



Universidad Central de Venezuela

Facultad de Ingeniería

Escuela de Geología, Minas y Geofísica

Departamento de Minas

RESISTENCIA AL CORTE EN DISCONTINUIDADES

EN ROCA: CASOS DE ESTUDIO EN VENEZUELA

**Trabajo presentado ante la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
por el Prof. Miguel Antonio Castillejo Cans
pata optar a la Categoría de Profesor Titular
dentro del Escalafón Universitario**

Caracas, marzo 2017



Universidad Central de Venezuela

Facultad de Ingeniería

Escuela de Geología, Minas y Geofísica

Departamento de Minas

RESISTENCIA AL CORTE EN DISCONTINUIDADES

EN ROCA: CASOS DE ESTUDIO EN VENEZUELA

**Trabajo presentado ante la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
por el Prof. Miguel Antonio Castillejo Cans
pata optar a la Categoría de Profesor Titular
dentro del Escalafón Universitario**

Caracas, marzo 2017

Las siguientes citas motivan el propósito de este trabajo:

“Ya que las discontinuidades son la principal de las causas de sobre excavaciones y problemas con el agua, estas siempre merecerán una atención muy especial

Karl Terzaghi, 1946

“Un mero aumento en la sofisticación matemática de un problema es más bien inútil, si no se pueden obtener los parámetros físicos correspondientes. A su vez, la adquisición de datos experimentales, sin seguir hipótesis teóricas asociadas, resulta cuando menos una pérdida de tiempo y dinero, y muy a menudo da lugar a errores”

Ch. Fairhurst, 1969

“La obtención de datos de campo confiables, en la ingeniería de diseño de estructuras en roca, es una de las tareas más difíciles que enfrentan los Ingenieros Geólogos y los Ingenieros de Diseño.

Es de extrema importancia, que la calidad de los datos, esté en concordancia con la sofisticación de los métodos de diseño”

Z.T. Bieniawski, 1984

“Veo que se ha dedicado poca investigación y esfuerzo en desarrollar la nueva generación de datos de entrada más refinados, que necesitamos para nuestros mejores modelos, más rápidos y mejores, así como también para nuestras técnicas de diseño mejoradas”

Evert Hoek, 1994

Los ingenieros no son super humanos.
Ellos cometen errores en sus hipótesis, en sus cálculos, en sus conclusiones.

Que cometan errores es perdonable; que los corrijan imprescindible.

Por lo tanto, es la esencia de la ingeniería moderna
no sólo para poder comprobar el propio trabajo,
sino también para tener controlada la propia obra y
para poder comprobar el trabajo de otros.

Henry Petroski

La función de los ingenieros de mecánica de rocas
no es para calcular con precisión, pero si analizar a fondo "

Keok & Londe

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que con su aporte, me han ayudado a realizar esta pequeña compilación de los parámetros de resistencia al corte en rocas de Venezuela.

En especial a Daniel Reverón, Aymara Yajaira Sánchez Martínez, Carlos Elías Oliveros Alcalá, Carlos Eduardo Elías Alcalá, Ramón Antonio Montes Machado, Vicente Johan Manuel Rico, Annie Katuska Araque Morillo, Diego Alexander Marchán Marchán, Daniel Meléndez, Ricardo Vélez, Héctor Escobar.

A las empresas Metro de Caracas, Odebrecht, F & L Servicios, C.A., Geocyma, C.A., Eje Consultores, C.A., por haber seleccionado el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Central de Venezuela (UCV), demostrando su confianza en nosotros y permitir la formación de ingenieros de las distintas especialidades de la Facultad de Ingeniería de la UCV, formarse en un área tan importante para la construcción de las grandes obras de un país.

A todos mis compañeros de trabajo, que con su estímulo me han permitido seguir con el mismo impulso, aumentar el número de protocolos de ensayos que se realizan, ya no solo en el área de mecánica de rocas, sino en la resistencia de materiales de construcción.

Un especial agradecimiento a Connoco Phillips que con su aporte a través de la Ley de Ciencia y Tecnología, fue posible la adquisición de este laboratorio y sin olvidar a todas las personas que participaron de una u otra manera a la instalación y puesta en funcionamiento.

A todo el personal de Geotechnical Consulting Testing System, LCC, radicada en Temple, Arizona, quienes suministraron los equipos y siempre han estado y están atentos a dar el apoyo necesario a las distintas interrogantes, que pueden surgir en la planificación y desarrollo de los protocolos de ensayo.

RESUMEN

El presente trabajo se inicia con una revisión histórica de la evolución de la resistencia al desplazamiento (fricción) entre dos superficies lisas, para pasar posteriormente a las discontinuidades en el marco de la Mecánica de Rocas y el proceso de desarrollo de las discontinuidades. La definición de las discontinuidades en términos geológicos, como realizar su levantamiento de campo y como estas influyen la resistencia del macizo rocoso. El otro aspecto importante es cómo se integran las discontinuidades, dentro de los ensayos de compresión simple, corte directo y brasilero.

Se analiza el ensayo de corte directo en las discontinuidades, presentando los criterios de resistencia aplicables a las mismas y como realizar el ensayo de corte. Se compara la norma ASTM 5607-08 con la norma ISRM-2014.

Se detalla el equipo empleado para la realización del ensayo, con la distintas modalidades de muestras sobre las cuales se puede realizar el ensayo de corte directo en discontinuidades en roca, abarcando todo el procedimiento desde la preparación de la muestra, elaboración del programa de ensayo, elaboración del informe y su interpretación, incluyendo las dos modalidades de ensayos disponibles. Reporte del ensayo de Carga Normal Constante [Constant Normal Load (CNL)] y Reporte del ensayo de Rigidez Normal Constante [Constant Normal Stiffness (CNS)], indicando cuando se debe aplicar cada uno de ellos.

Se incluyen los casos de estudio realizados en Venezuela en obras de interés, como lo son:

- 1) Caracterización Mecánica de un Sistema Cementante Convencional con Sílice para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a la inyección de vapor;
- 2) Caracterización Mecánica de un Sistema Cementante Alternativo aditivado con Arcillas para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a la inyección de vapor;
- 3) Propuesta para Reducción de Tamaño de Minerales No Metálicos: Caso Charnockita, Cerro La Danta, Sector Cambalache(estado Bolívar);
- 4) Estribos en la Presa sobre el Río Cuira del Sistema Tuy IV, en el Sector El Dinero, Municipio Acevedo (estado Miranda);
- 5) Estudio de las limos duros en el cauce del Río Guarenas(estado Miranda);
- 6) Estudio EOCENO-FRAC (estado

Zulia); 7) Túnel Baralt (Distrito Capital); 8) Sistema de Transporte Masivo Caracas-Guarenas-Guatire (estado Miranda); 9) Viaducto Mampote (estado Miranda); 10) Sistema de Transporte Metro Los Teques – Patios y Talleres (estado Miranda); 11) Caracterización Geomecánica del Macizo Rocosos de la Mina Colombia, El Callao, estado Bolívar; 12) Punte Nigale (Estado Zulia); 13) Quebrada la Culebra (Estado Anzoátegui); 14) Mirador Monumento a la Divina Pastora (Barquisimeto); 15) Talud de Cuarzita Ferruginosa Ferrominera (Ciudad Piar); 16) Fosa Norte – Guasare (Estado Zulia), para un total de ciento setenta y un (171) muestras reportadas.

Estos casos de estudio ya realizados y cuyos resultados, resumidos y analizados en este trabajo, permiten cubrir un amplio espectro de propiedades y casos de aplicación.

Así, las conclusiones y recomendaciones del trabajo se apoyan sobre una base amplia de datos experimentales, con datos que permita al usuario utilizar esos resultados como valores de referencia para apoyar análisis futuros de áreas distintas. Esto da un carácter robusto a las conclusiones y recomendaciones.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	7
RESUMEN	8
TABLA DE CONTENIDO.....	10
LISTA DE FIGURAS	26
LISTA DE TABLAS	47
ABREVIACIONES	51
SÍMBOLOS	52
1 INTRODUCCIÓN.....	54
1.1 Definición del problema	54
1.2 Objetivos.....	56
1.3 Motivación.....	57
1.4 Desarrollo de la Investigación	58
1.4.1 Revisión de la Literatura.....	58
1.4.2 Recolección de muestras y preparación	58
1.4.3 Trabajo Experimental	59
1.4.3.1 <i>Caracterización de la Muestra</i>	59
1.4.3.2 <i>Petrografías</i>	60
1.4.3.3 <i>Verificación de los Ensayos</i>	60
1.4.3.4 <i>Compilación de resultados por Zona de estudio</i>	60
1.4.4 Limitaciones del presente trabajo	60
1.5 Estructura de la Investigación	61
2 ESTADO DEL ARTE	63
2.1 Introducción	63

2.2	Antecedentes Históricos	63
2.2.1	Leonardo Da Vinci (1452-1519)	64
2.2.2	Guillaume Amontons (1663-1705).....	65
2.2.3	Culmann (1886).....	66
2.2.4	Mohr (1882)	66
2.2.5	Osborne Reynolds (1885).....	67
2.3	Discontinuidades	67
2.4	Las Discontinuidades en el desarrollo de la Mecánica de Rocas	69
2.4.1	Naturaleza y origen de las discontinuidades	71
2.4.2	Desarrollo del proceso de formación de discontinuidades	71
2.4.2.1	<i>Respuesta a los procesos mecánicos</i>	72
2.4.2.2	<i>Respuesta a los procesos químicos</i>	72
2.4.2.3	<i>Implicaciones Generales</i>	73
2.4.2.4	<i>Implicaciones para la Estabilidad de Taludes</i>	73
2.4.2.5	<i>Implicaciones para las Excavaciones Subterráneas</i>	74
2.4.2.6	<i>Implicaciones para las Fundaciones de Estructuras</i>	76
2.4.2.7	<i>Consideraciones finales</i>	78
2.5	Tipos de discontinuidades	80
2.6	Descripción de las Discontinuidades	81
2.6.1	Orientación.....	81
2.6.2	Apariencia	82
2.6.3	Espaciamiento	83
2.6.4	Persistencia	84
2.6.5	Rugosidad	85
2.6.6	Apertura	86
2.6.7	Relleno de las discontinuidades.....	86
2.6.8	Dureza	87

2.6.9	La meteorización y alteración	87
2.6.9.1	<i>Meteorización</i>	88
2.6.9.2	<i>Influencia del relleno y la meteorización</i>	89
2.6.9.3	<i>Alteración</i>	89
2.6.10	Caracterización del Macizo Rocoso.....	90
2.7	Definición de Términos	91
2.7.1	Dilatancia:.....	91
2.7.2	Cabalgamiento	93
2.7.3	Imbricación.....	93
2.7.4	Esfuerzo aparente	93
2.7.5	Asperidad	93
2.7.6	Discontinuidad	93
2.7.7	Resistencia de la roca intacta.....	94
2.7.8	Resistencia al corte residual.....	94
2.7.9	Área nominal	94
2.7.10	Rigidez al corte	94
2.7.11	Fricción al deslizamiento por esfuerzo de corte	94
2.8	Perspectivas en el Comportamiento de la Roca	95
2.9	Integración de los Procedimientos de Ensayo	96
2.9.1	Ensayos de compresión no confinados y confinados	97
2.9.2	Ensayos de Corte Directo	97
2.9.3	Ensayo de Tracción.....	98
3	RESISTENCIA AL CORTE DE LAS DISCONTINUIDADES	99
3.1	Introducción	99
3.2	Origen Físico de la Resistencia al Corte.....	104
3.3	Criterios de Resistencia al corte en discontinuidades: Estado del Arte.....	107
3.4	Criterios clásicos de falla en rocas.....	112

3.4.1	Modelo de Coulomb.....	112
3.4.2	Envolvente de Mohr.....	112
3.4.3	Criterio de Resistencia de Mohr-Coulomb.....	115
3.4.4	Teoría de grietas de Griffith.....	117
3.5	Criterios de Resistencia en Roca Empíricos.....	118
3.6	Resistencia al corte de discontinuidades limpias / frescas.....	120
3.6.1	Modelos Dilatantes.....	120
3.6.2	Modelo JRC.....	129
3.7	Criterios de falla aplicables a la resistencia al corte.....	131
3.8	Conclusión.....	131
4	ENSAYO DE CORTE EN DISCONTINUIDADES.....	133
4.1	Introducción.....	133
4.2	Normas para la Ejecución de los Ensayos de Corte en Rocas.....	135
4.2.1	Introducción.....	135
4.2.2	ASTM – D5607 – 08 Método de ensayo para realizar el Ensayo de Corte Directo en Roca en el Laboratorio bajo una Carga Normal Constante [Constant Normal Load (CNL)].....	135
4.2.2.1	<i>Generalidades.....</i>	<i>135</i>
4.2.2.2	<i>Ensayo en Discontinuidades Abiertas.....</i>	<i>136</i>
4.2.2.3	<i>Ensayo en Roca Intacta.....</i>	<i>137</i>
4.2.2.4	<i>Registro Fotográfico del Espécimen.....</i>	<i>137</i>
4.2.2.5	<i>Reporte.....</i>	<i>138</i>
4.2.3	ISRM (2014) - Método Sugerido para la Determinación de la Resistencia al Corte en el Laboratorio de Discontinuidades: Versión Revisada.....	139
4.3	Ensayo de Corte Directo.....	140
4.4	Equipo de Corte Directo en Rocas.....	141
4.4.1	Mecanismo de Carga Normal.....	143
4.4.2	Mecanismo de Carga de Corte.....	143

4.4.3	Detección de la Carga Normal y de Corte	143
4.4.4	Detección de la Deformación Normal y de Corte	143
4.5	Generalidades del Programa	144
4.6	Tipos de las especímenes para el Ensayo de Corte Directo	144
4.6.1	Espécimen Cilíndrico	145
4.6.1.1	<i>Superficie del Área de corte para un Espécimen Cilíndrico</i>	<i>146</i>
4.6.1.2	<i>Superficie del Área de Corte Elíptica para un Espécimen Cilíndrico</i>	<i>146</i>
4.6.1.3	<i>Superficie del Área de Corte Rectangular para un Espécimen Circular</i>	<i>147</i>
4.6.2	Espécimen Cuadrado.....	147
4.6.2.1	<i>Espécimen Rectangular.....</i>	<i>148</i>
4.6.3	Otros tipos de Especímenes.....	148
4.7	Preparación de las muestras para el Ensayo de Corte Directo	148
4.8	Recolección y Análisis de Resultados	150
4.8.1	Elaboración de Reportes	150
4.8.2	Análisis de Resultados.....	150
4.9	Reporte del Ensayo de Corte Directo en Roca del Laboratorio de Mecánica de Rocas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela	150
4.9.1	Reporte del ensayo de Carga Normal Contante [Constant Normal Load (CNL)].....	151
4.9.2	Reporte del ensayo de Rigidez Normal Constante [Constant Normal Stiffness (CNS)].....	164
4.10	Consideraciones para interpretar el ensayo, cuando se realice en una muestra sin discontinuidad (roca intacta)	171
4.10.1	Caso Metatobas de la Formación Las Hermanas (Presa sobre el Río Cuira) 172	
4.10.2	Caso Limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1).....	174
4.11	Dilatancia en el Ensayo.....	175

5	CASOS DE ESTUDIO REALIZADOS PARA MUESTRAS DE VENEZUELA.....	180
5.1	Caracterización Mecánica de un Sistema Cementante Convencional con Sílice para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a la inyección de vapor	180
5.1.1	Especímenes curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 288°C y presión de 10.34MPa	182
5.1.1.1	<i>Espécimen 1710</i>	182
5.1.1.2	<i>Espécimen 1711</i>	183
5.1.1.3	<i>Espécimen 1712</i>	184
5.1.1.4	<i>Espécimen 1713</i>	185
5.1.1.5	<i>Espécimen 1714</i>	186
5.1.1.6	<i>Espécimen 1715</i>	187
5.1.2	Especímenes curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 55°C y presión de 10.34MPa	188
5.1.2.1	<i>Espécimen 1716</i>	188
5.1.2.2	<i>Espécimen 1717</i>	189
5.1.2.3	<i>Espécimen 1718</i>	190
5.1.3	Envolventes de Mohr-Coulomb para el grupo de especímenes.....	190
5.1.4	Conclusiones para este tipo de cemento.....	195
5.2	Caracterización Mecánica de un Sistema Cementante Alternativo aditivado con Arcillas, para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a la inyección de vapor	196
5.2.1	Especímenes curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 52°C y presión de 10.34MPa	197
5.2.1.1	<i>Espécimen 1719</i>	197
5.2.1.2	<i>Espécimen 1720</i>	198
5.2.1.3	<i>Espécimen 1721</i>	199
5.2.2	Especímenes curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 288°C y presión de 10.34MPa	200

5.2.2.1	<i>Espécimen 1704</i>	200
5.2.2.2	<i>Espécimen 1705</i>	201
5.2.2.3	<i>Espécimen 1708</i>	202
5.2.2.4	<i>Espécimen 1709</i>	203
5.2.3	Envolventes de Mohr-Coulomb para el grupo de especímenes.....	203
5.2.4	Conclusiones para este tipo de cemento.....	208
5.3	Propuesta para Reducción de Tamaño de Minerales No Metálicos: Caso Charnockita, Cerro La Danta, Sector Cambalache, Estado Bolívar	209
5.3.1	Especímenes en estudio.....	209
5.3.1.1	<i>Espécimen 1408-A</i>	211
5.3.1.2	<i>Espécimen 1408-B</i>	212
5.3.1.3	<i>Espécimen 1409-C</i>	213
5.3.2	Envolventes de Mohr-Coulomb para el grupo de especímenes.....	213
5.4	Estribos en la Presa sobre el Río Cuira del Sistema Tuy IV, en el Sector El Dinero, Municipio Acevedo, Estado Miranda	218
5.4.1	Ubicación de la zona de estudio	218
5.4.2	Geología de la zona	219
5.4.2.1	<i>Geología Regional</i>	219
5.4.3	Propiedades Índices	229
5.4.4	Estudios Petrográficos.....	230
5.4.5	Ensayos de Corte.....	231
5.4.5.1	<i>Ensayos de Resistencia al Corte sobre caras lisas</i>	233
5.4.5.2	<i>Conclusión de ensayos con caras lisas ambos Estribos</i>	244
5.4.5.3	<i>Ensayos de Resistencia al Corte sobre caras rugosas</i>	246
5.5	Estudio de las limos duros en el cauce del Río Guarenas	285
5.5.1	Geología	287
5.5.1.1	<i>Geología Regional</i>	287
5.5.1.2	<i>Geología Local</i>	289

5.5.2	Caracterización Geomecánica.....	293
5.5.2.1	<i>Ensayos de Compresión Uniaxial, Triaxial, “Slake Durability”</i>	293
5.5.2.2	<i>Ensayos de Resistencia al Corte</i>	299
5.5.2.3	<i>Envolvente de Falla</i>	318
5.6	Estudio EOCENO-FRAC	324
5.6.1	Area de estudio	324
5.6.2	Casos ensayos CNS	326
5.6.2.1	<i>Espécimen 2179-1</i>	326
5.6.2.2	<i>Espécimen 2179-2</i>	327
5.6.2.3	<i>Espécimen 2180-1</i>	328
5.6.2.4	<i>Espécimen 2180-2</i>	329
5.6.2.5	<i>Espécimen 2181</i>	330
5.6.2.6	<i>Espécimen 2186-1</i>	331
5.6.2.7	<i>Espécimen 2186-2</i>	332
5.6.2.8	<i>Espécimen 2187-1</i>	333
5.6.3	Envolvente de falla	334
5.7	Túnel Baralt (Cienfuegos - Consultores y Gerencia de Proyectos, C.A., 2015)	347
5.7.1	Introducción	347
5.7.2	Ubicación y Geología del sitio de muestreo	347
5.7.3	Ensayos de Corte Directo	349
5.7.3.1	<i>DSH-1170-A_Baralt Sur – Progresiva 2+242.50</i>	349
5.7.3.2	<i>DSH-1170-B_Baralt Sur – Progresiva 2+242.50</i>	350
5.7.3.3	<i>DSH-1175-A_Baralt Norte – Progresiva 2+433.50</i>	351
5.7.3.4	<i>DSH-1175-B_Baralt Norte – Progresiva 2+433.50</i>	352
5.7.3.1	<i>DSH-072-1_Ladera Baralt Norte</i>	353
5.7.4	Análisis de resultados - Corte Directo - Baralt Norte – Progresiva 2+433.50.....	355
5.7.5	Análisis de resultados - Corte Directo - Baralt Sur – Progresiva 2+242.50 ..	356

5.8	Sistema de Transporte Masivo Caracas-Guarenas-Guatire	357
5.8.1	Introducción	357
5.8.2	Generalidades del Proyecto	358
5.8.3	Geología Regional	360
5.8.3.1	<i>Estratigrafía</i>	363
5.8.3.2	<i>Geología Estructural</i>	363
5.8.3.3	<i>Geología Estructural Local</i>	364
5.8.4	Perforación BH-10	367
5.8.4.1	<i>Espécimen 182-DSH</i>	367
5.8.4.2	<i>Espécimen 197-DSH</i>	368
5.8.4.3	<i>Espécimen 209-DSH</i>	369
5.8.4.4	<i>Envolvente de Falla BH-10</i>	370
5.8.5	Perforación BH-11	371
5.8.5.1	<i>Espécimen 317-DSH</i>	371
5.8.5.2	<i>Espécimen 323-DSH</i>	372
5.8.6	Perforación BH-17	373
5.8.6.1	<i>Espécimen 412-DSH</i>	373
5.8.6.2	<i>Espécimen 429-DSH</i>	374
5.8.6.3	<i>Espécimen 443-DSH</i>	375
5.8.7	Perforación BH-40	376
5.8.7.1	<i>Espécimen 395-DSH</i>	376
5.8.7.2	<i>Espécimen 397-DSH</i>	377
5.8.7.3	<i>Espécimen 401-DSH</i>	378
5.8.7.4	<i>Envolvente falla</i>	379
5.8.8	Perforación BH-51	381
5.8.8.1	<i>Espécimen 292-DSH</i>	381
5.8.8.2	<i>Espécimen 303-DSH</i>	382

5.8.8.3	<i>Envolvente de falla BH-51</i>	383
5.8.9	Perforación BH-70	384
5.8.9.1	<i>Espécimen 335-DSH</i>	384
5.8.9.2	<i>Espécimen 450-DSH</i>	385
5.8.9.3	<i>Espécimen 451-DSH</i>	386
5.8.9.4	<i>Espécimen 452-DSH</i>	387
5.8.9.5	<i>Espécimen 464-DSH</i>	388
5.8.10	Perforación BH-80	389
5.8.10.1	<i>Espécimen 474-DSH</i>	389
5.8.10.2	<i>Espécimen 484-DSH</i>	390
5.8.10.3	<i>Espécimen 492-DSH</i>	391
5.8.10.4	<i>Espécimen 498-DSH</i>	392
5.8.11	Perforación BH-210	393
5.8.11.1	<i>Espécimen 281-DSH</i>	393
5.8.12	Perforación BH-240	394
5.8.12.1	<i>Espécimen 210-DSH</i>	394
5.8.12.2	<i>Espécimen 222-DSH</i>	395
5.8.12.3	<i>Espécimen 244-DSH</i>	396
5.8.13	Perforación BH-250	397
5.8.13.1	<i>Espécimen 506-DSH</i>	397
5.8.14	Perforación BH-60	398
5.8.14.1	<i>Espécimen 317-DSH</i>	398
5.8.14.1	<i>Espécimen 323-DSH</i>	399
5.9	Viaducto Mampote - Sistema de Transporte Masivo Caracas-Guarenas-Guatire	402
5.9.1	Litotipos Presentes (F y L SERVICIOS, C.A., 2015)	402
5.9.2	Análisis estadístico de las especies mineralógicas presentes en las petrografías	405
5.9.3	Ensayos de Corte	407

5.9.3.1	2007-2-DSH	407
5.9.3.2	2010-DSH	408
5.9.3.3	2023-DSH	409
5.9.3.4	2035- DSH.....	410
5.9.3.5	2040-1-DSH	411
5.9.3.6	2045- DSH.....	412
5.9.3.7	2058-DSH	413
5.9.4	Análisis de resultados - Corte Directo.....	414
5.10	Sistema de Transporte Metro Los Teques – Patios y Talleres	419
5.10.1	Especímenes ensayados.....	420
5.10.1.1	Espécimen 548-DSH	420
5.10.1.2	Espécimen 556-DSH	421
5.10.1.3	Espécimen 560-DSH	422
5.10.1.4	Espécimen 571-2_DSH	423
5.10.1.5	Espécimen 571-4_DSH	424
5.10.1.6	Espécimen 577-DSH	425
5.10.1.7	Espécimen 587-DSH	426
5.10.1.8	Espécimen 589-DSH	427
5.10.1.9	Espécimen 592-DSH	428
5.10.1.10	Espécimen 593-DSH.....	429
5.10.1.11	Espécimen 595-DSH.....	430
5.10.2	Envolventes de Falla.....	431
5.11	Caracterización Geomecánica del Macizo Rocosos de la Mina Colombia, El Callao, estado Bolívar (Reverón Hernández, 2013)	436
5.11.1	Geología	436
5.11.1.1	Extensión geográfica.....	437
5.11.1.2	Contactos	437
5.11.1.3	Edad	438

5.11.2	Caracterización Geomecánica.....	438
5.11.3	Ensayos de Corte.....	440
	5.11.3.1 <i>Espécimen 146-1</i>	441
	5.11.3.2 <i>Espécimen 170</i>	443
	5.11.3.3 <i>Espécimen 171</i>	445
	5.11.3.4 <i>Espécimen 172</i>	447
5.11.4	Conclusiones sobre los ensayos de corte de la Mina Colombia – El Callao 449	
5.12	Puente Nigale.....	450
5.12.1	Ubicación.....	450
5.12.2	Objetivo General.....	451
5.12.3	Geología Regional.....	451
	5.12.3.1 <i>Formación Onia</i>	451
5.12.4	Geología Local.....	452
	5.12.4.1 <i>Perforación P-1 y P-2:</i>	453
	5.12.4.2 <i>Perforación P-3 y P-4:</i>	453
	5.12.4.3 <i>Perforación P-5:</i>	454
	5.12.4.4 <i>Perforación P-6 y P-7:</i>	454
	5.12.4.5 <i>Variación Lateral del Perfil Litoestratigráfico:</i>	455
5.12.5	Ensayos Geomecánicos.....	457
	5.12.5.1 <i>Propiedades Indices</i>	457
	5.12.5.2 <i>Difraccion de Rayos X</i>	458
	5.12.5.3 <i>Ensayos de Corte Directo</i>	459
	5.12.5.4 <i>Envolvente de Falla de los Ensayos de Corte</i>	477
5.12.6	CONCLUSIONES.....	482
5.13	Zonificación a Suceptabilidad de Movimientos de Masa en la Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi.....	484

5.13.1	Espécimen 143-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi.....	485
5.13.2	Espécimen 152-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi.....	486
5.13.3	Espécimen 153-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi.....	487
5.14	Mirador Monumento Manto de María, Divina Pastora – Barquisimeto	489
5.14.1	Espécimen 0939 – Mirador Monumento Manto de María, Divina Pastora – Barquisimeto	490
5.15	- Talud Ferrominera – Ciudad Piar – Estado Bolívar.....	491
5.16	Caracterización la Fosa Norte – Guasare, Estado Zulia (Tomás Alejandro Sánchez Seijas, 2017).....	492
5.16.1	Justificación de la investigación	492
5.16.2	Ubicación geográfica general.....	493
5.16.3	Geología	494
	5.16.3.1 <i>Geología Regional</i>	494
	5.16.3.1 <i>Geología Local</i>	494
5.16.4	Propiedades geomecánicas de los estratos	496
	5.16.4.1 <i>Ensayos de Corte Directo</i>	496
	5.16.4.2 <i>Limolitas</i>	497
	5.16.4.3 <i>Areniscas</i>	502
	5.16.4.4 <i>Carbones</i>	507
	5.16.4.5 <i>Arenisca-Limolita</i>	508

6	CONCLUSIONES	509
7	RECOMENDACIONES	514
8	BIBLIOGRAFÍA	516
	APENDICE A	542
9	ISRM (2014) - MÉTODO SUGERIDO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE EN EL LABORATORIO DE DISCONTINUIDADES: VERSIÓN REVISADA	543
9.1	Introducción	543
9.2	Propósito	544
9.3	Equipos	546
9.3.1	Máquina de Ensayo.....	546
9.3.2	Cargas.....	547
9.3.3	Registro de Cargas y Desplazamiento.....	548
9.4	Ensayo de Especímenes.....	549
9.4.1	Muestreo, Manejo y Almacenamiento	549
9.4.2	Tamaño y Forma	550
9.4.3	Observación y Mediciones en la Muestra y Especímenes	550
9.4.4	Encapsulamiento de la Muestra	552
9.5	Procedimiento de ensayo.....	554
9.5.1	Tareas Preliminares.....	554
9.5.2	Montaje de la Muestra.....	554
9.5.3	Aplicación de Cargas	555
9.5.3.1	<i>Carga Normal</i>	555
9.5.3.2	<i>Carga de Corte</i>	556
9.5.4	Procedimientos Alternativos.....	557
9.5.5	Mediciones	558
9.5.5.1	<i>Desplazamiento Normal</i> (δ_n)	558

9.5.5.2	Desplazamiento de Corte (δ_s)	558
9.5.5.3	Carga Normal (N)	558
9.5.5.4	Carga de Corte (T)	558
9.6	Calculos, Gráficos y Resultados	559
9.6.1	Datos	559
9.6.2	Gráficos y Cálculos	559
9.6.3	Reporte de Resultados	562
9.6.4	Apéndice: Terminología	563
9.7	Referencias	568
APENDICE B		571
10 LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS.....		572
10.1.1	Sistema de lazo cerrado de doble actuador (compresión/tracción):	572
10.1.2	Marco de Carga	573
10.1.3	Celda de Carga para Ensayos Triaxiales	573
10.1.4	Ensayos de Corte	573
10.1.4.1	Caja de Corte	574
10.1.5	Celda Triaxial de alta Presión - HTRX-200	575
10.1.6	Sistema de Intensificación de Presión	576
10.1.6.1	Sistema de Intensificación de Presión de Celda	576
10.1.6.2	Sistema de Intensificación de Presión de Poros	577
10.1.7	Equipo de Tracción Indirecta (Ensayo Brasiler)	577
10.1.8	Sistema de Medición de Velocidades Ultrasónicas – ULT-100	578
10.1.8.1	Especificaciones	579
10.1.9	Sistema de Adquisición de Datos (SCON-2000)	580
10.1.10	Tarjeta Universal de Acondicionamiento de Señal	581
10.1.11	Tarjeta de Amplificación Servo	581

10.1.12 Programa de Control Avanzado (CATS-ADV Advanced Computer Aided Testing Software)	582
10.1.12.1 Módulo para el ensayo de corte directo (CATS-DSH Direct Shear Software Module)	583
10.1.12.2 Módulo para el Ensayo Triaxial (CATS-TRX-Triaxial Software Module).....	583
10.1.13 Accesorio para el Ensayo de Fracturamiento Hidráulico HTRX-HF.....	587
10.1.14 Sistema Hidráulico.....	588
10.1.15 Equipo de Obtención de Núcleos de Presión Controlada –RDC-250.....	588
10.1.16 Refrentadora de Muestras RSG-200	589
10.1.17 Medidor de Paralelismo de las Caras de las Muestras	589
10.1.18 Calibrador de LVDT – DCD-025	589
10.1.19 Unidad de medición de deformaciones en roca – DEF-5000	589
10.1.20 Equipo para el ensayo de Resistencia a la Abrasion por el Método de Los Angeles	590
10.1.21 Equipo para el ensayo “Slake Durability”	590
10.1.22 Equipo para el Ensayo “Cerchar” (Abrasibilidad de la Roca)	590
10.1.23 Equipo de Carga Puntual.....	591

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Puentes de roca en el macizo rocoso	55
Figura 2.1	Estudios sobre fricción realizados por Leonardo Da Vinci, que demuestran que la fricción es independiente del tamaño de las superficies en contacto	65
Figura 2.3	Principales tipos de falla en roca y las condiciones geológicas que pueden causar la falla (Hoek & Bray, 1981). (a) Falla Plana presenta discontinuidades contínuas que tienen un buzamiento desfavorable hacia la cara del talud y un rumbo casi paralelo a la cara del talud; (b) Falla en Cuña es la intersección de dos discontinuidades y la línea de intersección debe aflorar en la cara del talud; (c) Falla por Volcamiento en una roca que presenta discontinuidades que buzando en sentido contrario a la cara del talud y (d) Falla Circular en rellenos de roca, suelo o roca con un fracturamiento intenso y con discontinuidades orientadas aleatoriamente.	74
Figura 2.4	Análisis de cuñas formadas en una excavación que atraviesa un macizo rocoso diaclasado (tomado de RocScience – Unwedge V4.0, 2015)	75
Figura 2.5	Patrón de anclajes en una excavación subterránea aplicado en los hastiales y techo para estabilizar las cuñas formadas por las discontinuidades intersectadas por la excavación (tomado de RocScience – Unwedge V4.0, 2015)	75
Figura 2.6	Condiciones para la creación de rocas sueltas en excavaciones subterráneas	76
Figura 2.7	Estabilidad de las fundaciones de un puente: (a-a) Falla global del talud debido a la presencia de zona de falla con buzamiento desfavorable; (b) Falla de corte de la fundación, debido al buzamiento de las discontinuidades hacia la cara del talud; (c) Movimiento de la fundación del arco, debido a la compresión de una roca con un módulo bajo; (d) Muro de contención para contener la roca	

	descompuesta en la fundación del tablero del puente. (modificado de Duncan, 1999)	78
Figura 2.8	Orientación de discontinuidades	82
Figura 2.9	Descripción de la apariencia de las discontinuidades	83
Figura 2.10	Espaciamiento de las discontinuidades	84
Figura 2.11	Persistencia de las discontinuidades	85
Figura 2.12	Rugosidad de una discontinuidad.....	86
Figura 2.13	Apertura de una discontinuidad	86
Figura 2.14	Relleno en discontinuidades.....	87
Figura 2.15	Esquema de las propiedades de las discontinuidades	88
Figura 2.16	Representación espacial de tres sistemas de discontinuidades	88
Figura 2.17	Masa Rocosa Meteorizada.....	89
Figura 2.18	Levantamiento Geológico	90
Figura 2.19	Definición de dilatancia.	92
Figura 3.1	Transición de una roca intacta para un macizo rocoso fracturado con el aumento del tamaño de la muestra en una excavación subterránea y en una mina a cielo abierto (Hoek & Brown, 1997 modificado González de Vallejo et. Al , 2010).	101
Figura 3.2	Relación entre el esfuerzo de corte y normal en una superficie de deslizamiento para tres tipos de discontinuidades en condiciones geológicas diferentes (Wyllie & Mah, 2004)	103
Figura 3.3	Fotos de la Presa Malpasset, en Frejus, Francia después de la falla ocurrida en 1959. El movimiento de una cuña delimitada por discontinuidades en la roca causó el colapso de la presa de concreto	108

Figura 3.4	Presa Vajont, Italia. En 1963, lluvias torrenciales y cargas intermitentes producidas por sismos, generaron el deslizamiento de una gran magnitud del monte TOC de 1921 msnm, en la foto de la derecha (2014) se observan las superficies de deslizamiento. La masa deslizante cayó dentro del embalse, creando una gran ola, la cual pasó por encima de la presa matando a 2600 personas que vivían en el valle aguas abajo.....	108
Figura 3.5	Discontinuidades rellenas y sin relleno	109
Figura 3.6	Ensayo de corte en discontinuidades	110
Figura 3.7	Dirección de los esfuerzos	113
Figura 3.8	Cículo de Mohr.....	113
Figura 3.9	Envolvente de Mohr	114
Figura 3.10	Criterio de Mohr-Coulomb en términos de a) esfuerzos principales y b) esfuerzos normales y de corte.....	116
Figura 3.11	Envolvente bilineal de falla para múltiples superficies inclinadas [modificado de (Patton, 1966)].....	121
Figura 3.12	Definición de los parámetros utilizados para derivar la envolvente de falla no lineal (Maksimovic, 1992).....	125
Figura 3.13	Idealización de una discontinuidad en roca mostrando la definición de rugosidad (Haberfield & Johnston 1994).....	128
Figura 3.14	Respuesta de una discontinuidad triangular en concreto bajo condiciones de carga constante. Analizando el mecanismo de comportamiento de las discontinuidades en roca, (Johnston & Lam 1989) se observaron varios mecanismos que controlan el movimiento. Estos mecanismos incluyen una deformación inicial, deslizamiento de asperezas individuales (incluyendo el aplanamiento de microasperezas, (lo cual posteriormente se traducen en	

una pérdida repentina de la cohesión aparente), asperidades por corte y tituración de asperidades	128
Figura 3.15 Perfiles estandar empleados para la estimación visual de JRC (Barton & Choubey, 1977).....	130
Figura 4.1 Simulación de las condiciones in-situ de los ensayos de corte directo.....	134
Figura 4.2 Aparato para Ensayo de Corte Directo	141
Figura 4.3 Sistema RDS-500 – Sistema de Corte Directo y Ensayo Triaxial	142
Figura 4.4 Equipo para realizar ensayo de corte directo, sin los retenedores, para establecer todos los grados de libertad de movimiento del cabezal.....	142
Figura 4.5 Espécimen cilíndrico	145
Figura 4.6 Área circular	146
Figura 4.7 Área elíptica	146
Figura 4.8 Área rectangular	147
Figura 4.9 Espécimen cuadrado.....	147
Figura 4.10 Espécimen rectangular	148
Figura 4.11 Procedimiento para el ensayo de corte directo (Aranguren Otero & Lacruz Paredes, 2016).....	149
Figura 4.13 Página 2 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL).....	156
Figura 4.14 Página 3 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL).....	157
Figura 4.15 Página 4 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL).....	158

Figura 4.16	Página 5 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL).....	159
Figura 4.17	Página 6 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL).....	161
Figura 4.19	Página 7 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL).....	163
Figura 4.20	Página 1 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS).....	165
Figura 4.21	Página 2 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS).....	166
Figura 4.22	Página 3 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS).....	167
Figura 4.23	Página 4 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS).....	168
Figura 4.24	Página 5 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS).....	169
Figura 4.25	Página 6 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS).....	170
Figura 4.26	Página 7 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS).....	171
Figura 4.28	Comparación de resultados obtebidos considerando la generación de la discontinuidad y no considerándola, en el caso Metatobas de la Formación Las Hermanas (Presa sobre el Río Cuira)	173

Figura 4.29	Comparación de resultados obtenidos considerando la generación de la discontinuidad y no considerándola, en el caso Limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)	174
Figura 4.30	Desplazamiento total de la caja de corte y desplazamiento absoluto de la caja de corte durante la etapa de aplicación de los esfuerzos de corte (CNL), en un espécimen de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1).....	176
Figura 4.31	Condición final de las caras de la discontinuidad generada, después de haber sido sometida a los cuatro puntos de carga, bajo el comportamiento de carga normal constante (CNL), para el mismo espécimen presentado en la Figura 5.17, en una espécimen de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1).	177
Figura 4.32	Desplazamiento absoluto de la caja de corte durante la etapa de aplicación de los esfuerzos de corte (CNL), en una espécimen de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)	178
Figura 4.33	Dilatancia durante un ensayo realizado bajo la modalidad de Rigidez Normal Constante (CNS), en una muestra de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)	178
Figura 4.34	Condición final de las caras de la discontinuidad generada, después de haber sido sometida a los cuatro puntos de carga, bajo el comportamiento de rigidez normal constante (CNS), para el mismo espécimen presentado en la Figura 5.19, en una espécimen de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)	179
Figura 5.1	Espécimen 1710_DSH-CNL	182
Figura 5.2	Espécimen 1711_DSH-CNL	183
Figura 5.3	Espécimen 1712_DSH-CNL	184
Figura 5.4	Espécimen 1713_DSH-CNL	185

Figura 5.5	Espécimen 1714_DSH-CNL	186
Figura 5.6	Espécimen 1715_DSH-CNL	187
Figura 5.7	Espécimen 1716_DSH-CNL	188
Figura 5.8	Espécimen 1717_DSH-CNL	189
Figura 5.9	Espécimen 1718_DSH-CNL	190
Figura 5.10	Criterio de Mohr-Coulomb en ensayos de corte acondicionados a 52°C y 10,34 MPa	193
Figura 5.11	Criterio de Mohr-Coulomb en ensayos de corte acondicionados a 52°C y 10,34 MPa	193
Figura 5.12	Espécimen 1719_DSH-CNL	197
Figura 5.13	Espécimen 1720_DSH-CNL	198
Figura 5.14	Espécimen 1721_DSH-CNL	199
Figura 5.15	Espécimen 1704_DSH-CNL	200
Figura 5.2.5	Espécimen 1705_DSH-CNL	201
Figura 5.16	Espécimen 1708_DSH-CNL	202
Figura 5.17	Espécimen 1709_DSH-CNL	203
Figura 5.18	Edad del cemento en ensayo de corte directo para muestras acondicionadas a 52 y 288 °C	205
Figura 5.19	Criterio de Mohr Coulomb aplicado a muestras curadas a 52 °C	206
Figura 5.20	Criterio de Mohr Coulomb aplicado a muestras curadas a 288 °C	207
Figura 5.21	Ubicación relativa del Cerro La Danta (Bermúdez A, 2016)	209
Figura 5.29	Caras del Especimen 1408-A_DSH, una vez finalizado el ensayo - Cerro La Danta	217

Figura 5.30	Caras del Especimen 1408-B_DSH, una vez finalizado el ensayo - Cerro La Danta	217
Figura 5.31	Caras del Especimen 1409-C_DSH, una vez finalizado el ensayo - Cerro La Danta	217
Figura 5.32	Mapa político territorial del Estado Miranda (Manuel Rico, 2016)	218
Figura 5.4.2	Ubicación Satelital de la zona de estudio (Manuel Rico, 2016 citando a Diaz & Ochoa, 2009)	218
Figura 5.34	Ubicación del Embalse sobre el Río Cuira (Manuel Rico, 2016)	219
Figura 5.35	Mapa Geológico Simplificado del Área Guatopo – El Guapo, Edos. Miranda y Guárico. (Urbani, Chirinos , & Marquina, 1990)	219
Figura 5.36	Mapa Geológico de la zona de El Dinero (Cortiula , 1983) & (Perez D'Gregorio, 1986)	220
Figura 5.37	Vista panorámica de la zona de presa donde se puede observar la ubicación de una falla rumbo N60W, 76N (030,76)	220
Figura 5.38	Vista panorámica en en sitio de construcción de la presa con la presencia de la falla rumbo N60W, 76W (030,76)	221
Figura 5.39	Detalle de la falla falla rumbo N60W, 76W (030,76)	221
Figura 5.40	Muestras sobre las cuales se elaboraron superficies lisas - Río Cuira	232
Figura 5.41	Espécimen 812_DSH-CNL - Río Cuira	233
Figura 5.42	Espécimen 813_DSH-CNL - Río Cuira	234
Figura 5.43	Espécimen 814-1_DSH-CNL - Río Cuira	235
Figura 5.44	Espécimen 822_DSH-CNL - Río Cuira	236
Figura 5.45	Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Derecho caras lisas (valores pico) - Río Cuira	237

Figura 5.46	Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Derecho caras lisas (valores residuales) - Río Cuira.....	238
Figura 5.47	Espécimen 825_DSH-CNL - Río Cuira.....	239
Figura 5.48	Espécimen 826_DSH-CNL - Río Cuira.....	240
Figura 5.49	Espécimen 827-1_DSH-CNL - Río Cuira.....	241
Figura 5.50	Espécimen 827-2_DSH-CNL - Río Cuira.....	242
Figura 5.51	Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Izquierdo caras lisas (valores pico) - Río Cuira.....	243
Figura 5.52	Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Izquierdo caras lisas (valores residuales) - Río Cuira.....	244
Figura 5.53	Espécimen 806_DSH-CNL - Río Cuira.....	246
Figura 5.54	Espécimen 810_DSH-CNL - Río Cuira.....	247
Figura 5.55	Espécimen 812_DSH-CNL - Río Cuira.....	248
Figura 5.56	Espécimen 813_DSH-CNL - Río Cuira.....	249
Figura 5.57	Espécimen 814-A_DSH-CNL - Río Cuira.....	250
Figura 5.58	Espécimen 814-B_DSH-CNL - Río Cuira.....	251
Figura 5.59	Espécimen 814-C_DSH-CNL - Río Cuira.....	252
Figura 5.60	Espécimen 817_DSH-CNL - Río Cuira.....	253
Figura 5.61	Espécimen 829_DSH-CNL - Río Cuira.....	254
Figura 5.62	Espécimen 831_DSH-CNL - Río Cuira.....	255
Figura 5.63	Espécimen 832-A_DSH-CNL - Río Cuira.....	256
Figura 5.64	Espécimen 832-B_DSH-CNL - Río Cuira.....	257

Figura 5.65	Espécimen 834-A_DSH-CNL - Río Cuira	258
Figura 5.66	Espécimen 795_DSH-CNL - Río Cuira	259
Figura 5.67	Espécimen 796_DSH-CNL - Río Cuira	260
Figura 5.68	Espécimen 801_DSH-CNL - Río Cuira	261
Figura 5.69	Espécimen 802_DSH-CNL - Río Cuira	262
Figura 5.70	Espécimen 804_DSH-CNL - Río Cuira	263
Figura 5.71	Espécimen 805_DSH-CNL - Río Cuira	264
Figura 5.72	Espécimen 808_DSH-CNL - Río Cuira	265
Figura 5.73	Espécimen 817_DSH-CNL - Río Cuira	266
Figura 5.74	Espécimen 830_DSH-CNL - Río Cuira	267
Figura 5.75	Espécimen 833-A_DSH-CNL - Río Cuira	268
Figura 5.76	Espécimen 1011_DSH-CNL - Río Cuira	269
Figura 5.77	Espécimen 1013_DSH-CNL - Río Cuira	270
Figura 5.78	Espécimen 1014_DSH-CNL - Río Cuira	271
Figura 5.79	Espécimen 1015_DSH-CNL - Río Cuira	272
Figura 5.80	Espécimen 1016_DSH-CNL - Río Cuira	273
Figura 5.81	Espécimen 1042_DSH-CNL - Río Cuira	274
Figura 5.82	Espécimen 1049_DSH-CNL - Río Cuira	275
Figura 5.83	Espécimen 1050_DSH-CNL - Río Cuira	276
Figura 5.84	Valores del JRC según su perfil de rugosidad, Estribo Derecho - Río Cuira	278
Figura 5.85	Valores del JRC según su perfil de rugosidad, Estribo Izquierdo - Río Cuira	279
Figura 5.86	Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Derecho (valores pico) - Río Cuira	280

Figura 5.87	Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Derecho (valores residuales) - Río Cuira...	281
Figura 5.88	Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Izquierdo (valores pico) - Río Cuira.....	282
Figura 5.89	Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Izquierdo (valores residuales) - Río Cuira	283
Figura 5.90	Plano de Ubicación de las Estaciones Guatire I y Guatire II	285
Figura 5.91	Detalle de la ubicación de la Estación Guatire I	286
Figura 5.92	Ubicación de las perforaciones realizadas por Geomin, C.A. para la estación Guatire 1	290
Figura 5.93	Correlación de los datos reportados en las planillas de perforación (P83 a P86) realizadas por la empresa Geomin, C.A.....	291
Figura 5.94	Correlación de los datos reportados en las planillas de perforación realizadas por la empresa Geocyma, C.A.	292
Figura 5.95	Análisis de los resultados de compresión simple y traixiales de la Estación Guatire 1	295
Figura 5.96	Análisis de los resultados de compresión simple y traixiales de la Estación Guatire 1 (continuación).....	296
Figura 5.97	Análisis de los resultados de compresión simple y traixiales de la Estación Guatire 1 (continuación).....	297
Figura 5.117	Análisis de datos para los ensayos de corte Estación Guatire 1.....	318
Figura 5.117	Análisis de datos para los ensayos de corte Estación Guatire 1 (continuación)	319
Figura 5.118	Criterio Mohr-Coulomb Estación Guatire 1 (Picos)	320
Figura 5.119	Criterio Barton-Bandis Estación Guatire 1 (Picos)	321
Figura 5.120	Criterio Mohr-Coulomb Estación Guatire 1 (Residuales)	322

Figura 5.121 Criterio Barton-Bandis Estación Guatire 1 (Residuales)	323
Figura 5.122 Espécimen 2179-1-CNS-EOCENO-FRAC	326
Figura 5.123 Espécimen 2179-2-CNS-EOCENO-FRAC	327
Figura 5.124 Espécimen 2180-1-CNS-EOCENO-FRAC	328
Figura 5.125 Espécimen 2180-2-CNS-EOCENO-FRAC	329
Figura 5.126 Espécimen 2181-CNS-EOCENO-FRAC	330
Figura 5.127 Espécimen 2186-1-CNS-EOCENO-FRAC	331
Figura 5.128 Espécimen 2186-2-CNS-EOCENO-FRAC	332
Figura 5.129 Espécimen 2187-1-CNS-EOCENO-FRAC	333
Figura 5.130 Resultados de los Ensayos de Corte para el realizar el análisis por envolvente de falla del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82	335
Figura 5.131 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82, por Mohr-Coulomb.....	336
Figura 5.132 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82, por Barton-Bandis.....	337
Figura 5.133 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82, por Mohr-Coulomb	338
Figura 5.134 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82, por Barton-Bandis	339
Figura 5.134 Resultados de los Ensayos de Corte para el realizar el análisis por envolvente de falla del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82	341
Figura 5.135 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82, por Mohr-Coulomb.....	342

Figura 5.136 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82, por Barton-Bandis.....	343
Figura 5.137 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82, por Mohr-Coulomb	344
Figura 5.138 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82, por Barton-Bandis	345
Figura 5.139 Ubicación relativa de los frentes de excavación de donde provienen los materiales analizados. (a) Frente Macayapa (extraído del Plano EST-TB-1215). (b) Frente Baralt (extraído del Plano EST-TB-1220). Se interpreta las unidades geológicas (CaM) en verde y (ASJ) en naranja.....	348
Figura 5.140 Espécimen DSH-1170-A_Baralt Sur – Progresiva 2+242.50.....	349
Figura 5.141 Espécimen DSH-1170-B_Baralt Sur – Progresiva 2+242.50.....	350
Figura 5.142 Espécimen DSH-1175-A_Baralt Norte – Progresiva 2+433.50	351
Figura 5.143 Espécimen DSH-1175-B_Baralt Norte – Progresiva 2+433.50.....	352
Figura 5.144 Espécimen DSH-072-1_Ladera Baralt Norte.....	353
Figura 5.145 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico Baralt Norte – Progresiva 2+433.50, por el Criterio de Falla de Mohr-Coulomb.....	355
Figura 5.146 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico Baralt Sur – Progresiva 2+242.50, por el Criterio de Falla de Mohr-Coulomb.....	356
Figura. 5.147 Ubicación de la zona de estudio (mapa geológico de Cordillera de la Costa. Tomado y modificado de Urbani & Rodríguez 2004	360
Figura 5.148 Espécimen 182-DSH _ Perforación BH-10 – STMCGG	367
Figura 5.149 Espécimen 197-DSH _ Perforación BH-10 – STMCGG	368
Figura 5.150 Espécimen 209-DSH _ Perforación BH-10 – STMCGG	369

Figura 5.151 Envolvente de Falla Criterio de Mohr-Coulomb en Ensayos de Corte Perforación BH-10 STMCGG	370
Figura 5.152 Espécimen 317-DSH _ Perforación BH-11 – STMCGG	371
Figura 5.153 Espécimen 323-DSH _ Perforación BH-11 – STMCGG	372
Figura 5.154 Espécimen 412-DSH _ Perforación BH-17 – STMCGG	373
Figura 5.155 Espécimen 429-DSH _ Perforación BH-17 – STMCGG	374
Figura 5.156 Espécimen 443-DSH _ Perforación BH-17 – STMCGG	375
Figura 5.157 Espécimen 395-DSH _ Perforación BH-40 – STMCGG	376
Figura 5.158 Espécimen 397-DSH _ Perforación BH-40 – STMCGG	377
Figura 5.159 Espécimen 401-DSH _ Perforación BH-40 – STMCGG	378
Figura 5.160 Envolvente de Falla Criterio de Mohr-Coulomb en Ensayos de Corte Perforación BH-40 STMCGG	379
Figura 5.161 Espécimen 292-DSH _ Perforación BH-51 – STMCGG	381
Figura 5.162 Espécimen 303-DSH _ Perforación BH-51 – STMCGG	382
Figura 5.163 Envolvente de Falla Criterio de Mohr-Coulomb en Ensayos de Corte Perforación BH-51 STMCGG	383
Figura 5.164 Espécimen 335-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG	384
Figura 5.165 Espécimen 450-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG	385
Figura 5.166 Espécimen 451-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG	386
Figura 5.167 Espécimen 452-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG	387
Figura 5.168 Espécimen 464-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG	388
Figura 5.169 Espécimen 474-DSH _ Perforación BH-80 – STMCGG	389

Figura 5.170 Espécimen 484-DSH _ Perforación BH-80 – STMCGG	390
Figura 5.171 Espécimen 492-DSH _ Perforación BH-80 – STMCGG	391
Figura 5.172 Espécimen 498-DSH _ Perforación BH-80 – STMCGG	392
Figura 5.173 Espécimen 281-DSH _ Perforación BH-210 – STMCGG	393
Figura 5.174 Espécimen 210-DSH _ Perforación BH-240 – STMCGG	394
Figura 5.175 Espécimen 222-DSH _ Perforación BH-240 – STMCGG	395
Figura 5.176 Espécimen 244-DSH _ Perforación BH-240 – STMCGG	396
Figura 5.177 Espécimen 506-DSH _ Perforación BH-250 – STMCGG	397
Figura 5.178 Espécimen 317-DSH _ Perforación BH-60 – STMCGG	398
Figura 5.179 Espécimen 323-DSH _ Perforación BH-60 – STMCGG	399
Figura 5.180 Envoltente de Falla Criterio de Mohr-Coulomb en Ensayos de Corte Perforación BH-40 STMCGG	400
Figura 5.181 Análisis mineralógico de las muestras ensayadas	405
Figura 5.182 Análisis estadístico de especies minerales presentes en las rocas obtenidas por petrografías.....	406
Figura 5.183 Espécimen 2007-2-DSH _ Perforación PM-07– STMCGG (FASE II).....	407
Figura 5.184 Espécimen 2010-DSH _ Perforación PM-10– STMCGG (FASE II).....	408
Figura 5.185 Espécimen 2023-DSH _ Perforación PM-10– STMCGG (FASE II).....	409
Figura 5.186 Espécimen 2035-DSH _ Perforación P-08– STMCGG (FASE II)	410
Figura 5.187 Espécimen 2040-1-DSH _ Perforación P-08– STMCGG (FASE II)	411
Figura 5.188 Espécimen 2045-DSH _ Perforación P-12– STMCGG (FASE II)	412
Figura 5.189 Espécimen 2058-DSH _ Perforación P-14– STMCGG (FASE II)	413

Figura 5.190 Resultados de los Ensayos de Corte – Viaducto de Mampote para el realizar el análisis por envolvente de falla	414
Figura 5.191 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico – Viaducto de Mampote, por el Criterio de Falla de Mohr-Coulomb.....	415
Figura 5.192 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico – Viaducto de Mampote, por el Criterio de Falla de Barton-Bandis.....	416
Figura 5.193 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales – Viaducto de Mampote, por el Criterio de Falla de Mohr-Coulomb.....	417
Figura 5.194 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales – Viaducto de Mampote, por el Criterio de Falla de Barton-Bandis.....	418
Figura 5.195 Espécimen 548-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	420
Figura 5.196 Espécimen 556-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	421
Figura 5.197 Espécimen 560-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	422
Figura 5.198 Espécimen 571-2-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	423
Figura 5.199 Espécimen 571-4-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	424
Figura 5.200 Espécimen 577-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	425
Figura 5.201 Espécimen 587-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	426
Figura 5.202 Espécimen 589-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	427
Figura 5.203 Espécimen 592-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	428
Figura 5.204 Espécimen 593-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	429
Figura 5.205 Espécimen 595-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques	430
Figura 5.206 Resultados de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques.....	431

Figura 5.207 Envolvente de Mohr-Coulomb para Esfuerzos Pico de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques.....	432
Figura 5.208 Envolvente de Barton-Bandis para Esfuerzos Pico de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques.....	433
Figura 5.209 Envolvente de Mohr-Coulomb para Esfuerzos Residuales de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques.....	434
Figura 5.210 Envolvente de Barton-Bandis para Esfuerzos Residuales de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques.....	435
Figura 5.211 El Callao estado Bolívar. (http://www.pdv.com/lexico/e110w.htm).....	436
Figura 5.212 Nivel 6, Mina Colombia [modificado de (Márquez O. A., 2002)]	438
Figura 5.213 Espécimen 146-1-DSH _ Mina Colombia – El Callao.....	441
Figura 5.214 Tipo de factura generada en el espécimen 146-1-DSH _ Mina Colombia – El Callao	442
Figura 5.215 Espécimen 170-DSH _ Mina Colombia – El Callao.....	443
Figura 5.216 Tipo de factura generada en el espécimen 170-DSH _ Mina Colombia – El Callao	444
Figura 5.217 Espécimen 171-DSH _ Mina Colombia – El Callao.....	445
Figura 5.218 Tipo de factura generada en el espécimen 171-DSH _ Mina Colombia – El Callao	446
Figura 5.219 Espécimen 172-DSH _ Mina Colombia – El Callao.....	447
Figura 5.220 Tipo de factura generada en el espécimen 172-DSH _ Mina Colombia – El Callao	448
Figura 5.221. Mapa de la Zona de Estudio.....	451
Figura 5.222. Mapa de la Ubicación de las perforaciones	452

Figura 5.223. Perfil Geológico de las perforaciones donde se describen la litología presente en la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	455
Figura 5.224. Perfil geológico de la cuenca del Lago de Maracaibo donde se puede observar los tipos de depósitos formados por río y lagos. A depósitos lacustres y de deltas. B dirección del crecimiento de deltas. Tomado: http://danielmarin.naukas.com/files/2014/12/mars-rover-curiosity-Gupta-5-delta-cartoon-river-lake-pia19071-br2.jpg . 02/02/2016	456
Figura 5.225 Espécimen 1702-DSH – Perforación P-1- Profundidad 26.00-27.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	459
Figura 5.226 5.12.5.3.1 Espécimen 1703-DSH – Perforación P-1- Profundidad 32.00-33.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	460
Figura 5.227 Espécimen 1400-DSH – Perforación P-1- Profundidad 43.00-44.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	461
Figura 5.228 Espécimen 1361 – Perforación P-3- Profundidad 51.00-52.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	462
Figura 5.229 Espécimen 1362 – Perforación P-3- Profundidad 52.00-53.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	463
Figura 5.230 5.12.5.3.1 Espécimen 1363 – Perforación P-3- Profundidad 53.00-54.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	464
Figura 5.231 5.12.5.3.1 Espécimen 1700 – Perforación P-4- Profundidad 47.20-48.20 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	465
Figura 5.232 Espécimen 1365 – Perforación P-4- Profundidad 49.20-50.20 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	466
Figura 5.233 Espécimen 1701-DSH _ Perforación P-4- Profundidad 53.20-54.20 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	467

Figura 5.234 Espécimen 1697 – Perforación P-5- Profundidad 57.80-59.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	468
Figura 5.235 Espécimen 1699 – Perforación P-5- Profundidad 60.00-61.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	469
Figura 5.236 Espécimen 1369 – Perforación P-5- Profundidad 62.00-63.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	470
Figura 5.237 Espécimen 1397-A – Perforación P-6- Profundidad 52.40 - 53.40 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	471
Figura 5.238 Espécimen 1397-B – Perforación P-6- Profundidad 52.40 - 53.40 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	472
Figura 5.239 Espécimen 1403 – Perforación P-6- Profundidad 54.40 - 55.40 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	473
Figura 5.240 Espécimen 1404 – Perforación P-7- Profundidad 57.00-58.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	474
Figura 5.241 Espécimen 1405 – Perforación P-7- Profundidad 58.00-58.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	475
Figura 5.242 Espécimen 1698 – Perforación P-7- Profundidad 60.00-61.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo	476
Figura 5.243 Modelo Geomecánico utilizando el Criterio de Mohr-Coulomb para Esfuerzos de Corte Pico.....	479
Figura 5.244 Modelo Geomecánico utilizando el Criterio de Barton-Bansis para Esfuerzos de Corte Pico.....	480
Figura 5.245 Modelo Geomecánico utilizando el Criterio de Mohr-Coulomb para Esfuerzos de Corte Residuales	481

Figura 5.246 Modelo Geomecánico utilizando el Criterio de Barton-Bansis para Esfuerzos de Corte Residuales	482
Figura 5.247 Espécimen 143-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi	485
Figura 5.248 Espécimen 152-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi	486
Figura 5.249 Espécimen 153-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi	487
Figura 5.250 Espécimen 154 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi	488
Figura 5.251 Espécimen 0939 – Mirador Monumento Manto de María, Divina Pastora – Barquisimeto.....	490
Figura 5.251 Espécimen 1166 – Talud – Cuarcita Ferruginosa, del Complejo Imataca, tomada en los yacimientos de Ferrominera del Orinoco	491
Figura 5.252. Ubicación geográfica de la empresa Carbozulia. Fuente: (Gerencia de Ingeniería de Mina, Carbones del Zulia S.A, 2014).....	493
Figura 2.253 Secuencia estratigráfica presente en la Mina Paso Diablo. Fuente. (Superintendencia de Geología, 2014)	495
Figura 5.254. Espécimen 1621-2 – Limolitas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia	497
Figura 5.255. Espécimen 1634-2 – Limolitas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia	498
Figura 5.256. Espécimen 1910 – Limolitas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia.....	499
Figura 5.257 Envoltente de falla Limolitas Criterio de Mohr-Coulomb (valores pico)	500
Figura 5.258 Envoltente de falla Limolitas Criterio de Mohr-Coulomb (valores residuales).....	501
Figura 5.259. Espécimen 1622-3 – Areniscas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia	502

Figura 5.260	Espécimen 1635-2 – Areniscas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia	503
Figura 5.261	Espécimen 1896 – Areniscas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia	504
Figura 5.262	Envolvente de falla Areniscas Criterio de Mohr-Coulomb (valores pico)	505
Figura 5.263	Envolvente de falla Areniscas Criterio de Mohr-Coulomb (valores residuales)....	506
Figura 5.264.	Espécimen 1917 – Carbón – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia	507
Figura 5.265.	Espécimen 1897 – Arenisca-Limolita – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia ...	508
Figura 9.1	Ilustración esquemática del montaje del espécimen. a) Disposición horizontal convencional; b) Disposición vertical alternativo	547
Figura 9.2	Ejemplos de medición de las superficies de las discontinuidades: a) circular; b) rectangular	552
Figura 9.3	Mitad inferior de una discontinuidad encapsulada de un espécimen de forma rectangular.....	553
Figura 9.4	Ejemplos de ensayos de corte multi-etapas bajo diferentes cargas normales, (a) sin reposicionamiento; (b) con reposicionamiento	557
Figura 9.5	Gráfico típico de un ensayo de corte de una discontinuidad en roca, (a) bajo condición de carga normal constante (CNL); (b) bajo la condición de rigidez normal constante (CNS).....	560
Figura 9.6	Evaluación de los esfuerzos de corte pico y último o residual	561
Figura 10.1	Sistema RDS-500, para ejecución de Ensayos de Corte Directo y Triaxial	572

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Factores que contribuyen a la resistencia a corte de las discontinuidades en la roca (Hencher, 1995)	105
Tabla 3.1	Criterios de Falla para Roca Intacta (Edelbro, 2003)	118
Tabla 3.1.	Criterios de Falla para Roca Intacta (Edelbro, 2003)(Continuación)	119
Tabla 3.2	Criterios de Falla para Macizos Rocosos (Edelbro, 2003).....	120
Tabla 3.3	Aplicabilidad de los Criterios de Resistencia de acuerdo al tipo de material y tipo de ensayo realizado.....	131
Tabla 5.1	Resultados de corte directo para las muestras ensayadas	191
Tabla 5.2	Comparación de resultados obtenidos a 52 y 288 °C en el criterio de Mohr-Coulomb a partir del ensayo de corte	194
Tabla 5.3	Valores de dilatación para las diferentes muestras ensayadas en la etapa de generación de la discontinuidad.....	194
Tabla 5.4	Resultados de corte directo para las muestras ensayadas	204
Tabla 5.5	Comparación de resultados obtenidos a 52 y 288 °C en el criterio de Mohr-Coulomb a partir del ensayo de corte	207
Tabla 5.6	Valores de dilatación para las diferentes muestras ensayadas en la etapa de generación de la discontinuidad.....	208
Tabla 5.7	Resultados de corte directo para las muestras ensayadas	214
Tabla 5.8	Resultados de los parámetros de resistencia aplicando el criterio de Mohr-Coulomb a partir del ensayo de corte	215
Tabla 5.9	Valores de dilatación para las diferentes muestras ensayadas en la etapa de generación de la discontinuidad.....	215

Tabla 5.10	Resultados de las Propiedades Índices	229
Tabla 5.11	Resultados petrográficos estribo derecho - Río Cuira	230
Tabla 5.12	Resultados petrográficos estribo izquierdo - Río Cuira	230
Tabla 5.13	Resultados totales Estribo Derecho caras lisas (valores pico).....	237
Tabla 5.14	Resultados totales Estribo Derecho caras lisas (valores residuales)	238
Tabla 5.15	Resultados totales Estribo Izquierdo caras lisas (valores pico)	243
Tabla 5.16	Resultados totales Estribo Izquierdo caras lisas (valores residuales)	244
Tabla 5.17	Tabla resumen de la Resistencia al Corte sobre caras lisas en ambos estribos	244
Tabla 5.18	Resultados de Dilatancia del Estribo Derecho - Río Cuira	277
Tabla 5.19	Resultados de Dilatancia del Estribo Izquierdo - Río Cuira.....	277
Tabla 5.20	Caracterización de las rugosidades del Estribo Derecho - Río Cuira	278
Tabla 5.21	Caracterización de las rugosidades del Estribo Izquierdo - Río Cuira.....	279
Tabla 5.22	Resultados totales Estribo Derecho (valores pico) - Río Cuira	280
Tabla 5.23	Resultados Globales Estribo Derecho (valores pico) - Río Cuira	280
Tabla 5.24	Resultados totales Estribo Derecho (valores residuales) - Río Cuira.....	281
Tabla 5.25	Resultados Globales Estribo Derecho (valores residuales) - Río Cuira.....	281
Tabla 5.26	Resultados totales Estribo Izquierdo (valores pico) - Río Cuira.....	282
Tabla 5.27	Resultados Globales Estribo Izquierdo (valores pico) - Río Cuira	282
Tabla 5.28	Resultados totales Estribo Izquierdo (valores residuales) - Río Cuira	283
Tabla 5.29	Resultados Globales Estribo Izquierdo (valores residuales) - Río Cuira	283
Tabla 5.30	Ubicación de las perforaciones realizadas por la Empresa Geomin, C.A.	289

Tabla 5.30	Ubicación de las perforaciones realizadas por la Empresa Geomin, C.A. (continuación).....	290
Tabla 5.31	Coordenadas del emplazamiento de las perforaciones realizadas por Geocyma	292
Tabla 5.32	Tabla de resultados de los ensayos de compresión simple y triaxiales	293
Tabla 5.33	Ensayos de corte realizados sobre muestras del EOCENO-FRAC	325
Tabla 5.34.	Ensayo de corte directo-Rigidez Normal Constante (CNS) de las muestras del pozo LL-2925	334
Tabla 5.35.	Ensayo de corte directo-Rigidez Normal Constante (CNS) de las muestras del pozo LL-2935	340
Tabla 5.36	Frentes y galerías del Túnel Baralt.....	347
Tabla 5.38	Resultados de Ensayo Corte Directo BH-40.....	380
Tabla 5.39	Resultados de Ensayo Corte Directo BH-51.....	383
Tabla 5.40	Resultados de Ensayo Corte Directo BH-60.....	400
Tabla 5.41	Ubicación de las perforaciones realizadas.....	403
Tabla 5.42	Ubicación de los ensayos de corte realizados	404
Tabla 5.43	Ubicación de las muestras por perforación y coordenadas	419
Tabla 5.44	Valores de RQD, calidad de la roca y Clasificación de Bieniawski [modificado de (Márquez O. A., 2002)]	439
Tabla 5.45	Resultados de ensayos de laboratorio (Márquez O. A., 2002)	440
Tabla 5.46.	Ensayos de corte realizados en muestras de la Mina Colombia	440
Tabla 5.47.	Resumen de los valores obtenidos de los ensayos de corte en la Mina Colombia	448

Tabla 5.48	Propiedades Índices.....	457
Tabla 5.49	Difracción de Rayos X.....	458
Tabla 5.50	Resultados del Ensayo de Corte Directo.....	477
Tabla 5.50	Resultados del Ensayo de Corte Directo (continuación)	478
Tabla 5.50	Resultados del Ensayo de Corte Directo (continuación)	479
Tabla 5.51	Resumen de resultados de los ensayos 1621-2 y 1634-2.....	500
Tabla 5.52	Resumen de resultados del ensayo 1622-3 y 1635-2.....	505
Tabla 10.1	Salidas de entradas calculadas directamente por CATS-TRX	584

ABREVIACIONES

ASTM	American Society for Testing and Materials
CNL	Constant Normal Load
CNS	Constant Normal Stiffness
GCTS	Geotechnical Consulting Testing Systems
ISRM	International Society for Rock Mechanics
LVDT	Lineal Voltage Diferential Transducer

SÍMBOLOS

c	cohesión [MPa]
c'	cohesión efectiva de la roca intacta o macizo rocoso [MPa]
c_d	cohesión de la discontinuidad [MPa]
ϕ	ángulo de fricción de la roca intacta o macizo rocoso [grados]
ϕ'	ángulo de fricción efectivo de la roca intacta o macizo rocoso [grados]
ϕ_d	ángulo de fricción de la discontinuidad [grados]
ϕ_A	ángulo de fricción estimado [grados]
ϕ_b	ángulo de fricción base [grados]
ϕ_r	ángulo de fricción residual [grados]
a	área del plano de corte (criterio de Coulomb)
N	fuerza normal en el plano de corte (criterio de Coulomb)
V	velocidad de dilatación
d_n	dilatancia
d	diámetro [mm]
d_f	espesor de la zona plástica [m]
ρ	densidad de la roca, en kg/m^3 o tn/m^3
γ	Peso unitario, en N/m^3
θ	inclinación del plano en el cual los esfuerzos y deformaciones actúan
E	módulo de elasticidad
E_i	módulo elástico de la roca intacta [GPa]
JCS	Resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad (Joint wall Compressive Strength)
JRC	Coefficiente de rugosidad de la discontinuidad (Joint Roughness Coefficient)
UCS	Resistencia a la compresión Uniaxial (Uniaxial Compressive Strength)
K	factor de dilatación considerando el incremento de volumen de la masa rocosa a la falla [-]
$p_{0,a}$	parte axialsimétrica del esfuerzo vertical primario [MPa]
σ_1	esfuerzo principal mayor [MPa] (los esfuerzos compresivos son tomados como positivos)
σ_2	esfuerzo principal intermedio [MPa]
σ_3	esfuerzo principal menor [MPa]

σ_1'	.....	esfuerzo efectivo principal mayor [MPa]
σ_2'	.....	esfuerzo efectivo principal intermedio [MPa]
σ_3'	.....	esfuerzo efectivo principal menor [MPa]
σ_c	.....	resistencia a la compresión simple de la roca intacta [MPa]
σ_{cm}	.....	resistencia a la compresión simple del macizo rocoso [MPa]
σ_n	.....	esfuerzo normal [MPa]
σ_t	.....	resistencia a la tracción de la roca intacta [MPa]
σ_{tm}	.....	resistencia a la tracción del macizo rocoso [MPa]
σ_{limite}}	.....	resistencia de fluencia [MPa]
σ_{pico}}	.....	resistencia pico [MPa]
σ_{res}}	.....	resistencia residual [MPa]
τ_f	.....	esfuerzo de corte [MPa]
τ_f	.....	resistencia al corte a lo largo de la superficie de falla [MPa]
E	.....	Módulo de Young
E_t	.....	Modulo tangente al 50% del esfuerzo de falla
E_s	.....	Módulo Secante
$E_{s-50\%}$	.....	Módulo Secante al 50% del esfuerzo de falla
M_{rj}	.....	relación de módulos para roca diaclasada
S_n	.....	promedio normal de espaciamiento de la discontinuidad [m]

1 Introducción **Equation Chapter 1 Section 1**

1.1 Definición del problema

El conocimiento del comportamiento geomecánico de los macizos rocosos es fundamental para el estudio de estabilidad de cualquier superficie rocosa o excavación subterránea. Este comportamiento se torna más complejo debido a la presencia de las discontinuidades, es decir el macizo rocoso se presenta como un medio discontinuo y anisotrópico, eventualmente heterogéneo, constituido por dos tipos de elementos: la matriz rocosa y las discontinuidades.

Por matriz rocosa del macizo rocoso se entiende la roca intacta existente entre discontinuidades (Brady & Brown, 1997) que representa la mayor parte del volumen del macizo rocoso. El término discontinuidad se refiere a una superficie de separación, es decir, una fractura de continuidad del material, caracterizado por una baja resistencia a la tracción o igual a cero (Hudson & Harrison, 1997).

El macizo rocoso es discontinuo por naturaleza propia, debido a la presencia de las discontinuidades; fracturas por corte, fisuras, fallas, planos de estratificación y planos de foliación están presentes entre otros, La resistencia al corte de las discontinuidades es el principal factor que controla la estabilidad estructural del macizo rocoso. Por lo tanto, la evaluación de la resistencia al corte en las discontinuidades y los mecanismos de falla de los puentes de roca, que son pequeñas áreas entre las discontinuidades que hacen que la discontinuidad no sea continua, son de fundamental importancia en los problemas de mecánica de rocas.

Debido a que el tipo de discontinuidad más común presente en los macizos rocosos son las diaclasas, que son de longitud finita con respecto a la geometría de las excavaciones en roca, y por lo tanto de longitud finita, la falla del macizo rocoso generalmente involucra la propagación de las discontinuidades a través de la roca intacta y la coalescencia de discontinuidades orientadas preferencialmente (Figura 1.1) bajo diferentes condiciones de

carga. Esto da lugar a superficies de fallas compuestas en contraposición a modelos simplificados y continuos de planos de debilidad.

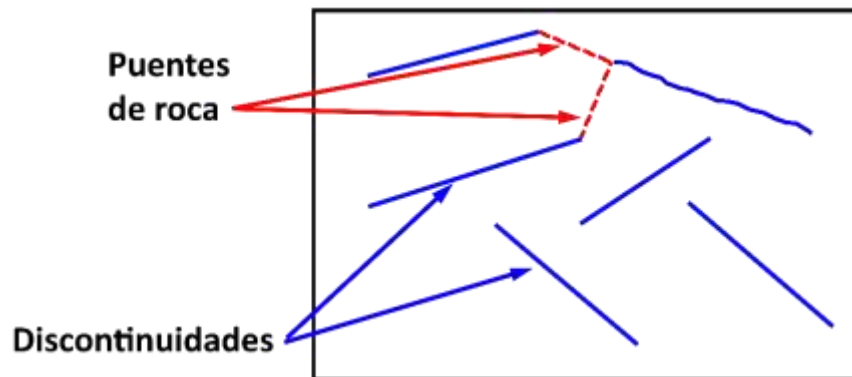


Figura 1.1 Puentes de roca en el macizo rocoso

La resistencia al corte de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso son críticas en el diseño de las estructuras de ingeniería de rocas y es una de las propiedades empleadas en los análisis de estabilidad y diseño de las estructuras en macizos rocosos, (taludes, túneles y fundaciones) (Hoek & Bray, 1981). Ya que ello permite la evaluación de la influencia de las perturbaciones inducidas por la excavación, debido a que la masa de roca podría perder el patrón estructural pre-existente.

El método convencional empleado para determinar la resistencia al corte de las discontinuidades en roca es el **“ensayo de corte directo”** el cual puede ser realizado en el laboratorio en el campo. Los equipos portátiles de corte directo utilizados en el campo **no** suministran resultados suficientemente confiables, debido principalmente al tamaño reducido del espécimen. Los equipos de mayor tamaño empleados en el laboratorio son costosos y muchas veces no están disponibles para los diseñadores o los ingenieros de campo. Los ensayos de los especímenes no son sólo costosos, sino también consumen tiempo, y subsecuentemente el número de especímenes analizados es limitado. Por lo tanto los resultados obtenidos no pueden representar la globalidad del comportamiento de las estructuras presentes en el macizo rocoso.

1.2 Objetivos

Las características ingenieriles de las rocas, particularmente, la resistencia al corte de las discontinuidades en las rocas, juegan un papel muy importante en la ingeniería de minas e ingeniería civil, específicamente en el diseño de estructuras en roca, tales como, excavaciones subterráneas, estabilidad de taludes, estabilidad de pilares, fundaciones de presas, estabilidad de taludes anclados y otros.

Para evaluar la estabilidad de estas estructuras, es necesario conocer la resistencia al corte de las discontinuidades con las orientaciones más desfavorables relativas a las cargas aplicadas requeridas. La determinación de las familias de discontinuidades presentes deberá realizarse con un levantamiento de campo, para así determinar las orientaciones más desfavorables para el estudio en particular, según sea el caso. Los parámetros de resistencia al corte para el diseño, generalmente “no” están disponibles en las etapas iniciales del diseño. Por lo tanto es necesario estimarlos. Por eso, este trabajo servirá de guía para la estimación de estos parámetros de resistencia, con la mayor precisión posible.

El objetivo fundamental de la presente investigación es:

- a) Realizar una revisión de los conceptos de discontinuidades, así como su levantamiento en el campo
- b) Desarrollo de los criterios de resistencia al corte en discontinuidades
- c) Determinar y analizar los parámetros de resistencia de las discontinuidades en varios tipos de rocas de Venezuela, que fueron muestreadas en las distintas localidades, clasificándolas según su tipo y resistencia de acuerdo a los parámetros característicos de las superficies de la discontinuidad

La información obtenida de estos casos presentados como Casos de Estudio servirá para construir una base de datos con los resultados obtenidos en el Laboratorio de Mecánica de Rocas, de la Universidad Central de Venezuela, de las características geomecánicas de las distintas rocas del territorio venezolano.

También se presentará la normativa para realizar el ensayo de corte bajo las modalidades de Carga Normal Constante (Constant Normal Load [CNL]) y Rigidez Normal Constante (Constant Normal Stiffness [CNS]), pasos para realizar el ensayo y programación del ensayo en equipos servo-controlados, así como la interpretación de los resultados.

Para lograr los objetivos anteriores, se realizaron una serie de ensayos de corte directo utilizando el sistema de ensayos RDS-500 fabricado por la empresa GCTS, que se encuentra en el laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Central de Venezuela, en la Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

1.3 Motivación

En nuestro país “no” se dispone de manera pública de parámetros de resistencia al corte. También debe mencionarse que en el país no existían equipos de este tamaño, para determinar dichos parámetros de una manera confiable, tal como el equipo existente, en el Laboratorio de mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería de la UCV, el cual era un equipo portátil, operado totalmente de manera manual, siendo los resultados poco confiables.

A partir de la adquisición del equipo RDS-500, esta dificultad ha sido superada, ya que es un equipo servo-controlado, permitiendo realizar ensayos con una gran precisión y exactitud. Este laboratorio fue inaugurado en marzo de 2011, permitiendo obtener los parámetros geomecánicos de las rocas de distintos proyectos de gran importancia para el país, como el ferrocarril Caracas-Guaremas, patio de trenes del Metro Los Teques, Presa del Río Cuira, Mina Colombia en El Callao (estado Bolívar), fosa Norte de la Mina Paso Diablo (estado Zulia), Túneles de la Av. Boyaca para su interconexión con la autopista Caracas-La Guaira y en la actualidad se encuentran en desarrollo otros proyectos de importancia en el área de minería.

Estos proyectos son de gran importancia ya que la población de Venezuela está ubicada primordialmente en la zona norte costera, y el crecimiento de la población ha obligado a la construcción de viviendas formales e informales en las laderas de las colinas circundantes a las zonas planas. Además en Venezuela por ser un país tropical, las rocas superficiales sufren un proceso de meteorización acelerado, después de los cortes realizados, presentando

inestabilidades futuras que deben ser corregidas con métodos tradicionales de estabilización de taludes como pantallas, muros, tierra armada, etc.

La estabilidad de todas estas estructuras depende de su diseño, de los materiales y métodos empleados durante su construcción, y la estabilidad durante su etapa operativa, para la cual fue construida. Las características de las rocas (particularmente los parámetros de la resistencia al corte de las discontinuidades) son de suma importancia para el diseño de las mismas. Estos parámetros, generalmente no han recibido la importancia requerida, debido a la dificultad para su obtención o debido a que no existen parámetros de referencia locales y los existentes son tomados de la literatura especializada y no se corresponden con la realidad presente. Adicionalmente a esto, la obtención de muestras representativas de roca también es difícil y frecuentemente sólo las rocas más competentes sobreviven al proceso de muestreo y preparación de la muestras.

La Base de Datos que se construirá debe ser lo más amplia posible y debe servir de referencia para la obtención de parámetros de diseño iniciales en obras futuras.

1.4 Desarrollo de la Investigación

1.4.1 Revisión de la Literatura

La revisión de la literatura fue realizada para determinar el Estado del Arte de los ensayos de corte directo, los criterios de resistencia al corte de las discontinuidades presentes en las rocas, y los efectos de la petrografía en la resistencia al corte (tamaño de grano, forma del grano, el color, composición, etc.). Esto incluye: teorías, procedimientos de ensayo, resultados, análisis y aplicaciones. Las fuentes de información son revistas, informes técnicos, congresos. Este trabajo incluye un resumen de la literatura revisada.

1.4.2 Recolección de muestras y preparación

Todas las muestras utilizadas en este trabajo provienen de sitios específicos de Venezuela, que por sus detalles particulares en el diseño o construcción de la obra, se requiere la obtención de los parámetros de resistencia, tratando en lo posible de obtener la mayor cantidad de

muestras, así como lograr la repetitividad de ensayo. La preparación de estas muestras se realizó de acuerdo a los procedimientos dados por las Normas del ISRM (International Society for Rock Mechanics, 1981), (International Society for Rock Mechanics, 2013) y ASTM D4543 (ASTM, 2012)

Todos los ensayos que se presentan fueron realizados en su totalidad en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería, como tesis de grado de estudiantes de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, cuyos ensayos estuvieron realizados bajo la supervisión y control del Autor del presente trabajo y se realizaron en el periodo desde el año 2012 hasta 2016. No fue para así otros trabajos que por su magnitud no justificaban un trabajo especial y pueden considerarse como ensayos puntuales realizados para particulares, que conscientes de la importancia de la determinación de tales parámetros de resistencia, han solicitado el Servicio del Laboratorio y para así poder realizar los diseños de los proyectos particulares ajustados a los parámetros de la geología local existente en cada uno de ellos.

1.4.3 Trabajo Experimental

Este trabajo incluye, numerosos especímenes ensayados, de distintas localidades de Venezuela. Los ensayos que corresponden a obras de infraestructura para el país. Los ensayos se han realizado en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. El trabajo de ensayos de laboratorio está dividido en tres etapas principales:

1.4.3.1 Caracterización de la Muestra

Los ensayos de caracterización incluyen varios tipos de ensayos, compresión simple, tracción indirecta, ensayo de corte directo, abrasividad de la roca (Cerchar), petrografía y desgaste de Los Angeles. Debido a la limitación de espacio en este Trabajo de Ascenso y con la premisa de presentar la mayor cantidad de Casos de Estudio de las diversas zonas del país solo se presentarán los ensayos de corte realizados sobre las muestras. La caracterización de dichas muestras, por zona se realizará sobre el análisis de la resistencia al corte en las discontinuidades.

1.4.3.2 Petrografías

Un estudio petrográfico se realiza mediante el análisis de secciones finas. Se prepara una sección fina pulida y se examina una por cada tipo de roca, empleando técnicas de microscopía óptica. La petrografía incluye parámetros de tipo y porcentajes por volumen de minerales, tamaño de grano y tamaño de los cristales, orientación, y tipos de materiales cementantes. Los resultados se utilizan para estudiar la relación de estos con las propiedades de resistencia de la roca. Las petrografías son realizadas en la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

1.4.3.3 Verificación de los Ensayos

Una serie de ensayos de corte directo se realizan para determinar los parámetros de resistencia de la roca, con el propósito de determinar el criterio de resistencia al corte de las discontinuidades. Los ensayos de resistencia al corte se realizarán siguiendo las normas ISRM (International Society for Rock Mechanics, 1981); (International Society for Rock Mechanics, 2013) y ASTM D5607 (American Society for Testing and Materials). Para cada uno de los ensayos se realizó un reporte particular para cada muestra, donde se incluye el tipo de ensayo de corte a realizado, la programación del ensayo, el desarrollo de cada etapa de corte; el análisis de la dilatación y se aplicó el criterio de Mohr-Coulomb.

1.4.3.4 Compilación de resultados por Zona de estudio

Una vez concluida la etapa de realización de los ensayos, se procedió a la elaboración del criterio de falla de la zona en estudio, con la finalidad de obtener la envolvente de falla a los Círculos de Mohr y poder establecer un criterio de falla general para el macizo rocoso.

1.4.4 Limitaciones del presente trabajo

Debido a la meta propuesta de presentar Casos de Estudio de Rocas de Venezuela y a que muchas de las muestras obtenidas para los ensayos son rocas intactas, es decir “no” tienen presente una discontinuidad. La primera etapa del ensayo es la generación de una discontinuidad por corte, si la muestra es una roca intacta, y la discontinuidad generada es

similar a las que pueden ocurrir en la naturaleza, no se realizó la relación del valor de resistencia pico como se describe mas adelante, en esta primera etapa con las demás propiedades mecánicas de la roca. Esto es debido a que la discontinuidad es inducida y no es de origen natural.

Se observa que es recomendable establecer la relación entre el ángulo de fricción y las propiedades físicas de la roca. Esto podría realizarse de la siguiente manera, 1) empleando el ángulo de fricción y los ensayos de caracterización; 2) generando una Base de Datos con los parámetros obtenidos de la caracterización a partir de una amplia gama de tipos de roca.

La predicción de la resistencia al corte de las discontinuidades de la roca empleando diferentes valores de JRC , no puede ser anticipada por el Criterio de Barton, **en las muestras en las que se generó la discontinuidad.**

Todos los trabajos experimentales y analíticos suponen condiciones isotrópicas y homogéneas. El trabajo no incluye los efectos de forma y tamaño. Los efectos de velocidad de carga, temperatura y cambios químicos no serán considerados (es decir, se suponen constantes). Todos los ensayos se realizaron en condición seca. No hay relleno en las aperturas de las discontinuidades. El comportamiento plástico no fue considerado en el análisis. Las cargas normales aplicadas son bajas (menores del 50% de la resistencia de la roca).

1.5 Estructura de la Investigación

El informe final de esta investigación fue dividida en cinco capítulos. En el capítulo 1, ya presentado, se describe el problema, la motivación del trabajo, objetivos de la investigación, aplicación del trabajo y metodología de investigación. El capítulo 2, presenta el estado del arte de las discontinuidades en roca. El capítulo 3, presenta una revisión de la literatura y los criterios de resistencia al corte, parámetros de resistencia y el efecto de la petrología sobre las propiedades mecánicas abarca el ensayo de resistencia al corte, sus modalidades, programación del ensayo, reportes e interpretación de resultados. El capítulo 4, cubre el ensayo de corte directo, sus modalidades, programación del ensayo, reportes e interpretación de los resultados. En el capítulo 5, se presentan algunos de los Casos de Estudio realizados en

Venezuela, presentando el resumen de cada espécimen y el criterio de falla de la zona en estudio en base a la envolvente de los círculos de Mohr. En el capítulo 6 se presentan la discusión, Conclusiones; y en el capítulo 7, presentas las Recomendaciones recomendaciones. En el apéndice A, se incluye la Norma ISRM para el ensayo de corte directo en roca (2013). En el apéndice B, incluyen las características del equipo de corte RDS-500, del cual dispone la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

2 Estado del Arte **Equation Section (Next)**

2.1 Introducción

A lo largo de los cinco mil años o más que los seres humanos han realizado construcciones de algún tipo, estas han estado sustentadas en la resistencia del suelo o de la roca, realizadas por constructores responsables, para asegurarse de que eran adecuadas para servir al propósito para el cual fueron construidas, ya sea en su estado natural o con materiales de construcción, fabricados por el hombre. Hasta el siglo XX, las evaluaciones de esas construcciones eran necesariamente cualitativas, basada fundamentalmente en la experiencia o la regla de oro. El problema es que el suelo y las rocas vienen en un número infinito de formas, y si bien la experiencia o regla de oro a menudo pueden haber sido suficiente en el pasado, había sin duda muchos casos, sobre todo en el olvido, cuando resultaron insuficientes e incluso engañosas, lo que lleva a los fallas. Los avances en la comprensión de la resistencia de los materiales de ingeniería que se produjeron en el siglo XIX no se hicieron extensivas a suelos y macizos rocosos. Una comprensión fundamental de la resistencia de los suelos y rocas **blandas** tuvo que esperar a una comprensión de los esfuerzos efectivos. En primer lugar la expresó formalmente por Terzaghi en 1936 por lo que es considerado, con razón, como el Padre de la Mecánica de Suelos. Un enfoque diferente, más empírico se ha requerido en el caso de rocas duras, para las que se reconoce que su fuerza está dominada por la presencia de imperfecciones.

2.2 Antecedentes Históricos

Las fuerzas de rozamiento están presentes en casi todos los fenómenos que observamos. Intervienen en el movimiento de objetos en el seno de fluidos (como, por ejemplo, el aire o el agua), cuando se produce deslizamiento de un objeto sobre otro, cuando un objeto rueda sobre una superficie, etc.

Aunque se limite el estudio al rozamiento por deslizamiento, la interpretación de las fuerzas de rozamiento es muy compleja, como se observa a considerar los procesos de rozamiento a escala microscópica. El perfil de las superficies dista mucho de ser plano y el área real de las superficies en contacto es mucho menor que el que aparenta a escala macroscópica. Se producen adherencias entre las zonas en contacto y, con el deslizamiento, esas zonas se deforman. A escala atómica, estas adherencias y deformaciones se relacionan con interacciones de los átomos y/o las moléculas de la superficie del objeto con otros átomos y/o otras moléculas de la superficie sobre la que desliza. Se pueden producir roturas y nuevas formaciones de enlaces químicos, etc.

Debido a estas complicaciones, no hay una teoría exacta del rozamiento en el deslizamiento. Las leyes del mismo son empíricas y consideran una fuerza global o macroscópica de rozamiento al deslizamiento que representa a la resultante de las múltiples interacciones ejercidas entre las superficies.

2.2.1 Leonardo Da Vinci (1452-1519)

El desarrollo de leyes que puedan expresar esta fuerza global de rozamiento comienza históricamente con Leonardo da Vinci (1452-1519), que realizó un estudio sistemático de la fricción e investigó el movimiento de un bloque rectangular, deslizando sobre una superficie plana. Este estudio de Leonardo pasó desapercibido.

Leonardo propuso dos leyes básicas de fricción 200 años antes que Newton definiera que es una fuerza. Da Vinci simplemente señaló que:

1. Las áreas que están en contacto no tienen efecto en la fricción. (1ra Ley de Amontons)
2. Si se duplica la carga sobre un objeto, también se duplicará su fricción. (2da Ley de Amontons)

Se observa que la primera afirmación **es contraria a la intuición**.

Leonardo realizó la observación que distintos materiales pueden deslizar con distinta facilidad (Figura 2.1). Supuso que esto es debido a una consecuencia de la rugosidad del material en estudio; es decir materiales menos rugosos tendrán fricciones más pequeñas. Leonardo Da

Vinci, no publicó sus teorías, por lo que nunca recibió el crédito por sus ideas. La única prueba de su existencia es su vasta colección de revistas.



Figura 2.1 Estudios sobre fricción realizados por Leonardo Da Vinci, que demuestran que la fricción es independiente del tamaño de las superficies en contacto

Leonardo hizo la observación de que diferentes materiales se mueven con facilidad diferente. Supuso que se trataba de una consecuencia de la rugosidad del material de que se trate; Así, los materiales más suaves tendrán fricciones más pequeñas como indicamos. Leonardo Da Vinci no publicó sus teorías, por lo que nunca recibió crédito por sus ideas. La única prueba de su existencia su vasta colección de revistas. Por lo tanto Leonardo puede ser llamado como el Padre de la moderna Tribología.

2.2.2 Guillaume Amontons (1663-1705)

Guillaume Amontons (1699) redescubrió las dos leyes básicas de la fricción que habían sido propuestas por Leonardo Da Vinci, y él también propuso otro conjunto de teorías propias. Él creía que la fricción era predominantemente el resultado del trabajo realizado para levantar una superficie sobre la rugosidad de la otra, o de la deformación o del desgaste de una superficie sobre otra la otra superficie. Durante varios siglos después del trabajo de Amontons, los científicos creían que la fricción se debía a la rugosidad de las superficies.

Las conclusiones de Amontons fueron:

- La fuerza de rozamiento se opone al movimiento de un bloque que desliza sobre un plano.
- La fuerza de rozamiento es proporcional a la fuerza normal que ejerce el plano sobre el bloque.
- La fuerza de rozamiento no depende del área aparente de contacto.

2.2.3 Culmann (1886)

La representación gráfica de los esfuerzos y la resistencia al corte juega un papel muy importante en su comprensión, tanto en suelos como en rocas. Culmann (1866) fue el primero que consideró el círculo de esfuerzos aplicando esfuerzo longitudinales y verticales sobre vigas horizontales durante la flexión.

El desarrollo del círculo de esfuerzos, incluye el establecimiento de un punto de la circunferencia, que ahora se conoce como el punto de polos, permitiendo que los esfuerzos en un plano con cualquier inclinación, pueda ser obtenido trazando una línea a través de este punto, de forma paralela a ese plano. Tal línea se intercepta en el círculo de nuevo, en el punto del esfuerzo requerido. Esto constituyó, una manera sencilla para trazar trayectorias principales de esfuerzos para una viga.

Consciente del hecho que el criterio de falla empleado en ese momento estaba basado en el criterio de esfuerzo máximo de Saint-Venant, ello no correspondía con los resultados experimentales con muestras de acero.

2.2.4 Mohr (1882)

Mohr (1882) promovió el uso de un criterio de falla basado en la limitación de la resistencia al corte, y propuso que los círculos de esfuerzo deben elaborarse para tener una mayor comprensión de las condiciones de esfuerzo en el momento de falla.

Como una ilustración del criterio de tensión de cizallamiento, Mohr usó el ejemplo de hierro fundido probado a la falla en la compresión, en la tensión y en cortante puro. Dibujó envolventes de rotura, simplemente tocando los círculos de compresión y tensión, con lo que demostró que el esfuerzo de rotura cortante está dada por el radio de un círculo con su centro en el origen de tensiones y simplemente tocar los dos sobres. Estos valores concuerdan de manera satisfactoria con las observaciones experimentales.

Aunque las motivaciones de Coulomb y Mohr hacia el desarrollo de un criterio de falla eran muy diferentes y en diferentes materiales, el punto final fue el mismo: un criterio dependiente

de la tensión basado en la resistencia al cizallamiento, familiar para los ingenieros geotécnicos como el criterio de Mohr-Coulomb.

2.2.5 Osborne Reynolds (1885)

Los materiales granulares sufren un cambio en su fracción de volumen cuando están sujetos a una presión. El fenómeno fue descrito por primera vez por Osborne Reynolds en 1885.

Reynolds comprobó este fenómeno llenando un recipiente de goma con arena y agua, añadiendo un tubo de vidrio a la boca del recipiente, de tal forma que el agua alcanzaba un cierto nivel dentro del tubo. Al comprimir con las manos el contenedor de goma, el nivel del agua en el tubo descendió, **en contra de lo que se esperaba**. Este fenómeno es conocido como Dilatancia de Reynolds.

La explicación de este fenómeno, dada por el mismo Reynolds, consiste en el cambio en la fracción de volumen del material granular. Al comprimir la arena, los granos de esta sufren un reacomodo en sus posiciones, de tal manera que aumenta el espacio vacío entre las partículas. Al ocurrir esto, el agua ocupa estos nuevos espacios y desciende su nivel. Este fenómeno es observado también en las playas al caminar una persona sobre la arena mojada, las huellas de los pies parecen secarse. La explicación es la misma la presión debida al peso de la persona que camina sobre la playa genera un cambio en la fracción de volumen de la arena y el agua dentro de ella desciende de nivel, apareciendo seca la superficie de la arena. Como se ha indicado, este cambio de volumen se denomina "dilatancia".

2.3 Discontinuidades

(Priest S. D., 1993), definió el significado práctico del término discontinuidad, el cual fue asumido por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas [International Society for Rock Mechanics, ISRM] (Muralha, y otros, 2015), quienes definen el término de la siguiente manera:

“El término discontinuidad se refiere a cualquier fractura mecánica presente en el macizo rocoso, con resistencia despreciable a la tracción (Priest S. D., 1993). Las discontinuidades pueden ser de origen geológico, (es decir, fallas, estratificación,

foliación, diaclasas) o de origen antrópico (es decir, inducidas por voladuras, esfuerzos inducidos o fracturas hidráulicas inducidas)."

Así, se entiende por discontinuidades, las fracturas que presenta la roca o planos de debilidad por los cuales las rocas alcanzan su fallo en la mayoría de los casos. Completando esta idea, se llaman discontinuidades a los defectos producidos a escala macroscópica, dichos defectos son (generalmente) producto del origen de las rocas. Se debe destacar que la discontinuidad es una fisura o plano de debilidad que hace estructuralmente **discontinuo** al macizo rocoso. En la literatura reciente el término discontinuidad se reemplaza por el término de "fractura".

Hay que señalar que el término discontinuidad tiene una etimología variada, la cual varía de un país a otro. Entre los nombres que recibe están: fisuras, laminación, planos de debilidad (más utilizado), planos de rotura, lechos de estratificación, foliación, dislocación, fallas, diaclasas, juntas, defectos, discordancias, litoclasas, pliegues, fracturas, borde de deslizamiento y otras.

Las discontinuidades tales como planos de estratificación, foliación, diaclasas, zonas de cizalla y fallas forman parte de cualquier macizo rocoso. El comportamiento del macizo rocoso a poca profundidad, donde los esfuerzos son relativamente bajos, es controlado en gran parte por el deslizamiento de bloques de roca en las diaclasas (discontinuidades). Existen una serie de factores que influyen en la resistencia al corte de las discontinuidades en la roca y están relacionados principalmente con la naturaleza de la superficie de la discontinuidad. Estos factores incluyen: la rugosidad de la superficie de la discontinuidad, la dureza de la superficie de la discontinuidad, la presencia y la presión del agua, la presencia de material de relleno, el tipo de material de relleno y el grosor del material de relleno.

Las discontinuidades que ocurren en cualquier macizo rocoso son el resultado de la formación de la masa de roca o movimiento en la corteza de la tierra. Según (Jennings, 1971) se conocerán dos conjuntos de discontinuidades y se denominan (a) mayores o principales y (b) características menores o secundarias. Las principales características de las discontinuidades mayores incluyen planos de estratificación, fallas, contactos y diques, todos los cuales pueden ser seguidos a través de largas distancias. Estas discontinuidades son importantes en el análisis

de la estabilidad de taludes. Las discontinuidades menores son de longitud limitada, tales como diaclasas transversales en las rocas sedimentarias.

2.4 Las Discontinuidades en el desarrollo de la Mecánica de Rocas

Como se conoce la Mecánica de Rocas es relativamente reciente. Las primeras bases científicas aparecen en los años de 1950 debido al incremento de la demanda de las materias primas y poco a poco se va convirtiendo en una disciplina a partir de los años de 1960 en adelante.

En sus inicios solo se prestó atención al comportamiento de la matriz rocosa, siendo a partir de los años de 1960 cuando se reconocen las discontinuidades y la estructura del macizo rocoso juega un papel muy importante; a parte de estas se estudió la aplicación práctica a la ingeniería de taludes e ingeniería de túneles. En los años de 1980, el papel preponderante lo jugó el macizo rocoso, y en esos años también se inició el desarrollo de los métodos numéricos.

En el ámbito de la ingeniería de minas e ingeniería civil, el diseño y análisis de la estabilidad de taludes es una de las tantas aplicaciones que tiene la mecánica de rocas, al igual que en la ingeniería de túneles tanto mineros como viarios. Poco a poco la mecánica de rocas ha ido alcanzado una mayor relevancia dentro de todas las obras de ingeniería.

Se puede entonces concluir que ***un macizo rocoso constituye un medio discontinuo que esencialmente se compone de bloques sólidos separados por discontinuidades***. Partiendo de esta idea, podría decirse que, si la roca está compuesta tanto por roca matriz (sana, sin fracturación) como por discontinuidades (fallas, grietas), entonces lo que divide a la roca matriz es la denominada discontinuidad y la misma ***“condiciona y gobierna el comportamiento del macizo rocoso disminuyendo la resistencia al corte y a tracción, la deformación y la permeabilidad”***. De manera general, se dice que la resistencia al corte de las discontinuidades de la roca es el aspecto **más importante** para determinar la estabilidad del macizo rocoso.

Esta misma idea la presentan (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, 2004) cuando expresan que:

“Los macizos rocosos en la naturaleza presentan comúnmente un número elevado de discontinuidades. Por ello, si se quiere conocer y describir adecuadamente el comportamiento mecánico de los macizos rocosos resulta necesario analizar previamente el comportamiento de las discontinuidades naturales”. El mismo autor indica que “el aspecto principal que condiciona el comportamiento mecánico de una discontinuidad natural, en un testigo de sondeo o en un afloramiento natural, es su resistencia al corte, aunque también los parámetros de deformación, como la rigidez cortante y la normal, y la dilatancia, pueden marcar en parte su comportamiento”.

Las discontinuidades en la roca son fundamentalmente importantes ya que estas indicarán la manera como el macizo rocoso se comportará en términos de asentamientos, estabilidad y excavación en los distintos proyectos ingenieriles, así como para el flujo y almacenamiento de líquidos y gases. Sin embargo, la naturaleza, y en particular, el origen de las diaclasas, fallas y cualquier otro tipo de discontinuidad presente en el macizo rocoso se tratan sólo de manera somera en la mayoría de los textos de mecánica de rocas, ingeniería de rocas e ingeniería geológica, presentando los métodos estándar para la descripción del macizo rocoso. La naturaleza de las discontinuidades y su origen generalmente se incluye en el campo de los geólogos estructurales.

Consecuentemente, cuando es necesario caracterizar el macizo rocoso en la ingeniería de rocas, las diaclasas y otras discontinuidades estructurales presentes tienden a ser tratadas de manera muy sencilla o simplificada. Generalmente las discontinuidades abiertas se registran en el registro de perforación. La selección del tipo de discontinuidad a registrar se limita a diaclasas, fallas, estratificación o clivaje. Adicionalmente, sólo los atributos geométricos tales como rumbo y buzamiento (o azimut e inclinación), rugosidad apertura, persistencia, tipo de relleno y terminación son registradas rutinariamente (Priest S. D., 1993). Los datos obtenidos se tratan estadísticamente empleando programas como del DIPS (Rocscience). La interpretación de las discontinuidades está centrada en la geometría y frecuencia, y con mucho menos atención a su origen, evolución de la resistencia o el entorno donde se encuentran las discontinuidades. Generalmente no se dá la importancia adecuada a las diaclasas y otras discontinuidades de la evolución de las propiedades geomecánicas en el tiempo, resultado de la meteorización.

2.4.1 Naturaleza y origen de las discontinuidades

Las discontinuidades son las fracturas encontradas en la mayoría de las rocas cerca de la superficie de la corteza terrestre, y su origen es sujeto de varias polémicas (Polland & Aydin, 1988). Las discontinuidades son claramente el resultado de los esfuerzos a que está sometida la roca (siempre en estado sólido). Algunas son formadas en ambientes sedimentarios, otras en cuerpos ígneos debido al enfriamiento de la roca y otras fuerzas que son el resultado de eventos tectónicos. Algunas discontinuidades son el resultado directo de condiciones de esfuerzos en la corteza terrestre. La formación de discontinuidades en regímenes de tensión y corte están basadas en los conceptos modernos de la mecánica de la fractura. Muchas discontinuidades son despreciables, ya que su formación es incipiente y no son visibles, ya que no se desarrollaron completamente y el comportamiento mecánico de la roca está sometido a un estado de liberación de esfuerzos y exposición de sus elementos.

2.4.2 Desarrollo del proceso de formación de discontinuidades

La geohistoria del macizo rocoso se puede definir como un grupo de condiciones geológicas (esfuerzos, presión de los fluidos, temperatura e interacción de los fluidos-roca) experimentados desde su formación hasta el presente. La historia de estos parámetros y el tiempo de duración de cada proceso, bajo ciertas condiciones determinadas, definirán la trayectoria de la geohistoria y pueden contribuir al desarrollo y estabilidad de las discontinuidades en el sistema. Por ejemplo, la exposición a una carga geológica y a una descarga durante y después de la era de hielo o la combinación de la meteorización por el influjo de diferentes fluidos puede inducir cambios dependientes en el **tiempo** sobre la resistencia del macizo rocoso. Se producen pequeños cambios en la cohesión entre las fases minerales a través de los bordes de los granos, la expansión por porosidad por la lenta disolución de los minerales o la reacción química a las distintas fases de meteorización, o la remoción de las cargas generando “micro-puentes” con incipientes discontinuidades que pueden a su vez inducir la falla por la evolución dinámica de la resistencia. Para concluir, deben considerarse dos procesos importantes en el comportamiento el primero dependiente del tiempo y el segundo de la estabilidad de los sistemas de discontinuidades.

2.4.2.1 Respuesta a los procesos mecánicos

Los procesos mecánicos no involucran las alteraciones químicas pero incluyen los procesos que impactan la condición de espaciamiento de las discontinuidades, lo cual promueve el inicio y propagación de fracturas o discontinuidades. Estas son fundamentalmente controladas por la fábrica de la roca y su mineralogía, donde los cambios en la distribución, frecuencia, orientación y cohesión de los granos durante su geohistoria (especialmente en las condiciones reciente y presente) impactan de manera significativa su susceptibilidad a la falla. El crecimiento lento de grietas y su interconexión con discontinuidades existentes puede promover un deterioro del macizo rocoso y puede depender de la respuesta elasticidad de los granos minerales adyacentes a los cambios de las condiciones geológicas (ciclos de carga o descarga durante la gelificación, expansión o presión de fluidos).

2.4.2.2 Respuesta a los procesos químicos

Este proceso involucra las reacciones químicas que cambian la resistencia de las interfaces que promueven o estabilizan el crecimiento de fracturas. Procesos tales como la disolución, corrosión, transformaciones, precipitaciones o meteorización pueden inducir cambios en el comportamiento del macizo rocoso. Las condiciones que aceleran una alteración química rápida son particularmente significativas. Los procesos químicos cuando se aplican a las rocas promueven cambios en su resistencia (generalmente a altas temperaturas) generando reacciones que promueven la ductilidad. Estos procesos transformacionales también mejoran la ductilidad y procesos similares pueden actuar en la meteorización, desarrollando las discontinuidades en la roca.

Aunque ambos procesos, los mecánicos y químicos, son bien conocidos, pero menos conocida es su combinación y retroalimentación entre procesos bajo diferentes condiciones. Esas condiciones controlan la susceptibilidad al desarrollo y propagación de las discontinuidades de cualquier localidad en particular.

2.4.2.3 Implicaciones Generales

Como se ha señalado, los sistemas de discontinuidades medidos en cualquier localidad tendrán sus propias propiedades relacionadas a su geohistoria pero con respecto al desarrollo de defectos en el tiempo geológico y relativo a la historia de su meteorización y cargas recientes. El rumbo y buzamiento de muchas familias de discontinuidades son predefinidas en su pasado geológico, pero la apertura, frecuencia y persistencia son principalmente una función de su exposición y de los esfuerzos locales de la roca en la superficie terrestre. Las discontinuidades paralelas facilitan planos de debilidad previos, particularmente en cuerpos ígneos, pero otros desarrollos como nuevas fracturas, son la respuesta al estado de esfuerzos en la superficie terrestre. El argumento de que algunas de estas diaclasas pueden ser antiquísimas debido a la evidencia de que diaclasas jóvenes cortaron diaclasas vieja, ya no es válido una vez que se acepta que la fractura antigua es necesaria sólo para desarrollar plenamente fracturas mecánicas que están visiblemente expuestas debido a la meteorización.

La importancia de considerar la geohistoria de los sistemas de discontinuidades cuando se caracteriza al macizo rocoso para procesos ingenieriles es enorme. Una consideración de los procesos que generan un sistema de discontinuidades y sus atributos en una localidad particular puede indicar que algunas discontinuidades pueden ser sub-muestreadas y subevaluadas, con consecuencias futuras impredecibles.

2.4.2.4 Implicaciones para la Estabilidad de Taludes

Los daños de una sobreestimación estadística en el tratamiento de las discontinuidades ha sido revisado por (Hencher, 1985). Fué realizado en fallas significativas de taludes, donde discontinuidades no frecuentes pero importantes fueron desestimadas en el diseño de los taludes (Hencher, 1983).

Más aún, el desarrollo y extensión de las discontinuidades en el tiempo puede ser significativo en el desarrollo de los taludes y su respectivo diseño.

En la estabilidad de taludes en roca se pueden encontrar cuatro tipos de falla (Figura 2.3), las características de cada uno de ellos dependerá de la orientación relativa de los planos de

discontinuidad entre la cara del talud y la discontinuidad (Hoek & Bray, 1981) para cada tipo de falla.

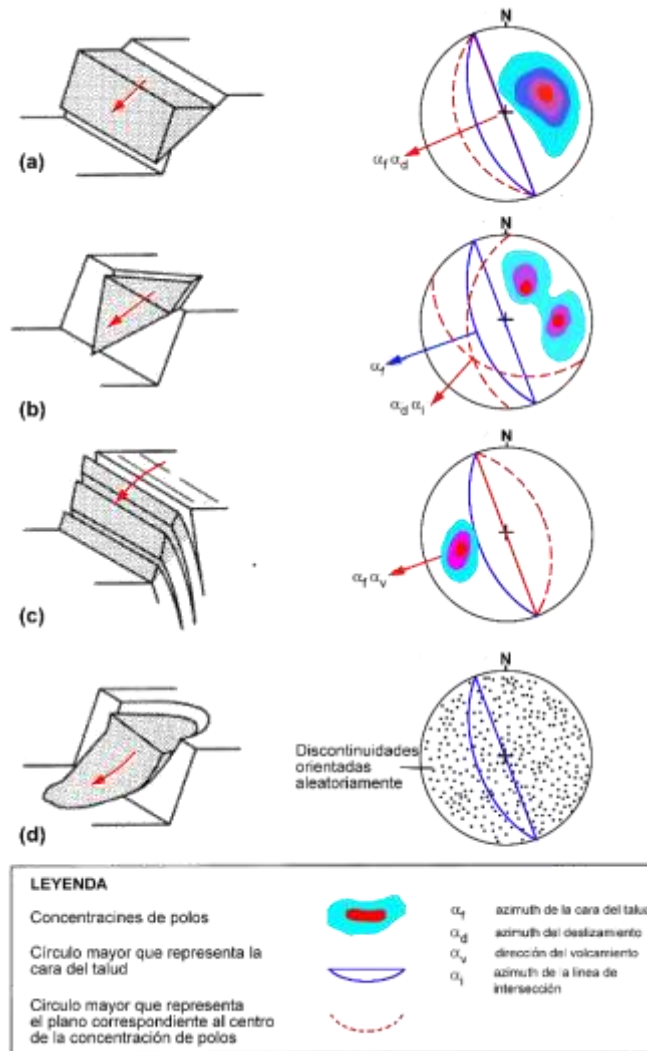


Figura 2.3 Principales tipos de falla en roca y las condiciones geológicas que pueden causar la falla (Hoek & Bray, 1981). (a) Falla Plana presenta discontinuidades continuas que tienen un buzamiento desfavorable hacia la cara del talud y un rumbo casi paralelo a la cara del talud; (b) Falla en Cuña es la intersección de dos discontinuidades y la línea de intersección debe aflorar en la cara del talud; (c) Falla por Volcamiento en una roca que presenta discontinuidades que buzando en sentido contrario a la cara del talud y (d) Falla Circular en rellenos de roca, suelo o roca con un fracturamiento intenso y con discontinuidades orientadas aleatoriamente.

2.4.2.5 Implicaciones para las Excavaciones Subterráneas

Los casos reportados donde la presencia de defectos pre-existentes que sólo serán desarrollados como fracturas mecánicas en la excavación con consecuencias de inestabilidad

para la obra subterránea, dan indicios de un estado de fracturamiento variable con diferentes niveles dentro del mismo macizo rocoso.

En la aplicación de los sistemas de clasificación como el RMR (Bieniawski, 1989) y Q (Barton N. R., 2000), se concluye como un estudio somero de las fracturas de la roca, se utiliza para caracterizar el macizo rocoso. Las discontinuidades no son diferenciadas de acuerdo a su origen y variación espacial. Las consideraciones de la geohistoria en la elaboración de los modelos geológicos y geomecánicos en el trazado de rutas de túneles sin duda serían de gran beneficio para el proyecto. La frecuencia de las discontinuidades, y por lo tanto la calidad del macizo rocoso, es de gran importancia con respecto a su excavabilidad y sostenimiento, el cual variará con el grado de meteorización. Debe tenerse sumo cuidado cuando se interpreten las condiciones del proyecto, utilizando como base a los datos recolectados.

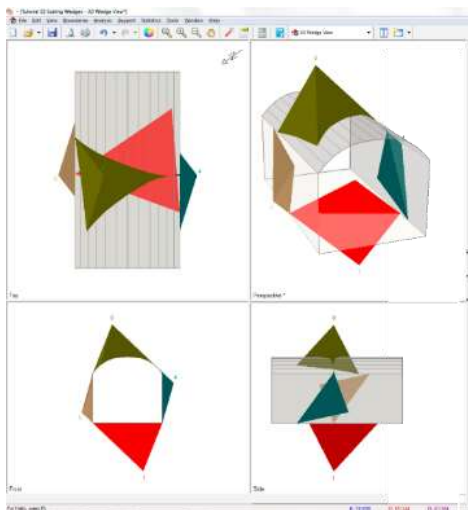


Figura 2.4 Análisis de cuñas formadas en una excavación que atraviesa un macizo rocoso diaclasado (tomado de RocScience – Unwedge V4.0, 2015)

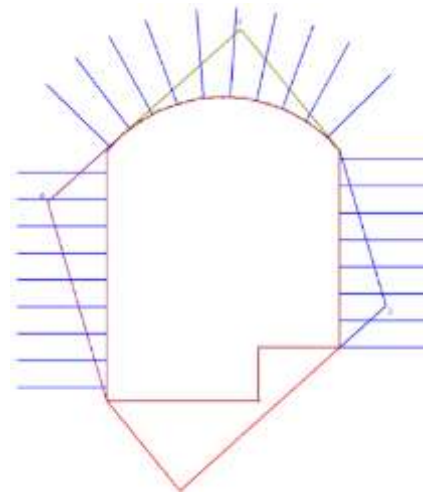


Figura 2.5 Patrón de anclajes en una excavación subterránea aplicado en los hastiales y techo para estabilizar las cuñas formadas por las discontinuidades intersectadas por la excavación (tomado de RocScience – Unwedge V4.0, 2015)

El análisis de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso (con sus respectivos parámetros geomecánicos) unido con los datos del futuro túnel a construir, permitirá concluir como estas lo interceptan, pudiendo determinarse las cuñas potencialmente inestables y

determinar así los anclajes necesarios para estabilizar las cuñas claves y evitar que el resto de ellas se muevan y produzcan sobreexcavaciones (Figuras 2.4 y 2.5).

Hay tres maneras por las que se pueden crear condiciones para la formación de rocas sueltas (Figura 2.6):

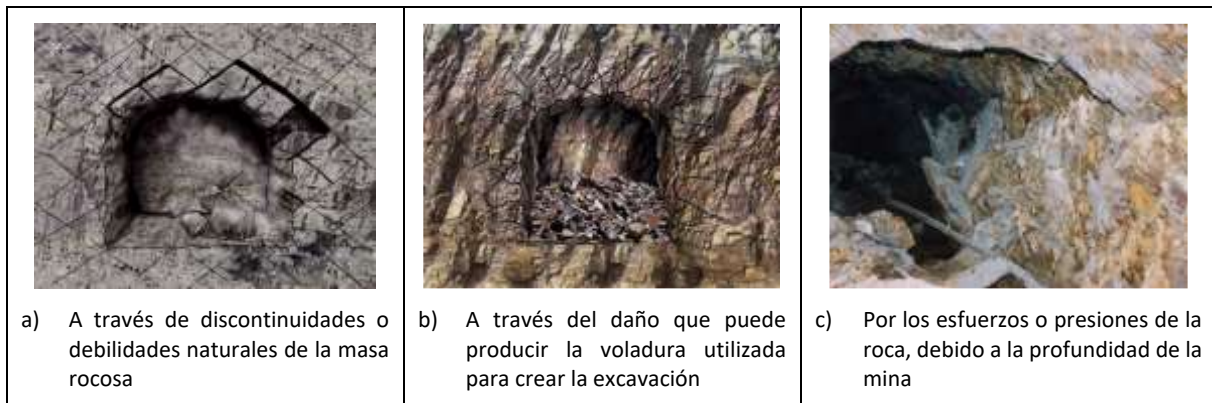


Figura 2.6 Condiciones para la creación de rocas sueltas en excavaciones subterráneas

Estas a su vez están influenciadas por otros factores tales como:

- La presencia de agua
- La forma, tamaño y orientación de las excavaciones
- El esquema y secuencia de avance del minado
- Las estándares inadecuados de perforación y voladura

2.4.2.6 Implicaciones para las Fundaciones de Estructuras

Hay dos características distintivas de las fundaciones en roca. En primer lugar, la capacidad de la roca para soportar cargas mucho mayores que el suelo. En segundo lugar, la presencia de defectos en la roca que se traducen en que la resistencia del macizo rocoso es considerablemente menor que la de la roca intacta. La resistencia a la compresión de la roca puede variar desde menos de 5 MPa a más de 200 MPa y donde la roca es competente, cargas sustanciales pueden ser apoyadas en pequeñas zapatas corridas. Sin embargo, una sola discontinuidad con baja resistencia, orientada en una dirección particular, **puede provocar la falla por deslizamiento, de toda la fundación.**

La capacidad de la roca de tener una capacidad portante y una resistencia al corte es significativa, lo cual significa que hay muchos tipos de estructuras que se pueden construir más fácilmente en la roca que en el suelo. Ejemplos de tales estructuras son presas y puentes de arco que producen cargas inclinadas en las fundaciones, los anclajes de los puentes colgantes y otros anclajes de amarre que desarrollan las fuerzas que evitan el levantamiento. Algunas de estas condiciones de carga se ilustran en la Figura 2.7. Allí se muestra un pilar de un puente de arco. La carga en la zapata para el arco está inclinada a lo largo de la tangente al arco, mientras que las cargas en las columnas y los pilares son verticales; la capacidad de carga de estas zapatas depende principalmente de la resistencia y deformabilidad del macizo rocoso. La pared de soporte en la rampa de acceso al puente tiene anclajes con bulbo de amarre y la capacidad de carga de estos anclajes depende de la resistencia al corte, desarrollado en la interfaz de la roca-cemento en la zona de anclaje.

Si el material que forma las fundaciones del puente como se muestra en la Figura 2.5 fuera todo roca intacta, masiva y homogénea sus propiedades serían similares al concreto. Como consecuencia su diseño y la construcción de las fundaciones sería un asunto trivial, porque las cargas aplicadas por una estructura son generalmente mucho menores que la resistencia de la roca. Sin embargo, como se ha indicado la roca siempre tiene discontinuidades que pueden ir desde discontinuidades con superficies rugosas y sin relleno (que tienen una resistencia significativa al corte), a zonas de falla que contienen arcillas expansivas, con poca resistencia. La Figura 2.7 muestra cómo la estructura geológica puede afectar a la estabilidad de las fundaciones. En primer lugar, existe la posibilidad de colapso general de la fundación a lo largo de un plano de falla (aa) que pasa a lo largo de todo el talud, y a través de la roca intacta con una inclinación paralela a la cara del talud.

En segundo lugar, el colapso local (b) de la fundación de la columna vertical puede ocurrir por el deslizamiento de las discontinuidades con una inclinación que aflora en la cara del talud. Y en tercer lugar, colapso de la fundación del arco puede ocurrir como resultado de la compresión de materiales débiles en la zona de la falla (c), y en cuarto lugar, roca de mala

calidad en la zona de anclajes podría resultar en la falla de los anclajes y en la pérdida de apoyo del pilar (d).

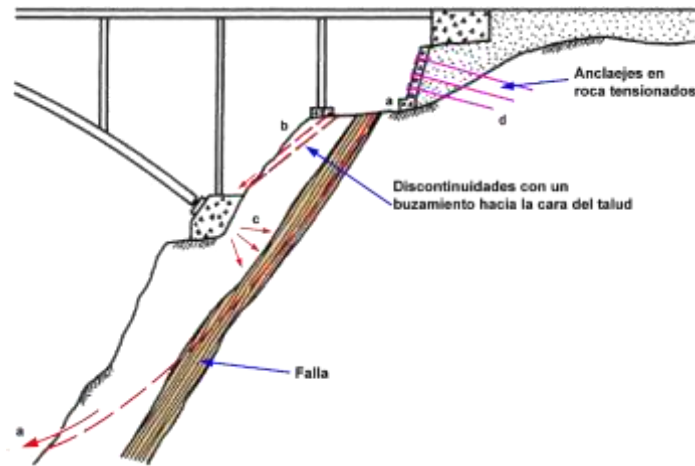


Figura 2.7 Estabilidad de las fundaciones de un puente: (a-a) Falla global del talud debido a la presencia de zona de falla con buzamiento desfavorable; (b) Falla de corte de la fundación, debido al buzamiento de las discontinuidades hacia la cara del talud; (c) Movimiento de la fundación del arco, debido a la compresión de una roca con un módulo bajo; (d) Muro de contención para contener la roca descompuesta en la fundación del tablero del puente. (modificado de Duncan, 1999)

2.4.2.7 Consideraciones finales

Los factores principales que intervienen en la reacción de una discontinuidad frente a un esfuerzo cortante son:

- Esfuerzos normales al plano de corte
- Orientación y desplazamiento del corte
- Rugosidad de las superficies de contacto
- Grado de alteración y resistencia de las caras de la discontinuidad
- Espesor y tipo de relleno
- Circulación de agua y grado de saturación del relleno
- Velocidad del movimiento de corte
- Amplitud del desplazamiento de corte y la existencia de desplazamientos previos de corte

Visto lo anterior, es necesario, realizar un levantamiento de las discontinuidades que caracterizará el macizo rocoso, centrándose en los procesos y modelos geológicos, especialmente cuando se trate de roca expuesta después que las excavaciones se hayan realizado, recolectando todos los datos posibles para su posterior análisis e interpretación. El conflicto existente con la mayoría de las normas es que las recomendaciones son hechas a partir de una línea de levantamiento y del sesgo de las concentraciones de las orientaciones, en vez de realizar un análisis geológico global.

Para determinar la resistencia al corte, la primera opción es realizar ensayos en el campo o en el laboratorio. Sin embargo, debido a la carencia de tiempo o fondos se suele recurrir a otras soluciones como son los métodos empíricos, aproximados, con los que sólo se pueden obtener órdenes de magnitud.

Uno de los interrogantes que se pretenderá responder es cuál de estos criterios resulta ser el ideal, el más simple o el que ofrece una aplicación óptima en la determinación de la resistencia al corte de las discontinuidades. Por lo que, teniendo esto en cuenta, se procede a evaluar mediante comparaciones, la resistencia al corte de las discontinuidades al utilizar los distintos criterios antes indicadas.

Antes de pasar a la descripción de los criterios, se hace necesario presentar el criterio de "Hoek & Brown" debido a que representa un método sencillo, rápido y económico de determinación de resistencia al corte de macizos rocosos, válido en la determinación de la estabilidad de taludes. Esto no hace referencia directa al tema, ya que se tratarán únicamente las discontinuidades, pero resulta importante conocer este criterio debido a que recientemente (Serrano, Olalla, & Galindo, 2014) han encontrado que al trabajar la discontinuidad con Mohr Coulomb y con "Hoek & Brown" da como resultado el criterio de Barton. Este aspecto se tratará más adelante.

Por otra parte, se debe mencionar que para contrastar la resistencia al corte de las discontinuidades hay dos (2) clasificaciones de las discontinuidades, las cuales son: discontinuidades planas lisas o discontinuidades rugosas, las cuales se discuten a continuación.

2.5 Tipos de discontinuidades

Las investigaciones geológicas categorizan las discontinuidades de acuerdo a la manera como estas se formaron. Esta clasificación es muy útil en la mecánica de rocas ya que cada categoría tiene propiedades muy similares en cuanto a su resistencia la corte y dimensiones, que pueden ser empleadas como una revisión **inicial** de las condiciones de estabilidad del sitio. A continuación se presentan las definiciones de las discontinuidades utilizadas más frecuentemente:

- **Falla:** Un discontinuidad se observa un desplazamiento relativo de sus caras. Las fallas raramente se encuentran solas; normalmente estas ocurren como grupos paralelos o sub-paralelos a lo largo de las cuales el movimiento ha ocurrido en mayor o menor extensión.
- **Estratificación:** Esta es una superficie paralela al plano de depositación, la cual puede o no tener expresiones físicas. El origen de estas discontinuidades es la depositación de sedimentos mecánicos o químicos que corresponden a las rocas sedimentarias.
- **Foliación:** La foliación es la orientación en planos paralelos de los minerales o también el bandeamiento de minerales en las rocas metamórficas. Las rocas metamórficas son aquellas que se originan a partir de la transformación de los minerales que integran otras rocas preexistentes en la corteza terrestre, generalmente durante el proceso que se conoce como metamorfismo. Los agentes que intervienen en el metamorfismo son principalmente, la presión y la temperatura, los cuales actúan en las rocas en estado sólido, pudiendo ser en este caso rocas ígneas, sedimentarias y otras rocas metamórficas. El metamorfismo es un proceso isoquímico, es decir, que no supone ningún cambio químico en la composición de las rocas implicadas, en caso contrario nos estaríamos en presencia de un proceso denominado metasomatismo. La discontinuidad principal encontrada en este tipo de roca es la foliación.
- **Diaclasas:** Es una discontinuidad donde no se observa un movimiento relativo de sus caras. En general, son discontinuidades que intersectan principalmente superficies tales como foliación, estratificación o rocas cristalinas (rocas ígneas). Un conjunto de diaclasa paralelas, es denominado "**familia de diaclasas**"; dos o mas intersecciones de familias de diaclasas producen un sistema de diaclasas; generalmente dos familias de discontinuidades

se interceptan aproximadamente en ángulos rectos entre sí y pueden identificarse como ortogonales.

- **Clivaje:** Son discontinuidades paralelas formadas en capas incompetentes de roca, en series de capas de acuerdo a su resistencia. En general el término implica que los planos de clivaje no son controlados por las partículas minerales en orientaciones paralelas.
- **Esquistosidad:** Esta es la foliación en los esquistos o en otras rocas cristalinas de grano grueso, debido al arreglo paralelo de los granos minerales en forma de hojas o tipo prismático. Un ejemplo de esto son las micas.
- **Discontinuidades por relajación de esfuerzos,** son resultado de la erosión de los materiales de roca y suelo degradado.
- **Discontinuidades por tracción,** son el resultado del enfriamiento y la cristalización de la roca ígnea.
- **Discontinuidades por corte,** es el resultado de fallas y esfuerzos de corte en el macizo rocoso, que se generan como resultado el movimiento tectónico.

Estas descripciones de las distintas categorías de discontinuidades han sido bien establecidas en la ingeniería práctica y sus propiedades pueden ser anticipadas de acuerdo a la categoría. Por ejemplo, las fallas son las estructuras mayores que generalmente contienen material de relleno tales como brecha de falla (roca triturada) y arcilla de relleno, mientras que las diaclasas son mucho más pequeñas que las fallas y estas pueden estar rellenas de algo de material cohesivo o encontrarse totalmente limpias.

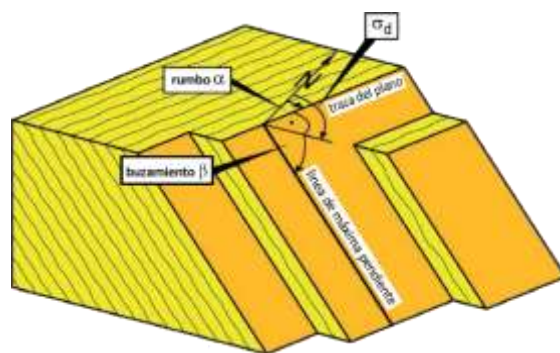
2.6 Descripción de las Discontinuidades

Las discontinuidades generalmente se presentan como grupos de familias con una o más direcciones paralelas. El ensamblaje de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso es llamado "Sistema de Discontinuidades". Las discontinuidades individualmente se caracterizan por parámetros que describen su orientación, apariencia y persistencia.

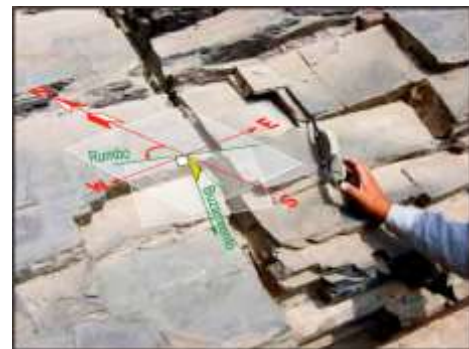
2.6.1 Orientación

La orientación de un plano de discontinuidad en relación a otros planos de discontinuidad y la dirección de la fuerza perturbadora determinará si partes de un macizo rocoso tienen

posibilidad de deslizarse. La discontinuidad tendrá una orientación espacial bien definida por dos ángulos (Figura 2.8). Estos son llamados rumbo α , el cual es ángulo forma la traza del plano con la horizontal y medida desde el norte en sentido horario. También se puede emplear el azimuth α_d para medir el plano. Es la proyección de la línea de máxima pendiente en el plano horizontal y es el ángulo que forma esta línea con el norte y se mide en sentido horario, además del buzamiento o inclinación β es el ángulo formado por la línea de máxima pendiente del plano con el plano horizontal.



(Wittke, 1990)



(SNMPE, 2004)

Figura 2.8 Orientación de discontinuidades

2.6.2 Apariencia

La apariencia de las discontinuidades está significativamente controlada por las características de la superficie, las cuales son de particular importancia en la estimación de la resistencia al corte. Los perfiles de las superficies son cualitativamente descritos como “**escalonada**”, “**ondulada**” y “**plana**” y a menor escala son clasificadas en “**rugosa**”, “**suave**” y “**pulida**” (ISRM, 2007). A gran escala los perfiles que son “**escalonados**” y “**ondulados**”, son denominados escalonados. Las discontinuidades son referidas como espejos cuando su superficie es muy suave en al menos una dirección, debido a su desplazamiento de corte relativo (Figura 2.9).

Mas aún, las discontinuidades pueden ser abiertas o cerradas y pueden contener material de relleno y vetas minerales como cuarzo o calcita o pueden tener meteorización.

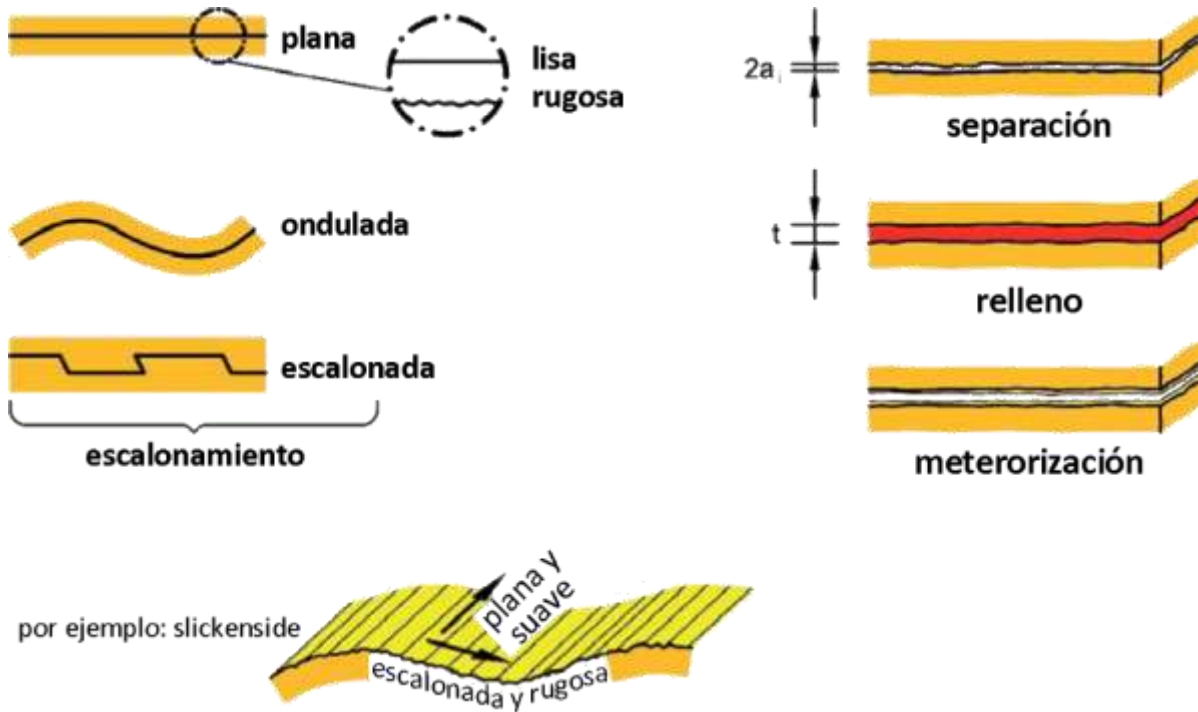


Figura 2.9 Descripción de la apariencia de las discontinuidades

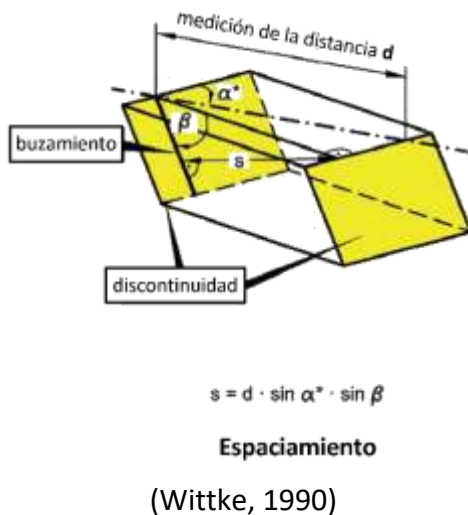
2.6.3 Espaciamiento

El espaciamiento es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes de las discontinuidades. Es una medida de la proximidad de las discontinuidades en una familia específica y afectará a la resistencia al corte de una masa de roca. Determina el tamaño de los bloques de roca intacta. Cuanto menos espaciado tengan, los bloques serán más pequeños y cuanto más espaciado tengan, los bloques serán más grandes. El espaciamiento s se define como la **menor distancia entre las caras** de una familia de discontinuidades. Cuando la dirección de medición no está perpendicularmente a la correspondiente familia de discontinuidades desde dos discontinuidades se puede calcular de la siguiente manera:

$$s = d \cdot \sin \alpha^* \cdot \sin \beta \quad (2.1)$$

donde d es la medición de la distancia de separación de ambas discontinuidades, α^* es el ángulo del rumbo de las discontinuidades y la dirección del ángulo de medición, y β es la inclinación de las discontinuidades (Figura 2.10, izquierda).

El valor recíproco del espaciamiento de las discontinuidades fue definido por Müller (1974) y citado por (Wittke, 2014) como la “**densidad de discontinuidades**” o “**número de intensidades**” de una familia de discontinuidades.



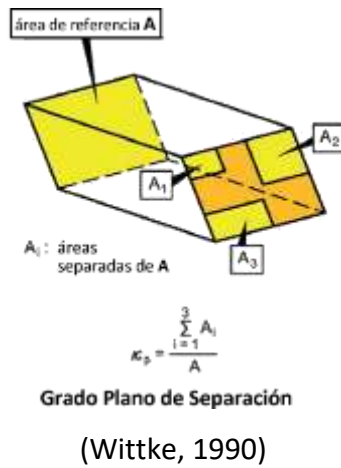
(SNMPE, 2004)

Figura 2.10 Espaciamiento de las discontinuidades

2.6.4 Persistencia

La persistencia de las discontinuidades es frecuentemente interrumpida por puentes de roca, o termina con otra discontinuidad. Tales discontinuidades son referidas en la literatura como discontinuidades “**impersistentes**” o “**intermitentes**”. En este trabajo se denominaran “**no-persistentes**”. La persistencia se puede definir también como la extensión en área o tamaño de una discontinuidad. Cuanto menor sea la persistencia, la masa rocosa será más estable y cuanto mayor sea ésta, será menos estable.

Una medición del grado de persistencia de las discontinuidades, se denominado, “**grado plano de separación**”. De acuerdo a Pacher (1959) citado por (Wittke, 2014), se definió el grado plano de separación k_p , como la suma de las separaciones de áreas de roca A_i dividida por un área de referencia A (Figura 2.11).



(SNMPE, 2004)

Figura 2.11 Persistencia de las discontinuidades

$$\kappa_p = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A} \tag{2.2}$$

κ_p es un parámetro de importancia para la estimación de la resistencia al corte de las discontinuidades “no-persistentes”

De manera similar, Müller (1974) citado por (Wittke, 2014), define el “grado lineal de separación” κ_l como la medición de la persistencia de las discontinuidades en un afloramiento bidimensional de la roca. Así:

$$\kappa_l = \frac{\sum_{i=1}^n \ell_i}{\ell} \tag{2.3}$$

donde ℓ es la longitud de referencia a lo largo de la traza de la discontinuidad y ℓ_i son las secciones separadas de ℓ , también denominadas “longitud de la traza”.

2.6.5 Rugosidad

La rugosidad puede ser descrita en términos de (Figura 2.12), como se resume a continuación:

- I. Asperezas (rugosidad a pequeña escala)
- II. Grandes protuberancias (rugosidad intermedia)
- III. Ondulaciones o superficies aplanadas (rugosidad a gran escala).

Cuanto menor rugosidad tenga una discontinuidad, la masa rocosa será menos competente y cuanto mayor sea ésta, la masa rocosa será más competente.

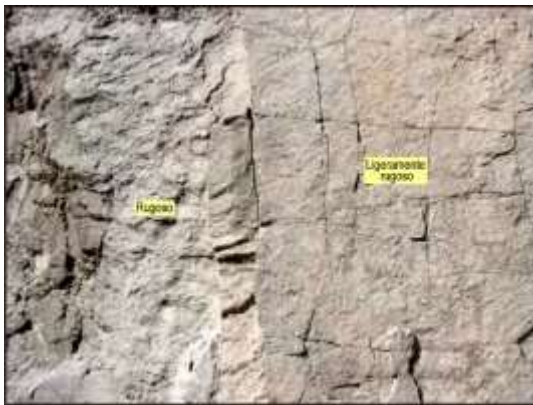


Figura 2.12 Rugosidad de una discontinuidad



Figura 2.13 Apertura de una discontinuidad

2.6.6 Apertura

La apertura es la separación entre las paredes rocosas de una discontinuidad o el grado de espacio abierto que ésta presenta. A menor apertura, las condiciones de la masa rocosa serán mejores y a mayor apertura, las condiciones serán más desfavorables (Figura 2.13)

2.6.7 Relleno de las discontinuidades

El relleno de las discontinuidades corresponde a los materiales que se encuentran **dentro** de la discontinuidad. Cuando los materiales son suaves, la masa rocosa es menos competente y cuando éstos son más duros, ésta es más competente. Cuando el material de relleno son productos de alteración puede tener un efecto negativo en la resistencia al corte de las discontinuidades. (Figura 2.14)



Figura 2.14 Relleno en discontinuidades

2.6.8 Dureza

La dureza de las discontinuidades se determina por el tipo de pared de la roca o el grado de alteración de la pared conjunta de la discontinuidad.

- **Discontinuidades meteorizadas o rellenas:** tendrán menor resistencia al deslizamiento de las superficies duras e inalteradas de la discontinuidad.
- **Ondulamiento:** aportan una mayor contribución a la resistencia al corte sobre grandes extensiones (áreas), como fundaciones de presas.
- **Presencia de agua sobre la superficie de las discontinuidades:** tiene una influencia en el comportamiento mecánico de la superficie de la discontinuidad. La presencia de agua y agua bajo presión normalmente reducen la resistencia al corte.

A continuación se presentarán las características que definen la discontinuidad en el macizo rocoso (Figura 2.15) y (Figura 2.16). Se incluye la representación espacial de los sistemas de discontinuidades.

2.6.9 La meteorización y alteración

Entre los procesos geológicos que más influyen en las condiciones de resistencia de la roca y que están presentes en todos los yacimientos metálicos, hay dos factores importantes: la meteorización y la alteración.



Figura 2.15 Esquema de las propiedades de las discontinuidades



Figura 2.16 Representación espacial de tres sistemas de discontinuidades

2.6.9.1 Meteorización

Denominada también intemperización, está relacionada con la modificación que sufre la superficie de la roca o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos. El grado de la meteorización dependerá de las condiciones climatológicas, morfológicas y la composición de la masa rocosa. La meteorización se divide en meteorización física, química y biológica (Figura 2.17).

- **Meteorización física**, como consecuencia de ésta, la apertura de las discontinuidades aumenta o pueden formarse nuevas fracturas por el relajamiento de la roca.
- **Meteorización química**, origina la decoloración de la roca hasta la descomposición de la misma.
- **Meteorización biológica**, está regida por la presencia y actividad de los seres vivos.



Figura 2.17 Masa Rocosa Meteorizada

2.6.9.2 Influencia del relleno y la meteorización

Si el espesor del relleno es más del 25-50% de la amplitud de las asperezas, habrá poca o ningún contacto de roca con roca (Duncan C, 1999). En este caso, la resistencia al corte del material de relleno domina el comportamiento de resistencia al corte de la discontinuidad. Por otro lado, si las paredes de discontinuidad son meteorizadas y profundas (penetración) donde la meteorización de la pared es mayor de 1 mm, que con niveles de esfuerzos normales efectivos bajos, la zona meteorizada puede continuar teniendo el control de la resistencia al corte luego de superar la resistencia pico, incluso para desplazamientos hasta alcanzar la resistencia residual (Barton & Choubey, 1977).

2.6.9.3 Alteración

La alteración de la roca o más propiamente dicha, alteración hidrotermal, se produce por la ascensión de flúidos o gases magmáticos a altas temperaturas a través de fracturas o zonas de falla. Este fenómeno afecta a los rellenos de las zonas de falla y sus cajas, originando reemplazamientos y rellenos, que modifican las condiciones del macizo rocoso en los cuales se emplazan. Algunos tipos de alteración, como la silicificación y en menor grado la calcificación, **mejoran** las características de la masa rocosa, incluyendo las zonas de falla. Otros, como la propilitización, disminuyen levemente las condiciones debido a la presencia de cloritas en las paredes de las fracturas. La sericitización y la argilitización (aumento de minerales

arcillosos) son las alteraciones más **desfavorables** para los macizos rocosos donde se emplazan.

2.6.10 Caracterización del Macizo Rocosó

Para evaluar el macizo rocoso, hay necesidad de observar en él las diferentes propiedades de las discontinuidades. A partir de estas observaciones se podrán obtener conclusiones sobre las condiciones geomecánicas del macizo rocoso.

Debido a la variación de las características del macizo rocoso, el ingeniero deberá realizar de forma permanente una evaluación de las condiciones geomecánicas, conforme avanzan las labores, tanto en desarrollo como en explotación, utilizando en este trabajo como una herramienta de clasificación de la masa rocosa.

En situaciones especiales, el ingeniero deberá realizar un levantamiento sistemático de las discontinuidades, denominado levantamiento geomecánico, utilizando métodos como el “registro lineal”, para lo cual debe extender una cinta métrica en la pared rocosa e ir registrando todos los datos referidos a las propiedades de las discontinuidades, teniendo cuidado de no incluir en ellos las fracturas producidas por la voladura. Los datos se irán registrando en formatos elaborados para este fin, luego serán procesados y presentados en los planos de las labores mineras.

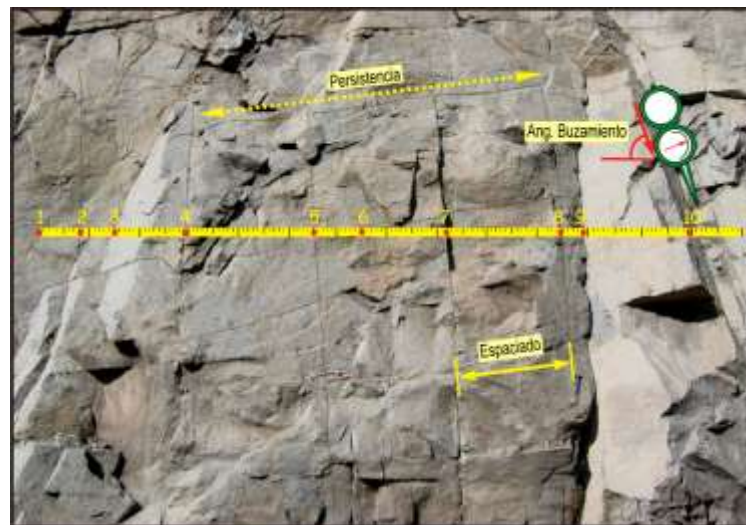


Figura 2.18 Levantamiento Geológico

2.7 Definición de Términos

Es conveniente presentar las definiciones de algunos términos, ya que es necesario tener el conocimiento de los mismos para una mejor comprensión del resto del informe.

A continuación se presentan las siguientes definiciones:

2.7.1 Dilatancia:

- Para Maksimovic (1996), la dilatancia representa *“el mínimo camino de energía entre deslizamiento y corte”*, la cual es un componente geométrico que depende de la rugosidad de la roca y que disminuye a medida que aumenta el nivel de esfuerzo normal.
- Cristescu (1982), define la dilatancia como *“una propiedad mecánica de las rocas que se manifiesta con presiones de confinamiento bajas, aumentando su efecto con la deformación principal en la fase previa a la rotura”*.
- Ayala Carcedo, y otros, (1987), se refieren a la dilatancia como *“la expansión o aumento de volumen que se produce en las juntas de la roca cuando comienza a producirse un deslizamiento a lo largo de las mismas”*.
- Craig, (2004), define la dilatancia como:

“Una propiedad de los materiales utilizada frecuentemente para describir el incremento en volumen de un material granular frente a un esfuerzo de corte. Al aplicar un alto confinamiento sobre materiales granulares se puede observar una alteración en su comportamiento, donde a mayor presión se vuelven netamente contractivos, en régimen de altos esfuerzos también puede dar lugar a la ruptura de fragmentos generando así una disminución en la distancia del material.”

El índice o razón de dilatancia se representa comúnmente a través del ángulo de dilatancia (ψ) como:

$$\psi = \tan^{-1}(\delta\varepsilon_v / \delta\gamma) \quad (2.4)$$

donde, $\delta\varepsilon_v$ representa la deformación volumétrica y $\delta\gamma$ representa la deformación de corte.

La dilatancia se obtiene mediante la realización de un ensayo de corte directo. En el mismo se prepara una probeta con el material granular a la cual se le aplica un esfuerzo normal constante, mientras se induce un plano de falla aplicando una fuerza de corte.

Esta definición se puede aplicar de manera análoga a las rocas, utilizando como la definición de dilatancia la variación del volumen (incremento o disminución) de la roca intacta, cuando se aplican esfuerzos tangenciales y ocurre cuando la resistencia pico es excedida. Por lo tanto, el ángulo de dilatancia tiene una influencia marcada en las deformaciones viscoelásticas y también en los esfuerzos, si la deformación volumétrica es confinada.

Esto puede ser entendido muy bien en la Figura 2.19:

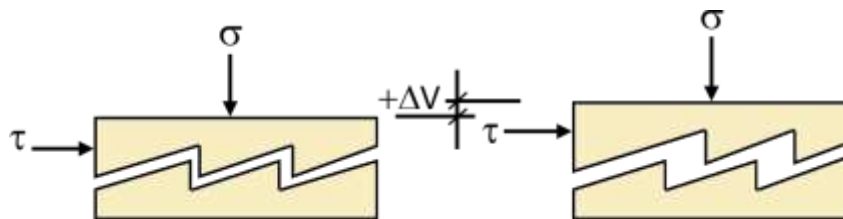


Figura 2.19 Definición de dilatancia.

Se tiene una discontinuidad sobre la cual actúa un esfuerzo normal y se somete a un esfuerzo de corte τ . Por la morfología de la discontinuidad, la cara superior tiende a desplazarse hacia arriba, provocando un cambio de volumen ΔV , y esto provoca un deslizamiento de las caras de la discontinuidad. Al ángulo de este deslizamiento se le llama ψ o ángulo de dilatancia.

Se define el ángulo de dilatancia,

$$d_n = \arctan\left(\frac{\delta_v}{\delta_h}\right) \quad (2.5)$$

De esta manera, el esfuerzo de corte máximo que puede resistir la roca se obtiene de la siguiente expresión:

$$\tau = \sigma \tan(\phi + \psi) \quad (2.6)$$

donde ϕ es el ángulo de fricción (a obtenerse mediante ensayos experimentales).

Diversos autores han observado que la dilatación máxima, o ángulo de dilatación pico, suele coincidir con el instante en que se produce el esfuerzo de corte pico. Sin embargo, en las primeras fases de la realización de un ensayo de corte directo, sobre todo en aquellos casos que se realizan a esfuerzos normales elevados, el desplazamiento vertical y por lo tanto la dilatación, resultan negativos.

2.7.2 Cabalgamiento

También denominado “*falla de cabalgamiento*” es un tipo de falla inversa, o sea una rotura en la corteza de la Tierra a través de la cual se ha producido un desplazamiento relativo, en el que las rocas de posición estratigráfica inferior son empujadas hacia arriba, por encima de los estratos más recientes. Las fallas de cabalgamiento son el resultado de fuerzas de compresión.

2.7.3 Imbricación

Superposición parcial de objetos iguales, imitando la disposición de las escamas en los peces.

2.7.4 Esfuerzo aparente

Es el esfuerzo nominal, que corresponde a la carga externa aplicada por unidad de área. Esta se calcula dividiendo la carga externa aplicada por el área nominal.

2.7.5 Asperidad

- Calidad — de la rugosidad de una superficie.
- Característica — la función de irregularidad de la superficie que va desde afilada o angular a redondeadas u ondulado.
- Asperidades — colección de irregularidades de la superficie que conforman la superficie de rugosidad

2.7.6 Discontinuidad

- Cambio abrupto, interrupción o ruptura de la integridad o las propiedades físicas de la roca, como el plano de la estratificación, fractura, hendidura, grieta, discontinuidad o falla.

- La discontinuidad con puentes de roca, consiste de superficies opuestas de roca, separadas por espacios abiertos o rellenos. Las discontinuidades cerradas, consisten en superficies de roca donde no existe separación y son continuos, pueden considerarse como una superficie de discontinuidad y se considera como una única discontinuidad.
- Una discontinuidad son dos superficies de roca opuestas que pueden ser planas o no planares.

2.7.7 Resistencia de la roca intacta

Es la resistencia pico al corte de la roca intacta (en unidades de esfuerzo) de un espécimen de roca intaca o de una muestra de contiene una discontinuidad totalmente cerrada.

2.7.8 Resistencia al corte residual

Es el esfuerzo de corte, correspondiente a un esfuerzo normal específico, para el cual el esfuerzo de corte se mantiene esencialmente constante con el incremento del desplazamiento de corte.

2.7.9 Área nominal

Es el área obtenida por la medición o cálculo de la sección transversal del plano de corte. Esta se calcula después que la sección transversal relevante ha sido determinada.

2.7.10 Rigidez al corte

Representa la resistencia del espécimen a los desplazamientos de corte bajo una fuerza de corte aplicada antes de alcanzar la resistencia pico al corte. Esta se calcula dividiendo el esfuerzo de corte aparente entre el desplazamiento de corte (horizontal) (pendiente de la curva antes de alcanzar el esfuerzo pico de corte).

2.7.11 Fricción al deslizamiento por esfuerzo de corte

Es la resistencia pico (en unidades de esfuerzo) de un espécimen de una roca que contiene una discontinuidad abierta.

2.8 Perspectivas en el Comportamiento de la Roca

El estado del arte de los equipos de ensayo permite nuevos tipos de procedimientos de ensayos para determinar los parámetros mecánicos de las discontinuidades y de la roca intacta. El alto desempeño de los sistemas servo-hidráulicos con tecnología de control digital, equipos de medición de deformaciones instalados en el espécimen de roca y modos de control programables, permiten **nuevos tipos de procedimientos** de ensayos a ser realizados, el cual se diseña para la solución de un problema específico.

Los ensayos de laboratorio de mecánica de rocas, contribuyen a la comprensión del comportamiento del macizo rocoso. El conocimiento de las propiedades mecánicas de especímenes individuales de roca es una representación estadística muy pequeña del comportamiento global del macizo rocoso.

La interpretación correcta de los resultados de los ensayos depende de la cantidad y especialmente de la calidad de los ensayos de laboratorio, con el propósito de obtener la mayor cantidad posible de las propiedades de la roca de cada tipo de ensayo o grupo de ensayos. A fin de describir el comportamiento de la roca y el macizo rocoso, se utilizarán varios parámetros. Definir los parámetros que se deben obtener y como obtener estos parámetros es una de las preguntas más importantes de la ingeniería de rocas y se describe a continuación.

Las condiciones de contorno relevantes para algunos proyectos deben ser analizadas en la fase de investigación. El análisis de tales materiales complejos requieren cooperación entre de Ingenieros de minas, geólogos, geofísicos, ingenieros y expertos en otros campos. Si se desarrolla una visión realística entonces se pueden esperar resultados razonables. Muchos parámetros pueden ser medidos y calculados, pero siempre son limitados. La determinación de estos parámetros con los ensayos de laboratorio es una parte esencial del proceso de caracterización. Debido a que la roca y el macizo rocoso son no homogéneos, se tratarán amplias variaciones de los valores de los parámetros para determinar cuáles son los parámetros apropiados para la roca intacta y el macizo rocoso que permitan representar en el laboratorio el comportamiento de la situación real en estudio. Un sistema de Base de Datos y

análisis estadístico se requiere para agrupar los ensayos de laboratorio y hacerlos disponibles para los profesionales de la ingeniería.

El trabajo en equipo entre los geólogos e ingenieros, el laboratorio y diseñadores es necesario para caracterizar adecuadamente situaciones geológicas complejas para propósitos de ingeniería. Las muestras para los ensayos en roca, que sean representativos del comportamiento del macizo rocoso, son extremadamente difíciles de obtener. Incluso la obtención de núcleos de perforación, que son adecuados para los ensayos de compresiones uniaxiales o triaxiales, a menudo no pueden ser utilizados debido a defectos de la muestra. Por lo tanto, esta selección sesgada de las muestras **puede tener una gran influencia en los resultados.**

Esto es especialmente cierto, para roca blanda o roca muy fracturada, donde los parámetros mecánicos son aún más importantes para las investigaciones de estabilidad. Poner cifras para el comportamiento del macizo rocoso y la roca intacta, siempre será un desafío, los procedimientos y análisis de los ensayos adecuados son el primer paso para una evaluación más realista.

2.9 Integración de los Procedimientos de Ensayo

La capacidad de aplicar diferentes trayectorias de esfuerzo y condiciones de contorno para una muestra dada o conjunto de muestras permite diferentes modos de falla a ser investigados en el laboratorio. Para determinar los parámetros apropiados que describen el comportamiento de las rocas, generalmente se realizan los siguientes ensayos:

- Ensayos de compresión no confinados y confinados
- Ensayos de corte directo
- Ensayo de tracción

2.9.1 Ensayos de compresión no confinados y confinados

El ensayo de compresión uniaxial es el ensayo más frecuente empleado en mecánica de rocas. Sin embargo, este ensayo solo evalúa las propiedades elásticas y un valor final a la falla obtenido a través de cada trayectoria de esfuerzo simple.

Con la realimentación controlada por computador es posible obtener diferentes trayectorias de esfuerzos mediante la variación asimétrica de la presión de confinamiento y la compresión axial de un cilindro de roca. El uso de controles automatizados mediante computador, permite realizar múltiples ciclos de carga sobre la misma muestra. Después de cada pico de carga para una presión de confinamiento, el esfuerzo desviador se reduce a cero y la muestra se carga hidrostáticamente al siguiente nivel de confinamiento. Así, la historia de esfuerzo progresivo de una sola muestra puede ser monitoreada en lugar de utilizar diferentes muestras (con diferentes microestructuras?) en cada estado de esfuerzo y permite utilizar la combinación de los resultados para estimar el comportamiento de esfuerzos progresivos de la roca "intacta".

Esto permite una evaluación más realista de la resistencia de la roca intacta, y por lo tanto del macizo rocoso, dando como resultado predicciones e interpretaciones realistas del comportamiento in-situel del macizo rocoso.

2.9.2 Ensayos de Corte Directo

No hay manera de describir un criterio de falla de los materiales sin sus parámetros de resistencia al corte. Sin embargo, la evolución de los métodos de ensayo y evaluación del corte o cizalla en la mecánica de rocas en gran parte han sido ignoradas. Por lo tanto, para investigar el comportamiento y las características de la falla por corte de las discontinuidades en la roca y la roca intacta, se deben utilizar protocolos automatizados de ejecución para realizar los ensayos, con diferentes condiciones de contorno. Esto permite la ejecución de ensayos modificados de corte, que simulen un comportamiento específico. Por ejemplo, ensayos con rigidez controlada se pueden utilizar para evaluar la resistencia al corte final para diferentes condiciones de contorno, y también permiten el reconocimiento de los diferentes modos de falla que ocurren durante el corte. Este método de ensayo, es el método de ensayo más

apropiado para evaluar el comportamiento de cizalla de materiales, produciendo el corte y la rigidez normal, para determinar el potencial de dilatación, la cohesión y los ángulos de fricción iniciales y finales.

Se pueden realizar ensayos de corte bajo estados multi-falla (bajo cargas normales constantes), así como varias combinaciones de procedimientos de control de los ensayos para ejecutarlos sobre una sola muestra, eliminando los efectos de la variabilidad de la muestra en la envolvente de rotura o falla.

2.9.3 Ensayo de Tracción

La preparación y la realización de ensayos para una evaluación directa de la resistencia a la tracción es difícil de realizar y no se utiliza generalmente. Se utilizan en su lugar muchas pruebas de índice, como la el ensayo de tracción indirecta o brasilero, ensayos de flexión de tres o cuatro puntos, etc. La correlación entre los resultados de los ensayos y la resistencia a la tracción directa **no es clara**, ya que a menudo diferentes trayectorias de tensiones son responsables de la falla de la roca. Usando muestras de anillos de roca, se puede realizar el ensayo poniendo a prueba la resistencia a la tracción directa de una muestra utilizando la carga de compresión.

Esto permite una correlación directa entre las pruebas índice y los valores de tracción directa, que permitan generar correlaciones específicas del tipo de roca para un proyecto determinado. Además, se pueden utilizar muestras con diferentes geometrías para evaluar los diferentes modos de fragilidad a la fractura y determinar si el criterio de Griffith es necesario utilizarlo para un problema dado.

3 Resistencia al Corte de las Discontinuidades

3.1 Introducción **Equation Section (Next)**

Las propiedades mecánicas de la roca son uno de los parámetros más importantes que se utilizan en el análisis y diseño de cualquier estructura ingenieril en roca. Si un levantamiento geológico identifica discontinuidades en el macizo rocoso, del tipo de falla que pueda ocurrir, será necesario determinar el ángulo de fricción y la cohesión de la superficie de la discontinuidad, con el fin de realizar los análisis de estabilidad y diseño de los trabajos de mitigación, en caso que sea necesario.

La resistencia de un macizo rocoso es función de la resistencia de la roca intacta y de las discontinuidades presentes en este. Según su grado de fracturamiento, el comportamiento y las propiedades de resistencia de un macizo rocoso esas características generalmente se definen por los siguientes parámetros:

- Resistencia de la roca intacta (isótropa o anisótropa)
- Resistencia al corte de una familia de discontinuidad o familias, de acuerdo a la escala del problema a analizar (familias representativas del macizo rocoso)
- Resistencia global de un sistema de bloques rocosos con comportamiento isótropo

La respuesta de una roca a una fuerza impuesta muestra un efecto pronunciado de tamaño o volumen cargado, dependiendo este efecto de la naturaleza discontinua del macizo rocoso. Experimentalmente, muestras geoméricamente homotéticas **de un mismo material**, sometidas a sollicitaciones de carga semejantes, exhiben características que no son constantes sino una función del tamaño de la muestra. El efecto de estas características cambia con el tamaño de la muestras y se considera un efecto escala.

Este efecto escala se puede apreciar observando la variación el comportamiento de la la roca intacta, a medida que el número de discontinuidades aumenta wn la misma muetras de roca sujeta al mismo estado de carga, es decir el comporamiento de la roca extrapolado al macizo rocoso, es donde el efecto de escala se vuelve crítico, para evaluar la estabilidad de los

diferentes trabajos de ingeniería: por ejemplo, en la excavación minera subterránea (Brady & Brown, 2005) y un talud de una mina a cielo abierto (Wyllie & Mah, 2004). La Figura 3.1 muestra cómo la **misma masa de roca** puede ser estudiada como una roca isotrópica intacta, pero debe ser considerada como una masa de roca altamente anisotrópica en el que la ruptura es controlada por uno o dos discontinuidades para la condición que se está estudiando como una masa de roca isotrópica fuertemente fracturada (Hoek & Brown, 1997), para los dos casos mencionados.

Analizando la Figura 3.1 se verifica que a una escala menor que el espaciamiento entre las discontinuidades, se tienen bloques de roca intacta, estando controlado el comportamiento únicamente por la resistencia de la roca. Por ejemplo, en un proceso de perforación, en general, estarán presente las propiedades de resistencia de la roca intacta. Al aumentar la escala, la superficie de deslizamiento potencial se puede producir por uno o un pequeño número de discontinuidades, siendo controlado el deslizamiento por el comportamiento de las discontinuidades que allí son de importancia. Ejemplos de este tipo de problema incluyen los bloques de roca de equilibrio formados por la intersección de tres o más discontinuidades en el techo o en la pared de una excavación (Brady & Brown, 2005), o cuando la altura de una superficie de trabajo es aproximadamente igual a la longitud de una discontinuidad y la estabilidad sólo es controlada por ella (Wyllie & Mah, 2004). Dentro del macizo rocoso **a mayor escala** puede ser considerado como un conjunto de bloques discretos y su desempeño en la periferia de una excavación subterránea estará controlada por las propiedades de las discontinuidades dispersas y su comportamiento condicionado por la presencia de estos bloques (Brady & Brown, 2005). A una mayor escala, a veces es necesario tener en cuenta la respuesta general del macizo rocoso de roca fracturada, en el cual la separación es en pequeñas discontinuidades teniendo en cuenta la escala del dominio del problema. Por ejemplo, las dimensiones generales de una talud pueden ser mayores que la longitud de las discontinuidades, así que no hay rotura de la superficie contenida en la masa de roca fracturada (Wyllie & Mah, 2004).

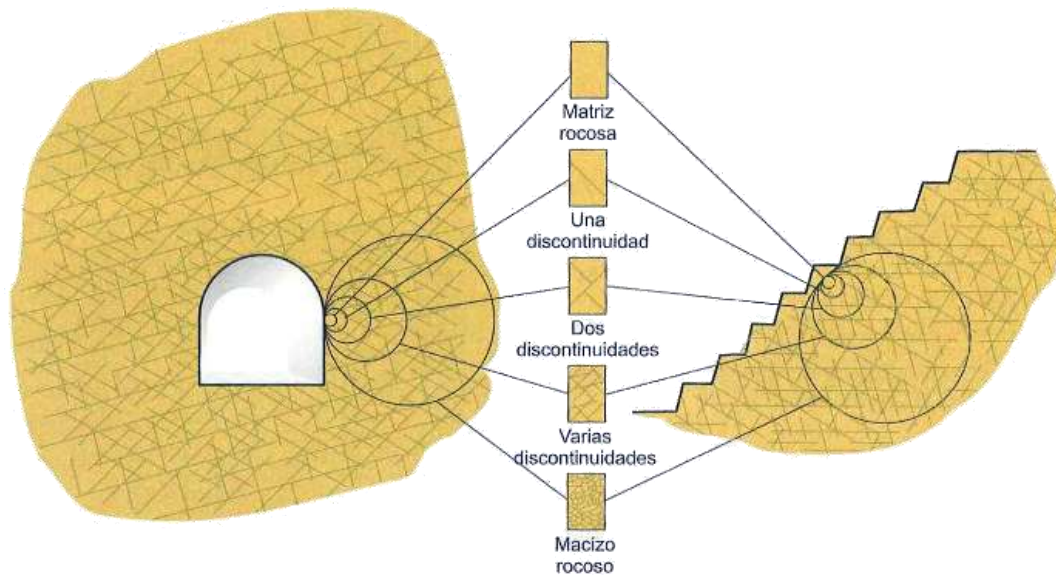


Figura 3.1 Transición de una roca intacta para un macizo rocoso fracturado con el aumento del tamaño de la muestra en una excavación subterránea y en una mina a cielo abierto (Hoek & Brown, 1997 modificado González de Vallejo et. Al , 2010).

Según (Wyllie & Mah, 2004), la selección de un valor adecuado para la resistencia al corte depende tanto de la magnitud relativa entre la superficie de deslizamiento y la geología estructural del macizo rocoso. Es decir, el modelo a aplicar en un caso determinado depende principalmente del **tamaño de la obra** en relación con discontinuidades, su espaciado, el estado de esfuerzo *in-situ* y las orientaciones de estas discontinuidades (Brady & Brown, 2005). En la Figura 3.2, se muestra el modelo del ensayo de corte, observándose el comportamiento general de las rocas durante la ejecución del ensayo.

Las características geométricas y la rugosidad de la superficie de las discontinuidades de resistencia son, por tanto, "fuentes potenciales de efecto de escala" (Bandis, 1981 citados (Graça, 1985)).

Establecidos los elementos que controlan la resistencia del macizo rocoso, en ambos casos (discontinuidades o masa de roca), su caracterización puede ser efectuada por los siguientes parámetros:

- **Resistencia al corte del macizo rocoso:** Se puede determinar por métodos empíricos que implican retro-análisis, requiriendo información sobre la resistencia de la roca intacta, del tipo de roca y el grado de fracturación (Wyllie & Mah, 2004).
- **La resistencia al cizallamiento de las discontinuidades:** Se puede determinar experimentalmente en un laboratorio o en el campo. Como se describirá en detalle en las secciones siguientes, los ensayos de laboratorio de corte o deslizamiento en diaclasas resulta ser adecuado para el estudio de la fricción en la mecánica de rocas (Grasselli, 2001).
- **Con respecto a las propiedades mecánicas de la roca intacta,** estas pueden ser determinadas en el laboratorio, empleando los ensayos de compresión sin confinar, ensayos triaxiales y ensayo de tracción (Brasileiro), y utilizar el criterio de resistencia de Hoek y Brown (Hoek, Carranza-Torres, & Corkum, 2002).

En terraplenes, fundaciones y excavaciones subterráneas a poca profundidad, el colapso es a menudo controlado por la presencia de discontinuidades. Como se señaló anteriormente, la intersección de estas características estructurales podrá liberar bloques o cuñas que pueden caer o deslizarse desde la superficie de la excavación. La falla de la roca intacta rara vez es un problema en los casos en que la deformación y las fallas son causadas por el deslizamiento a lo largo superficies individuales de discontinuidad o lo largo de las superficies de intersección ó planos de debilidad. Los planos de separación, rotación de bloques y cuñas desempeñan, en este caso, un papel fundamental en el proceso de deformación y falla (Hoek E, 2007). A poca profundidad, donde los esfuerzos se reducen, por lo general el comportamiento de masas, lo controla principalmente el deslizamiento de las discontinuidades. Por lo tanto, para el análisis de la estabilidad de los sistemas de bloques de roca, es necesario comprender los factores que controlan la resistencia al corte de las discontinuidades que los separan (Hoek E, 2007), siendo importante distinguir, principalmente, si las discontinuidades están con o sin relleno (Hoek E, 2007).

Las discontinuidades rellenas constituyen un conjunto especial de problemas. Su resistencia al corte depende principalmente de las propiedades físicas y mineralógicas del material que separa las paredes de la discontinuidad (Barton & Choubey, 1977) (Grasselli, 2001). A su vez,

el comportamiento de la resistencia al corte de las discontinuidades depende también del nivel de esfuerzo normal efectivo que actúa sobre el plano de deslizamiento, las propiedades de las paredes de la discontinuidad, incluyendo el tipo de roca, el grado de rugosidad, el tamaño de la discontinuidad (efecto de escala), el grado de desgaste, la presencia de humedad y la presión del agua (Grasselli, 2001). El efecto de la rugosidad en la resistencia al corte es más pronunciada en situaciones en las que los esfuerzos normales efectivos son bajos y tiende a ser más importante que otros factores (Barton & Choubey, 1977).

El análisis de estabilidad, generalmente, supone que la roca se comporta como un material que sigue la teoría de Mohr-Coulomb, en que la resistencia al corte se expresa en términos de cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ). Los valores de estos dos parámetros de resistencia están estrechamente relacionados con las condiciones geológicas de cada sitio,: A continuación se discute su aplicación bajo tres condiciones diferentes. La Figura 3.2, presenta la envolvente de Mohr-Coulomb, que ilustra los posibles comportamientos de resistencia al corte para tres tipos de discontinuidades. La pendiente de la recta es el ángulo de fricción (ϕ) y la intersección con el eje de las ordenadas es la cohesión (c).

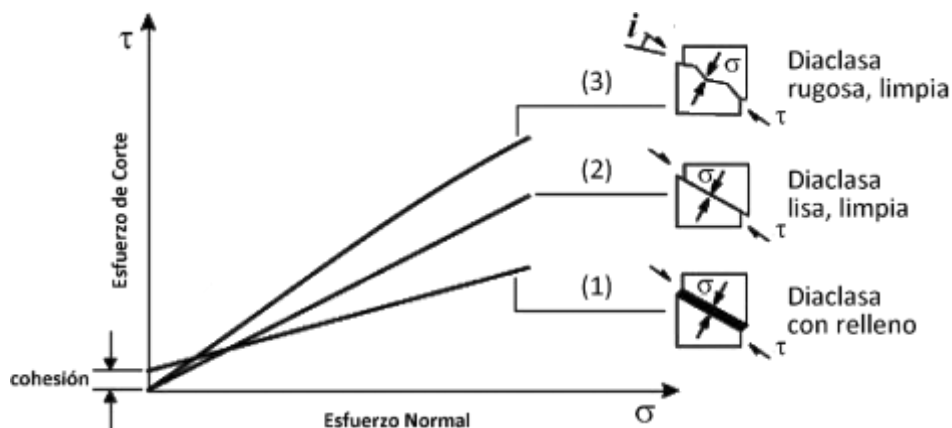


Figura 3.2 Relación entre el esfuerzo de corte y normal en una superficie de deslizamiento para tres tipos de discontinuidades en condiciones geológicas diferentes (Wyllie & Mah, 2004)

En la Figura 3.2 se observa:

- En el Caso (1), una discontinuidad con relleno, es necesario tener en cuenta la naturaleza del relleno. Si es una arcilla de mala calidad o brecha de falla, es probable que el ángulo

de fricción sea bajo, aunque puede haber cierta cohesión en el caso que el relleno de encuentre intacto. Si el relleno es un material más resistente, haciendo un sello con las paredes de la discontinuidad, entonces la cohesión puede ser significativa y deberá ser considerada para los análisis de estabilidad.

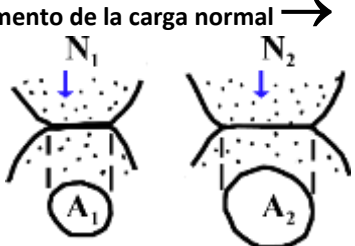

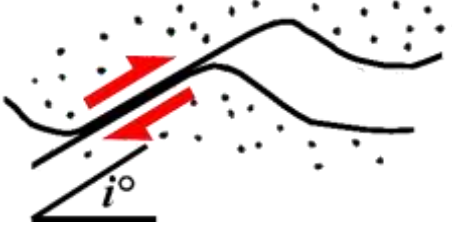

- En el Caso (2), se tiene una discontinuidad sin relleno y de paredes lisas, la cohesión es cero y el ángulo de fricción (ϕ_b) está relacionado con el tamaño de grano de la roca, siendo generalmente más bajo en las rocas de grano fino que en las rocas de grano grueso.
- En el Caso (3), se tiene una discontinuidad con superficies rugosas, la cohesión es cero y el ángulo de fricción está compuesto por dos componentes: el ángulo de fricción de la superficie de la roca (ϕ_b) y una componente (i) relacionada con la rugosidad (asperezas) de la superficie y la proporción de la resistencia de la roca y el esfuerzo normal aplicado. Con el aumento del esfuerzo normal, las asperezas progresivamente son alisadas y el ángulo de fricción total disminuye.

3.2 Origen Físico de la Resistencia al Corte

Hencher (1985), señala que los trabajos fundamentales del origen físico de la fricción en roca han sido estudiados por varios autores, los cuales señalan que las componentes de resistencia al corte se representan esquemáticamente en la Tabla 3.1. y se discuten someramente a continuación:

1. **Adherencia:** Es la resistencia a la fricción baja que tiene cualquier discontinuidad debido a la roca y es probable que sea derivada de las uniones químicas y físicas, que se forman continuamente y son rotas durante el corte o cizallamiento, sobre el área de contacto verdaderas tal como lo propuso Terzaghi en 1925, pero para las rocas [Boltmott et al., 1992 citado por (Hencher, 1995)] esta resistencia por fricción baja debe estar en el orden de los 10°. Ciertamente estos valores tan bajos pueden apropiados para superficies de rocas pulidas naturalmente.

Tabla 3.1 Factores que contribuyen a la resistencia a corte de las discontinuidades en la roca (Hencher, 1995)

<p>1. ADHESIÓN (bajo nivel de fricción) (fricción adicional)</p> <p>Incremento de la carga normal →</p> 	<p>Unión verdadera sobre las áreas de contacto</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proporcional al esfuerzo normal • No causa dilatancia (por definición) • No existe reducción de área con el desplazamiento • Igual comportamiento diferentes texturas de superficie y rugosidad
<p>2. BLOQUEO Y ARRASTRE</p> <p>Incremento de la carga normal →</p> 	<p>Componente de textura superficial</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proporcional al esfuerzo normal • No causa dilatancia • Generalmente disminuye con el desplazamiento debido al daño y producción de detritos • Se incrementa con una supercie de textura rugosa
<p>3. CABALGAMIENTO</p> 	<p>Trabajo debido a la dilatancia o compresión</p> <ul style="list-style-type: none"> • El deslizamiento hacia arriba indica un incremento de la resistencia medida y viceversa • Efecto puramente geométrico • Disminuye con el incremento de la carga normal y disminuye con la resistencia de las paredes de roca
<p>4. COHESIÓN</p> 	<p>Cizallamiento de los puentes de roca y asperidades bloqueadas</p> <ul style="list-style-type: none"> • No proporcional al esfuerzo normal • Independiente de la dilatancia • Perdida después de alcanzar la resistencia pico

2. **Bloqueo y Arrastre:** La resistencia a la fricción adicional se debe a la escala de la textura superficial generada de la interacción de asperidades, las cuales son deformadas y dañadas localmente durante el corte sin causar dilatancia de la discontinuidad (por definición. Hencher (1995), señala que en el caso de ensayos típicos en superficies con forma de diente de sierra se han medido ángulos de fricción del orden de los 30°, estimando que quizás 2/3

de la resistencia al corte se debe a la resistencia de la textura de la superficie y el proceso de deformación. En superficies con texturas superficiales más rugosas que son producidas por una sierra de diamante, donde no se han alcanzado morfologías planas, se pueden obtener resistencias mayores sin dilatación.

3. **Cabalgamiento:** En el caso de discontinuidades rugosas a una escala mayor, la resistencia al corte se obtiene del trabajo realizado por el cabalgamiento sobre las asperidades de mayor tamaño (dilatación) y puede ser cuantificable. Este trabajo también se realiza durante la deformación o destrucción de grandes asperidades, las cuales causan dilatación. De la experiencia de los ensayos en discontinuidades naturales, esta contribución a la resistencia al corte es esencialmente friccional (proporcional al esfuerzo normal) e inseparable de la componente indicada en el punto 2, ya descrito. Sin embargo, la interacción particular de grandes asperidades en cualquier situación será compleja y dependerá de la geometría (y por lo tanto de la escala) y de la resistencia relativa de la asperidad a un nivel de esfuerzo mayor, tal como lo ha comentado (Ladanyi & Archambault, 1970) y (Barton & Choubey, 1977).
4. **Cohesión:** La verdadera cohesión es el resultado del corte de los puentes de roca intacta o sección recementadas de discontinuidades. Para discontinuidades continuas, el entramamiento de las asperidades también genera una cohesión real, involucra el corte de las asperidades. El trabajo no se representa como ángulo equivalente de dilatación (como es el caso de la deformación y daño de las asperidades durante el cabalgamiento, como es señalado en el punto 3). No se hará referencia a discontinuidades con relleno.

En la práctica, existen dos etapas en la determinación de la resistencia al corte. En primer lugar, la fricción disponible a nivel de escala de la textura de la superficie que se determina por los factores 1 y 2 señalados. Esta depende del acabado y la mineralogía de las superficies de las caras naturales y pueden ser mayores o menores que para superficies tipo diente de sierra presentes en el macizo rocoso. En segundo lugar, la resistencia obtenida por la contribución de la interacción de rugosidad y la impersistencia a nivel de campo (factores 3 y 4 ya señalados).

3.3 Criterios de Resistencia al corte en discontinuidades: Estado del Arte

Las discontinuidades, planos de estratificación, fallas y otras fracturas planas recurrentes alteran radicalmente el comportamiento del macizo rocoso. Como las discontinuidades, en general, no se distribuyen aleatoriamente, su efecto es crear una anisotropía pronunciada en las propiedades de la masa de roca. En particular, la anisotropía de la resistencia. Por ejemplo, la resistencia de una fundación cargada de forma oblicua a la orientación de los planos de estratificación puede ser menos de la mitad de la resistencia cuando se aplica la carga de manera perpendicular o paralela a los planos de estratificación. Por otra parte, la anisotropía existe comúnmente en muchas rocas que tienen estructura continua, a causa de orientaciones preferentes de los granos minerales o antecedentes de esfuerzos direccionales. Por lo tanto, los macizos rocosos son generalmente anisotrópicos en las propiedades que afectan su comportamiento mecánico. En particular, las discontinuidades y debilidades planas hacen al macizo rocoso más débil, más deformable, y altamente anisotrópico en la resistencia, ya que reduce la resistencia al corte. Las discontinuidades también afectan el comportamiento hidráulico; por ejemplo, resultan en una mayor permeabilidad en direcciones paralelas a discontinuidades. Estos factores se combinan para crear una variedad de problemas potenciales.

Las fundaciones que descansan sobre rocas con discontinuidades pueden presentar asentamientos significativos debido al cerramiento de estas discontinuidades que se encuentran cercanas a la superficie, sometidas a cargas, incluso aún, si la roca es muy rígida. Las presas que yacen sobre rocas discontinuas están propensas a sufrir daños, si los bloques de roca se deslizan a lo largo de uno o más superficies de debilidad (Figura 3.3). Más de una rotura de una presa se ha atribuido a este mecanismo de falla. El movimiento de bloques de roca a lo largo de los planos individuales o múltiples de debilidad también es la causa de falla en los taludes en roca (Figura 3.3)



Foto de la Presa Malpasset, (DGPR/SRT/BARPI, 2008)

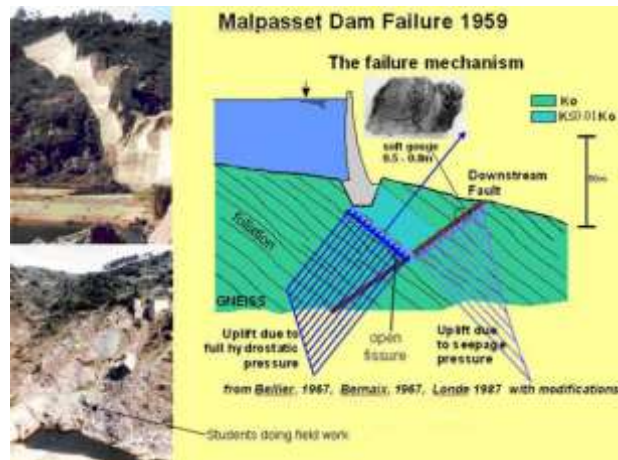


Diagrama de fuerzas debajo de la presa. Investigación del Profesor Paúl G. Marinos, extraída de www.geoengineer.org

Figura 3.3 Fotos de la Presa Malpasset, en Frejus, Francia después de la falla ocurrida en 1959. El movimiento de una cuña delimitada por discontinuidades en la roca causó el colapso de la presa de concreto



foto: Stefano Petri



foto: Rainer Michael Hawlicek

Figura 3.4 Presa Vajont, Italia. En 1963, lluvias torrenciales y cargas intermitentes producidas por sismos, generaron el deslizamiento de una gran magnitud del monte TOC de 1921 msnm, en la foto de la derecha (2014) se observan las superficies de deslizamiento. La masa deslizante cayó dentro del embalse, creando una gran ola, la cual pasó por encima de la presa matando a 2600 personas que vivían en el valle aguas abajo.

Los movimientos a lo largo de las discontinuidades en fundaciones, presas, túneles y taludes, pueden ocurrir en cualquier dirección, dependiendo de las restricciones cinemáticas y fuerzas externas (incluyendo las presiones de agua y fuerzas inducidas por sismos) actúan sobre la estructura. Por lo tanto, es necesario comprender la variación de la resistencia al corte de las

discontinuidades en roca, en todas las direcciones. También se debe tener en cuenta, que incluso para una orientación específica, la resistencia al corte de una discontinuidad natural puede ser sustancialmente diferente para cargas aplicadas en diferentes direcciones.

En el estudio de la resistencia al corte de las discontinuidades, es importante distinguir si las discontinuidades están rellenas o están limpias (Figura 3.5).

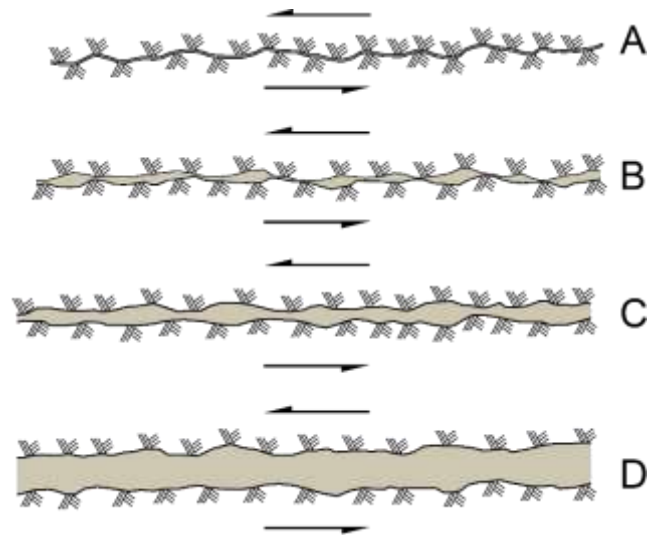


Figura 3.5 Discontinuidades rellenas y sin relleno

Las discontinuidades rellenas, contienen materiales que varían desde materiales plásticos blandos, tales como arcilla a nivel microscópico, a fallas que contienen brecha de nivel macroscópico, constituyendo un conjunto muy especial de los problemas: Su resistencia al corte depende principalmente de las propiedades físicas y mineralógicas de los materiales que separan las caras de la discontinuidad. Por el contrario, el comportamiento de la resistencia al corte de las discontinuidades sin relleno, depende, en parte de los esfuerzos efectivos normales que actúan sobre el plano de deslizamiento, de las propiedades de las paredes de la roca, incluyendo el tipo de roca, grado de rugosidad, el tamaño de la discontinuidad (efecto escala), el grado de erosión, la presencia de humedad y la presión del agua. El efecto de la rugosidad es la resistencia al corte, la cual es mayor en niveles de esfuerzos normales eficaces bajos (hasta el 20% de la resistencia a la compresión simple) y tiende a ser más importante que los otros factores.

Como se discutirá mas adelante, los ensayos de corte directo son muy importantes para el estudio de la fricción en la mecánica de rocas, debido a que los desplazamientos normales y de corte pueden ser medidos fácilmente durante el corte (Figura 3.6).

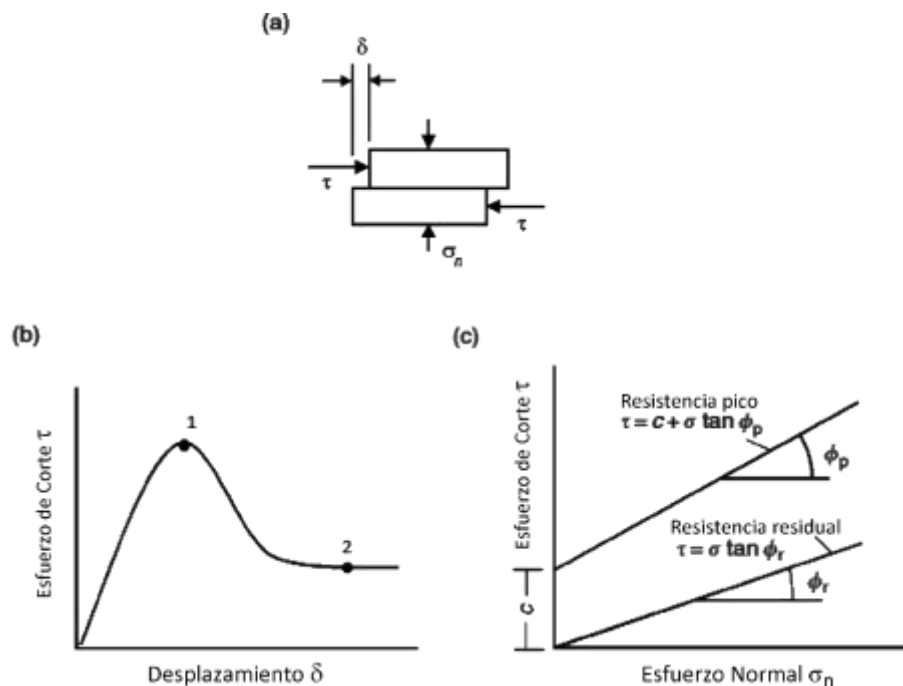


Figura 3.6 Ensayo de corte en discontinuidades

Estos ensayos permiten indentificar varios mecanismos básicos que dominan el comportamiento al corte. Inicialmente, cuando el esfuerzo de corte se aplica a un espécimen, la discontinuidad se cierra, las asperidades en contacto se deforman elásticamente hasta el punto de fluencia. Si la discontinuidad es rugosa, esta tenderá a abrirse “dilatancia” durante el corte. La dilatancia se define como el desplazamiento normal medido del bloque superior con respecto al bloque inferior durante el ensayo de corte. El punto de fluencia marca el inicio del crecimiento de microfisuras locales hasta el momento que ocurre la falla (esfuerzo pico de corte). Las asperidades en contacto pueden deformarse elásticamente o ser cortadas o trituradas, dependiendo de los esfuerzos normales efectivos y de la geometría local. Luego, en la zona de post-pico o post-falla, los esfuerzos de corte disminuyen tendiendo a un valor constante, que corresponde a la resistencia última o residual de la discontinuidad.

Cuando se realiza una serie de ensayos de corte directo, con diferentes esfuerzos normales, se generan una serie de puntos de resistencia pico al corte, a través de los cuales se puede dibujar la curva de resistencia la corte de la discontinuidad. Durante el corte, el esfuerzo de corte se va acumulando, un periodo de ajuste con una pequeña dilatación es seguido con un aumento rápido de la dilatación, siendo el punto máximo de la dilatación, coincidente con la resistencia pico o máxima (“resistencia al corte”). A partir de este punto, el esfuerzo de corte disminuye progresivamente; la discontinuidad también se va relajando continuamente hasta que se alcanzan los desplazamientos residuales. Los desplazamientos residuales corresponden a la distancia de los desplazamientos de la discontinuidad después del esfuerzo pico de corte, y de alcanzar la resistencia de corte residual o última. El desplazamiento residual puede ser de algunos milímetros o centímetros después de la resistencia pico. En el campo, con superficies rugosas muy cerradas, el desplazamiento residual no puede ser alcanzado, sino para un metro de desplazamiento.

Se han propuesto, varios criterios para identificar la resistencia de la discontinuidad de la roca. Estos criterios delimitan el estado de esfuerzos que separa el deslizamiento del post-deslizamiento de la discontinuidad. El criterio más simple de resistencia al corte pico para las discontinuidades en rocas es el modelo de Patton (Patton, 1966). Está basado en el criterio de fricción de Coulomb. Este modelo caracteriza el comportamiento de la discontinuidad por un parámetro único que es el ángulo promedio de rugosidad. Los modelos más complejos aparecen posteriormente, acompañando el desarrollo de métodos numéricos. Entre ellos destacan el Modelo Empírico de Ladanyi (Ladanyi & Archambault, 1970) y el Modelo Empírico de Barton (Barton & Choubey, 1977). Sin embargo, ninguno de los criterios de resistencia propuestos toman en cuenta el hecho que la resistencia pico al corte es anisotrópica, dependiendo de la variación de la rugosidad con respecto a la dirección de corte.

3.4 Criterios clásicos de falla en rocas

3.4.1 Modelo de Coulomb

El primer criterio de resistencia al corte conocido fue propuesto por Coulomb en el siglo XVIII. Estudió la fricción entre dos superficies lisas, y en 1773 presentó su artículo a la Academia de Ciencias de Francia, que después de haber sido arbitrado por sus compañeros, finalmente es publicado en 1776. El trabajo de investigación desarrollado por Coulomb se realizó en falla por corte en vidrio. Concluyendo que existe una relación entre los esfuerzos normales y de corte, que se puede expresar de la siguiente manera.

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (3.1)$$

donde μ es el coeficiente de fricción, el cual es una propiedad del material. Observando, un bloque en un plano inclinado, Coulomb, se dio cuenta que este permanecería en reposo sobre una superficie plana si la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el bloque que estaba inclinado un ángulo con respecto a la normal de la superficie es menor o igual a ϕ_b , el cual es denominado ángulo de fricción básico. El coeficiente de fricción es relacionado a ϕ_b por:

$$\mu = \tan \phi_b \quad (3.2)$$

Es común, visualizar el concepto de resistencia de fricción en términos de ángulo de fricción en lugar del coeficiente de fricción. Por ejemplo, con el fin de cuantificar la resistencia residual de la discontinuidad, referirse como ángulo de fricción residual (ϕ_r).

3.4.2 Envolvente de Mohr

En 1882, Otto Mohr, presentó un trabajo detallado para describir el estado de esfuerzos en un punto. El estado de esfuerzos en un punto puede ser expresado como:

$$\sigma_{(\theta)} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3.3)$$

$$\tau_{(\theta)} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \tag{3.4}$$

donde θ es la inclinación del plano en el cual σ_y y τ_y actúan, ver Figura 3.7. Mohr demostró que al eliminar θ de estas expresiones, se obtiene la ecuación del círculo:

$$\left(\sigma_{(\theta)} - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \right)^2 + \tau_{(\theta)}^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 = R^2 \tag{3.5}$$

El círculo fue llamado Círculo de Mohr y es una herramienta gráfica muy útil para ilustrar las diferentes propiedades del estado de esfuerzo en un punto, tal como se muestra en la Figura 3.8.

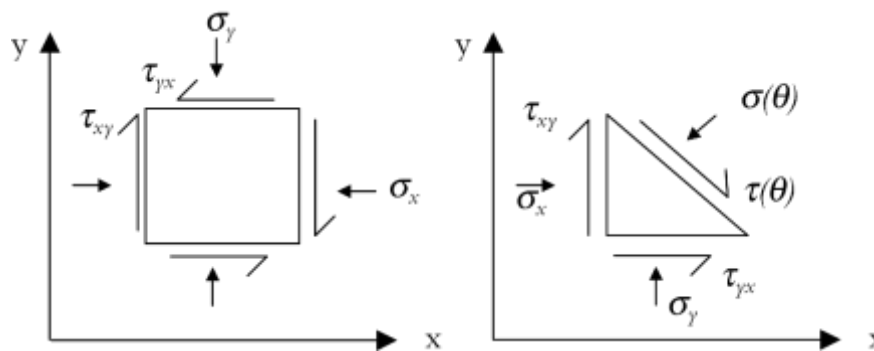


Figura 3.7 Dirección de los esfuerzos

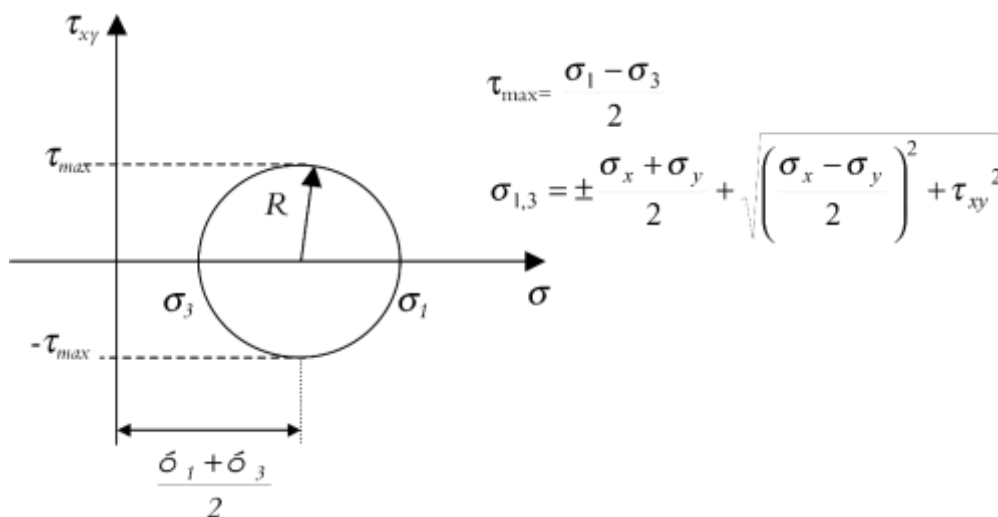


Figura 3.8 Círculo de Mohr

El Círculo de Mohr a la falla se determina experimentalmente a través de ensayos triaxiales, con distintos esfuerzos de confinamiento. Para generar la envolvente de Mohr, hay que realizar diferentes ensayos con diferentes niveles de esfuerzo. Para cada par de σ_1 y σ_3 , a la falla, se define un círculo de Mohr. La curva tangencial a los círculos de Mohr obtenidos experimentalmente se llama envolvente de Mohr. La Figura 3.9 muestra el estado de falla de acuerdo a la teoría de Mohr, que ocurre cuando el círculo de Mohr excede la envolvente de falla para un punto en el cuerpo.

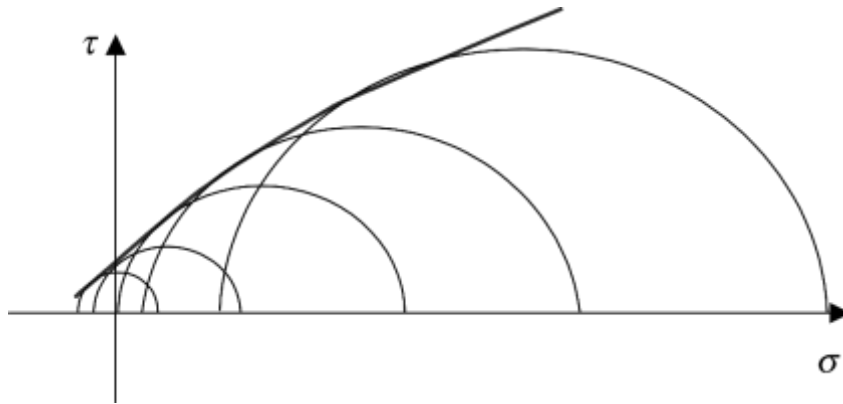


Figura 3.9 Envolvente de Mohr

Similar al criterio de Coulomb, la influencia de los esfuerzos principales intermedios, σ_2 , son ignorados. El plano de falla que se forma será paralelo a σ_2 . El ángulo entre el esfuerzo principal mayor (σ_1) y el plano de falla disminuye con el incremento de los esfuerzos principal menor (σ_3).

Omitiendo el problema de encontrar la ecuación exacta para la Envolvente de Mohr definida por los esfuerzos principales, Balmer presentó en 1952, un método simple para determinar los esfuerzos normales y de corte σ_n y τ , para cualquier valor dado de σ_1 y σ_3 :

$$\left(\sigma_n - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 \quad (3.6)$$

Diferenciando parcialmente σ_1 , con respecto a σ_3 y simplificando se obtiene:

$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3}} \quad (3.7)$$

Cuando un grupo de valores de (σ_n, τ) han sido calculados, la cohesión promedio (c) y el ángulo de fricción (ϕ), se puede encontrar por un análisis de regresión lineal, donde la mejor curva de ajuste es una línea recta que se calcula para el rango de pares de (σ_n, τ) .

3.4.3 Criterio de Resistencia de Mohr-Coulomb (1882)

Aunque los motivos de Coulomb y Mohr, para el desarrollo del criterio de falla eran muy distintos y los materiales considerados diferentes, el resultado fue un criterio dependiente del esfuerzo. En términos modernos, la Ecuación de Coulomb se escribe de la siguiente forma:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (3.8)$$

donde τ_f es la resistencia al corte a lo largo del plano de falla; c es la cohesión; σ_n es el esfuerzo normal actuante en el plano de falla; y ϕ es el ángulo de fricción del plano de falla.

La ecuación frecuentemente se refiere como “**Criterio de Mohr-Coulomb**” y se aplica en mecánica de rocas para la falla en rocas, discontinuidades en roca y macizos rocosos. El criterio supone que la falla ocurre a lo largo de un plano, sin que exista dilatación. El Criterio de Mohr-Coulomb también puede ser expresado, en términos de esfuerzos principales, como:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi}{(1 - \sin \phi)} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (3.9)$$

o en muchos casos se presenta como:

$$\sigma_1 = \sigma_c + k \sigma_3 \quad (3.10)$$

donde k es la inclinación de la línea que relaciona σ_1 y σ_3 , mientras que σ_c es la resistencia a la compresión uniaxial. El Criterio de Mohr-Coulomb es lineal, pero la roca no puede resistir

grandes esfuerzos de tracción. El esfuerzo de tracción se incluye frecuentemente, como se muestra en la Figura 3.10.

Los valores del ángulo de fricción (ϕ) y cohesión (c) pueden ser calculados empleando las siguientes expresiones:

$$\sin \phi = \frac{k-1}{k+1} \tag{3.11}$$

$$c = \frac{\sigma_c(1-\sin \phi)}{2 \cos \phi} \tag{3.12}$$

En el caso especial, cuando $c = 0$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1+\sin \phi}{1-\sin \phi} = k \tag{3.13}$$

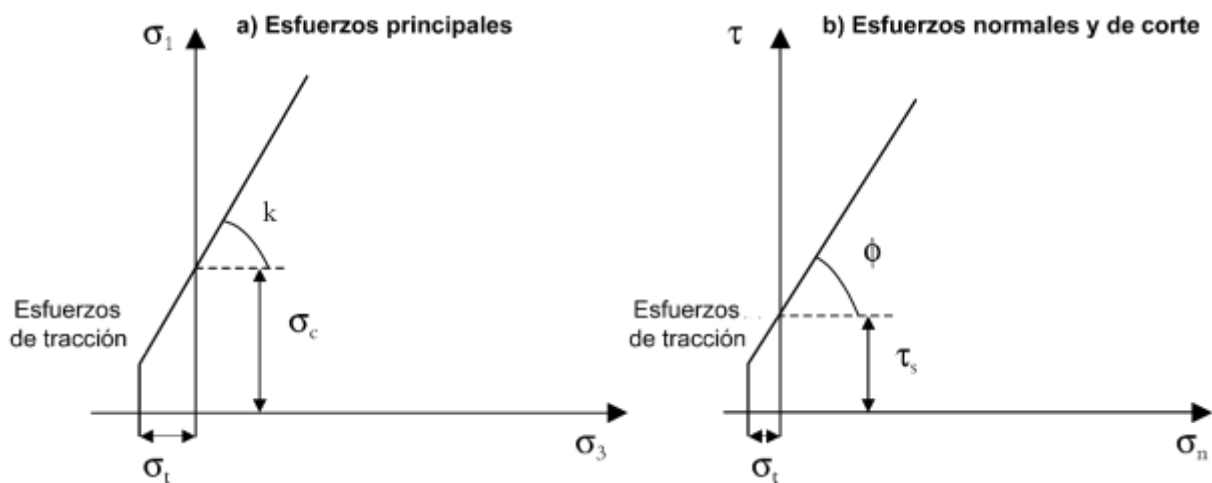


Figura 3.10 Criterio de Mohr-Coulomb en términos de a) esfuerzos principales y b) esfuerzos normales y de corte

Una de las razones por las cuales el criterio de Mohr-Coulomb se utiliza frecuentemente empleado en la mecánica de rocas, es porque se describe por una simple ecuación matemática, es fácilmente comprensible y de aplicación sencilla. Para emplear el criterio de Mohr-Coulomb hay que tomar en cuenta lo siguiente:

- El mecanismo de falla debe ser por corte

- La relaciones entre el esfuerzo normal y de corte se obtienen por ensayos experimentales, que frecuentemente muestran un comportamiento no lineal muestra que el criterio de Mohr-Coulomb **no** predice un comportamiento no lineal
- Si los esfuerzos normales son de tracción, asumir la fricción interna no tiene sentido, siendo limitado el criterio a $\sigma_n = \sigma_x$, que se aplica normalmente

3.4.4 Teoría de grietas de Griffith

Griffith (1924) sugiere que para los materiales frágiles tal como el vidrio, la fractura se iniciará cuando el esfuerzo a tracción ha superado los esfuerzos de tracción en los extremos, por defectos microscópicos en el material. Estos defectos microscópicos en la roca intacta podrían ser pequeñas grietas microscópicas al azar, fisuras o límites en los granos. Suponiendo que el estado de esfuerzo plano, dentro de una placa de vidrio, el estado de falla ocurre cuando:

$$\sigma_3 = -\sigma_t, \quad \text{si } \sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0, \text{ o} \quad (3.14)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3) = 0, \quad \text{si } \sigma_1 + 3\sigma_3 \leq 0 \quad (3.15)$$

donde σ_t es la resistencia a la tracción uniaxial, y σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principal mayor y menor, respectivamente. La teoría Griffith de no tiene ninguna aplicación práctica en mecánica de rocas, ya que sólo es válida para materiales frágiles, en los cuales la falla ocurre sin la formación de zonas de flujo plástico de los materiales, que son típicos de las fallas en metales y otros materiales estructurales.

Griffith empleó los Círculos de Mohr para construir sus propias envolventes para su criterio de falla, basado en la ecuación 3.16. El resultado es una relación parabólica entre los esfuerzos de corte y normales a la falla.

$$\tau^2 = 4\sigma_t(\sigma_n + \sigma_t) \quad (3.16)$$

donde τ es el esfuerzo de corte a lo largo del plano de falla y σ_n es el esfuerzo actuante normal al plano de falla. El criterio de Griffith ignora las fuerzas de fricción en el cerramiento

de las grietas. De acuerdo a esta teoría, la resistencia a la compresión uniaxial es ocho veces mayor que la resistencia a la tracción uniaxial.

Modificaciones del criterio de Griffith, basadas en ensayos sobre especímenes de roca [Wiebols & Cook, 1968; Gramberg, 1965; Fairhurst & Cook, 1966, citados por (Edelbro, 2003)], en los cuales la fricción fue tomada en cuenta, no concuerdan satisfactoriamente con los ensayos experimentales.

3.5 Criterios de Resistencia en Roca Empíricos

Las expresiones para los criterios de falla empírica de rocas han sido propuestas basadas en ensayos de laboratorio en especímenes de roca intacta. Algunos de ellos también han sido desarrollados como criterios de falla del macizo rocoso, con ajustes adecuados relacionados con los índices de clasificación de rocas (RMR, GSI y el criterio de Hoek-Brown).

Las expresiones para los criterios de falla empírica de rocas mecánicas bien conocidas para la roca intacta se dan en la Tabla 3.1. Los parámetros incluidos en cada criterio dado en la Tabla 3.1 son constantes dependiendo de las propiedades de la muestra de roca. Como se puede ver en las ecuaciones de la Tabla 3.1, los criterios se formulan en términos de σ_1 y σ_3 , sin considerar el esfuerzo principal intermedio, σ_2 .

Tabla 3.1 Criterios de Falla para Roca Intacta (Edelbro, 2003)

Expresión de falla	Desarrollo / Comentarios	Autor, Publicación inicial del Criterio
$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = a + b(\sigma_1 + \sigma_3)$	Es una generalización empírica de la teoría de Griffith para roca intacta	Fairhurst (1964)
$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 + F\sigma_3^f$	Ajuste empírico para resultados de ensayos en roca intacta	Hobbs (1964)
$\sigma_1 = \sigma_c + a\sigma_3^b$		Murrel (1965)
$\frac{\tau_m - \tau_o}{\sigma_c} = D \left| \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \right|^c$	Curva de ajuste empírica para roca intacta	Hoek (1965)
$d\sigma_1 = \sigma_c + a\sigma_3$	Ensayos triaxiales en roca blanda	Bodonyi (1970)

Tabla 3.1. Criterios de Falla para Roca Intacta (Edelbro, 2003)(Continuación)

Expresión de falla	Desarrollo / Comentarios	Autor, Publicación inicial del Criterio
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c^{1-B} (\sigma_1 + \sigma_3)^B$	Curva de ajuste empírica para 500 espécimes de roca	Franklin (1971)
$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2}$	Aplicación de la teoría de Griffith y curva de ajuste empírica. Para macizos rocosos con roca intacta y altamente diaclasados	Hoek & Brown (1980)
$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = a + b \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^\alpha$	Curva de ajuste empírica para 700 especímenes de roca. Para macizos rocosos con roca intacta y altamente diaclasados	Bieniawski (1974), modificado por Yudhbir et al. (1983)
$\sigma_1 = \sigma_3 + a\sigma_3 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_3} \right)^b$	Aplicado a 89 muestras de roca	Ramamurthy et al, (1985)
$\sigma_{1n}' = \left(\frac{M}{B} \sigma_{3n}' + 1 \right)^B$	Curva de ajuste empírica para especímenes de suelo y roca.	Johnston (1985)
$\sigma_1 = \sigma_c \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t} \right)^b$	Para macizos rocosos con roca intacta y altamente diaclasados	Balmer 1952), Sheorey et al. (1989)
$\sigma_1 = \sigma_3 + A\sigma_c \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} - S \right)^{1/B}$	A, B y S son parámetros de resistencia.	Yoshida (1990)

donde

$$\tau_m = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 \text{ y } \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2)/2;$$

$$\sigma_{3n}' = \text{Esfuerzo principal menor efectivo normalizado}$$

$$\sigma_1 = \text{Esfuerzo principal mayor};$$

$$\sigma_3 = \text{Esfuerzo principal menor}$$

$$\sigma_{1n}' = \text{Esfuerzo principal mayor efectivo normalizado}$$

$$\sigma_t = \text{Resistencia a la tracción}$$

a, b, F, C, D, B, M y α son constantes

Una gran cantidad de información sobre resistencia en roca intacta se ha publicado durante el siglo XX y la resistencia de la roca intacta se ha comprendido bastante bien. Basándose en la experiencia de los criterios de falla para roca intacta, se han desarrollado diferentes criterios de falla para el macizo rocoso. Los criterios de falla para el macizo rocoso se basan en ensayos a gran escala y de laboratorio, experiencia de trabajos realizados y/o análisis. Los criterios de falla para el macizo rocoso utilizados con más frecuencia son presentados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Criterios de Falla para Macizos Rocosos (Edelbro, 2003)

Expresión de falla	Desarrollo / Comentarios	Autor, Publicación inicial del Criterio
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha$	Versión 2002	Hoek & Brown (1980)
$\sigma_1 = A\sigma_{ci} + B\sigma_{ci} \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^\alpha$	A es un parámetro adimensional y B es una constante de la roca intacta, α es sugerido = 0.65	Yudhbir et al. (1983)
$\sigma_1 = \sigma_{cm} \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_{cm}} \right)^{b_m}$	Emplea el valor de RMR_{76}	Sheorey et al. (1989)
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_3' \cdot B_j \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_3'} \right)^{\alpha_j}$	Versión 2001	Ramamurthy, (1995)

Todos estos criterios de falla para Macizos Rocosos son formulados en términos de σ_1 y σ_3 , siendo similares a los criterios de roca intacta, sin considerar tampoco el esfuerzo principal intermedio, σ_2 .

3.6 Resistencia al corte de discontinuidades limpias / frescas

Para diaclasas limpias sin meteorización, la resistencia al corte está controlada por la geometría y la resistencia de las paredes de la discontinuidad. Se han propuesto varios modelos empíricos para describir esta dependencia, que se resumen a continuación:

3.6.1 Modelos Dilatantes

Patton (1966), fue el primer investigador en la mecánica de rocas en relacionar el comportamiento al corte de las discontinuidades con un esfuerzo normal y su rugosidad. Su trabajo esta basado un modelo idealizado de la discontinuidad, donde la rugosidad es representada por una serie de triangulos con ángulos constantes o diente de sierra. Para estos perfiles, el ángulo de dilatancia es el arco tangente de la relación del desplazamiento vertical entre el desplazamiento horizontal $\left[\tan^{-1}(\delta_v/\delta_h) \right]$ de la muestra durante el corte y es

constante, suponiendo que la roca es rígida. Patton observó, que con esfuerzos normales bajos, cuando no existen practicamente asperidades de corte, la resistencia al corte de la discontinuidad es:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\phi_b + i) \tag{3.17}$$

donde σ_n es el esfuerzo normal, ϕ_b es el ángulo de fricción básico, y i es el ángulo de inclinación del escalón o diente.

Al aplicar altos esfuerzos normales, cuando los picos de la mayoría de las asperidades se cortaron, encontró una similitud razonable con los resultados experimentales, empleando un criterio de falla diferente:

$$\tau = c_j + \sigma_n \cdot \tan \phi_r \tag{3.18}$$

donde c_j es la cohesión aparente de la discontinuidad y ϕ_r es el ángulo de fricción residual

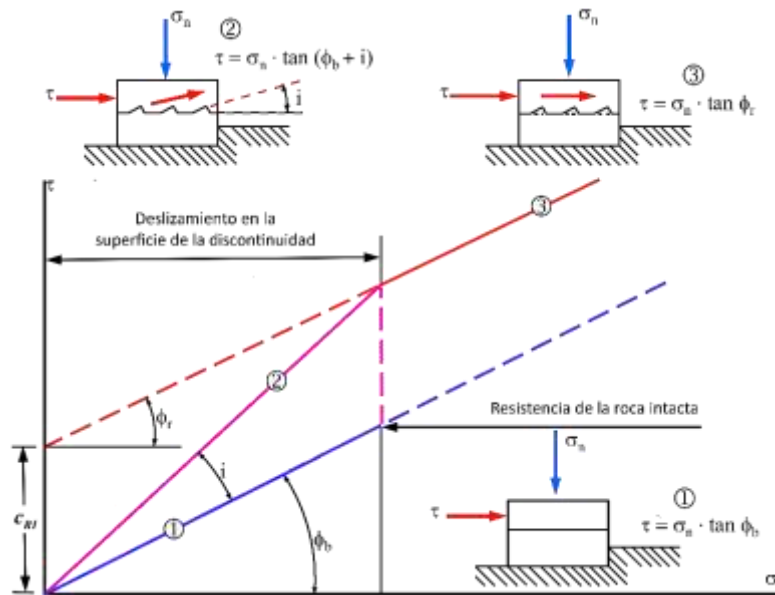


Figura 3.11 Envolvente bilineal de falla para múltiples superficies inclinadas [modificado de (Patton, 1966)]

Combinando los dos criterios de falla en uno, Patton obtuvo una envolvente bilineal que describe bastante bien la resistencia al corte de superficies planas que contengan un número

regularmente espaciado de dientes, con dimensiones iguales (Figura 3.11). Sin embargo, este criterio no es satisfactorio para describir el comportamiento de corte de superficies de roca irregulares, que muestran las envolventes de falla continuas que se obtienen normalmente. Patton, describe correctamente la discrepancia con las discontinuidades reales, explicando que a diferencia de las superficies con dientes de sierra, donde la envolvente de falla refleja simplemente el cambio del modo de falla, la envolvente de falla de las superficies de roca refleja cambios en las intensidades de los distintos tipos de falla, que ocurren de manera simultánea.

El Modelo de Patton puede explicarse de manera detallada de la siguiente manera:

Curva 1 La resistencia al corte de discontinuidades planas y persistentes puede ser descrito exclusivamente por la fricción y puede ser aproximada a una relación lineal de

entre τ y σ_n :

$$\tau_{res} = \sigma_n \cdot \tan(\phi_b) \quad (3.19)$$

El ángulo de fricción básico puede ser el mismo o menor que el de la roca intacta, debido a la meteorización o capa lubricante entre las superficies de la discontinuidad.

El ángulo de fricción ϕ_b^* de discontinuidades planas, persistentes y cerradas es igual a ϕ_b .

Las discontinuidades que sean irregulares tienen dos modos de falla a la resistencia al corte, tal como es ilustrado en la Figura 3.11, en el Caso 2 y 3 una superficie dentada regular.

Caso 2 Si la discontinuidad se somete a un bajo esfuerzo normal $\sigma_n \leq \sigma_{np}$ las superficies de deslizamiento sobre la discontinuidad se realizan bajo tres etapas de corte (Figura 3.11, izquierda superior). Considerando el último estado de equilibrio que es dado por la resistencia pico:

$$\tau_{res} = \sigma_n \cdot \tan(\phi_b + i) = \sigma_n \cdot \tan(\phi_D) \quad (3.20)$$

donde i es el ángulo de deslizamiento hacia arriba del diente de sierra; ϕ_b es el ángulo de fricción de la superficie de la discontinuidad.

Caso 3 Si el esfuerzo normal excede cierto valor σ_{ns} , el deslizamiento a través de las discontinuidades **no** puede ocurrir, entonces la falla toma lugar por el corte directo de la base de los dientes, es decir ocurre el corte de la roca intacta (Figura 3.11, derecha superior). Para que se inicie el movimiento en este caso es necesario superar la fricción y la cohesión de manera simultánea. En este caso, la resistencia pico al corte para $\sigma_n > \sigma_{ns}$, es dada por:

$$\tau_{res} = c_{RI} + \sigma \cdot \tan \phi_{RI} \quad (3.21)$$

donde ϕ_{RI} y c_{RI} son la fricción y cohesión para la roca intacta, pudiendo ser estos valores menores que los valores de ϕ_{RI} y c_{RI} de la roca meteorizada.

En cuanto a la resistencia residual τ_{res} de las discontinuidades irregulares o rugosas persistentes, debe hacerse un comentario entre la falla por corte debido al deslizamiento y la causada por el corte de las asperezas. A niveles de esfuerzos bajos $\sigma_n < \sigma_{ns}$, no ocurre una reducción de esfuerzos durante el corte, y el ángulo de fricción residual ϕ_{res} debe considerarse igual al ángulo de fricción de la discontinuidad ϕ_D . Con niveles de esfuerzo altos $\sigma_n > \sigma_{ns}$, el ángulo de fricción residual ϕ_{res} , puede ser supuesto igual al ángulo de fricción de la roca intacta ϕ_{RI} (Caso 1). Como resultado, la resistencia al corte residual de una discontinuidad irregular o aspera, puede ser descrita por el criterio de falla discontinua (Wittke, 1990):

$$\tau_{res} = \begin{cases} \sigma_n \cdot \tan \phi_D, & \text{si } \sigma_n < \sigma_{ns} \\ \sigma_n \cdot \tan \phi_{RI}, & \text{si } \sigma_n \geq \sigma_{ns} \end{cases} \quad (3.22)$$

Naturalmente, la apariencia de las discontinuidades con respecto a sus superficies, casi nunca presentan formas altamente irregulares y ángulos de deslizamiento i los cuales pueden variar

considerablemente de un lugar a otro. Por lo tanto la Curva 2, podrá ajustarse a los criterios no lineales de falla que han sido formulados por distintos autores, y la línea de esta curva podrá mostrar un criterio no lineal para la resistencia pico, en el cual el ángulo de ϕ_D es una función de σ_n :

$$\tau_{res} = \sigma_n \cdot \tan \phi_D(\sigma_n) \quad (3.23)$$

Uno de los criterios de falla más empleado frecuentemente para la resistencia al corte de discontinuidades rugosas, es el propuesto por Barton (1973), que será discutido mas adelante.

Otro aspecto de gran importancia de la resistencia al corte con las asperezas, la cuales son inclinadas con respecto a la dirección de los esfuerzos de corte aplicados τ , es que cualquier desplazamiento de corte es acompañado por un desplazamiento normal. En el caso de un espécimen con distintas proyecciones (tales como los ensayados por Patton), significa que el espécimen tiene dilatación. La dilatación juega un papel muy importante en el comportamiento del corte de las superficies reales de roca.

El Modelo Patton fue extendido a perfiles naturales por Maksimovic (1996), para tener en cuenta la dilatación. Para describir la variación de la dilatación de las discontinuidades rugosas como una función del esfuerzo normal, propuso la siguiente expresión para estimar la resistencia al corte pico de la discontinuidad:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left(\phi_b + \frac{\Delta\phi}{1 + \frac{\sigma_n}{p_n}} \right) \quad (3.24)$$

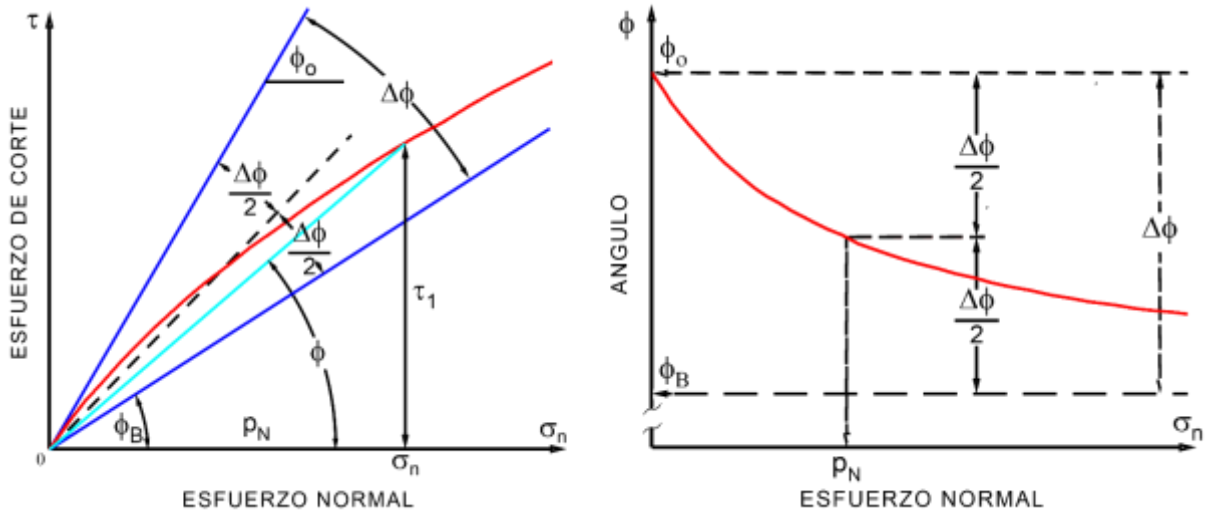


Figura 3.12 Definición de los parámetros utilizados para derivar la envolvente de falla no lineal (Maksimovic, 1992)

donde: $\Delta\phi$ es la inclinación de las asperidades con mayor inclinación; p_n es el ángulo promedio de presión, que “es igual al valor del esfuerzo normal en que la contribución de la dilatación y la rotura de las asperezas es igual a un medio del ángulo de dilatación para un esfuerzo normal cero ($\Delta\phi/2$)”. El ángulo inicial de la envolvente de falla en el origen, es simplemente la suma del ángulo friccional básico y la inclinación de las asperezas superficiales (Figura 3.12). Existe un problema técnico en el uso de este criterio, ya que necesariamente hay que realizar tres ensayos en la misma superficie para calcular el parámetro p_n (Maksimovic, 1992). Adicionalmente, no está claro en el artículo como obtener estos parámetros en el laboratorio.

Revisando nuevamente los perfiles de dientes de sierra en dos dimensiones, la transición de la dilatación al corte, fue estudiada teórica y experimentalmente por (Ladanyi & Archambault, 1970), quienes aproximaron el problema de la resistencia al corte de una discontinuidad por medio de la identificación de las áreas en la superficie de la discontinuidad, donde el desplazamiento y falla de las asperezas es más probable que ocurra. Se define como el área donde el corte a través de las asperezas se lleva a cabo. Para el resto de las superficies, al

menos para una de ellas, se asume que deslizan una sobre la otra sin que se dañen. Proponiendo la siguiente expresión:

$$T_p = S_F (1 - a_s) + S_r \cdot a_s \quad (3.25)$$

donde T_p es la resistencia pico al corte; S_F es la fuerza de corte requerida para el deslizamiento sobre las asperidades; S_r es la fuerza de corte requerida para cabalgar sobre las asperidades. Basados en estos supuestos, y dividiendo la Ecuación (3.26) por el área total de la discontinuidad, proponen la siguiente expresión para la resistencia:

$$\tau_p = \frac{\sigma_n \cdot (1 - a_s) \cdot (\tan \theta_p + \tan \phi_b) + a_s \cdot \tau_{roca}}{1 - (1 - a_s) \cdot \tan \theta_p \cdot \tan \phi_b} \quad (3.27)$$

donde τ_{roca} es la resistencia de la roca intacta; $\theta_p = \arctan(v_p/u_p)$ es el ángulo de dilatación pico; v_p es el desplazamiento vertical promedio del plano de discontinuidad a la resistencia pico, medida en la dirección de corte. A niveles de esfuerzo muy bajos, cuando no existe resistencia debido a la rugosidad, $a_s \rightarrow 0$ y $\theta_p \rightarrow i$ (donde i , es la inclinación de la rugosidad), la ecuación simplifica a la ecuación propuesta por Patton. Con uno niveles de esfuerzo muy altos, cuando $a_s \rightarrow 1$ y $\tau_p \rightarrow \tau_{roca}$, Ladanyi y Archambault sugieren que τ_{roca} , sea la resistencia del material adyacente a las superficies de las discontinuidad, y pueda ser representado por la ecuación de una parábola, de acuerdo a la expresión propuesta por Fairhurst (1964):

$$\tau_{roca} = \tau_c \cdot \frac{\sqrt{1+n}-1}{n} \cdot \sqrt{1+n \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_c}} \quad (3.28)$$

donde τ_c es la resistencia a la compresión uniaxial de la roca; σ_t es la resistencia a la tracción, y n es la relación entre la resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la tracción $n = (\sigma_c/\sigma_t)$. Es importante observar que el uso de la ecuación de Ladanyi y Archambault, no

necesariamente adopta la definición de τ_{roca} sugerida. Se puede adoptar cualquier otro criterio de resistencia al corte de la roca intacta.

Desafortunadamente, el parámetro a_s no es fácil su medición, bajo las condiciones de laboratorio. En contraste, la velocidad de dilatancia es fácilmente medida durante el ensayo de corte, pero es difícil estimarla en condiciones in-situ.

Para superar estos problemas, y hacer la ecuación mucho más amigable, Ladanyi y Archambault, realizaron una gran número de ensayos en especímenes de concreto, con superficies de corte tipo diente de sierra. En base a los resultados de estos ensayos, proponen la siguientes relaciones empíricas:

$$\tan \mathcal{G}_p = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_c}\right)^K \cdot \tan i \quad (3.29)$$

$$a_s = \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_c}\right)^L \quad (3.30)$$

donde, para superficies rugosas, $K=4$, $L=1.5$ y i es el ángulo del perfil del diente. El modelo de resistencia al corte de Ladanyi y Archambault, fue revisado posteriormente por Saeb (1990), a la luz de la teoría de la dilatancia de arenas, y sugirió la siguiente expresión simplificada:

$$\tau_p = \sigma_n \cdot (1 - a_s) \cdot \tan(\phi_b + i) + a_s \cdot \tau_{roca} \quad (3.31)$$

Para una mejor representación de la superficie de la roca, Haberfield & Johnston (1994) extendieron el concepto de aspersion triangular y consideraron una serie de perfiles triangulares irregulares. En este modelo, las aspersiones tienen una inclinación y longitud de la base variables, en el intento de predecir la variación del ángulo de dilatancia con el desplazamiento de corte (Figura 3.13), y los diferentes mecanismos que controlan el movimiento de la discontinuidad (Figura 3.14). Mientras que los modelos de Haberfield & Johnston, representan una mejora sustancial con respecto a la idealización de la aspersion triangular, sigue siendo muy difícil su extensión a condiciones naturales. Por ejemplo, la

elección de la longitud de una base es bastante arbitraria, y el proceso para la aproximación de la superficie rugosa basada en perfiles de triángulos, no está bien definida. Por otra parte, para perfiles más reales, el ángulo de dilatación varía con el desplazamiento al corte, y se presenta la dificultad en la predicción de la variación del ángulo de dilatación, y por lo tanto de la resistencia al corte, con desplazamiento de corte.

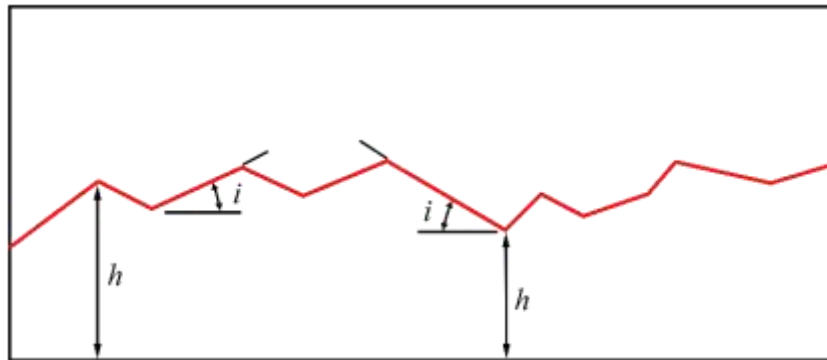


Figura 3.13 Idealización de una discontinuidad en roca mostrando la definición de rugosidad (Haberfield & Johnston 1994)

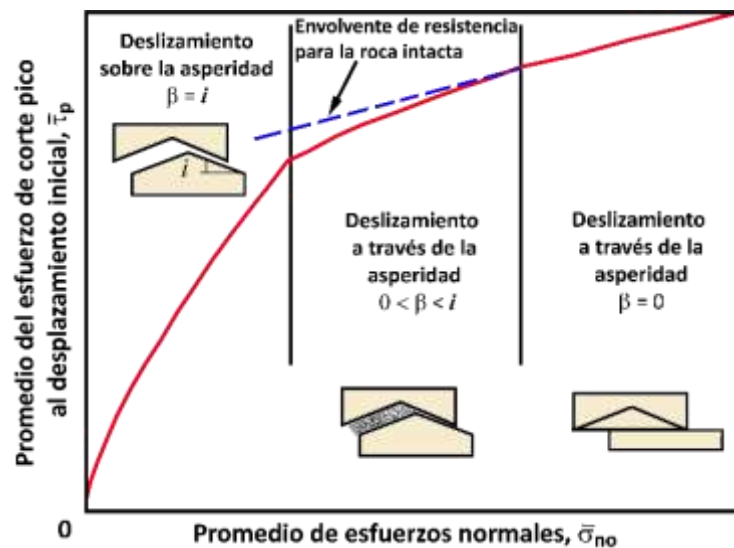


Figura 3.14 Respuesta de una discontinuidad triangular en concreto bajo condiciones de carga constante. Analizando el mecanismo de comportamiento de las discontinuidades en roca, (Johnston & Lam 1989) se observaron varios mecanismos que controlan el movimiento. Estos mecanismos incluyen una deformación inicial, deslizamiento de asperezas individuales (incluyendo el aplanamiento de microasperezas, (lo cual posteriormente se traducen en una pérdida repentina de la cohesión aparente), asperezas por corte y tituración de asperezas

3.6.2 Modelo JRC

Una aproximación alternativa al problema de predecir la resistencia al corte de las discontinuidades rugosas fue propuesta por Barton & Choubey (1977). En base a los ensayos realizados sobre discontinuidades naturales rugosas, Barton, obtuvo la siguiente relación empírica:

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \left(\phi_p + JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (3.32)$$

donde JCS (Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad/Joint Roughness Coefficient) es el parámetro que representa la rugosidad de la discontinuidad y JRC (Resistencia a la compresión de la discontinuidad/Joint Compressive Strength), que es la resistencia a la compresión de discontinuidad de la superficie de roca, tomando en cuenta posibles reducciones en la resistencia debido a fatiga, alteración química u otros procesos de meteorización de la roca en la interface. Cuando la discontinuidad es “fresca”, JRC es igual a la resistencia compresiva de la roca, es decir ($JRC = \sigma_c$). JRC , se determina con el martillo de Schmith, como lo señalo (Barton & Choubey, 1977).

Comparando la Ecuación (3.33) con la propuesta por Patton Ecuación (3.17), es evidente que la diferencia entre las dos expresiones es que el ángulo i de la rugosidad de la ecuación de Patton, ha sido reemplazado por un término dependiente de los esfuerzos normales que contiene JRC .

Los experimentos originales de Barton fueron realizados con unos niveles de esfuerzo normal extremadamente bajos, y su ecuación es probablemente aplicable para un rango de esfuerzos de $0.01 < \sigma_n / JCS < 0.3$. Fuera de este rango, la influencia de la rugosidad de la discontinuidad será despreciable o sobreestimada.

Además, es importante tener en cuenta que el término logarítmico de Barton $\sigma_n \rightarrow 0$, tiende al infinito y la ecuación deja de ser válida. Barton, sugiere que el máximo valor para el ángulo de fricción total (argumento en el término de la tangente) sea de 70° . Duncan (1969), sugiere

que con el fin de obtener valores reales para el valor de $[JRC \cdot \log_{10}(JCS/\sigma_n) + \phi_{ba}]$, el valor del ángulo de fricción total **no debe exceder** los 50°.

Barton, propone estimar el valor de *JRC* por un análisis de retrocálculo del ensayo de corte que ha sido realizado, o por una comparación visual de la rugosidad con diez perfiles estandar que se muestran en la Figura 3.115. Para estos perfiles estandar, los valores de *JRC*, están entre 0 y 20, donde son asignados en un intervalo de dos, con cero correspondiente al perfil más suave o plano y 20 al más rugoso, posteriormente la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, adoptó estos perfiles estandar en su procesimiento sugerido para la medición de la rugosidad de las discontinuidades (ISRM, 1978).

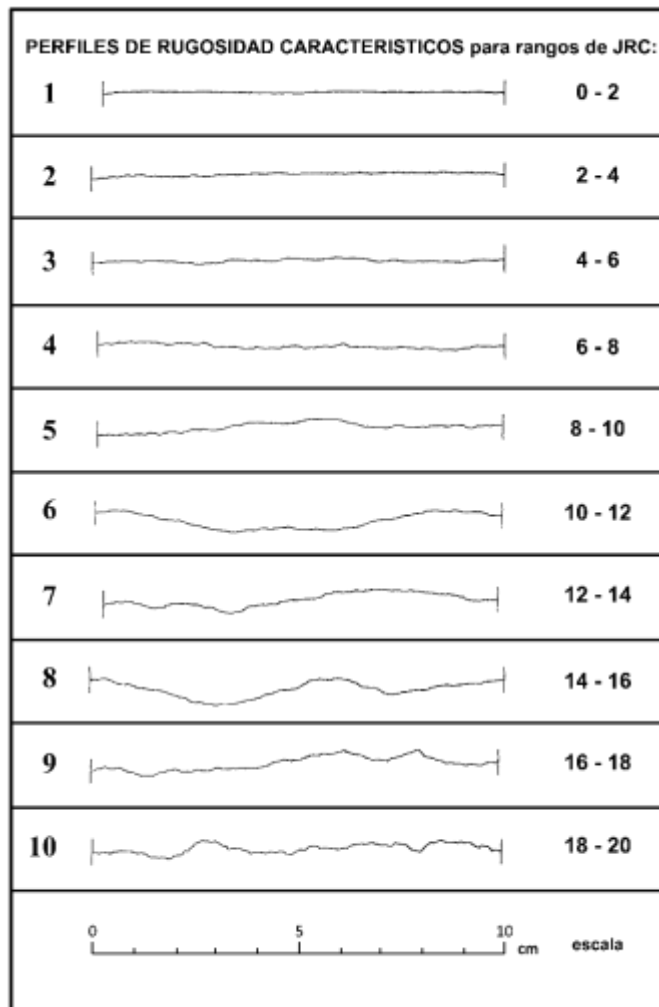


Figura 3.15 Perfiles estandar empleados para la estimación visual de JRC (Barton & Choubey, 1977)

Este método de comparación visual para estimar el valor de JRC , ha sido considerado subjetivo y poco confiable por varios investigadores. Por lo tanto, muchos investigadores han estudiado formas alternativas de calcular el valor de JRC , y, en consecuencia se han propuesto muchos parámetros en la literatura.

3.7 Criterios de falla aplicables a la resistencia al corte

La siguiente tabla resume el rango de aplicabilidad de cada uno de los criterios de resistencia:

Tabla 3.3 Aplicabilidad de los Criterios de Resistencia de acuerdo al tipo de material y tipo de ensayo realizado

	Roca	Suelo	Discontinuidades	Ensayo Triaxial	Ensayo de Corte
Hoek-Brown Generalizado	◆			◆	
Mohr-Coulomb	◆	◆	◆	◆	◆
Barton-Bandis			◆		◆
Power Curve	◆	◆	◆	◆	◆

3.8 Conclusión

La selección de un criterio general para determinar la resistencia al corte de la rugosidad de las discontinuidades en roca, ha sido investigada por muchos años. Numerosos modelos han sido propuestos en las últimas décadas, tratando de relacionar la resistencia al corte a parámetros medibles de las discontinuidades. Aunque estos modelos han mejorado la comprensión del comportamiento de las discontinuidades en roca, hay que reconocer sus limitaciones. Los modelos disponibles en la literatura son cuestionables cuando son aplicados en la práctica, ya porque sean demasiado simplistas (Patton), o porque se basan en demasiado empirismo (modelos JRC), o requieren la estimación de parámetros de entrada muy complejos, que exceden la capacidad práctica de investigación de un sitio en particular o de procedimientos de laboratorio muy sofisticados (Ladanyi & Archambault). Mas aún el comportamiento de la resistencia al corte ha sido estudiada en discontinuidades artificiales, que tienen superficies regulares, tal como la diente de sierra o escalonado [(Xu & De Freitas,

1990); (Qui, Plesha, Huang, & Haimson, 1993); (Fishman, 1990); (Dong & Pan, 1996); (Dight & Chiu, 1981); (Yang & Huang, 1995)]. En este caso, se distinguen claramente dos modos de falla: deslizamiento y corte. Esto puede ser válido para todas las asperezas que son cortadas en el mismo momento, como lo asumen (Huang & Doong, 1990). Sin embargo, debido a que la superficie de una discontinuidad **natural** de roca tiene asperezas con diferentes longitudes de base (ongitudes proyectadas) e inclinaciones, la envolvente de falla de la discontinuidad natural podría no reflejar un simple cambio en el modo de falla. Por estas razones, los modelos existentes **no** son capaces de reflejar con suficiente exactitud el comportamiento complejo de corte de las discontinuidades. Por lo tanto, para ir más allá del estado del arte, es necesario un nuevo criterio de resistencia pico. Hoy en día muchas de las limitaciones técnicas se han superado en la cuantificación de los parámetros de la superficie. Por ejemplo, el alto rendimiento de los computadores hace posible el levantamiento entero de superficies, y los nuevos algoritmos, permiten nuevas vías para aproximaciones para el estudio de la fricción en las superficies de la roca, pasando de un estado bidimensional simple a un estudio total de descripción de la superficie. Los nuevos ensayos de corte, ahora hacen posible registrar en tiempo real a intervalos de tiempo infinitesimales. Los ensayos que antes era posible solo realizarlos en el laboratorio, también pueden realizarse in-situ. En la actualidad se dispone de muchas mas herramientas tecnológicas para entender el comportamiento de la roca. Estos avances permitirán incorporan nuevos parámetros en las expresiones de resistencia al corte. Serán muy útiles estas expresiones para dar estimados mas precisos de la resistencia pico, basados en parámetros medibles tanto en el laboratorio como in-situ.

4 Ensayo de Corte en Discontinuidades

4.1 Introducción **Equation Section (Next)**

Uno de los principales objetivos del presente trabajo es aportar información que permita una mejor comprensión del comportamiento friccional de las discontinuidades en roca, sometidas a esfuerzos cortantes. Esto va acompañado al creciente número de obras de interés público que se están realizando en el campo de la mecánica de rocas. Se debe recordar que el comportamiento de las discontinuidades en roca ocurre in-situ y las condiciones de contorno varían de un sitio a otro.

La presencia de discontinuidades intersectándose alrededor de todo el túnel forma bloques de roca inestable y la estabilidad del túnel dependerá de la resistencia al corte del deslizamiento de estos bloques. Mientras que el movimiento normal del bloque en la superficie de deslizamiento es relativamente libre de moverse en el caso de un talud, la dilatación de las interfases de los bloques alrededor del túnel está confinada en cierta medida por los bloques adyacentes. Por lo tanto, el comportamiento al corte de las discontinuidades en roca no sólo depende de las propiedades de las superficies de sus discontinuidades, sino también de las condiciones de contorno a las cuales están sometidas esas discontinuidades.

Aún así, es posible identificar dos comportamientos característicos distintos:

- Un primer caso, donde la discontinuidad puede tener una dilatación libre (por ejemplo, un talud en roca). Esta condición es reproducida en el laboratorio manteniendo una fuerza normal constante (CNL – Constant Normal Load) durante todo el ensayo de corte (Figura 4.1a) sobre la superficie de la discontinuidad: Esta condición, por ejemplo, podría ser aplicada a un bloque de roca deslizando por una pendiente
- Un segundo caso, donde es el de rigidez normal constante (CNS - Constant Normal Stiffness), bajo esta condición los esfuerzos normales varían durante el proceso de corte. Esta situación ocurre cuando los bloques del techo o hastiales de una excavación subterránea caen hacia la excavación. Durante el movimiento de los bloques, los esfuerzos normales a la superficie de la discontinuidad no son constantes, cambiando continuamente

debido a la restricciones de dilatación normal, es decir, la discontinuidad está confinada y cualquier dilatación, activa cargas normales adicionales, esto se simula en el laboratorio manteniendo una rigidez constante durante el ensayo (Figura 4.1b).

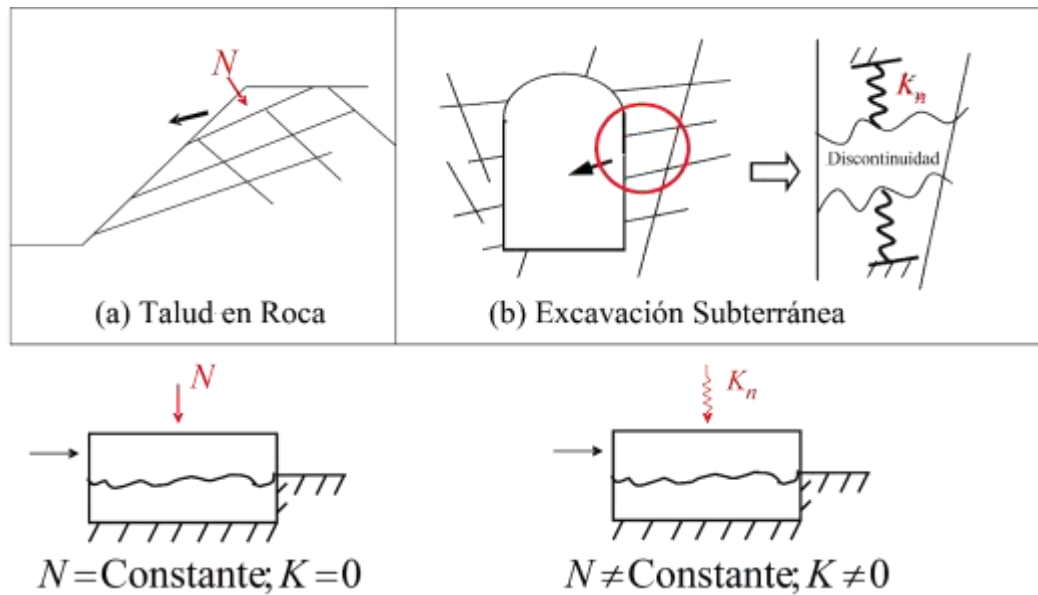


Figura 4.1 Simulación de las condiciones in-situ de los ensayos de corte directo

El ensayo de corte de discontinuidades naturales en roca, presenta dificultades para predecir su comportamiento debido a la rugosidad presente en las discontinuidades. Adicionalmente a esto, los diferentes minerales constituyentes de las rocas tienen diferentes propiedades friccionadas; mas aún el material de relleno o la meteorización de las caras de la discontinuidad puede influenciar los demás parámetros incluyendo la rugosidad efectiva. El problema se complica por el efecto aparente de escala y el nivel de esfuerzo normal.

Una opción es realizar el ensayo de corte directo sobre muestras pequeñas, aunque esto puede ser poco representativo de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso, sobre todo con respecto a la rugosidad. Los resultados de los ensayos de corte directo tienden a mostrar las mismas tendencias generales del incremento de la resistencia al corte con el aumento de la rugosidad, sobre todo con niveles bajos de esfuerzo normal, pero frecuentemente con poca consistencia de los resultados obtenidos.

En la actualidad, muchos ingenieros geotécnicos consideran los ensayos de corte directo sobre las discontinuidades de roca como indispensables, para obtener parámetros de diseños confiables. Además, se requiere un procedimiento sistemático para el análisis e interpretación de los resultados de ensayo, donde se tome en cuenta la variable rugosidad para la muestra, a fin de los datos puedan ser empleados con una mayor confianza.

4.2 Normas para la Ejecución de los Ensayos de Corte en Rocas

4.2.1 Introducción

A continuación se resumen las normas disponibles y se comentan, para la realización de los ensayos de corte directo en roca en el Laboratorio, no considerando los Ensayos de Corte Directo in-situ (ASTM, 2012), ya que estos últimos no están dentro del alcance del presente trabajo.

Normas disponibles:

- **ASTM – D5607 – 08 Método de ensayo para realizar el Ensayo de Corte Directo en Roca en el Laboratorio bajo una Carga Normal Constante [Constant Normal Load (CNL)]** (ASTM, 2008)
- **ISRM (2014) Método Sugerido para la Determinación de la Resistencia al Corte en el Laboratorio de Discontinuidades: Versión Revisada,** (International Society for Rock Mechanics, 2013)

4.2.2 ASTM – D5607 – 08 Método de ensayo para realizar el Ensayo de Corte Directo en Roca en el Laboratorio bajo una Carga Normal Constante [Constant Normal Load (CNL)]

4.2.2.1 Generalidades

Esta norma establece los requerimientos y procedimientos de laboratorio para realizar los ensayos de corte directo en roca, ya sea para roca intacta, sobre discontinuidades que sean homogéneas, o sean meteorizadas, incluyendo discontinuidades naturales o en roca. Como

ejemplo de las discontinuidades artificiales se incluyen las interfaces de roca-concreto, o interfaces de dos vertidos de concreto. Las discontinuidades pueden estar abiertas, parcialmente o completamente rellenas (puede ser por arcilla o brecha de falla).

Esta norma solo está diseñada para la realización de ensayos en una discontinuidad abierta, limpia y en condición drenada, con la aplicación de una **carga normal constante**. Para determinar la resistencia al corte hay que realizar varios ensayos con diferentes esfuerzos aplicados sobre el plano de corte o discontinuidad. Es aplicable a roca dura, roca blanda o concreto y en discontinuidades lisas o rugosas.

Presenta las características del equipo a utilizar, equipos para aplicación de los esfuerzos normales y de corte, preparación de la muestra, equipos de medición de los desplazamientos con LVDT con una precisión de 0.025 mm, necesidad de un equipo de recolección de datos.

Señala que la muestra debe ser al menos 10 veces mayor que el tamaño de grano en el espécimen y que el área mínima de ensayo debe ser 1900 mm² (3 in²).

Establece las condiciones de almacenamiento de la muestra, condición de humedad del espécimen en el momento de ensayo.

Esta norma se encuentra basada en las siguientes normas:

- Suggested Method for Laboratory Determination of Shear Strength, Editor E. T. Brown, Pergamon Press, 1981, pp. 135–137
- Suggested Method for Rock Characterization Testing and Monitoring, Editor E. T. Brown, Pergamon Press, 1981, pp. 135–137
- RTH NO 203 Direct Shear Strength of Rock Core Specimens, *Rock Testing Handbook*, Geotechnical Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1980

4.2.2.2 Ensayo en Discontinuidades Abiertas

- **Carga de Asiento:** Aplicación de una pequeña carga de asiento entre 450 a 950 N, dependiendo del tamaño de la muestra, que debe ser tomada en cuenta como parte de la carga normal aplicada al espécimen.

- **Esfuerzo Normal:** Debe ser continuo e incremental hasta alcanzar el esfuerzo establecido en el programa de ensayo, registrando los desplazamientos normales que ocurran y esperar que el esfuerzo se estabilice completamente cuando los cambios en los consecuentes desplazamiento normales sean menores a 0.05 mm en un tiempo de 10 min. Durante la etapa de corte el esfuerzo normal debe mantenerse constante.
- **Esfuerzo de Corte:** Después de haber aplicado el esfuerzo normal y que este se haya estabilizado, se procederá a la aplicación del esfuerzo de corte de una manera continua, de acuerdo a la velocidad de desplazamiento establecida. Señala un número mínimo de lecturas que deben realizarse antes de alcanzar la resistencia pico. Después de alcanzar la resistencia pico, la carga debe continuar, con las consecuentes lecturas de datos a fin de establecer la resistencia residual de corte. Especifica también como realizar los subsecuentes incrementos de esfuerzo normal.
- **Medición de los desplazamientos normales:** establece que la medición de los desplazamientos normales debe realizarse con cuatro LVDT instalados en la caja de corte. La finalidad de estas cuatro mediciones es determinar la rotación de la muestra, que se determina al comparar estas mediciones. También es posible determinar el grado de cerramiento de la discontinuidad y dilatación de la muestra.
- **Medición de los desplazamientos de corte:** Establece que la mediciones y registro de los desplazamientos de corte se realice a intervalos de 0.025 o 0.05 mm, con un dispositivo de medición montado sobre la caja de corte.

4.2.2.3 Ensayo en Roca Intacta

- **Esfuerzo Normal:** El esfuerzo normal debe ser incrementado continuamente y mantenerse constante al alcanzar el esfuerzo programado para el ensayo. Este esfuerzo normal debe mantenerse constante durante toda la ejecución de la etapa de corte del ensayo.
- **Esfuerzo de Corte:** Después de estabilizarse el esfuerzo normal, debe incrementarse continuamente el esfuerzo de corte hasta alcanzar la falla del espécimen (generación de la discontinuidad). Para las etapas subsiguientes aplicar lo establecido en el aparte 4.4.2.2.

4.2.2.4 Registro Fotográfico del Especimen

Debe fotografiarse el espécimen antes y después del ensayo.

4.2.2.5 Reporte

El reporte debe contener la siguiente información:

- a) Origen del espécimen, incluyendo nombre del proyecto, características de la localidad, profundidad, identificación de la perforación con su ángulo de inclinación, condiciones de almacenamiento: Como se preparó la muestra para su almacenamiento, manejo y transporte.
- b) Descripción física del espécimen incluyendo el tipo de material y la localización y orientación de las discontinuidades (rumbo y buzamiento) y datos que puedan ser de importancia, planos de debilidad aparente, estratificación, foliación, esquistosidad e inclusiones.
- c) Condiciones de humedad del espécimen al momento de ser ensayado, también, humedad, saturación cuando fue recibido el espécimen en el laboratorio, humedad del aire del laboratorio.
- d) Forma inicial de la muestra y su sección transversal nominal, incluyendo la rugosidad de acuerdo a la tabla de rugosidades propuesta por Barton & Choubey, (1977)
- e) Fecha del muestreo y de ensayo
- f) Número del espécimen ensayado (número de laboratorio)
- g) Tipo de material empleado para el encapsulamiento del espécimen
- h) Lecturas de las mediciones realizadas
- i) Esfuerzos aplicados durante el ensayo (normal y corte)
- j) Descripción de la falla, incluyendo fotografías, antes y después del ensayo.
- k) Tablas y gráficos de los ensayos individuales y resultados combinados, incluyendo los siguientes:
 - Esfuerzo de corte vs. Desplazamiento de corte
 - Esfuerzo de corte vs. Esfuerzo Normal

4.2.3 ISRM (2014) - Método Sugerido para la Determinación de la Resistencia al Corte en el Laboratorio de Discontinuidades: Versión Revisada

Esta versión de la norma es una revisión de la siguiente norma:

- ISRM - Método Sugerido para la Determinación de la Resistencia al Corte Directo en el Laboratorio (ISRM, 2007)

El propósito de esta revisión y actualización es abarcar los requerimientos y procedimientos para realizar el ensayo de corte directo de discontinuidades en el laboratorio utilizando las condiciones de contorno de **Carga Normal Constante (CNL)** y **Rigidez Normal Constante (CNS)**. Tomando en consideración los avances tecnológicos que se desarrollaron desde su publicación inicial, adicionalmente se consideraron también otras normas como en:

- USACE (1980) – Method of Test for Direct Shear Strength of Rock Core Specimens
- ASTM (2008) – D5607 Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force (ASTM, 2008)
- JGS (2008) – Method for Direct Shear Test on a Rock Discontinuity (JGS, 2008)

En la descripción que sigue de esta norma en versión revisada se cubren:

- Equipos
- Manejo, y almacenamiento de los especímenes
- Procedimiento de ensayo
- Cálculos y Gráficos

No se dará una descripción detallada de la norma, ya que esta se incluye completa en el Apéndice A, sino que se limitará a un resumen de cada paso.

Esta es la norma que regirá los ensayos del Laboratorio de Mecánica de Rocas (LMR) de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

4.3 Ensayo de Corte Directo

La caja de corte convencional ha sido empleada extensivamente para determinar la resistencia al corte pico y residual de un material que se esté ensayando, en función de los esfuerzos normales al plano de corte. El sistema utiliza unos mecanismos de aplicación de fuerza normal y también de carga horizontal (fuerza de corte). Las cargas normales y de corte serán registradas empleando celdas de carga. Las deformaciones son registradas ya sea empleando medidores de deformación tipo dial o transductores de variación diferencial lineal/linear variable differential transducers (LVDT).

Las cargas normales y de corte pueden ser aplicadas utilizando bombas manuales o actuadores servo-controlados neumáticos o hidráulicos. La operación servo-controlada permite determinar fácilmente la dilatancia de la muestra. Las cajas de corte convencionales consisten de una base o asiento de montaje de la muestra a ensayar en una masa encapsulante dentro de la caja de corte, con el plano de discontinuidad posicionado precisamente entre los retenedores superior e inferior. Las deformaciones normales y de corte son registradas, así como también las cargas normales y de cortes que se aplican.

La Figura 4.1 muestra un equipo de corte típico disponible para realizar el ensayo de corte directo. La muestra a ensayar (intacta o con discontinuidades) se monta dentro de la caja de corte y se cementada en las dos mitades superior e inferior de la caja de corte. La muestra se somete a un esfuerzo normal y a un esfuerzo de corte. La carga normal puede ser aplicada por medio de un actuador doble montado en el marco de carga externo. Los componentes del equipo de corte incluyen:

1. Caja de corte, superior e inferior
2. Actuador de carga de corte
3. Actuador de carga Normal
4. Sensor de desplazamiento de Corte
5. Sensores de desplazamiento Normal (es)
6. Marco de carga
7. Asiento esférico para la carga normal

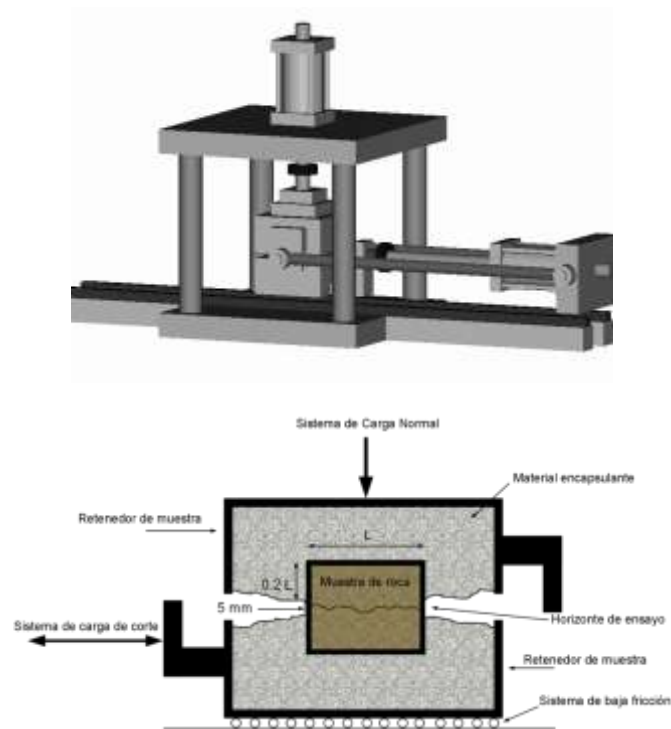


Figura 4.2 Aparato para Ensayo de Corte Directo

4.4 Equipo de Corte Directo en Rocas

El equipo de Mecánica de Rocas que dispone la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, es el Sistema RDS-500 – Sistema de Corte Directo y Ensayo Triaxial, fabricado por GCTS Testing Systems (Figura 4.2 y Figura 4.3).

Puede ser considerado como un equipo extremadamente versátil, ya que permite realizar una amplia gama de ensayos en roca bajo distintas configuraciones. Este es un equipo totalmente automatizado, con un programa de control de avanzada, permitiendo un fácil uso y manejo.

Dentro de las principales características del equipo se tienen las siguientes:

- Sistema servo-controlado electro-hidráulico, de lazo cerrado, con control en los dos actuadores (push & pull) para el ensayo de corte directo con una capacidad máxima del actuador de corte 500 kN (50 ton) con un desplazamiento máximo del actuado de ± 50 mm.
- Un actuado de carga normal con una capacidad de 1500 kN (150 tn) con un desplazamiento máximo del actuado de ± 100 mm.

- Incluye mecanismos ajustables de bloqueo para prevenir la rotación de la caja superior de corte en una dirección, dos direcciones, o ninguna dirección (libre) con respecto al plano de corte que no tiene ningún plano de rotación permitido.
- Acepta especímenes con diámetros hasta de 150 mm (6") de diámetro y especímenes cúbicos de hasta 100 x 100 mm de área y una altura de 150 mm.
- Permite realizar ensayos de Compresión sin confinar y Ensayos Triaxiales.
- El equipo permite realizar ensayos de corte, totalmente de manera automática con condiciones de Esfuerzo Normal Constante [Constant Normal Load (CNL)] o Rigidez Normal Constante [Constant Normal Stiffness (CNS)]



Figura 4.3 Sistema RDS-500 – Sistema de Corte Directo y Ensayo Triaxial



Figura 4.4 Equipo para realizar ensayo de corte directo, sin los retenedores, para establecer todos los grados de libertad de movimiento del cabezal

4.4.1 Mecanismo de Carga Normal

La carga normal se aplica empleando sistema hidráulico, el cual está diseñado para hacer que la carga esté distribuida sobre el plano a ser ensayado. La capacidad del actuador de carga normal debe ser mayor que la dilatancia o consolidación de la muestra esperada durante el ensayo y debe ser capaz de mantener la carga normal dentro de un 2% de la carga requerida.

4.4.2 Mecanismo de Carga de Corte

El mecanismo de carga de corte puede ser aplicado empleando sistemas hidráulicos. La carga debe ser distribuida a lo largo de cada una de las dos mitades de la muestra a ensayar con la fuerza de corte actuante en el plano de corte. El actuador de corte debe permitir un desplazamiento del 10% mayor que la longitud de la muestra. También está construido sobre una unidad de baja fricción, haciendo que el equipo asegure que la resistencia al corte por desplazamiento sea menor del 1% de la fuerza de corte máxima aplicada en el ensayo.

4.4.3 Detección de la Carga Normal y de Corte

La carga normal se registra empleando la celda de carga montada entre el actuador de carga normal y el tope de la caja de corte. La exactitud de la celda de carga debe ser $\pm 2\%$ de la carga máxima alcanzada en el ensayo. La celda de carga debe tener una exactitud de aproximadamente 0.1% de la capacidad de la celda de carga.

4.4.4 Detección de la Deformación Normal y de Corte

La deformación normal y corte en la muestra a ensayar se mide empleando “transductores lineales variables diferenciales-linear variable differential transducers” (LVDT). Un posible arreglo es tener cuatro (4) LVDT para medir la deformación normal y otro LVDT para medir la deformación por corte. El rango de trabajo recomendado para los LVDT para el desplazamiento normal y de corte es de +0.25 pulgadas (+6mm) con una exactitud menor de 0.001 pulgadas (0.025 mm).

4.5 Generalidades del Programa

El Modo de Ensayo de Corte Directo GCTS dentro del Programa CATS, que está asociado al equipo físico, es un programa de uso fácil que permite al usuario configurar fácilmente el ensayo y realizar el ensayo de corte directo. El programa tiene previsto control y determinación del tiempo real de entradas experimentales diversas, tal como el área corregida de corte del espécimen, así como también el esfuerzo normal y el esfuerzo al corte. El usuario tiene la elección para configurar su propio ensayo, con múltiples etapas, dentro de cada etapa podrá iniciarse con una etapa de Consolidación, una Carga de Corte o Universal. La etapa de Consolidación permite al usuario realizar fácilmente una consolidación normal, y la Etapa de Carga de Corte es optimizada, mientras que la etapa Universal le permite al usuario definir cualquier secuencia de ensayo que quiera. Como mínimo, el programa requiere que los sensores eléctricos midan la carga de corte y deformación de corte. El control de la carga normal y/o de la carga corte o puede ser realizada utilizando a un controlador externo o servocontrolado usando este programa cuándo es combinado con una servoválvula, o servocontrol, empleando el programa cuando es combinado con una servo-válvula, servo-amplificador y un actuador doble. El “Modo de Ensayo Anillo de Corte-Ring Shear Test mode” dentro del software CATS, es un programa de fácil uso que permite configurar y realizar el “ensayo de corte de anillo torsional-torsional ring shear tests”.

El programa permite, en tiempo real, determinar y controlar varias entradas de ensayos, tales como el esfuerzo normal y el esfuerzo de corte.

4.6 Tipos de las especímenes para el Ensayo de Corte Directo

El Ensayo de Corte Directo sobre un espécimen puede ser realizado sobre cuatro tipos de ellos. El aspecto importante es diferenciar el área de la superficie de corte del espécimen, la cual será cizallada o cortada durante el ensayo. La configuración del espécimen determinará la forma del área de la superficie de corte. Por ejemplo, cuando un espécimen cilíndrico está colocado en una posición vertical, entonces la superficie de corte tendrá un área circular, y si

el mismo espécimen es colocado en una posición horizontal, en este caso, la superficie de corte tendrá un área rectangular.

Existen básicamente cuatro tipos de especímenes, los cuales, con la excepción del tipo cilíndrico, relacionan la forma del área de la superficie de corte del espécimen (para el espécimen cilíndrico, el área de la superficie de corte es dada por la configuración del espécimen):

- Cilíndrica
- Cuadrada
- Rectangular
- Otra

4.6.1 Espécimen Cilíndrico

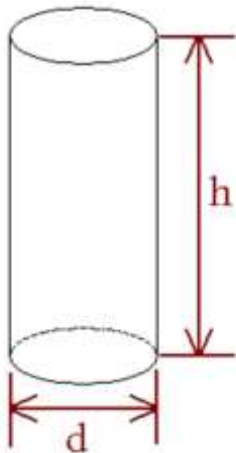


Figura 4.5 Espécimen cilíndrico

El espécimen cilíndrico se configura por su altura, h , así como también por su diámetro, d . El área de la superficie de corte de un espécimen circular es dada por su orientación. En la actualidad, el programa permite tres (3) orientaciones del espécimen cilíndrico, que dan tres posibles áreas de superficies de corte: 1) cuando el espécimen cilíndrico está orientado verticalmente, en este caso tendremos una sección transversal circular; 2) si el espécimen está inclinado con respecto a la vertical tendremos una sección transversal horizontal elíptica para el área de la superficie de corte; y 3) cuando el espécimen está acostado completamente (posición horizontal), entonces tendremos una superficie de corte rectangular.

Si se quiere ensayar el espécimen cilíndrico en otras orientaciones que no están directamente soportadas aquí, entonces se necesita encontrar la configuración que mejor se ajuste a la configuración del espécimen.

4.6.1.1 Superficie del Área de corte para un Espécimen Cilíndrico

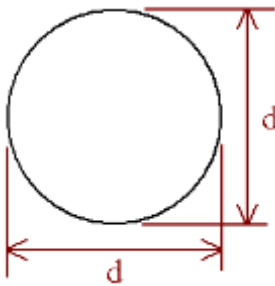


Figura 4.6 Área circular

Si un espécimen cilíndrico se orienta en posición vertical, entonces obtendremos una sección transversal para el área de la superficie de corte, que será definida por su diámetro, d . Debido a que la sección transversal circular es simétrica, la dirección de carga no tiene que ser definida para esta área de la superficie de corte.

4.6.1.2 Superficie del Área de Corte Elíptica para un Espécimen Cilíndrico

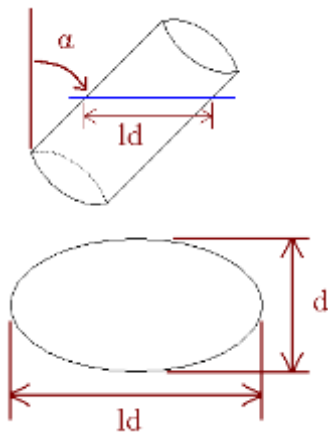


Figura 4.7 Área elíptica

Si el espécimen cilíndrico está inclinado con respecto a la posición vertical un ángulo α , entonces se tendrá un área de sección transversal elíptica para la superficie de corte, la cual es definida por su diámetro, d , así como también por la distancia horizontal mayor, ld , para definir la elipse. Debido a que la sección transversal no es simétrica, una dirección de carga no está definida para esta área de la superficie de corte.

4.6.1.3 Superficie del Área de Corte Rectangular para un Espécimen Circular

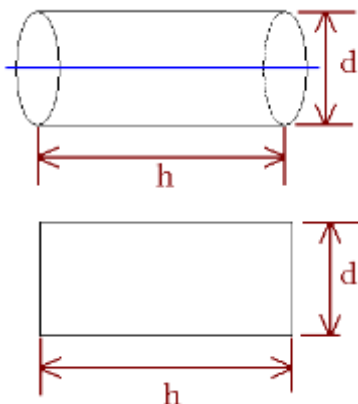


Figura 4.8 Área rectangular

Si el espécimen cilíndrico es orientado de manera tal que se encuentra en posición horizontal, en este caso se tendrá un área de sección transversal rectangular para la superficie de corte, la cual es definida por su diámetro, d , así como la altura del espécimen, h , para configurar un rectángulo

En esta orientación se asume que la superficie del área de corte pasa por el centro del cilindro, donde el valor de la sección transversal es el diámetro por la altura del espécimen, $d \times h$. Debido a que la sección transversal no es simétrica, una dirección de carga no está definida para esta área de la superficie de corte.

4.6.2 Espécimen Cuadrado

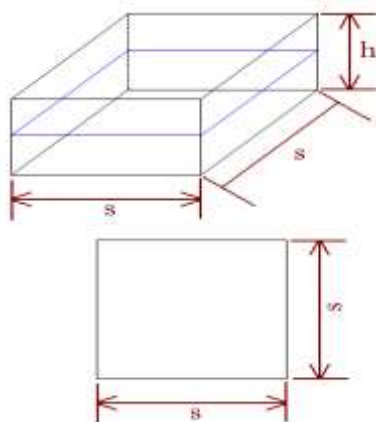
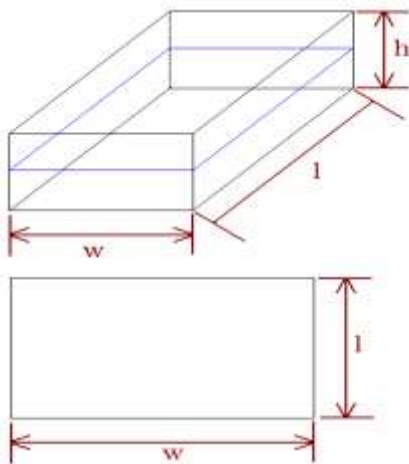


Figura 4.9 Espécimen cuadrado

El espécimen cuadrado se describe por su altura, h , así como también por la dimensión de sus lados, s . Durante el ensayo, se supone que el espécimen tendrá un área de sección transversal para la superficie de corte que será un cuadrado en posición horizontal.

4.6.2.1 *Espécimen Rectangular*



El espécimen rectangular se describe por su altura, h , así como las dimensiones de sus lados, el ancho, w , y su largo, l . Durante el ensayo, se supone que el espécimen tendrá un área de sección transversal para la superficie de corte que será un rectángulo en posición horizontal.

Debido a que la sección transversal no es simétrica, una dirección de carga no está definida para esta área de la superficie de corte.

Figura 4.10 Espécimen rectangular

4.6.3 Otros tipos de Especímenes

La opción de otro tipo de especímenes, permite manejar casos donde las otras opciones no pueden ser empleadas. Para los otros tipos de especímenes, la relación entre la deformación de corte y el área de corte necesitan ser definidas. En esta definición se pueden tener dos alternativas: Por la definición de los puntos del área de la superficie de corte vs. deformación de corte, o por la definición de la función del área de corte vs. deformación de corte.

4.7 Preparación de las muestras para el Ensayo de Corte Directo

El espécimen debe ser encapsulado en los anillos de corte, que se insertan en la caja de corte en el equipo. El procedimiento es el siguiente (Figura 4.12),

1. Una vez seleccionado el espécimen, en cualquiera de las formas descritas anteriormente, se corta de manera que este pueda ser colocado entre los dos anillos. En el caso de formas irregulares, es necesario determinar el área de corte del espécimen y las sucesivas variaciones del área de contacto entre las dos caras de la discontinuidad, que ocurrirán en el ensayo cada 1 mm o menos.

2. En la etapa de encapsulamiento, se encapsula primero la parte inferior de la muestra. Es recomendable utilizar para el encapsulamiento cementos de alta resistencia, que puedan resistir los esfuerzos a que va estar sometido el espécimen.
3. Una vez fraguado el cemento encapsulante se coloca el anillo separador y centrador del anillo inferior y superior, que será la zona por donde se realizará la cizalla sobre la muestra. Este anillo tiene un separador entre los dos anillos. A fin de garantizar la separación entre los encapsulamientos de cemento, se coloca en la separación sobre la cual se realizará el corte, un relleno de plastilina, que evitará que el cemento vaciado para el anillo superior entre en contacto con el vaciado en el inferior que y deje el espacio para el movimiento horizontal de corte.
4. Se vacia el cemento encapsulante para el anillo superior, se deja fraguar.
5. Posteriormente la muestra confinada en los anillos, es colocada en la caja de corte, ejecutando el ensayo de acuerdo a la programación realizada y con las distintas etapas para realizar el ensayo.
6. Finalizado el ensayo se extraen y se convierten los datos a formato Excel y se inicia el proceso de elaboración del Informe respectivo.



Figura 4.11 Procedimiento para el ensayo de corte directo (Aranguren Otero & Lacruz Paredes, 2016)

4.8 Recolección y Análisis de Resultados

4.8.1 Elaboración de Reportes

Se generan reportes agrupándolos por tipo litológico y ensayo, para todos los especímenes ensayados.

4.8.2 Análisis de Resultados

Al finalizar las comparaciones y los reportes de los resultados obtenidos, se realiza el análisis de los mismos para determinar el comportamiento de los especímenes. Se utiliza el programa RocData que es un conjunto versátil de herramientas usado para el análisis de los datos de roca, la resistencia del suelo y otros parámetros físicos.

4.9 Reporte del Ensayo de Corte Directo en Roca del Laboratorio de Mecánica de Rocas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela

A continuación se presentará y se describirá en detalle un reporte tipo del Ensayo de Corte Directo en Roca, realizados en el laboratorio.

Este reporte tipo ha sido utilizado por más de cinco años en los distintos trabajos de investigación como de servicio a empresas. Se presentarán los dos informes para los tipos de ensayos que se están realizando en la actualidad:

- a) Ensayo de Carga Normal Contante [Constant Normal Load (**CNL**)]
- b) Ensayo de Rigidez Normal Constante [Constant Normal Stiffness (**CNS**)]



Con la finalidad de organizar y sistematizar los resultados, se procedió a organizar los datos utilizando tablas, gráficos y reportes, así:

- **Tablas:** Empleadas para simplificar los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas y a su vez comparar con diversas variables.

- **Gráficos:** Son realizados con la finalidad de presentar datos numéricos mediante recursos gráficos (lineal, barras, circular, entre otros) que permiten representar de manera visual la relación existente entre una o más variables. Para la elaboración de estos se hizo uso de herramientas computacionales como Office, Grapher y RocData.
- **Reportes:** Para sintetizar los resultados de los ensayos mecánicos se crearon hojas de reportes allí se describen características de las muestras (dimensiones y peso), configuración del equipo (etapas de ejecución), resultados (esfuerzos, deformaciones y módulos), algunos gráficos y fotos de la muestras antes y después del ensayo.

4.9.1 Reporte del ensayo de Carga Normal Contante [Constant Normal Load (CNL)]

En este reporte típico se presenta un ensayo sobre una muestra de cemento aditivado con sílice para la cementación de pozos petroleros. Esta es una muestra cilíndrica sometida a un proceso de curado, sometida a condiciones simuladas de estimulación térmica a temperatura de 288°C y presión de celda de 10.34 MPa, para la caracterización mecánica de un sistema cementante convencional con sílice para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a la inyección de vapor. Se describirán de manera detallada cada uno de los campos del reporte, indentificados con el número en fondo azul.

1			LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			
	RIF: J-001108483		<i>Caracterización Mecánica De Un Sistema Cementante Convencional Con Sílice</i>			
Código Proyecto:		Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 1 de 7	
TESIS DE GRADO		D. VILFAÑE & J.BRAVO	M. CASTILLEJO & V. BASTOS	02-11-2015	Espécimen: 1712_DSH	
2	NORMAS UTILIZADAS		ISRM Suggested Methods For Determining Shear Strength (2014) ASTM D5607 - 08 - Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force			
3	DATOS GENERALES					
	Equipo	GCTS - RDS-500				
	Software	C.A.T.S. Advanced – Versión: 1.89				
	Proyecto	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN SISTEMA CEMENTANTE CONVENCIONAL CON SÍLICE PARA LA CEMENTACIÓN DE POZOS DE LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO CANDIDATOS A LA INYECCIÓN DE VAPOR				
	Espécimen	1712_DSH				
	Origen del Espécimen	Elaborado en el Laboratorio según formulación				
	Tipo de Cemento	G				
	Tipo de Roca	Dura				
	Inclinación de la Discontinuidad	- Generada en la etapa 1				
	4	Tipo de Espécimen	Cilíndrico	Altura	115.90mm	
			Diámetro	54.60 mm		
			Angulo de inclinación con la vertical:	-		
Dirección de Esfuerzo de Corte	indicada					
Eje Mayor	- mm					
Área Inicial	23.41 cm ²					
Grados de libertad de la Caja de Corte		Todos		GRADOS DE LIBERTAD DEL ENSAYO		
PROGRAMA DE CARGA						
5	Etapa 1: APLICACIÓN DE ESFUERZO NORMAL σ_n			Etapa 2: APLICACIÓN DE ESFUERZO DE CORTE τ_n		
	Actuador de Corte			Actuador de Corte		
	Retroalimentación	AI-4: Desplazamiento de Corte		Retroalimentación	AI-4: Desplazamiento de Corte	
	Modo	Constante		Modo	Incremental	
	Valor Constante	Relativo		Valor Inicial	0 mm	
	Actuador Normal			Velocidad de Desplazamiento	2 mm/minuto	
	Retroalimentación	TI-2: σ_n – Esfuerzo Normal		Valor Final	15 mm	
	Modo	Incremental		Actuador Normal		
	Valor Inicial	0 kPa		Retroalimentación	TI-2: σ_n – Esfuerzo Normal	
	Velocidad de Carga	Ver etapa de resultados		Modo	Constante	
	Valor Final	kPa		Valor Constante	Relativo	
	Adquisición de Datos			Adquisición de Datos		
	Incrementos de Tiempo	1 segundo		Incrementos de Tiempo	1 segundo	
	Nivel de Cruce	Seleccionado		Nivel de Cruce	Seleccionado	
	Picos/valles	Seleccionado		Picos/valles	Seleccionado	
Entrada Maestra	AI-2: Desplazamiento del actuador normal		Entrada Maestra	AI-4: Desplazamiento de corte		
Sensibilidad	0.05 mm		Sensibilidad	0.05 mm		
Tiempo Máximo de Ejecución	1 minutos		Tiempo Máximo de Ejecución	- minutos		
Corrección del área para la Deformación por Corte			Corrección del área para la Deformación por Corte			
sin corrección			con corrección			

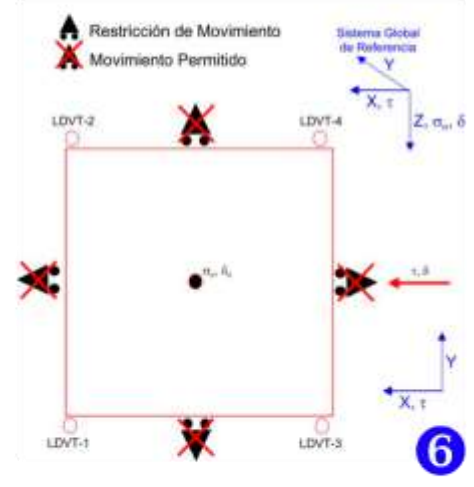


Figura 4.12 Página 1 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL)

• **Página 1 del reporte**

La Figura 4.12, muestra la página 1 del reporte del ensayo. Define el ensayo que se va a realizar, las características de la muestra y programación del ensayo. El campo 1, define

el encabezado de todas las paginas del reporte para el espécimen que se está ensayando. Se indentifica el nombre del laboratorio, quien es el ente contratante del ensayo, la fecha del ensayo, número de laboratorio de la muestra (este número es único para las muestras que ingresan al laboratorio, en el caso que el número de laboratorio este seguido de “-#”, significa que de una misma muestra se tomarón varios especímenes. En este caso de un cilindro vaciado de cemento con sílice, una vez curado, de la muestra se obtuvieron especímenes distintos, para el mismo ensayo u otros ensayos.

El campo ②, especifica las normas que rigen el ensayo que se está realizando.

El campo ③, especifica el equipo utilizado, programa de control y su versión, el proyecto para el cual se ejecuta el ensayo.

El campo ④, define los datos específicos de la muestra, número de laboratorio de la muestra, origen, dimensiones, tipo de la discontinuidad sobre la cual se realizará el ensayo de corte directo en roca, los grados de libertad del cabezal superior del equipo de corte. Estos grados de libertad son definidos inicialmente, pudiendo estar restringido su movimiento en una o dos direcciones. A mano derecha del reporte se encuentra el gráfico ⑥ que representa las condiciones bajo las cuales se está realizando el ensayo. En este caso el cabezal tiene la posibilidad de tener rotación en cualquier dirección, el condicionamiento de estos grados de libertad influenciará en el comportamiento de la muestra en el ensayo.

El campo ⑤, presenta el programa de ejecución total del ensayo. En el cuadro de la izquierda se presenta el programa general de carga del esfuerzo normal para cada una de las etapas. A medida que avanzan las etapas, en los gráficos particulares de las etapas se indicarán los esfuerzos normales σ_{nx} , que se aplicarán en cada una de las etapas. Esta se divide en cinco (5) secciones que son: a) comportamiento del actuador de corte; b) comportamiento del actuador normal; c) etapa de adquisición de los datos; d) tiempo máximo de ejecución de la carga por el actuador normal; e) la corrección del área del espécimen mientras se ejecuta la carga normal. Cada una de estas se describen a continuación:

- a) **Comportamiento del actuador de corte:** se especifica, el dispositivo de retroalimentación para la ejecución de esta etapa, que en este caso es el AI-4: Desplazamiento de Corte, y que durante toda la etapa tendrá un modo de comportamiento constante y será relativo a la posición que el actuador de corte tenga para el momento que se inicie el ensayo, garantizando de esta manera que el actuador no tenga ningún tipo de desplazamiento.
- b) **Comportamiento del actuador normal:** se especifica el dispositivo de retroalimentación para la ejecución de esta etapa, que en este caso es el TI-2: σ_n – Esfuerzo Normal, que es el dispositivo de control del esfuerzo que se está aplicando al espécimen. Es importante señalar que este dispositivo es virtual, ya que el equipo que dispone de manera real es la celda de carga, debido a que en la etapa 4, se definió la muestra. El controlador puede emular este dispositivo virtual, realizando el cálculo del esfuerzo aplicado en cada momento. El modo de carga aplicado es incremental, cuyo valor inicial partirá de 0 kPa, la velocidad (kPa/seg) de aplicación del esfuerzo normal para lograr el valor de carga final de carga establecido para el punto, en (kPa). Esta será una velocidad de carga constante durante esta etapa para el punto particular.
- c) **Etapas de adquisición de los datos:** Esta etapa de adquisición de datos para la aplicación del esfuerzo normal especifica el incremento de tiempo de cómo se tomarán los datos durante esta etapa de carga. Si los tiempos son muy cortos, el número de datos se incrementará de manera proporcional a la relación del tiempo en que se ejecuta el ensayo entre el tiempo de adquisición, es decir para el primer punto será 1 minuto = 60 segundos, entonces el número de datos recolectados será de: $60 \text{ segundos} / 1 \frac{\text{dato}}{\text{segundo}} = 60 \text{ datos}$; el nivel de cruce de adquisición de datos permite que los datos de la fase se guardan con respecto a un maestro de entrada (entrada de interés) y un valor de sensibilidad. Así, cuando se elige la adquisición de datos a nivel de cruce, se requiere seleccionar la entrada principal, y se introduce un valor de sensibilidad, ya sea como un porcentaje de la escala total o en las unidades de la entrada principal; el pico y valle de adquisición de datos permite que los datos de la fase se guarden, con respecto a una entrada principal (entrada de interés) de pico y valles. La adquisición de datos de pico y valle, emplea la entrada principal y la sensibilidad. No adquiere constantemente los datos, cuando no se excede la

sensibilidad del canal principal, sólo cuando se ha detectado un pico o valle que excede la sensibilidad. El método de pico y valle adquiere datos cuando la señal de la entrada principal tiene una pendiente de cero y la inversión de la señal es igual o mayor que la sensibilidad especificada. Un valor máximo o mínimo relativo se considera cuando la señal cambia su dirección en una cantidad igual o mayor que la sensibilidad.

- d) Tiempo máximo de ejecución de la etapa:** esto representa el tiempo máximo que durará la etapa. Si el valor de esfuerzo normal carga alcanza el valor especificado en menos tiempo del señalado, este esfuerzo se mantendrá constante, hasta que se cumpla el tiempo especificado, para pasar a la siguiente etapa;
- e) Corrección por área:** El cálculo del área (corregida) es una opción, dependiente del usuario en el momento de realizar la programación del ensayo. Si esta opción se activa se especificará como será el tipo de corrección a realizar sobre el área inicial sometida a el ensayo de corte.

- Páginas 2, 3, 4 y 5

1	 RIF: J-001108483	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7
	<i>Caracterización Mecánica De Un Sistema Cementante Convencional Con Sílice</i>				
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 2 de 7	
TESIS DE GRADO	D. VILLAFÁÑE & J.BRAVO	M. CASTILLEJO & V. BASTOS	02-11-2015	Espécimen: 1712_DSH	

2 Resultados

Punto 1	Velocidad de Carga – σ_n	50 kPa/segundo	Valor Final – σ_n	500 kPa	
VARIABLE	ETAPA 1 – Aplicación de Carga Normal		ETAPA 2 – Ejecución del Corte		Unidades
	Pico	Residual	Pico	Residual	
τ - Esfuerzo de Corte	27.40	3.91	5380.33	832.35	kPa
Tiempo	10.499600	60.00	178.20	510.00	segundos
Deformación de Corte	-0.0047	0.00	3.93	15.00	mm
Deformación Normal	0.1256	0.13	-1.56	-2.18	mm
σ - Esfuerzo Normal	769.1415	508.41	513.68	528.74	kPa
Mediciones				1414	puntos

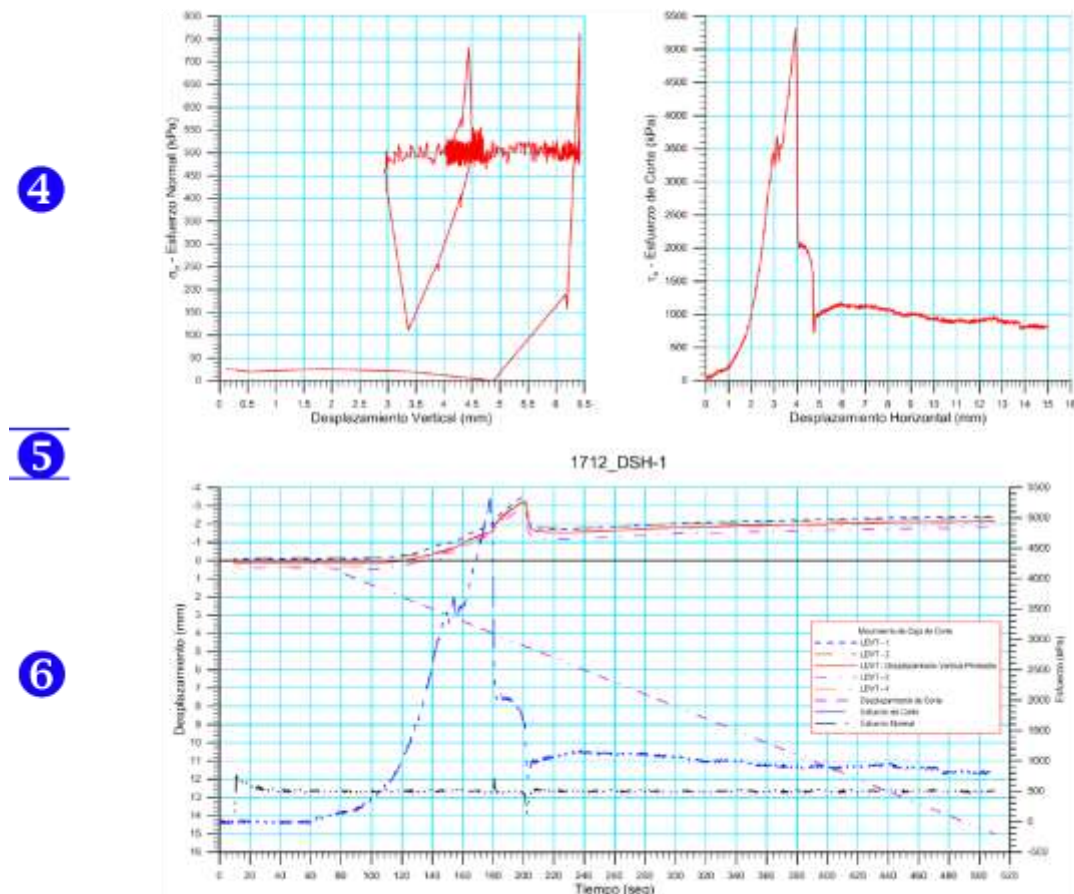


Figura 4.13 Página 2 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL)

1	 LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)		 			
	RIF: J-001108483		RIF: G-20000062-7			
Código Proyecto: TESIS DE GRADO		Cálculo: D. VILLAFANE & J. BRAVO	Revisión: M. CASTILLEJO & V. BASTOS	Fecha: 02-11-2015	Página 3 de 7 Espécimen: 1712_DSH	
2	Punto 2	Velocidad de Carga – σ_n	50 kPa/segundo	Valor Final – σ_n	1000 kPa	
3	VARIABLE	ETAPA 1 – Aplicación de Carga Normal		ETAPA 2 – Ejecución del Corte		Unidades
		Pico	Residual	Pico	Residual	
	τ - Esfuerzo de Corte	43.06	-70.47	1539.99	1294.14	kPa
	Tiempo	0.003420	60.00	297.81	510.00	segundos
	Deformación de Corte	0.0062	-0.01	7.92	15.00	mm
	Deformación Normal	0.0048	0.62	0.40	0.06	mm
	σ - Esfuerzo Normal	32.5916	1010.43	1018.45	985.30	kPa
	Mediciones				1423	puntos

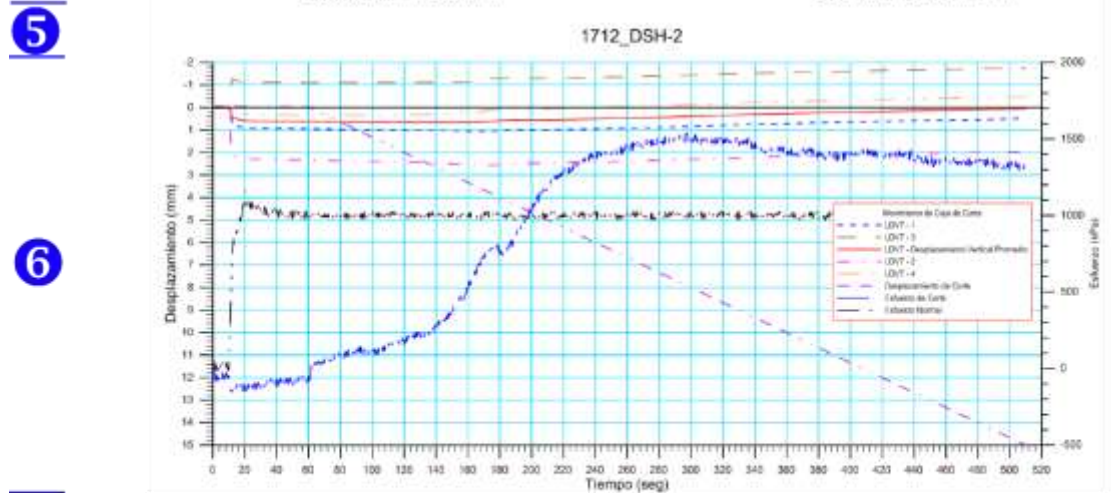
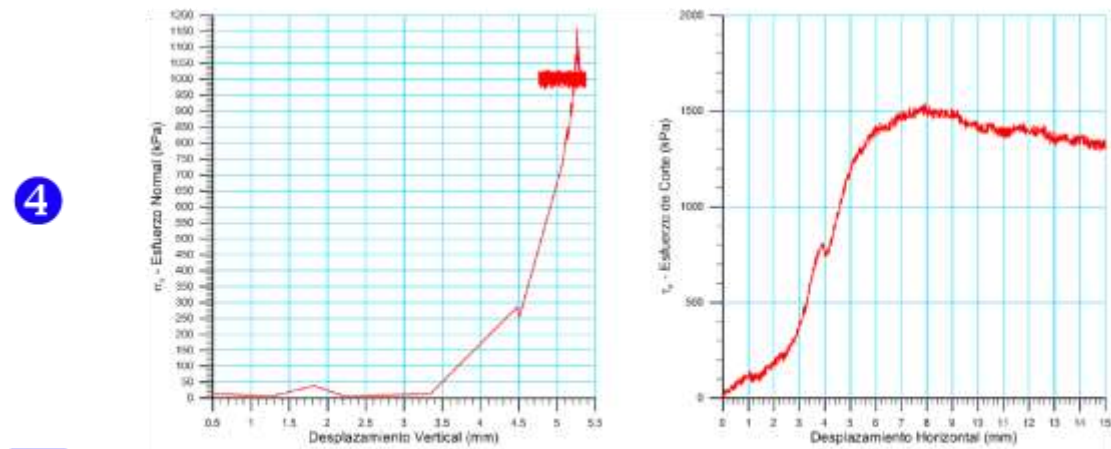


Figura 4.14 Página 3 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL)

1	 LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)		 			
	RIF: J-001108483		RIF: G-20000062-7			
Código Proyecto: TESIS DE GRADO		Cálculo: D. VILLAFANE & J. BRAVO	Revisión: M. CASTILLEJO & V. BASTOS	Fecha: 02-11-2015	Página 4 de 7	
Tesis de Grado		D. VILLAFANE & J. BRAVO		M. CASTILLEJO & V. BASTOS		
Tesis de Grado		D. VILLAFANE & J. BRAVO		M. CASTILLEJO & V. BASTOS		
2	Punto 3	Velocidad de Carga – σ_n	50 kPa/segundo	Valor Final – σ_n	2000 kPa	
3	VARIABLE	ETAPA 1 – Aplicación de Carga Normal		ETAPA 2 – Ejecución del Corte		Unidades
		Pico	Residual	Pico	Residual	
	τ - Esfuerzo de Corte	3.91	-332.74	2353.60	2183.90	kPa
	Tiempo	0.030782	60.00	376.33	510.00	segundos
	Deformación de Corte	0.0016	0.00	10.53	14.99	mm
	Deformación Normal	0.0012	0.79	0.95	0.82	mm
	σ - Esfuerzo Normal	0.0000	1994.55	2023.14	1994.39	kPa
	Mediciones				1427	puntos

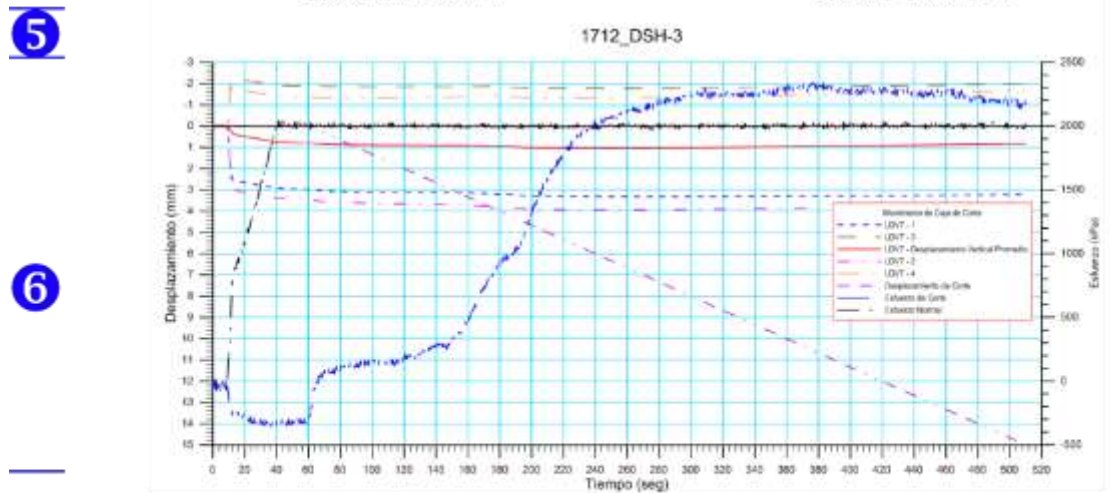
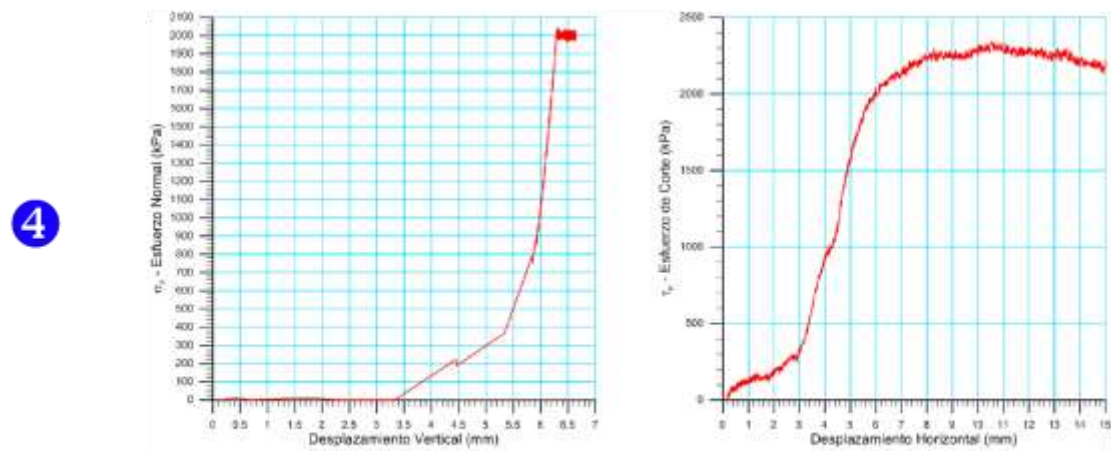


Figura 4.15 Página 4 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL)

1	 RIF: J-001108483		LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL) <i>Caracterización Mecánica De Un Sistema Cementante</i> <i>Convencional Con Silice</i>		 RIF: G-20000062-7		
	Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 7		
	TESIS DE GRADO	D. VILLAFÁÑE & J.BRAVO	M. CASTILLEJO & V. BASTOS	02-11-2015	Especimen: 1712_DSH		
2	Punto 4	Velocidad de Carga – σ_n	100 kPa/segundo	Valor Final – σ_n	4000 kPa		
3	VARIABLE	ETAPA 1 – Aplicación de Carga Normal		ETAPA 2 – Ejecución del Corte		Unidades	
		Pico	Residual	Pico	Residual		
	τ - Esfuerzo de Corte	3.91	-598.97	3847.57	3703.98	kPa	
	Tiempo	0.017101	60.00	441.92	510.00	segundos	
	Deformación de Corte	0.0062	-0.01	12.72	14.99	mm	
	Deformación Normal	0.0017	1.30	1.59	1.55	mm	
	σ - Esfuerzo Normal	6.5186	3989.33	4031.12	3988.77	kPa	
	Mediciones					1431	puntos

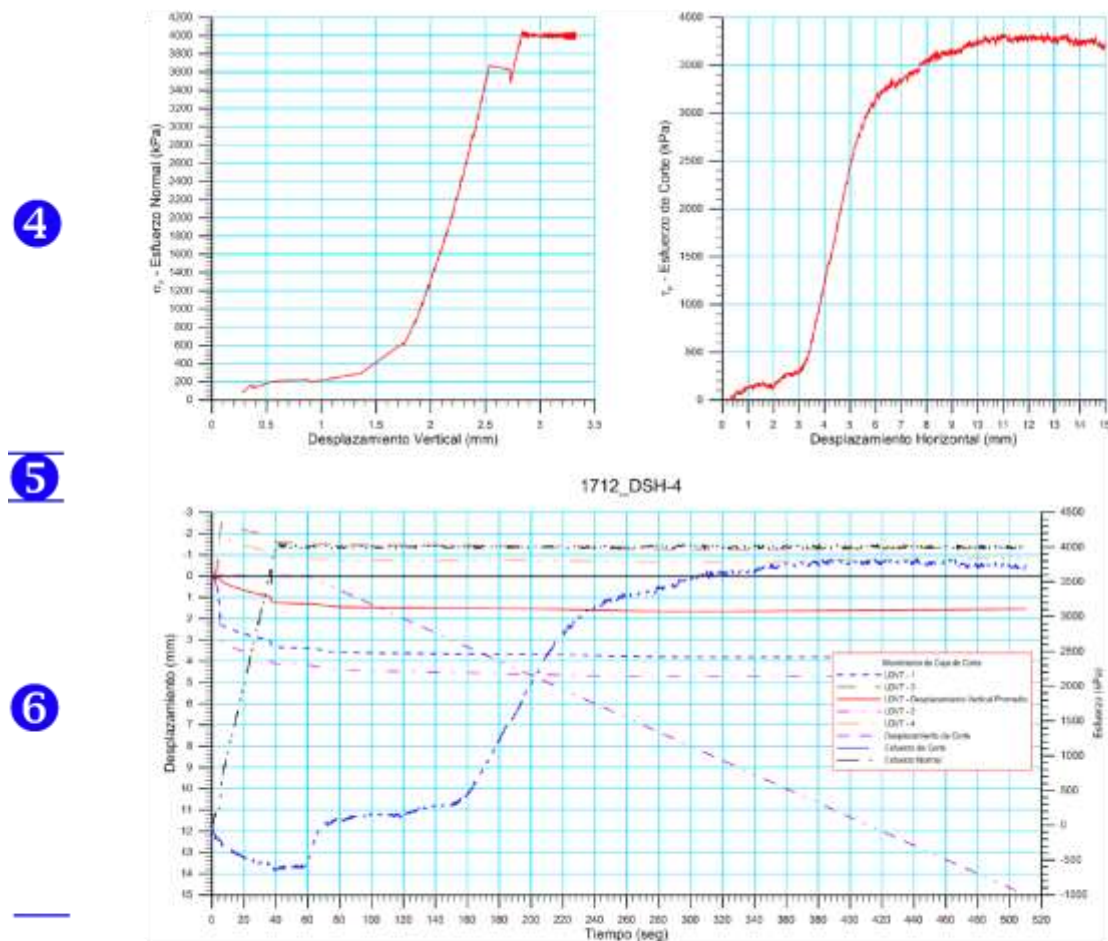


Figura 4.16 Página 5 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL)

Como se puede observar, estas cuatro páginas (Figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16) del reporte tiene los mismos campos.

El campo ①, como en la primera página, corresponde al tipo de ensayo, ente contratante, número del espécimen, fecha de ejecución del ensayo.

El campo ②, tiene los datos correspondiente al punto dentro del ensayo a que corresponde, el esfuerzo normal y la velocidad de aplicación del esfuerzo. Como puede observar hay cuatro puntos de determinación de la resistencia al corte con cuatro cargas normales, que tienen el doble del esfuerzo del punto anterior. Se puede preguntar porqué cuatro puntos? Esto es debido a que los ensayos de corte de roca deben realizarse sobre una discontinuidad existente. Como en muchos de los casos, las muestras obtenidas a través de perforaciones con extracción de núcleos o como en este caso en cilindros de cemento preparados bajo una formulación particular, esta discontinuidad, no existe y por lo tanto el primer punto corresponde a la **generación de la discontinuidad**, que representa la resistencia del material bajo un esfuerzo normal al corte. Los tres puntos restantes, incluyendo la resistencia al corte residual del primer punto, se consideran para la estimación de los parámetros de resistencia C y ϕ , del material en estudio.

En el campo ③, se reportan las variables de esfuerzo de corte y normal, deformación de corte y normal, tiempo de ejecución y el número de puntos registrados, tanto de la primera como en la segunda etapa de cada punto.

En el campo ④, se presenta en el gráfico de la izquierda el esfuerzo normal vs el desplazamiento vertical del actuador de carga axial. En el gráfico de la derecha se presenta el esfuerzo de corte vs. desplazamiento horizontal del actuador de corte.

En el campo ⑤, se presenta el número de laboratorio del ensayo. El último número a la derecha indica a qué etapa corresponde el juego de graficos presentados en los campos ④ y ⑥, de manera de garantizar los graficos con cada etapa que se esté reportando.

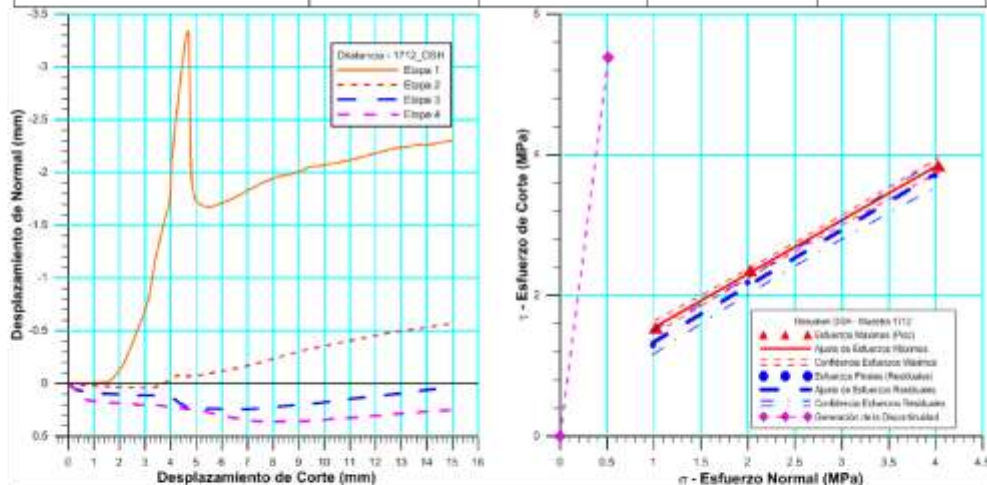
El gráfico del campo 6 presenta el desarrollo de todas las variables del ensayo en el tiempo, lo cual permite establecer qué condiciones en particular ocurren en un momento determinado.

• **Página 6**

1	 RIF: J-001108483	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL) <i>Caracterización Mecánica De Un Sistema Cementante Convencional Con Silíce</i>			 RIF: G-20000062-7
	Código Proyecto: TESIS DE GRADO	Cálculo: D. VILLAFÁÑE & J. BRAVO	Revisión: M. CASTILLEJO & V. BASTOS	Fecha: 02-11-2015	Página 6 de 7 Espécimen: 1712_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.51368	5.38033	0.52874	0.83235
2	1.01845	1.53999	0.98530	1.29414
3	2.02314	2.35360	1.99439	2.18390
4	4.03112	3.84757	3.98877	3.70398



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(37.34) * s + 0.78$	$t = \tan(38.54) * s + 0.54$
Cohesión (c) (MPa)	0.78	0.54
Ángulo de Fricción (θ), (grados)	37.34	38.54
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.36	2.32
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.58	2.39
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.74	2.97
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

Figura 4.17 Página 6 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL)

En la figura 4.17, se describe:

- En el campo ❶, la identificación del ensayo, tal como se señaló anteriormente.
- En el campo ❷, se presentan los valores de (σ_{np}, τ_p) y (σ_{nr}, τ_r) para cada uno de los puntos del ensayo.
- En el campo ❸, en el gráfico de la izquierda se muestra la deformación vertical vs la deformación horizontal, que se denomina dilatancia para la etapa de corte, con la cual se puede calcular el ángulo de dilatancia. Esto dá una idea de la rugosidad de la discontinuidad a medida que una cara se desplaza sobre la otra. En el gráfico de la derecha, se representan los esfuerzos de corte τ vs los esfuerzos normales σ_n para los valores pico residual, y aplicando el criterio de Mohr-Coulomb (Figura 4.18), para los puntos en cuestión se obtienen los parámetros de resistencia c y ϕ , del material en estudio. Hay que recordar que el primer valor de esfuerzo pico de la etapa 1, corresponde a la **generación de la discontinuidad** y se representa como una recta que parte del valor de $(\tau, \sigma_{n0}) = (0, 0)$ y finaliza en el valor de (τ, σ_{n1}) .

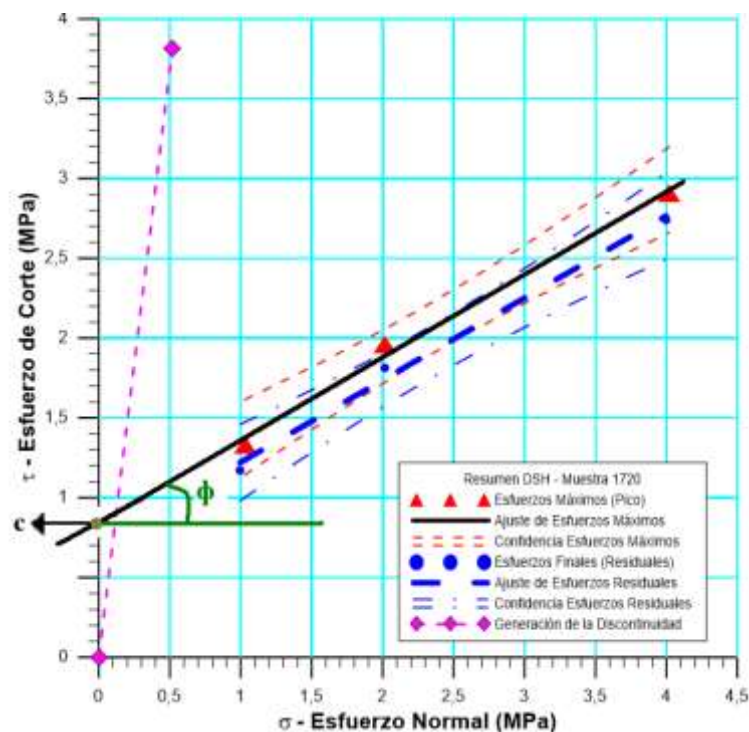


Figura 4.18 Aplicación del criterio de Mohr-Coulomb a la muestra 1720-DSH

En el campo 4, se presenta el resumen total de todas las variables de interés del ensayo, tanto para los esfuerzos máximos o picos como para los esfuerzos mínimos o residuales.

- **Página 7 (Figura 4.19)**

Allí se presentan las observaciones del ensayo, la foto del espécimen antes del ensayo, y las caras de las superficies de la discontinuidad, una vez que han concluido las cuatro etapas de corte para el espécimen.

 <p>RIF: J-001108483</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)</p>			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p><i>Caracterización Mecánica De Un Sistema Cementante Convencional Con Sílice</i></p>			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 7
TESIS DE GRADO	D. VILLAFÑE & J.BRAVO	M. CASTILLEJO & V. BASTOS	02-11-2015	Espécimen: 1712_DSH
<p>OBSERVACIONES</p> <p>Espécimen sometido a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 288°C y presión de 10,34MPa.</p>				
 <p>FINAL – CAJA INFERIOR</p>		<p>INICIAL</p>  <p>FINAL – CAJA SUPERIOR</p>		

Figura 4.19 Página 7 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNL)

4.9.2 Reporte del ensayo de Rigidez Normal Constante [Constant Normal Stiffness (CNS)]

El reporte tipo para el ensayo de Rigidez Normal Constante [Constant Normal Stiffness (CNS)] es bastante similar (Figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25) al reporte del ensayo de Carga Normal Constante [Constant Normal Load (CNL)]. La variación está en la especificación de la rigidez aplicada a la muestra y en los reportes por punto que presenta la rigidez aplicada a la muestra. Un aspecto importante que puede observarse en esta muestra, que no es de forma regular es que el equipo está en capacidad de poderlo realizar, previa carga de las áreas de intersección de la cara superior con la inferior cada milímetro.

El ensayo está diseñado con una rigidez de 2000 kPa/mm (Figura 4.20, punto 7). En la primera etapa del ensayo (Figura 4.21) la muestra alcanza una rigidez de 1600 kPa/mm hasta que ocurre la falla, con una resistencia al corte pico de la muestra de 1.90 MPa y un desplazamiento del cabezal superior de 0.58 mm. Así mismo, se observa como la rigidez de la muestra va variando a medida que se realizan las sucesivas etapas de ensayo, variando la rigidez en la Etapa 2 a un valor de 322.66 kPa/mm, en la Etapa 3 a un valor de 685.19 kPa/mm, en la Etapa 4 a un valor de 871.47 kPa/mm.

En los puntos sucesivos del ensayo la muestra sufre un continuo pulimiento de las discontinuidades presentes en la primera superficie generada. Esto puede ser evidenciado por medio del gráfico de dilatancia, en el que las curvas de los puntos 2 y 3, van disminuyendo en pendiente, acercándose a la línea horizontal (Figura 4.25).

A continuación se incluye un reporte completo del ensayo.




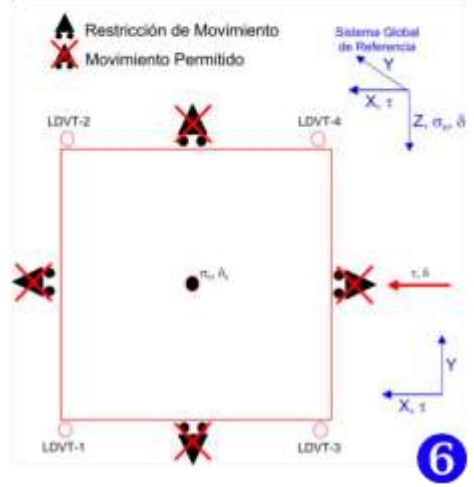

1	 RIF: J-30681665-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – RIGIDEZ NORML CONSTANTE - (CNS)		  RIF: G-2000062-7	
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82		Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016	Página 1 de 7 Espécimen: 2179-1_DSH
2	NORMAS UTILIZADAS ISRM ASTM	Suggested Methods For Determining Shear Strength (2014)			
3	DATOS GENERALES				
	Equipo	GCTS - RDS-500			
	Software	C.A.T.S. Advanced – Versión: 1.89			
	Proyecto	EOCENO FRAC - Yacimiento B2X82			
	Espécimen	2179-1_DSH			
	Origen del Espécimen	Suministrado por PDVSA			
	Pozo	Pozo LL-2925			
	Profundidad	3868 pies 3 pulgadas			
	Formación	Misoa			
	Tipo de Roca	Arenisca			
4	Inclinación de la Discontinuidad - Generada en la etapa 1				
	Tipo de Espécimen Cilíndrico	Altura	117.95mm		
		Diámetro	54.6 mm		
		Angulo de inclinación con la vertical:	-		
	Dirección de Esfuerzo de Corte indicada Paralela a los planos de estratificación				
	Eje Mayor	- mm			
	Área Inicial	23.41 cm ²			
	Grados de libertad de la Caja de Corte	Todos	GRADOS DE LIBERTAD DEL ENSAYO		
PROGRAMA DE CARGA					
Etapa 1: APLICACIÓN DE ESFUERZO NORMAL σ_n			Etapa 2: APLICACIÓN DE ESFUERZO DE CORTE τ_s		
Actuador de Corte			Actuador de Corte		
Retroalimentación	AI-4: Desplazamiento de Corte		Retroalimentación	AI-4: Desplazamiento de Corte	
Modo	Constante		Modo	Incremental	
Valor Constante	0 mm		Valor Inicial	0 mm	
Actuador Normal			Velocidad de Desplazamiento	2 mm/minuto	
Retroalimentación	TI-2: σ_n – Esfuerzo Normal		Valor Final	15 mm	
Modo	Incremental		Actuador Normal		
Valor Inicial	0 kPa		Retroalimentación	TI-2: σ_n – Esfuerzo Normal	
Velocidad de Carga	Ver etapa de resultados	kPa/segundo	Rigidez Normal	2000 kPa/mm	
Valor Final		kPa	Carga Normal	Ver etapa de resultados	
Adquisición de Datos			Adquisición de Datos		
Incrementos de Tiempo	1 segundo		Incrementos de Tiempo	1 segundo	
Nivel de Cruce	Seleccionado		Nivel de Cruce	Seleccionado	
Picos/valles	Seleccionado		Picos/valles	Seleccionado	
Entrada Maestra	TI-2: σ_n – Esfuerzo Normal		Entrada Maestra	AI-4: Desplazamiento de corte	
Sensibilidad	0.05 pfs		Sensibilidad	0.05 mm	
Tiempo Máximo de Ejecución	2 minutos		Tiempo Máximo de Ejecución	- minutos	
Corrección del área para la Deformación por Corte con corrección			Corrección del área para la Deformación por Corte con corrección		
5					
	7				

Figura 4.20 Página 1 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS)

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE - (CNS)			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 2 de 7	
R. Guacuto & Y. Azocar	Miguel Castillejo	26-07-2016	Espécimen: 2179-1_DSH	

Resultados

Punto 1	Velocidad de Carga – σ_n	50 kPa/segundo	Valor Final – σ_n	250 kPa	
VARIABLE	ETAPA 1 – Aplicación de Carga Normal		ETAPA 2 – Ejecución del Corte		Unidades
	Pico	Residual	Pico	Residual	
τ - Esfuerzo de Corte	51.6913	13.4922	1,909.2672	1,129.7350	kPa
Tiempo	10.0950	120.0000	180.4990	570.0010	segundos
Deformación de Corte	0.0281	-0.0062	2.0008	15.0013	mm
Deformación Normal	0.1954	0.1862	-0.0574	-0.2968	mm
σ - Esfuerzo Normal	415.3769	262.0876	782.9619	1,279.6101	kPa
Mediciones					33,369 puntos

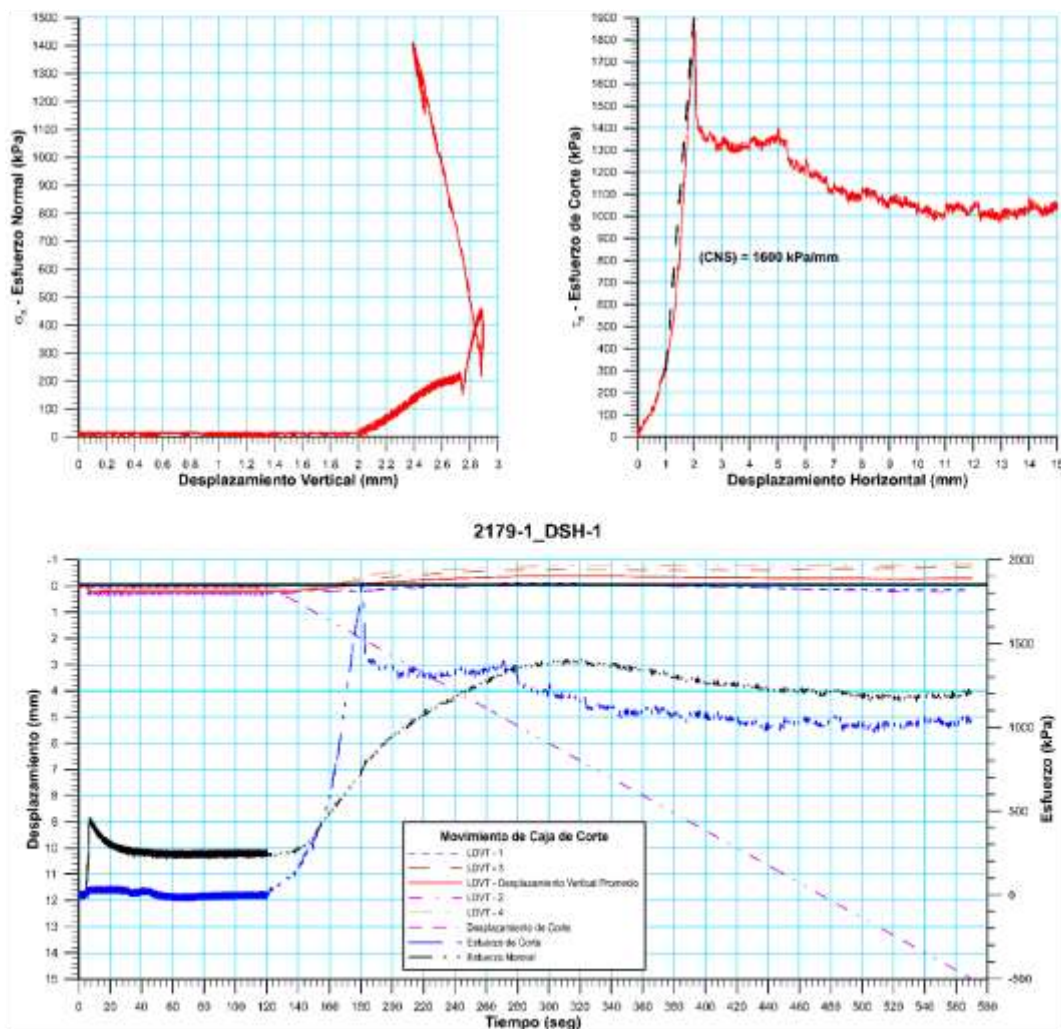


Figura 4.21 Página 2 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS)

 RIF: J-30681665-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE - (CNS)			 RIF: G-2000062-7	
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82				
Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016	Página 3 de 7 Espécimen: 2179-1_DSH		
Punto 2	Velocidad de Carga – σ_n	50 kPa/segundo	Valor Final – σ_n	500 kPa	
VARIABLE	ETAPA 1 – Aplicación de Carga Normal		ETAPA 2 – Ejecución del Corte		Unidades
	Pico	Residual	Pico	Residual	
τ - Esfuerzo de Corte	33.7317	13.4879	903.0783	878.1378	kPa
Tiempo	0.0410	120.0000	569.8180	570.0010	segundos
Deformación de Corte	0.0031	-0.0172	15.0013	15.0060	mm
Deformación Normal	0.0008	0.1585	0.0247	0.0220	mm
σ - Esfuerzo Normal	11.2333	505.3207	831.4512	784.1422	kPa
Mediciones				7396	puntos

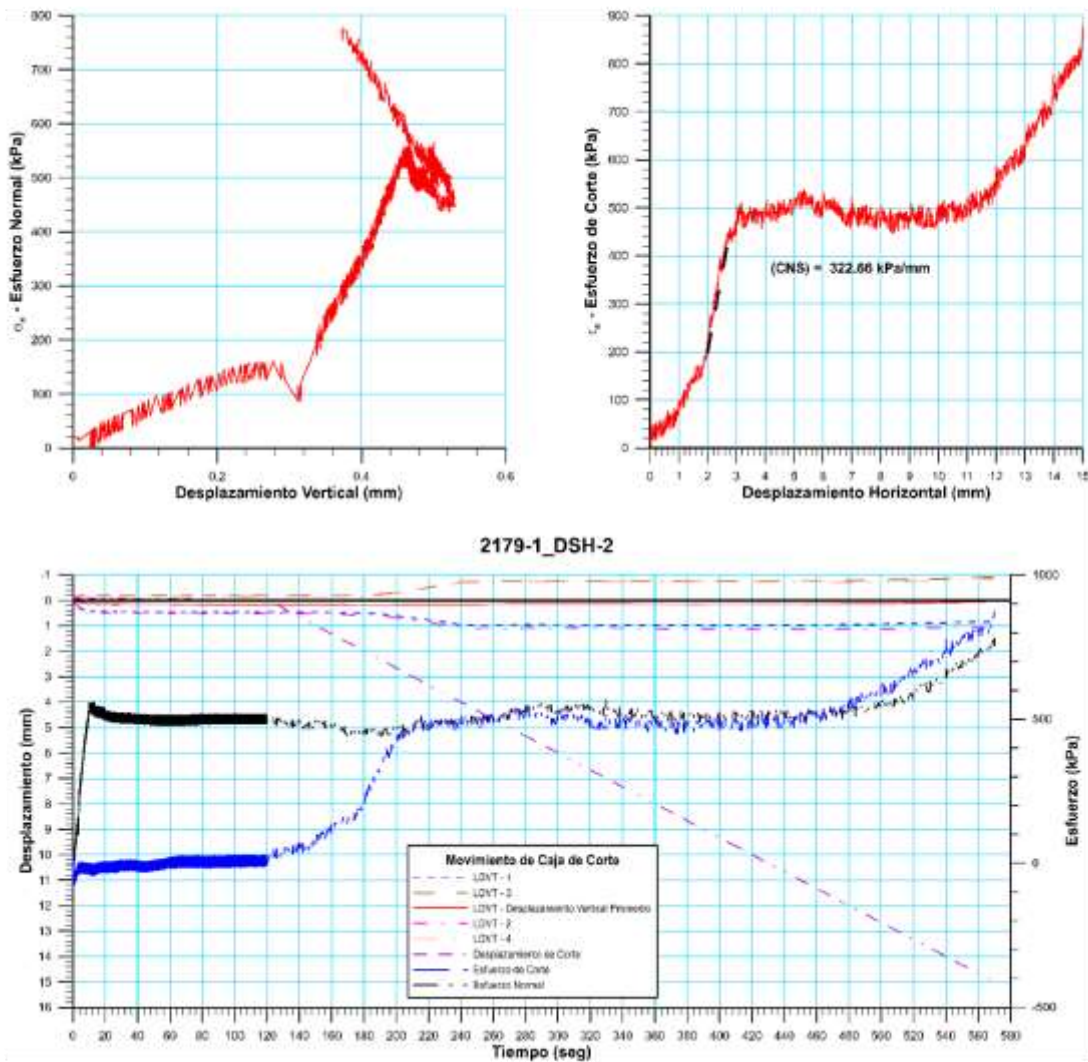




Figura 4.22 Página 3 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS)

 RIF: J-30681665-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE - (CNS)			 RIF: G-20000062-7
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 4 de 7	
R. Guacuto & Y. Azocar	Miguel Castillejo	26-07-2016	Especimen: 2179-1_DSH	

Punto 3	Velocidad de Carga – σ_n	50 kPa/segundo	Valor Final – σ_n	1000 kPa
----------------	---	-----------------------	--	-----------------

VARIABLE	ETAPA 1 – Aplicación de Carga Normal		ETAPA 2 – Ejecución del Corte		Unidades
	Pico	Residual	Pico	Residual	
τ - Esfuerzo de Corte	24.7330	20.2326	1,238.3202	1,218.2654	kPa
Tiempo	0.0474	120.0000	569.8100	570.0010	segundos
Deformación de Corte	0.0094	-0.0156	14.9872	14.9950	mm
Deformación Normal	0.0013	0.3144	0.1697	0.1694	mm
σ - Esfuerzo Normal	7.4876	1,014.4230	1,301.6697	1,284.8958	kPa
Mediciones					3851 puntos

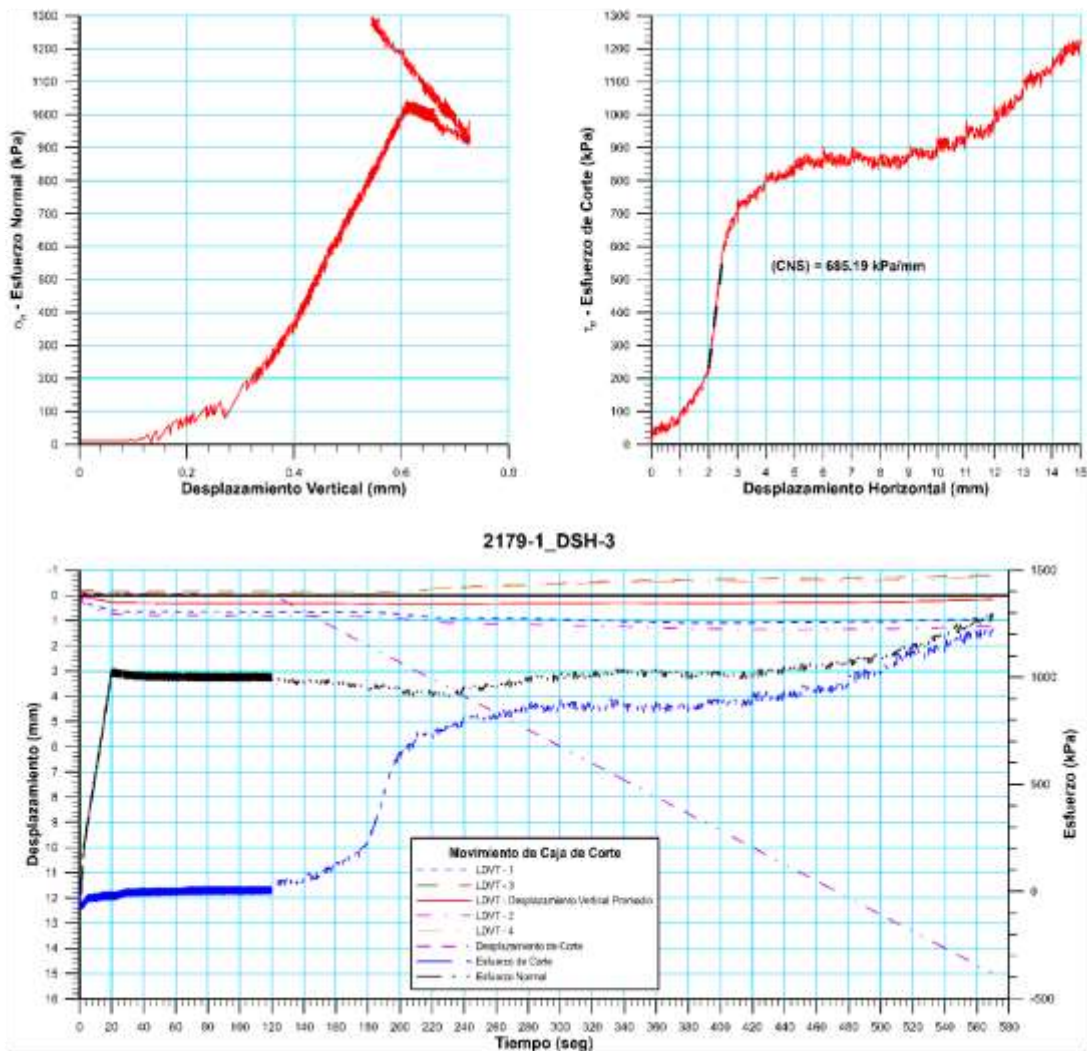




Figura 4.23 Página 4 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS)

 RIF: J-30681665-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE - (CNS)			 RIF: G-2000062-7	
	EOCENO FRAC Yacimiento BZX82				
Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016	Página 5 de 7 Espécimen: 2179-1_DSH		
Punto 4	Velocidad de Carga – σ_n	100 kPa/segundo	Valor Final – σ_n	2000 kPa	
VARIABLE	ETAPA 1 – Aplicación de Carga Normal		ETAPA 2 – Ejecución del Corte		Unidades
	Pico	Residual	Pico	Residual	
τ - Esfuerzo de Corte	4.4973	-40.4660	1,931.9900	1,838.7921	kPa
Tiempo	0.0381	120.0000	540.2020	570.0010	segundos
Deformación de Corte	-0.0047	-0.0156	14.0009	14.9966	mm
Deformación Normal	0.0004	0.4852	0.4335	0.3973	mm
σ - Esfuerzo Normal	0.0000	1,987.6677	2,269.4148	2,165.0691	kPa
Mediciones					6952 puntos

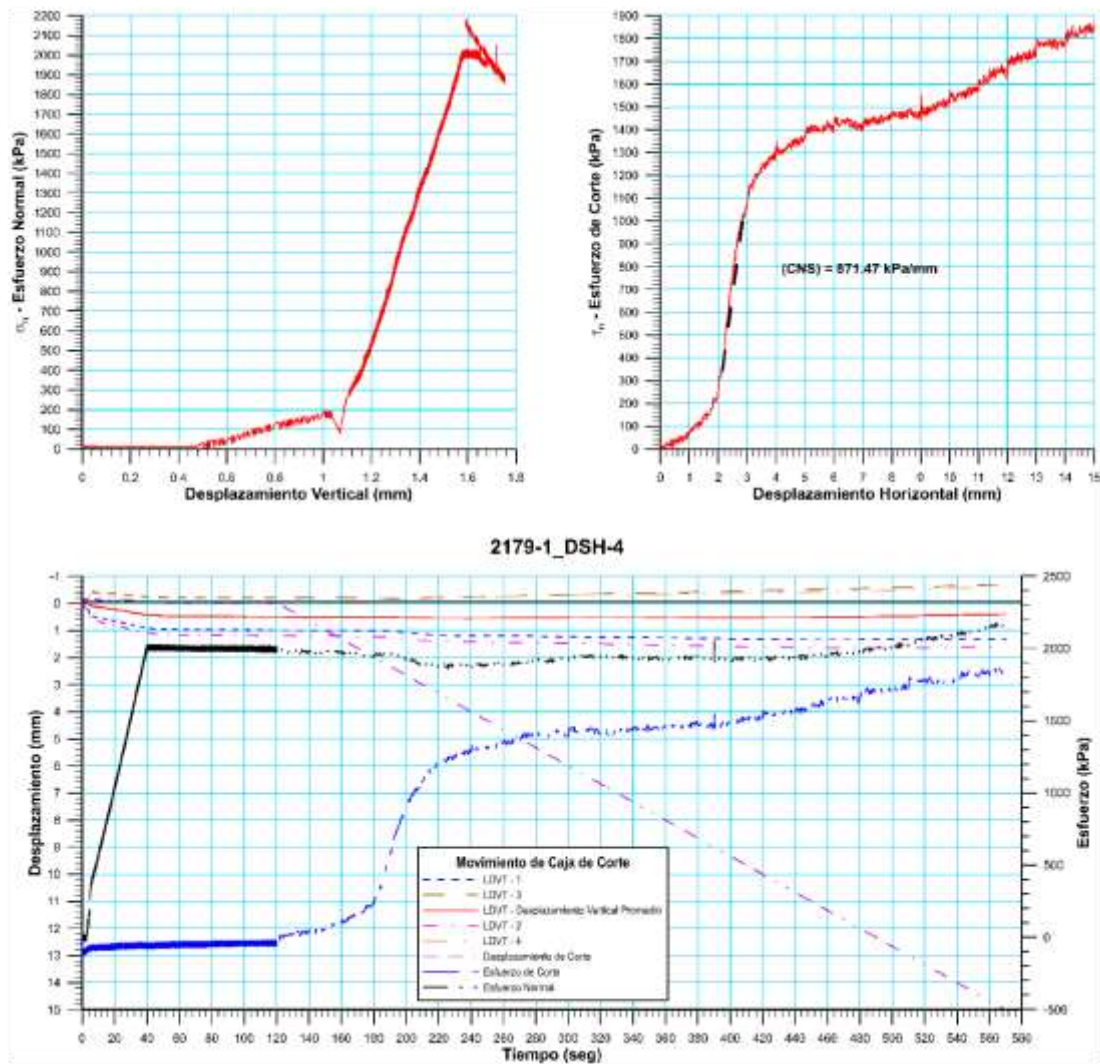
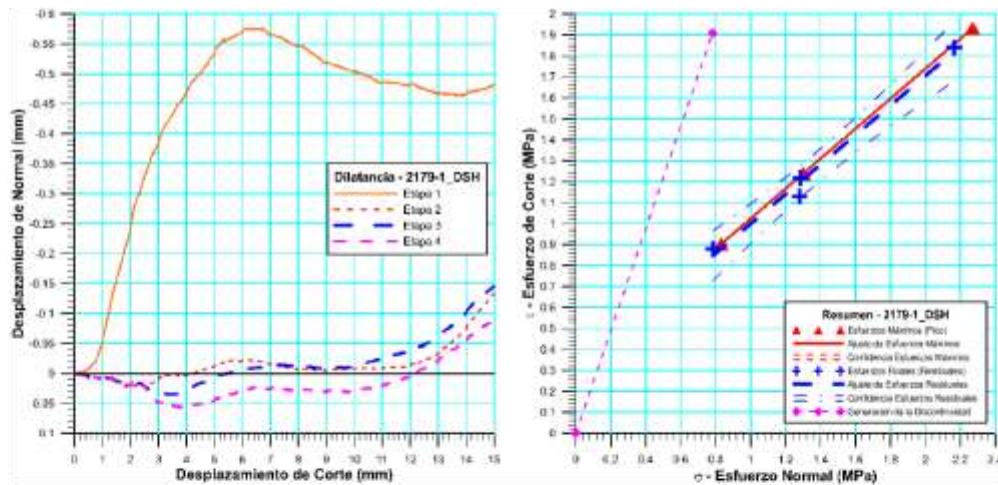


Figura 4.24 Página 5 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS)

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE - (CNS)			 <p>RIF: G-2000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82			
Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016	Página 6 de 7 Espécimen: 2179-1_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
1	0.78296	1.90927	1.27961	1.12973	1600.00
2	0.83145	0.90308	0.78414	0.87814	322.67
3	1.30167	1.23832	1.28490	1.21827	685.19
4	2.26941	1.93199	2.16507	1.83879	871.47



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	$t = \tan(35.59) * s + 0.31$	$t = \tan(34.87) * s + 0.33$
Ecuación de la recta	0.31	0.33
Cohesión (c) (MPa)	35.59	34.87
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	3	4
Número de puntos	1.47	1.41
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.36	1.31
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.00	0.00
Suma de los residuos cuadrados	0.55	0.47
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1.00	1.00
Coefficiente de Determinación (R ²)	$t = \tan(35.59) * s + 0.31$	$t = \tan(34.87) * s + 0.33$

Figura 4.25 Página 6 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS)



Figura 4.26 Página 7 del reporte del Ensayo de Corte bajo la condición de Carga Normal Constante (CNS)

4.10 Consideraciones para interpretar el ensayo, cuando se realice en una muestra sin discontinuidad (roca intacta)

Este es un aspecto que debe tenerse en cuenta para el análisis de los resultados, ya que los mismos pueden variar sustancialmente. Como se ha descrito, en muestras que son intactas (como en muchos de los casos que se describen a continuación), ya sea porque no hay la posibilidad de tomar una muestra con una discontinuidad presente, o en otros que son

muestras fabricadas en el laboratorio, como el caso de los cementos, el primer corte que se realiza en la muestra es para **generar la discontinuidad**, que en la mayoría de los casos requiere un esfuerzo de corte mucho mayor que el requerido cuando se realiza sobre una muestra con la discontinuidad presente.

Esta acotación fue generada después de realizar muchos ensayos con tres puntos sobre muestras sin presencia de la discontinuidad, y en el momento de aplicar el criterio de Mohr-Coulomb, los resultados no eran satisfactorios, ya que al aplicar el criterio de Mohr-Coulomb los ángulos de fricción se veían muy influenciados por la cohesión de la roca **antes de obtener la fractura**. A partir de estas observaciones se empezó a incorporar al ensayo un cuarto punto, permitiendo realizar una mejor interpretación de los resultados del ensayo, **separando la generación de la discontinuidad en los esfuerzos máximos y considerando las cuatro etapas para los esfuerzos residuales**.

Esto estableció como norma en el laboratorio que todos los ensayos de corte tuvieran un mínimo de cuatro (4) etapas de corte.

También se puede observar en el Caso de las metatobas de la formación Las Hermanas en el río Cuira, (para el caso de las caras lisas) que se pueden realizar muchas más etapas de corte aumentando los esfuerzos normales, pero esto estará limitado a la resistencia de la roca que se este ensayando, que sea capaz de resistir el incremento de los esfuerzos normales, que a su vez son proporcionales a los esfuerzos de corte, sin que la roca se destruya debido a la trituración de las caras en contacto durante el ensayo. Para considerar el análisis, en ambos casos se presentará una muestra de las metatobas de la Formación Las Hermanas, donde se construirá la presa sobre el Río Cuira (sección 5.4) y otra de los limos de la Formación Guatire (Sección 5.5), donde estará la Estación Guatire 1 del Sistema de Transporte Masivo Caracas-Guaremas-Guatire.

4.10.1 Caso Metatobas de la Formación Las Hermanas (Presa sobre el Río Cuira)

A continuación se presentará el Caso de una misma muestra analizada de las dos formas, la primera considerando los cuatro puntos realizados en el ensayo así como asumiendo que la

discontinuidad está presente en el momento del ensayo y posteriormente considerando que son eventos distintos, y analizando cada evento de manera separada, es decir, el primer punto genera la discontinuidad y los otros tres corresponden a la resistencia al corte sobre la discontinuidad recién creada. Hay que hacer la observación con respecto a los esfuerzos residuales, que se consideran los cuatro puntos del ensayo. Esto se hizo, porque para el esfuerzo residual del primer punto ya la discontinuidad existe y este esfuerzo es correlacinable con los otros tres residuales obtenidos en las etapas subsiguientes del ensayo.

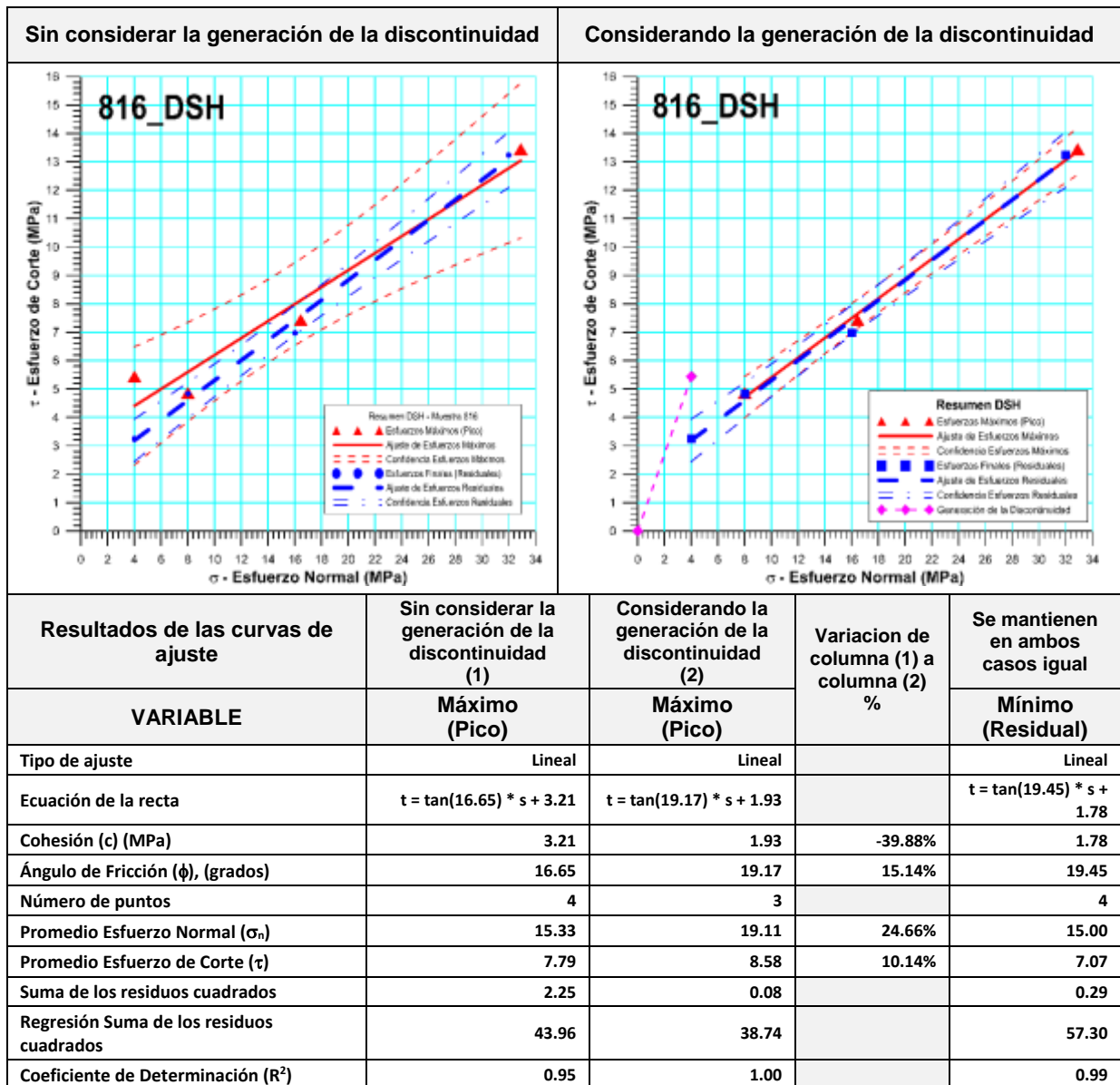


Figura 4.28 Comparación de resultados obtenidos considerando la generación de la discontinuidad y no considerándola, en el caso Metatobas de la Formación Las Hermanas (Presa sobre el Río Caura)

Se concluye (Figura 4.28) para este caso, que la cohesión disminuyó un 39.88% y la fricción aumentó un 15.14%, los promedios de esfuerzo tanto el de corte como el normal aumentaron, de igual manera la suma de los residuos cuadrados, la regresión de la suma de los residuos cuadrados disminuyeron y el coeficiente de determinación paso de 0.95 a 1.00, lo cual significa un ajuste excepcional de a los puntos del ensayo, con la recta totalmente ajustada.

4.10.2 Caso Limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)

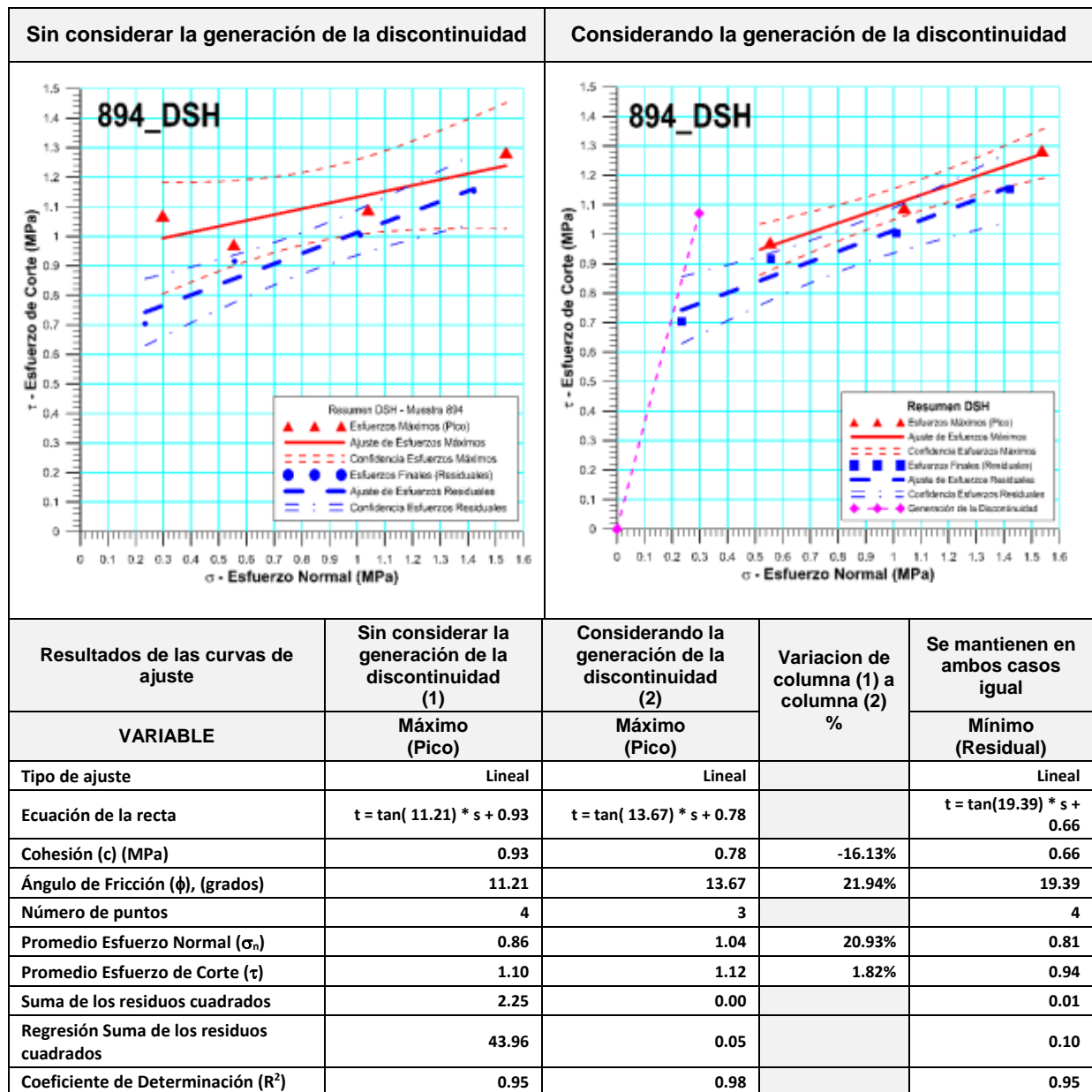


Figura 4.29 Comparación de resultados obtenidos considerando la generación de la discontinuidad y no considerándola, en el caso Limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)

Se concluye (Figura 4.29) para este caso que la cohesión disminuyó un 16.13% y la fricción aumentó un 21.94%, los promedios de esfuerzo tanto el de corte como el normal aumentaron, de igual manera a suma de los residuos cuadrados, la regresión de la suma de los residuos cuadrados disminuyeron y el coeficiente de determinación paso de 0.95 a 0.98, lo que significa un mejor ajuste de los puntos del ensayo, con la recta ajustada.

4.11 Dilatancia en el Ensayo

Como se indicó anteriormente, para seguir el movimiento de la caja superior de corte, hay cuatro dispositivos de medición de movimiento, colocados en cada uno de los vértices de la misma. El equipo calcula el desplazamiento promedio de la caja y lo reporta como una columna adicional dentro del ensayo, para cada uno de los intervalos de captura de datos que se ha especificado.

Este desplazamiento es acumulativo desde que se inicia el ensayo de manera automática, ya que la Etapa 1 y la Etapa 2 del ensayo se realizan de acuerdo al programa establecido para cada una de ellas, haciendo la ejecución del ensayo mucho más confiable y lo que permite evitar errores de operación. Es decir, la Etapa 1, se podría realizar de manera manual, y una vez alcanzado el esfuerzo normal ejecutar la etapa de corte de manera automatizada, en este caso, el equipo registraría el promedio de los desplazamientos de la parte superior de la caja de corte y la dilatancia podría ser representada directamente de la columna de datos que corresponde a este promedio calculado del equipo.

En este caso como el desplazamiento promedio de la caja se está registrando, desde el mismo momento que se inicia el ensayo, de manera manual, en el proceso de elaboración del informe, es necesario corregir este acumulado.

Para realizar la corrección, se obtiene del el reporte final cuanto es el tiempo de ejecución de la Etapa 1 para cada uno de los ensayos y cuando el equipo registra el primer incremento positivo de esfuerzo normal, se considera este momento como el punto de partida del ensayo, generando una columna adicional en la que se registra el valor promedio del instante y se resta el mismo valor desde esta fila al resto de las filas, hasta que se concluya la etapa, es decir la

fila de partida tendrá un valor de cero y el resto de las filas tendrán el valor de la celda de desplazamiento promedio menos el valor de desplazamiento promedio en que se inició la etapa de corte.

Así se obtienen los valores de dilatación que se podrán comparar con cada uno de los puntos realizados para un espécimen.

A fin de ilustrar estos se presentará para una misma muestra los desplazamientos promedios totales de la caja y el valor real de la dilatación de manera gráfica (Figura 4.30).

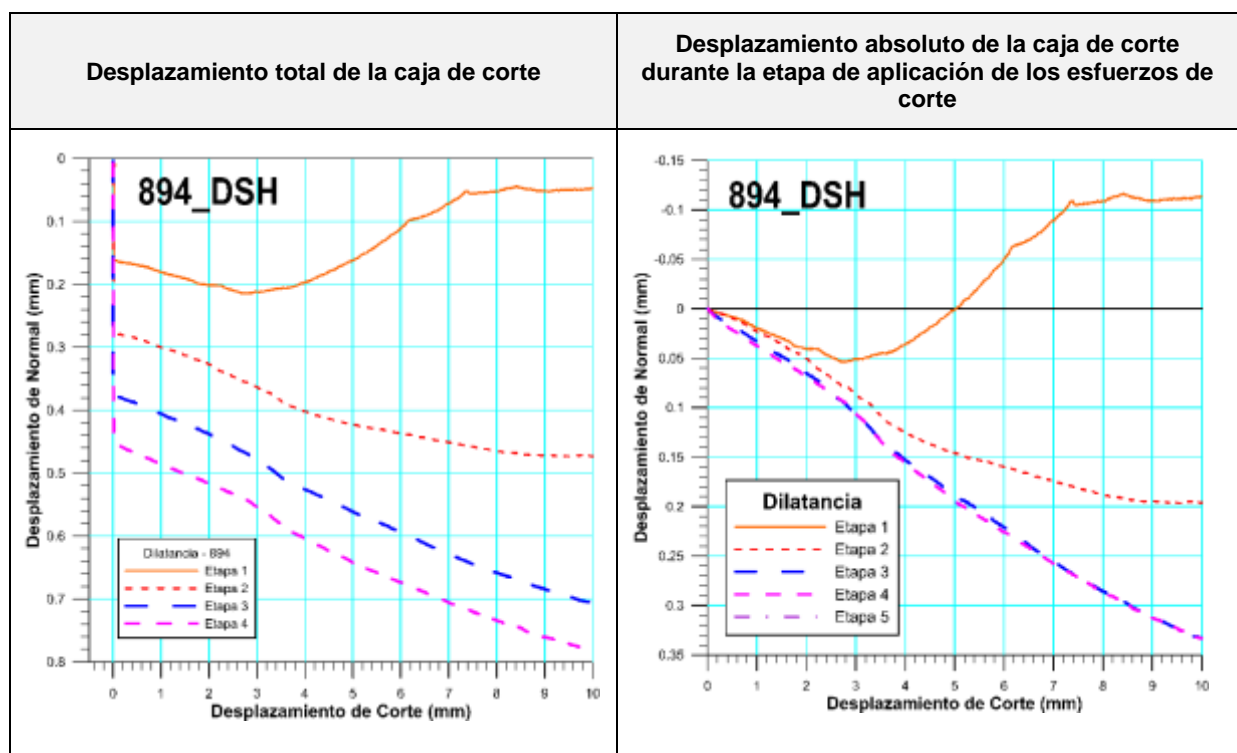


Figura 4.30 Desplazamiento total de la caja de corte y desplazamiento absoluto de la caja de corte durante la etapa de aplicación de los esfuerzos de corte (CNL), en un espécimen de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)

Puede observarse que todas las líneas de desplazamiento de la caja de corte en Figura 4.30 (izquierda) tiene el desplazamiento total de la caja de corte desde el inicio del ensayo y en la Figura 4.30 (derecha), todas las líneas de desplazamiento absoluto de la etapa de corte inician en el eje de coordenadas (0, 0), representando los valores positivos el aumento de dilatación (empuje en sentido contrario del esfuerzo de corte) y los valores negativos representan la

compresión de la muestra a medida que la caja de corte hace el desplazamiento horizontal programado para la etapa.

Puede observarse que el momento de generación de la discontinuidad, alcanza la dilatación máxima de aproximadamente -0.12 mm durante el ensayo, si se ejecuta con la modalidad de carga normal constante el cabezal de corte podrá desplazarse hacia arriba producto de la rugosidad generada durante este punto.

A medida que se realizan los subsiguientes puntos del ensayo esta rugosidad de manera paulatina es alisada o aplanada y como se puede observar en la etapa 3 y 4 la dilatación se mantiene casi igual durante estos dos puntos del ensayo, indicando que la cara de la discontinuidad está bastante lisa, como puede observarse en la Figura 4.30.



Figura 4.31 Condición final de las caras de la discontinuidad generada, después de haber sido sometida a los cuatro puntos de carga, bajo el comportamiento de carga normal constante (CNL), para el mismo espécimen presentado en la Figura 5.17, en un espécimen de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1).

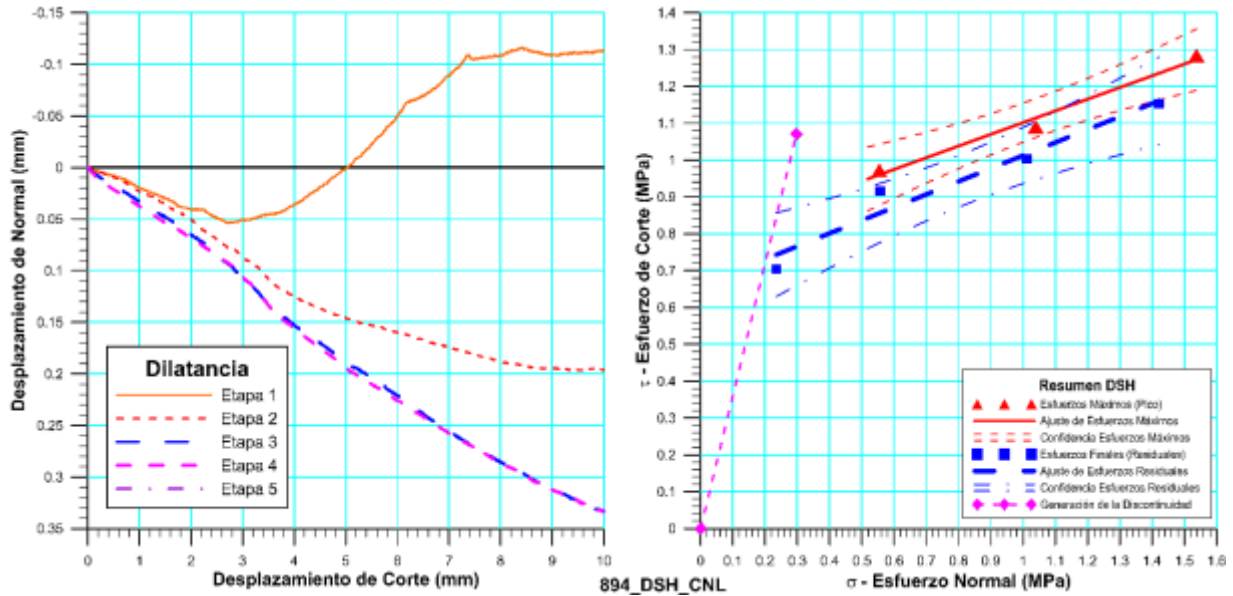


Figura 4.32 Desplazamiento absoluto de la caja de corte durante la etapa de aplicación de los esfuerzos de corte (CNL), en una espécimen de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)

En el caso de Rigidez Normal Constante (Figura 4.33), la rigidez afecta de manera significativa la dilatación, debido a que la muestra tendrá que aplanar sus caras de la discontinuidad (Figura 4.34) ya que tiene que superar la rigidez normal que se le está aplicando en cada una de las etapas.

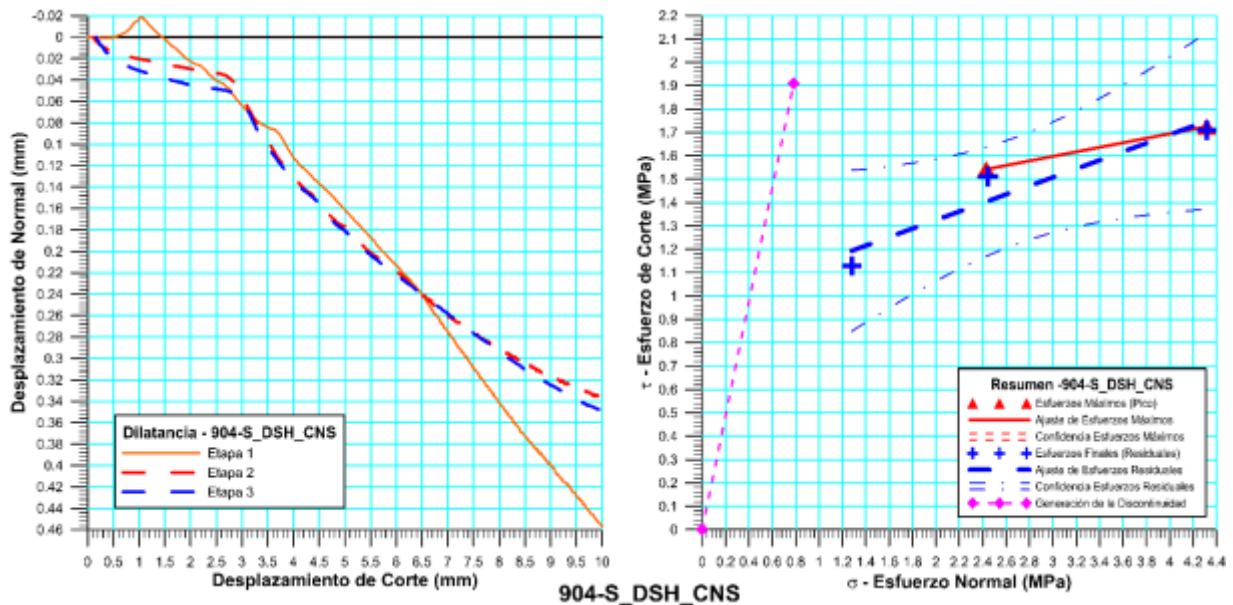


Figura 4.33 Dilatación durante un ensayo realizado bajo la modalidad de Rigidez Normal Constante (CNS), en una muestra de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)

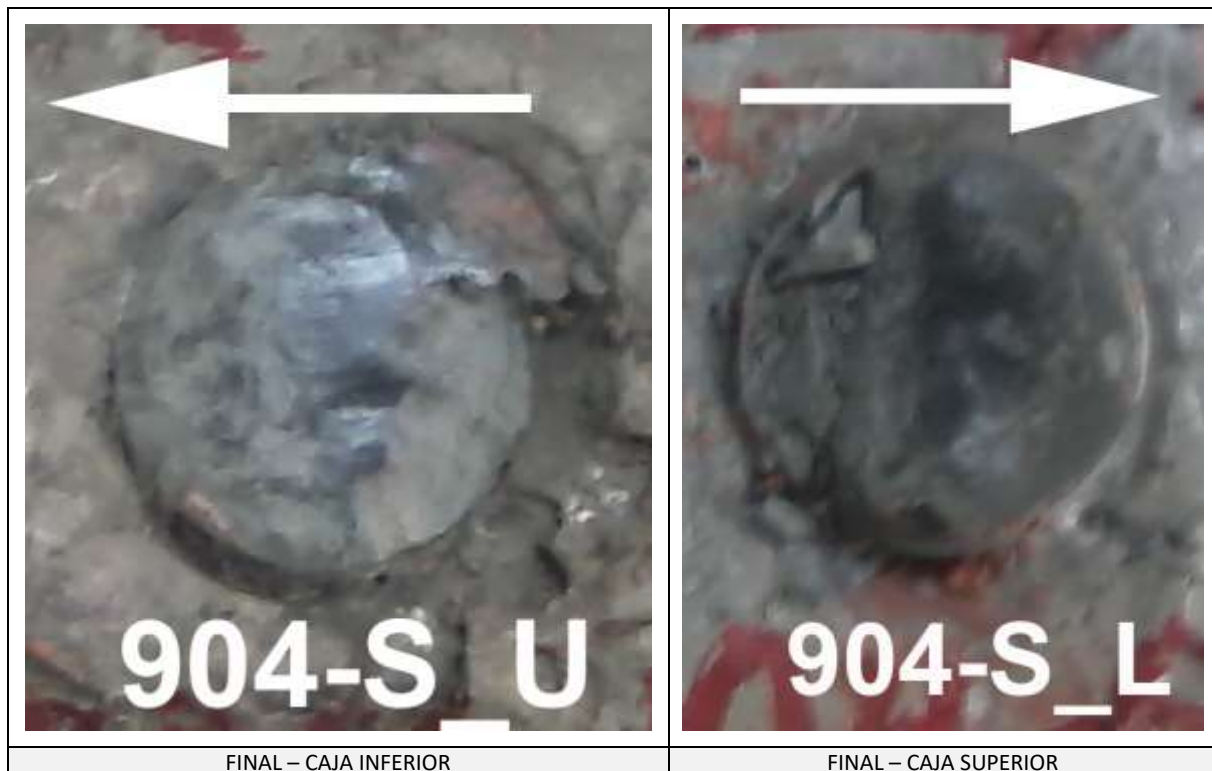


Figura 4.34 Condición final de las caras de la discontinuidad generada, después de haber sido sometida a los cuatro puntos de carga, bajo el comportamiento de rigidez normal constante (CNS), para el mismo espécimen presentado en la Figura 5.19, en una espécimen de los limos de la Formación Guatire (Estación Guatire 1)

Se puede observar de de la Figura 4.34, la condición pulida de las caras de la discontinuidad generada, verificando que para que pueda ocurrir el movimiento la rugosidad de las caras de la discontinuidad tiene que desaparecer, para que el movimiento ocurra a lo largo de la superficie de falla.

5 Casos de Estudio realizados para Muestras de Venezuela

Equation Section (Next)

En este capítulo 5 se presentarán los resultados de los siguientes casos sobre ensayos de corte realizados en muestras de Venezuela. A fin de disminuir de la discusión sólo se presentará por estudio, de cada una de las muestras ensayadas, el gráfico de dilatación y el gráfico del criterio de resistencia y por estudio la envolvente general de todas las muestras ensayadas en el estudio.

5.1 Caracterización Mecánica de un Sistema Cementante Convencional con Sílice para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a la inyección de vapor

Este caso tiene como finalidad de estudiar el comportamiento mecánico de un sistema cementante convencional, aditivado con sílice, para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a la inyección de vapor. Dentro de toda la batería de ensayos realizados para estas muestras sólo se presentarán aquí los ensayos de corte realizados en ellas, bajo condiciones simuladas de curado temperatura de 55°C y 288°C y una presión constante 10.34 MPa. Los resultados presentados en este caso son parte del trabajo especial de grado presentado por Bravo S & Villafañe P, (2016).

En este Caso se trabajarán 9 especímenes. Todos los especímenes fueron cilíndricos, sometidos a ensayo de corte directo con carga normal. Los especímenes identificados con los siguientes números de laboratorio: 1716_DSH, 1717_DSH, 1718_DSH, fueron curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 52°C y presión de 10.34MPa y los especímenes 1710_DSH, 1711_DSH, 1712_DSH, 1713_DSH, 1714_DSH, 1715_DSH, fueron curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 288°C y presión de 10.34MPa.

Mediante este ensayo se creó una discontinuidad en la probeta de cemento con un esfuerzo normal de 500 kPa, teniendo como resultado el valor del esfuerzo de corte aplicado a la muestra para ejecutar la fractura. Posteriormente, las cargas o esfuerzos normales se variaron entre 1000 kPa, 2000 kPa y 4000 kPa, para obtener igualmente, valores de esfuerzos de corte para los diferentes esfuerzos normales. Con estos 3 puntos, se realizó una recta que ajusta los resultados determinados para estimar la cohesión y el ángulo de fricción para cada muestra.

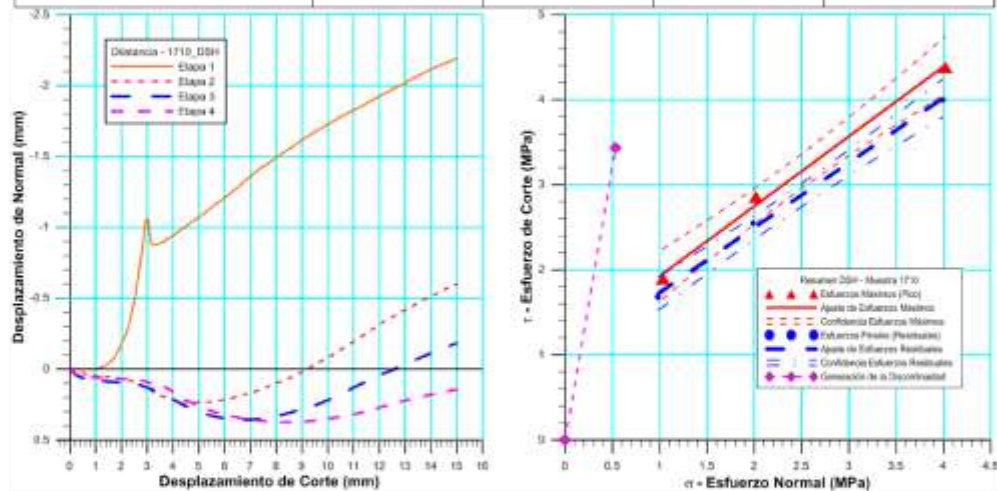
A continuación se presenta el cuadro resumen de estos ensayos.

5.1.1 Especímenes curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 288°C y presión de 10.34MPa

5.1.1.1 Espécimen 1710

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.53289	3.43134	0.50370	0.84511
2	1.02939	1.89132	0.98325	1.68033
3	2.01954	2.85439	1.99043	2.54923
4	4.02240	4.37770	3.98914	3.99457



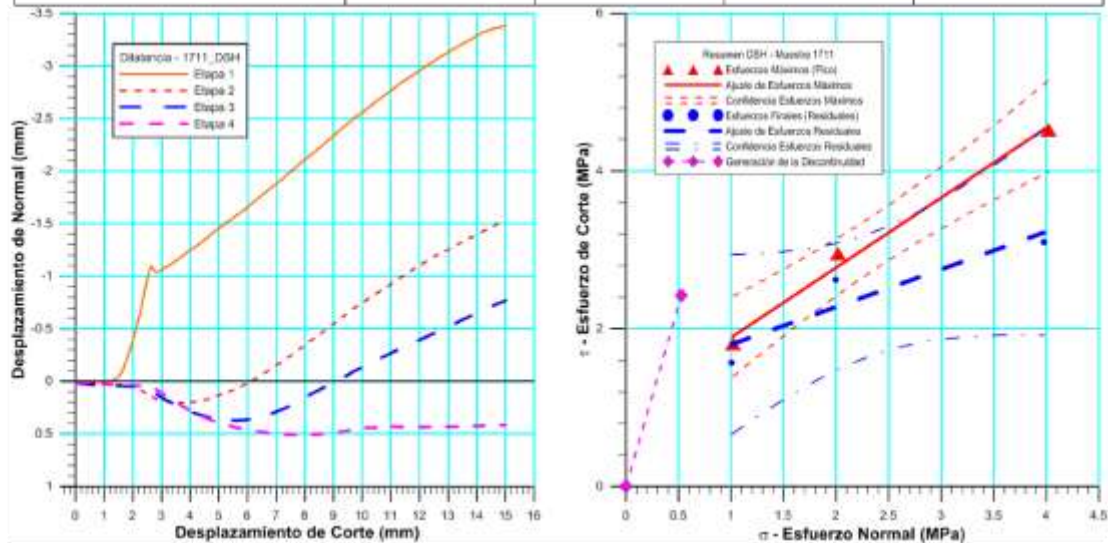
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(39.37) * s + 1.11$	$t = \tan(37.35) * s + 0.97$
Cohesión (c) (MPa)	1.11	0.97
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	39.37	37.35
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.36	2.32
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.04	2.74
Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3.13	2.73
Coficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

Figura 5.1 Espécimen 1710_DSH-CNL

5.1.1.2 *Espécimen 1711*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.52583	2.42116	0.49871	0.91303
2	1.01995	1.80242	1.00558	1.57021
3	2.01628	2.94645	1.99497	2.62333
4	4.02378	4.51991	3.97376	3.10154



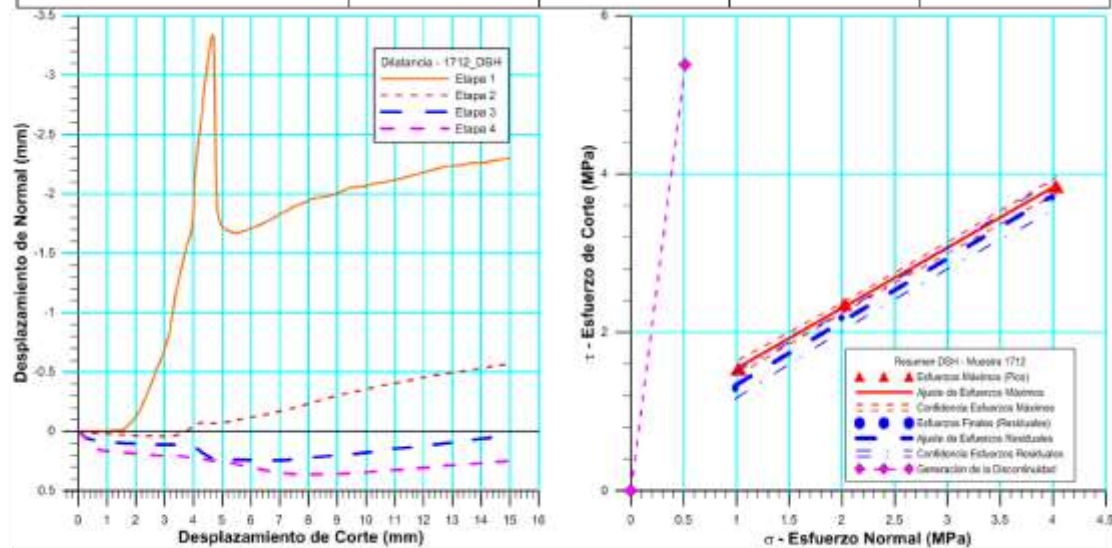
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(41.58) * s + 1.00$	$t = \tan(25.49) * s + 1.32$
Cohesión (c) (MPa)	1.00	1.32
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	41.58	25.49
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.35	2.32
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.09	2.43
Suma de los residuos cuadrados	0.04	0.19
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3.69	1.04
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.85

Figura 5.2 *Espécimen 1711_DSH-CNL*

5.1.1.3 *Espécimen 1712*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.51368	5.38033	0.52874	0.83235
2	1.01845	1.53999	0.98530	1.29414
3	2.02314	2.35360	1.99439	2.18390
4	4.03112	3.84757	3.98877	3.70398



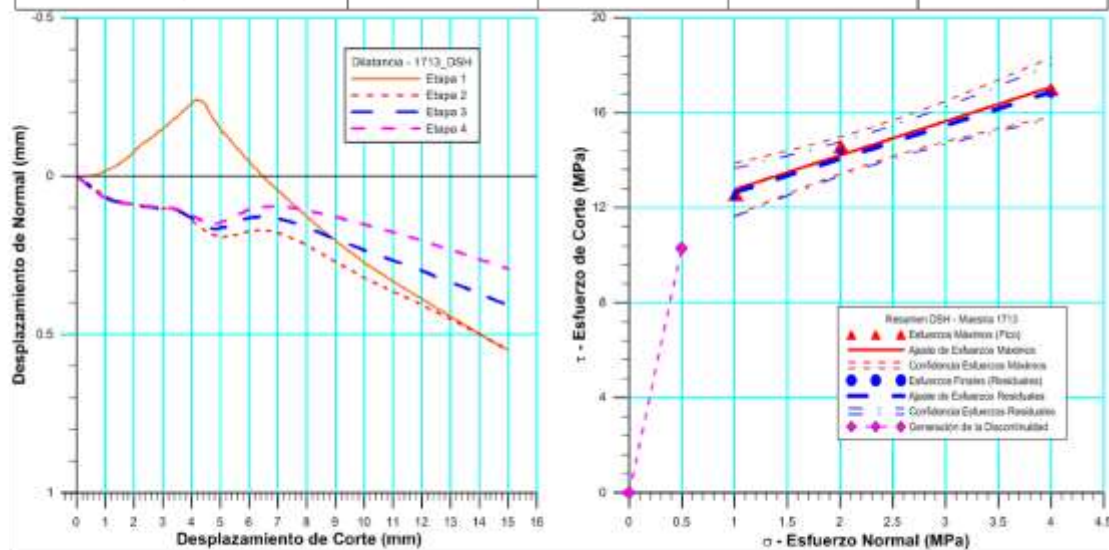
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(37.34) * s + 0.78$	$t = \tan(38.54) * s + 0.54$
Cohesión (c) (MPa)	0.78	0.54
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	37.34	38.54
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.36	2.32
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.58	2.39
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.74	2.97
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

Figura 5.3 *Espécimen 1712_DSH-CNL*

5.1.1.4 *Espécimen 1713*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.49741	10.28961	0.49062	6.71902
2	1.00778	12.55646	0.99763	12.43727
3	2.00814	14.55416	2.00297	14.37240
4	4.00212	16.96925	3.99799	16.76902



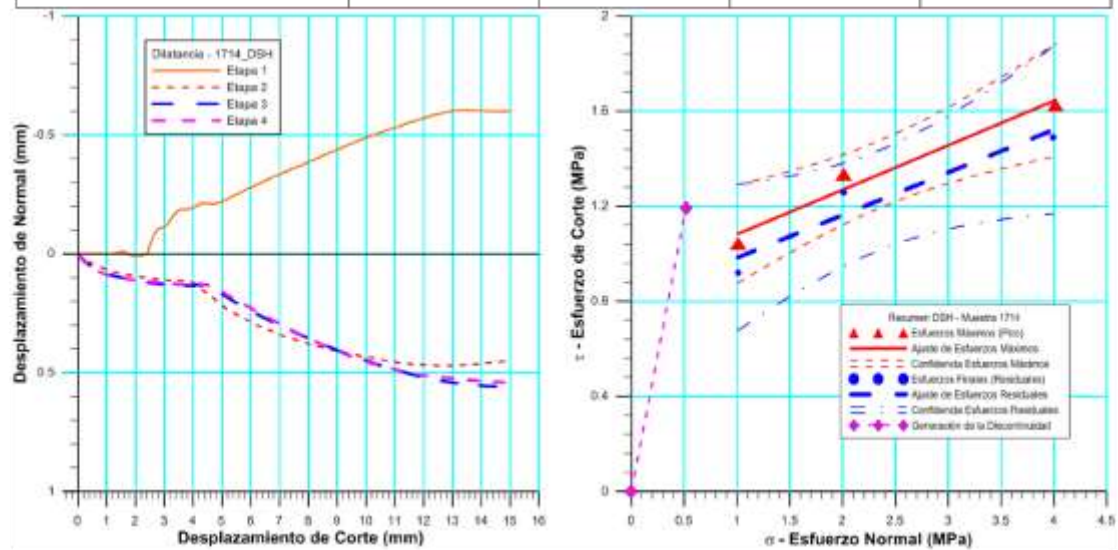
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(55.16) * s + 11.33$	$t = \tan(54.65) * s + 11.24$
Cohesión (c) (MPa)	11.33	11.24
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	55.16	54.65
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.34	2.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	14.69	14.53
Suma de los residuos cuadrados	0.18	0.15
Regresión Suma de los residuos cuadrados	9.59	9.27
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.98	0.98

Figura 5.4 *Espécimen 1713_DSH-CNL*

5.1.1.5 *Espécimen 1714*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.51629	1.19196	0.50371	0.51860
2	1.01302	1.04165	1.00728	0.92182
3	2.00838	1.33390	2.00661	1.25794
4	4.01680	1.62554	3.98914	1.48836



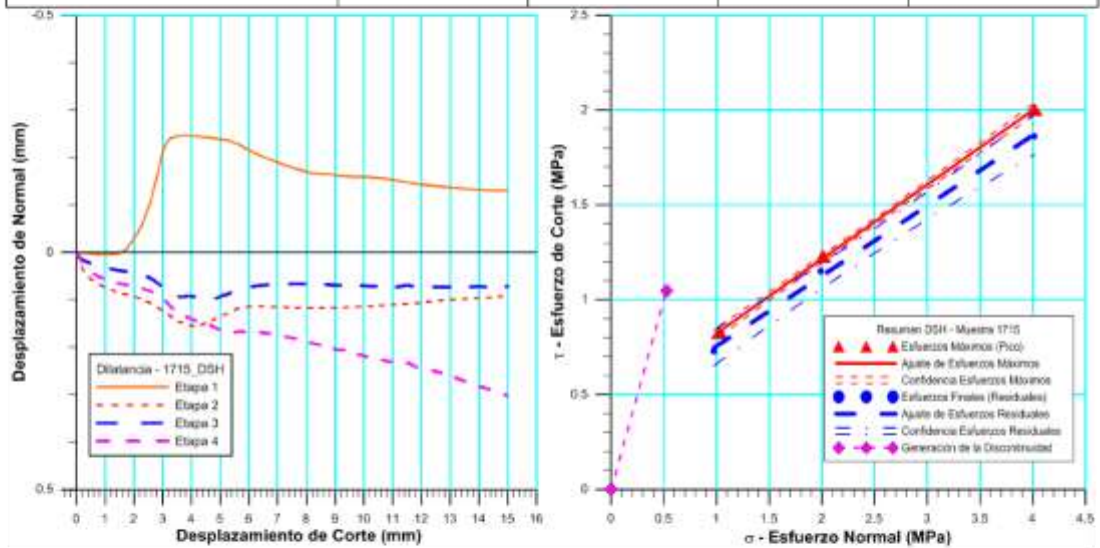
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(10.61) * s + 0.89$	$t = \tan(10.18) * s + 0.80$
Cohesión (c) (MPa)	0.89	0.80
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	10.61	10.18
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.35	2.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.33	1.22
Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.16	0.15
Coefficiente de Determinación (R ²)	0.96	0.92

Figura 5.5 *Espécimen 1714_DSH-CNL*

5.1.1.6 *Espécimen 1715*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.52427	1.04682	0.48457	0.49474
2	1.02836	0.82805	0.97734	0.72764
3	2.01329	1.22848	1.98693	1.14965
4	4.01813	2.00323	4.01356	1.86240



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(21.41) * s + 0.43$	$t = \tan(20.33) * s + 0.38$
Cohesión (c) (MPa)	0.43	0.38
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	21.41	20.33
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.35	2.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.35	1.25
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.71	0.66
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

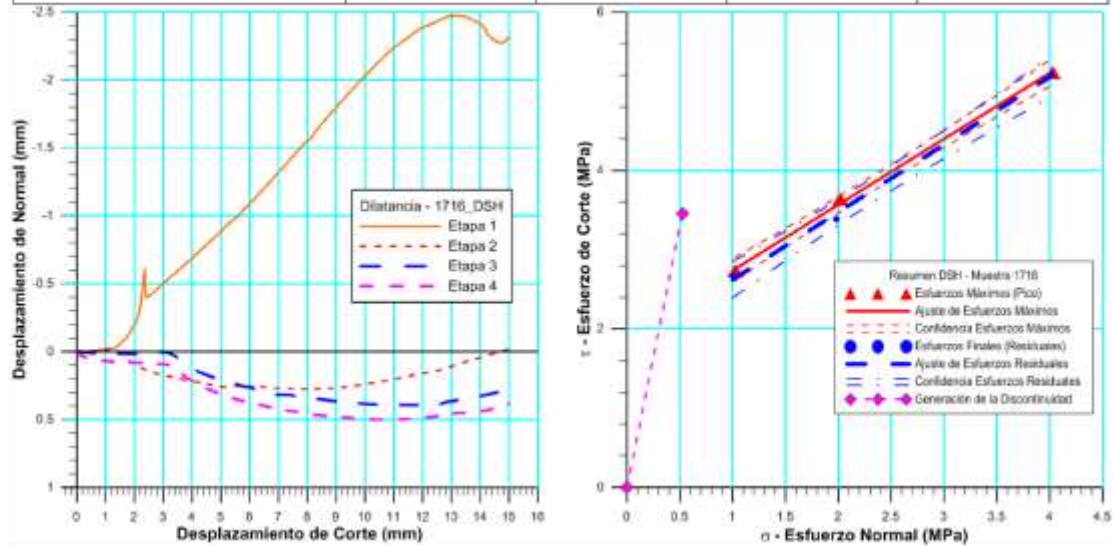
Figura 5.6 Espécimen 1715_DSH-CNL

5.1.2 Especímenes curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 55°C y presión de 10.34MPa

5.1.2.1 Espécimen 1716

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.52264	3.45677	0.52872	0.71687
2	1.02371	2.72824	1.00134	2.67014
3	2.01990	3.62975	1.97865	3.38699
4	4.02833	5.23784	4.01329	5.21506



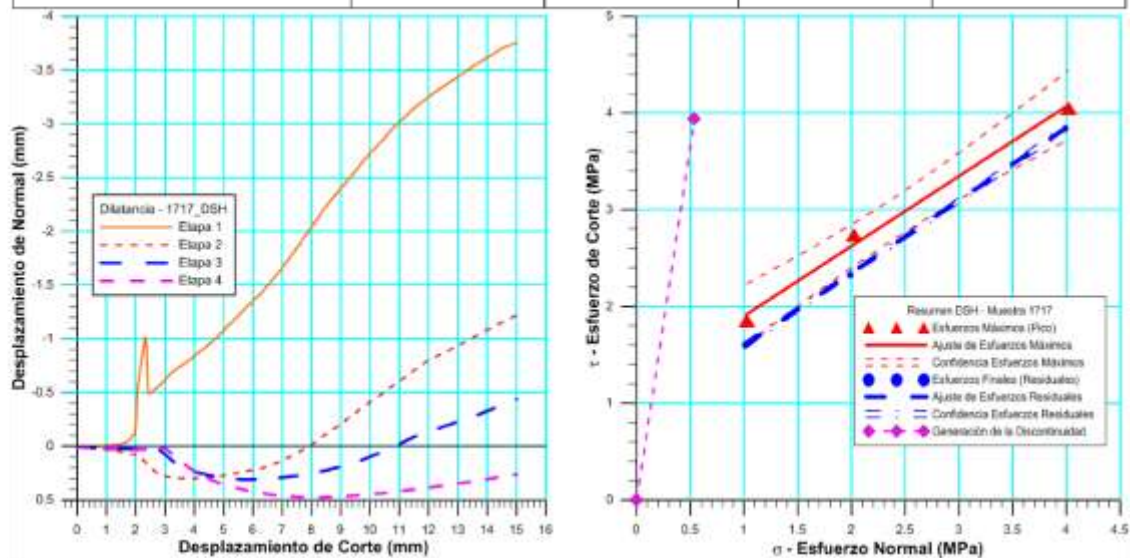
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(39.70) * s + 1.91$	$t = \tan(40.47) * s + 1.77$
Cohesión (c) (MPa)	1.91	1.77
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	39.70	40.47
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.36	2.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.87	3.76
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3.23	3.44
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

Figura 5.7 Espécimen 1716_DSH-CNL

5.1.2.2 *Espécimen 1717*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.53718	3.93594	0.52364	0.99668
2	1.02545	1.85651	1.00698	1.60626
3	2.02576	2.73969	1.98998	2.32737
4	4.01830	4.05089	3.98870	3.84250



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(35.85) * s + 1.18$	$t = \tan(36.91) * s + 0.84$
Cohesión (c) (MPa)	1.18	0.84
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	35.85	36.91
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.36	2.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.88	2.59
Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.42	2.61
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	1.00

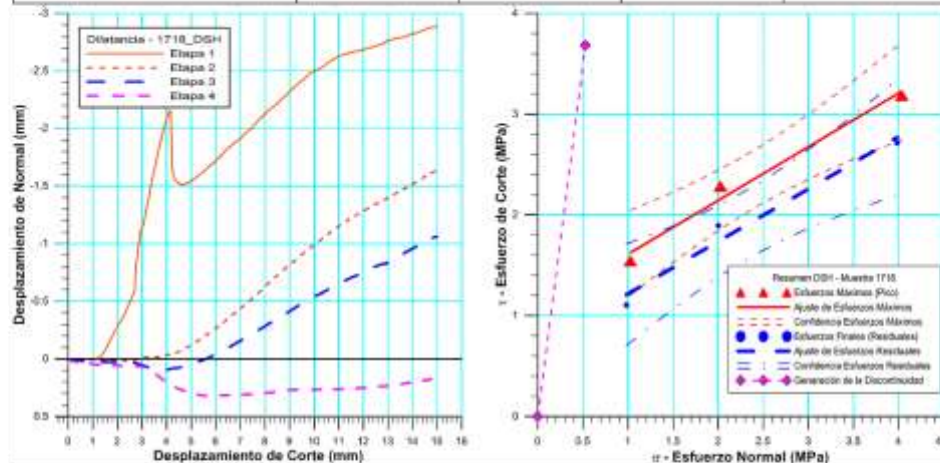
Figura 5.8 Espécimen 1717_DSH-CNL

5.1.2.3 *Espécimen 1718*

 <p>RIF: J-001108483</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 <p>RIF: G-2000062-7</p>
	<i>Caracterización Mecánica De Un Sistema Cementante Convencional Con Silíce</i>			
Cálculo: Dayanis Villafañe Juan Bravo	Revisión: M. Castillejo & V. Bastos	Fecha: 02-11-2015	Página 6 de 7 Espécimen:1718_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0.52733	3.68266	0.47400	0.68996
2	1.02870	1.54024	0.98003	1.10480
3	2.02252	2.28412	2.00023	1.89118
4	4.03410	3.18322	3.98507	2.71663



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(28.02) * s + 1.08$	$t = \tan(27.47) * s + 0.70$
Cohesión (c) (MPa)	1.08	0.70
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	28.02	27.47
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.36	2.32
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.34	1.90
Suma de los residuos cuadrados	0.03	0.04
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1.33	1.26
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.98	0.97

Figura 5.9 Espécimen 1718_DSH-CNL

5.1.3 **Envolventes de Mohr-Coulomb para el grupo de especímenes**

En la tabla 5.1, se resumen los resultados obtenidos para cada muestra de cemento, así como el coeficiente de determinación para cada uno de los ajustes efectuados a los resultados.

Tabla 5.1 Resultados de corte directo para las muestras ensayadas

Especímenes acondicionados a 52 °C y 10,34 MPa (125 °F y 1500 psi)					
Nº Muestra	Resistencia al corte para generar la discontinuidad (MPa) – [psi]	Cohesión (MPa)	Cohesión (psi)	Ángulo de fricción (°)	Coefficiente de Determinación (R2)
1716	3.46 – [501.83]	1.91	277.02	39.70	1.00
1717	3.94 – [571.44]	1.18	171.15	35.85	0.99
1718	3.68 – [533.73]	1.08	156.64	28.02	0.98
Promedio	3.69 – [535.67]	1.39	201.60	34.52	
Desviación Estándar	0.24 – [34.85]	0.45	65.71	5.95	

Especímenes acondicionados a 288 °C y 10,34 MPa (125 °F y 1500 psi)					
Nº Muestra	Resistencia al corte para generar la discontinuidad (MPa) – [psi]	Cohesión (MPa)	Cohesión (psi)	Ángulo de fricción (°)	Coefficiente de Determinación (R2)
1710	3.43 – [497.48]	1.11	100.99	39.37	1.00
1711	2.42 – [350.99]	1.00	145.05	41.58	0.99
1712	5.38 – [780.30]	0.78	113.13	37.34	1.00
1715	1.05 – [152.29]	0.43	62.37	21.41	1.00
Promedio	3.07 – [445.26]	0.83	105.39	34.93	
Desviación Estándar	1.58 – [228.96]	0.26	29.59	7.95	

Se evidencia una disminución del esfuerzo de corte (τ) para la generación de la discontinuidad en los especímenes acondicionados a 288 °C (550 °F) de 16.80 % en relación a los especímenes curados a 52 °C (125 °F). Los esfuerzos de corte promedio para cada condición (52 °C y 288 °C) son de 3.69 MPa y 3.07 MPa (592 y 698 psi), cuyos valores representan el esfuerzo de corte máximo para que en la muestra se genere la discontinuidad, con desviaciones estándar de 0.24 MPa (34.85 psi) y 1.58 MPa (228.96 psi) respectivamente.

Los resultados promedio de cohesión y ángulo de fricción obtenidos aplicando el criterio en la condición de 52 °C (125 °F) fueron 1.39 MPa (201.60 psi) y 34,57 grados, mientras que para

288 °C (550 °F) fueron de 0.83 MPa (105.39 psi) y 34.93 grados, disminuyendo la cohesión en un 40.28 % y para la fricción un incremento del 1.041%, en ambos casos comparando la condición de 52 °C con respecto a la condición de 288 °C. También se puede acotar que ambos valores de ángulo de fricción están en el rango de 25 a 45 ° al cual pertenecen la mayoría de las rocas. Por lo tanto los valores de cohesión y ángulo de fricción, en ambas condiciones, reflejan que se requiere de altos esfuerzos para poder cizallar el cemento, evitando un problema en el pozo cuando está sometido algún esfuerzo de corte.

La resistencia es función de las fuerzas cohesivas y friccionales del material entre otros factores.. De igual manera, en la tabla 5.1, se observan valores de cohesión y ángulo de fricción que soporta la muestra antes de que ceda, esto indica que, el cemento será bastante resistente bajo condiciones simuladas de estimulación térmica. Sin embargo, los datos de ángulo de fricción varían en un rango mayor. Esto puede ser motivado a que, en presencia de una condición tan extrema de temperatura y presión, el cemento presente cierta inestabilidad en su composición.

El criterio de Mohr-Coulomb fue aplicado utilizando el programa RocData para determinar los valores de cohesión y ángulo de fricción. Las muestras de cemento acondicionadas a 52 °C presentaron una cohesión promedio de 1.391 MPa y un ángulo de fricción promedio de 34.69 °, como se observa en la Figura 5.10. Según González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, y Oteo (2004), para la mayoría de las rocas, el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca varía entre 25 ° y 45 °. Por lo tanto, el cemento en estudio, cumple con la condición. Para las muestras acondicionadas a 288 °C y 10.34 MPa (Figura 5.11), se observa una cohesión y ángulo de fricción de 0.828 MPa y 35.425 ° respectivamente, siendo la muestra de cemento acondicionada a 52 °C más resistente a un esfuerzo de corte.

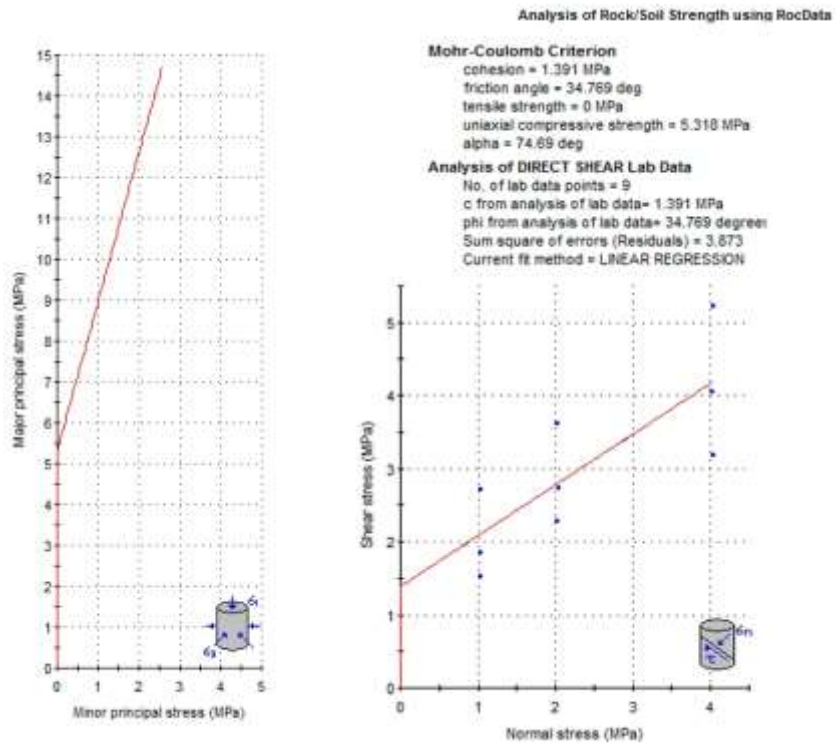


Figura 5.10 Criterio de Mohr-Coulomb en ensayos de corte acondicionados a 52°C y 10,34 MPa

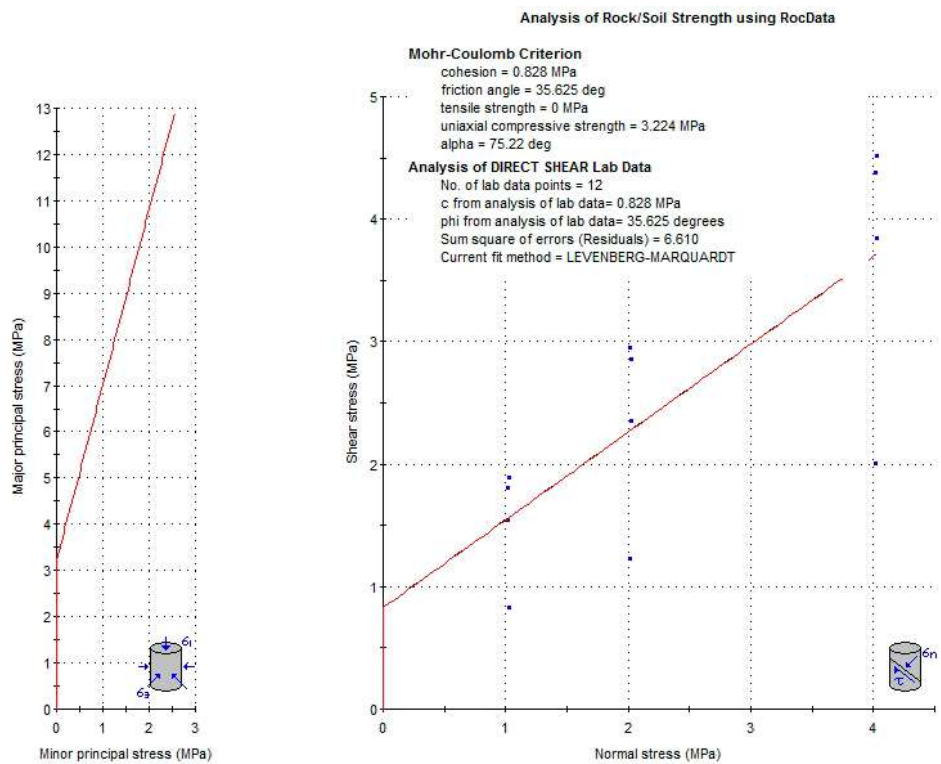


Figura 5.11 Criterio de Mohr-Coulomb en ensayos de corte acondicionados a 52°C y 10,34 MPa

Para resumir se muestra la Tabla 5.1.2, en donde se comparan los resultados obtenidos en la condición estática de pozo y la de simulación de estimulación térmica.

Tabla 5.2 Comparación de resultados obtenidos a 52 y 288 °C en el criterio de Mohr-Coulomb a partir del ensayo de corte

Parámetro	Condición de 52 °C	Condición de 288 °C	Observación (Comparación con respecto a 52 °C)
Cohesión (MPa)	1.40	0.83	Disminución del 40.71%
Ángulo de Fricción (°)	34.77	35.63	Incremento del 2.47%

También es importante tener en cuenta los valores obtenidos de dilatación. Esta es la separación que se va a presentar después de que se ha generado la discontinuidad en la muestra a medida que se aplican bajas cargas normales, para que las caras de la muestra se desplacen entre sí (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, y Oteo, 2004). En la tabla 5.3, se observan los resultados obtenidos, donde las muestras poseen un valor de dilatación promedio de 3.13 mm para las muestras acondicionadas a 52 °C y 10.34 MPa y de 3.56 mm para las muestras curadas a 288 °C y 10.34 MPa, evidenciando que el cemento al momento de una posible rotura (cuando se encuentre en el pozo) presentará alta rugosidad, es decir, las caras no se deslizarán entre sí con cierta facilidad para bajos esfuerzos normales, para este tipo de ensayo.

Tabla 5.3 Valores de dilatación para las diferentes muestras ensayadas en la etapa de generación de la discontinuidad

Especímenes acondicionados a 52 °C y 10.34 MPa (125 °F y 1500 psi)		Especímenes acondicionados a 288 °C y 10.34 MPa (550 °F y 1500 psi)	
N° de Espécimen	Dilatancia (mm)	N° de Espécimen	Dilatancia (mm)
1716	2.47	1710	2.19
1717	3.76	1711	3.38
1718	2.89	1712	3.34
Promedio	3.04	1714	0.61
Desviación Estándar	0.66	1715	0.24
		Promedio	1.95

Desviación Estándar

1.48

5.1.4 Conclusiones para este tipo de cemento

- Para condiciones estáticas de fondo de pozo a 52 °C y 10,34 MPa (125 °F y 1500 psi), las muestras no presentaron homogeneidad entre tope y base, lo que motiva la sedimentación en las probetas de cemento
- Las muestras curadas a condiciones de estimulación térmica a 288 °C y 10.34 MPa (550 °F y 1500 psi), sufrieron cambios en su distribución o tamaño de poros volviéndose más permeable, producto de las altas temperaturas y presiones a las que se encontraron expuestas.
- A medida que se incrementa la temperatura, la lechada es menos viscosa y necesita menos fuerza para que se traslade hasta el espacio anular, sin riesgo a que fragüe antes de llegar a la posición deseada.
- Los valores de cohesión y ángulo de fricción determinados para las condiciones estáticas de fondo de pozo según el ensayo de corte directo fueron 1.39 MPa (201.60 psi) y 34.77 ° respectivamente, mientras que las muestras a condiciones de estimulación térmica presentaron 0.83 MPa (120.38 psi) de cohesión y 35.43 ° en ángulo de fricción. Por lo tanto, el sistema cementante presenta valores de cohesión y ángulo de fricción altos y es resistente a un esfuerzo de corte, presentando alta rugosidad al momento de producirse una discontinuidad.
- La edad del sistema cementante influye en la resistencia del mismo
- El sistema cementante es capaz de soportar las condiciones requeridas en pozos candidatos a inyección alterna de vapor presentes en la Faja Petrolífera del Orinoco.

5.2 Caracterización Mecánica de un Sistema Cementante Alternativo aditivado con Arcillas, para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a la inyección de vapor

Este caso tiene como finalidad de estudiar el comportamiento mecánico de un sistema cementante convencional aditivado con arcillas para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a la inyección de vapor, dentro de toda la batería de ensayos realizados para estas muestras sólo se presentarán aquí los ensayos de corte realizados en ellas, bajo condiciones simuladas de curado temperatura de 52°C (125°F) y 288°C (550°F) y una presión constante 10.34 MPa (1500 psi). Los resultados presentados en esta sección pertenecen al Trabajo Especial de Grado de los Ingenieros Aranguren Otero & Lacruz Paredes, (2016).

En este caso se realizaron ensayos sobre siete (7) especímenes. Todos fueron cilíndricos, sometidos a ensayo de corte directo con carga normal. Los especímenes identificados con los siguientes números de laboratorio: 1719_DSH, 1720_DSH, 1721_DSH, fueron curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 52 °C y presión de 10.34 MPa y los especímenes 1704_DSH, 1705_DSH, 1708_DSH, 1709_DSH, fueron curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 288 °C y presión de 10.34 MPa.

Durante este ensayo se creó una discontinuidad en la probeta de cemento con un esfuerzo normal de 500 kPa, teniendo como resultado el valor del esfuerzo de corte aplicado a la muestra para ejecutar la fractura. Posteriormente las cargas o esfuerzos normales se variaron entre 1000 kPa, 2000 kPa y 4000 kPa, para obtener igualmente, valores de esfuerzos de corte para los diferentes esfuerzos normales. Con estos tres (3) puntos, se ajustó una recta a los resultados determinados para hallar la cohesión y el ángulo de fricción para cada muestra.

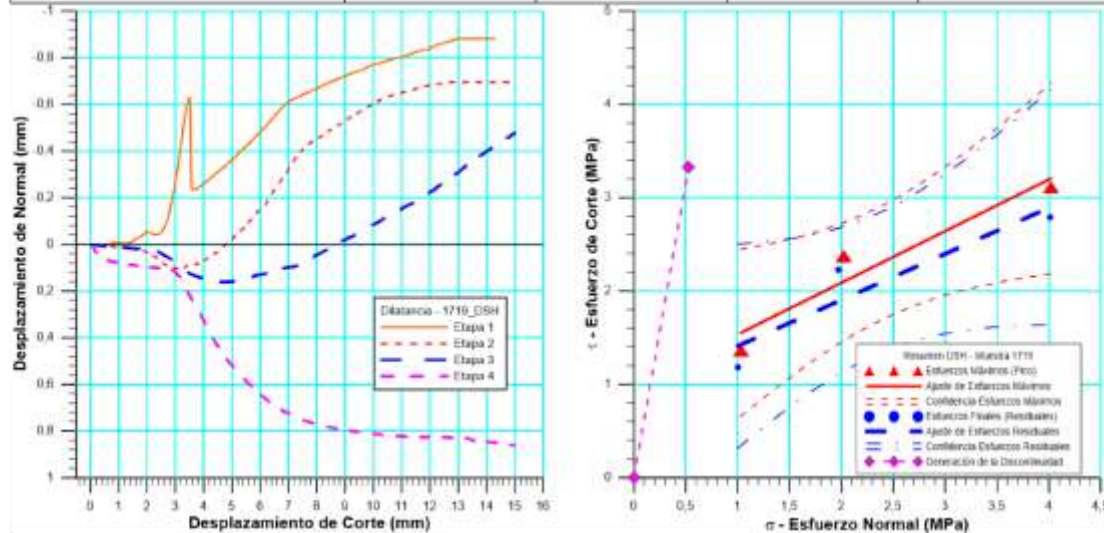
A continuación se incluye el cuadro resumen de estos ensayos.

5.2.1 Especímenes curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 52°C y presión de 10.34MPa

5.2.1.1 Espécimen 1719

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1	0,52752	3,32656	0,51187	0,80216
2	1,02826	1,36804	0,99984	1,18174
3	2,02390	2,37491	1,96768	2,22417
4	4,02066	3,11516	4,01505	2,79082



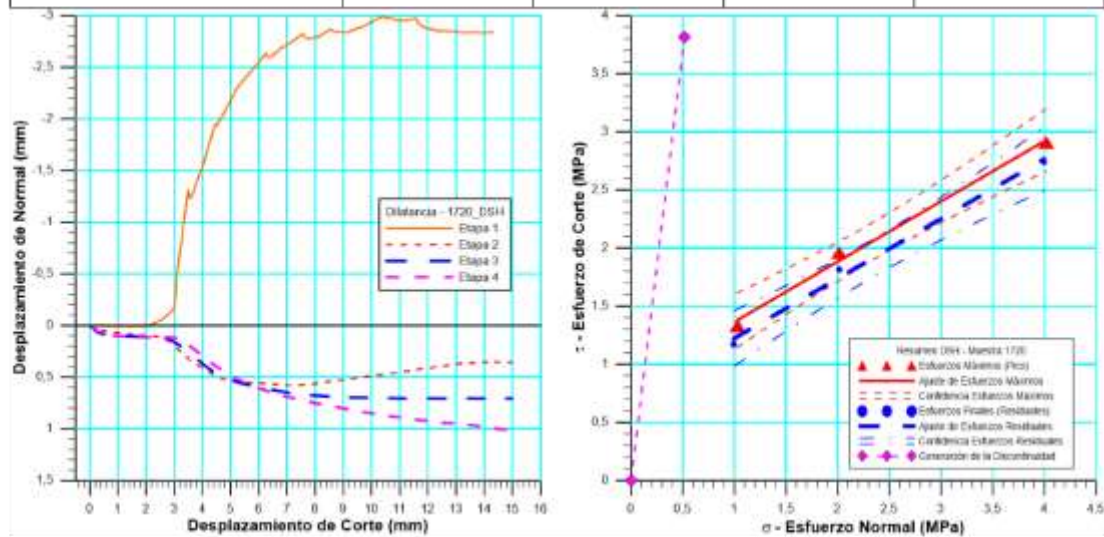
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(029) * s + 001$	$t = \tan(026) * s + 001$
Cohesión (c) (MPa)	0,98	0,92
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	28,95	26,28
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2,36	2,33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2,29	2,07
Suma de los residuos cuadrados	0,12	0,18
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1,42	1,16
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,92	0,87

Figura 5.12 Espécimen 1719_DSH-CNL

5.2.1.2 *Espécimen 1720*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1	0,51829	3,81609	0,46980	0,69820
2	1,02789	1,32998	0,99521	1,17149
3	2,01191	1,96073	2,01430	1,81700
4	4,01885	2,90505	3,99695	2,73998



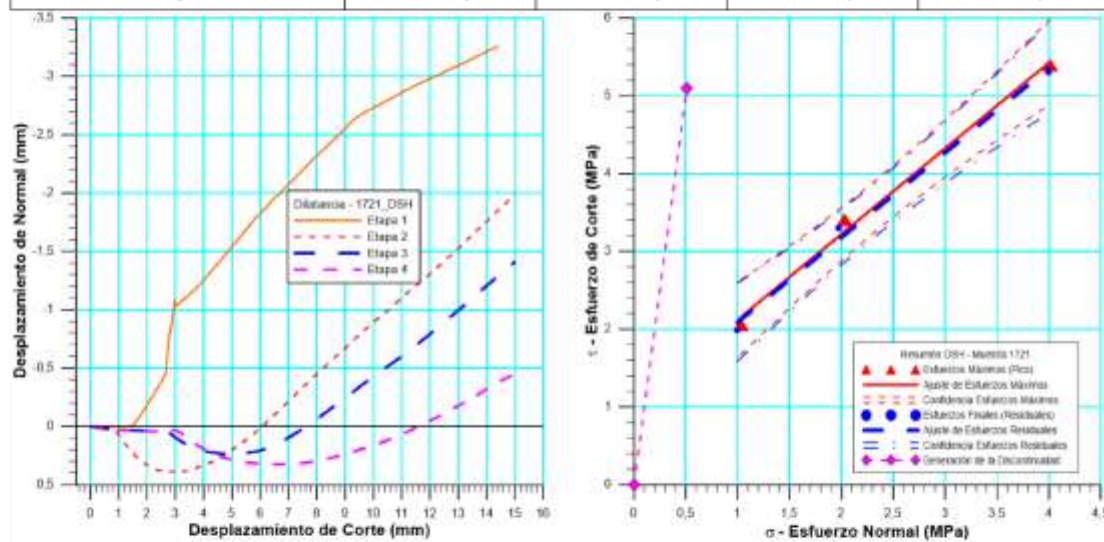
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(027) * s + 001$	$t = \tan(027) * s + 001$
Cohesión (c) (MPa)	0,85	0,71
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	27,40	27,24
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2,35	2,34
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2,07	1,91
Suma de los residuos cuadrados	0,01	0,01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1,25	1,23
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,99	0,99

Figura 5.13 Espécimen 1720_DSH-CNL

5.2.1.3 *Espécimen 1721*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1	0,51026	5,09273	0,49457	1,17852
2	1,02940	2,05444	0,99721	1,98355
3	2,03351	3,40521	1,97058	3,30129
4	4,01489	5,39181	3,99710	5,30423



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(048) * s + 001$	$t = \tan(047) * s + 001$
Cohesión (c) (MPa)	1,02	1,00
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	47,77	47,44
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2,36	2,32
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3,62	3,53
Suma de los residuos cuadrados	0,03	0,04
Regresión Suma de los residuos cuadrados	5,60	5,55
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,99	0,99

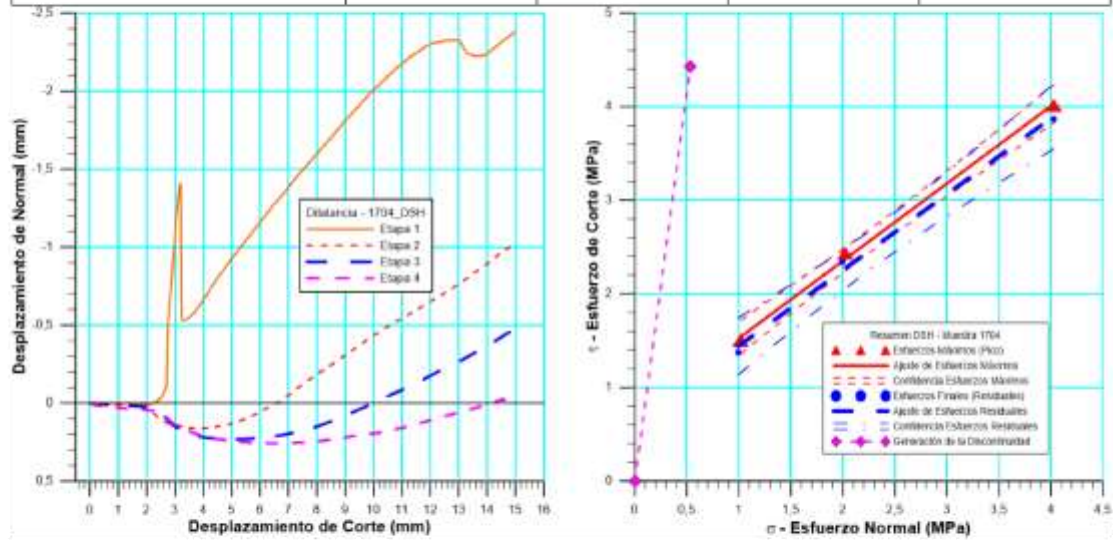
Figura 5.14 Espécimen 1721_DSH-CNL

5.2.2 Especímenes curados a condiciones simuladas de estimulación térmica de temperatura de 288°C y presión de 10.34MPa

5.2.2.1 Espécimen 1704

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	0,53263	4,42578	0,49668	0,81309
2	1,02027	1,50599	0,99336	1,37600
3	2,02595	2,42887	1,99468	2,34299
4	4,02999	4,01226	4,02911	3,86781



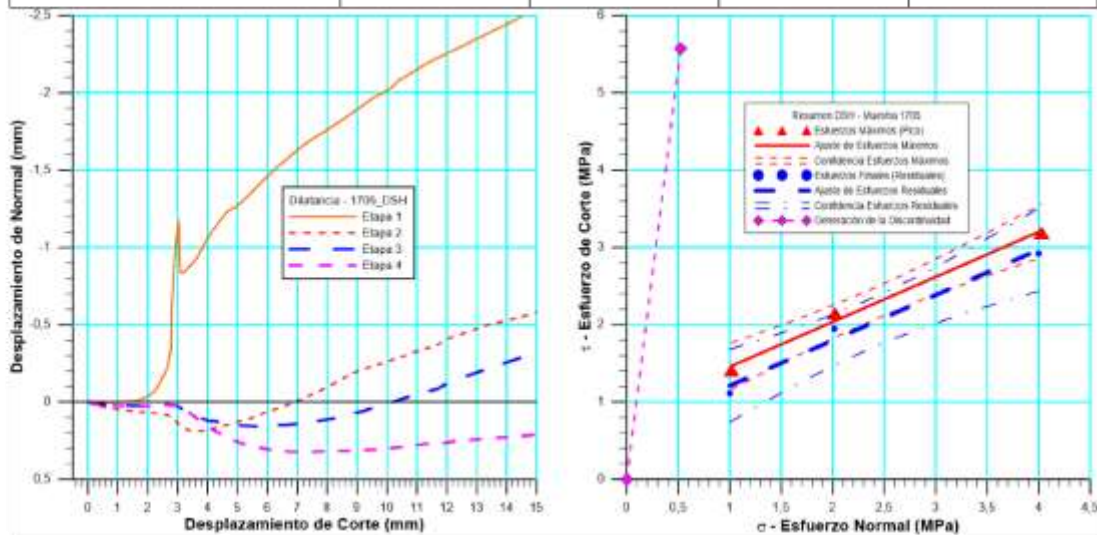
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(040) * s + 001$	$t = \tan(039) * s + 001$
Cohesión (c) (MPa)	0,70	0,63
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	39,58	39,02
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2,36	2,34
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2,65	2,53
Suma de los residuos cuadrados	0,00	0,01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3,21	3,14
Coefficiente de Determinación (R^2)	1,00	1,00

Figura 5.15 Espécimen 1704_DSH-CNL

5.2.2.2 *Espécimen 1705*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0	0	0
1	0.52540	5.57463	0.49566	0.72979
2	1.01996	1.40452	0.99924	1.11382
3	2.02404	2.14219	2.01460	1.94932
4	4.02568	3.18432	3.99704	2.91904



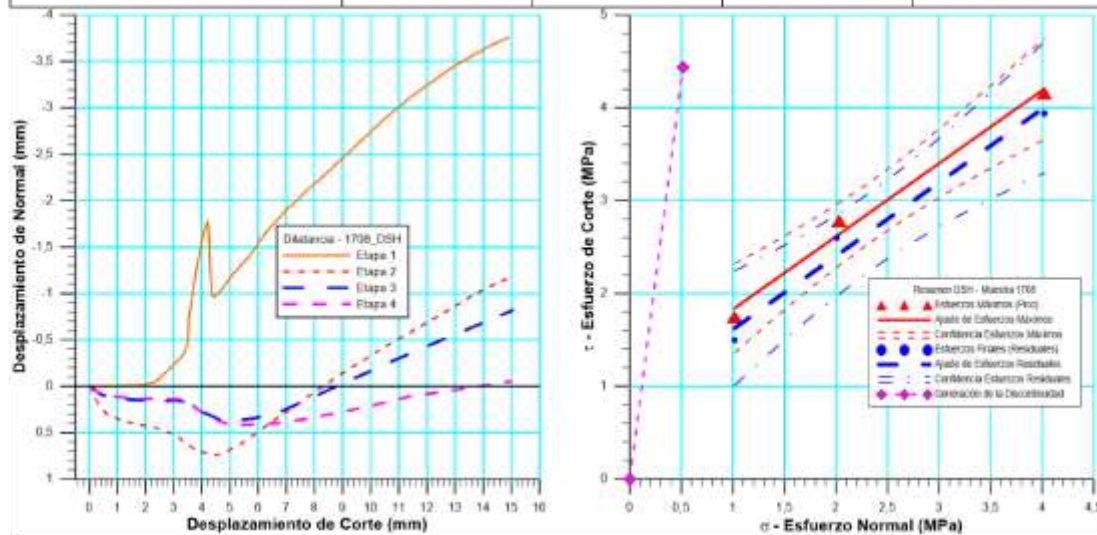
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(030) * s + 001$	$t = \tan(030) * s + 001$
Cohesión (c) (MPa)	0,87	0,62
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	30,20	30,40
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2,36	2,34
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2,24	1,99
Suma de los residuos cuadrados	0,01	0,03
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1,59	1,60
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,99	0,98

Figura 5.2.5 Espécimen 1705_DSH-CNL

5.2.2.3 *Espécimen 1708*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1	0,51666	4,43798	0,48760	0,81612
2	1,01734	1,74386	1,01517	1,49782
3	2,02766	2,78284	2,00812	2,59945
4	4,01813	4,15251	4,02122	3,94185



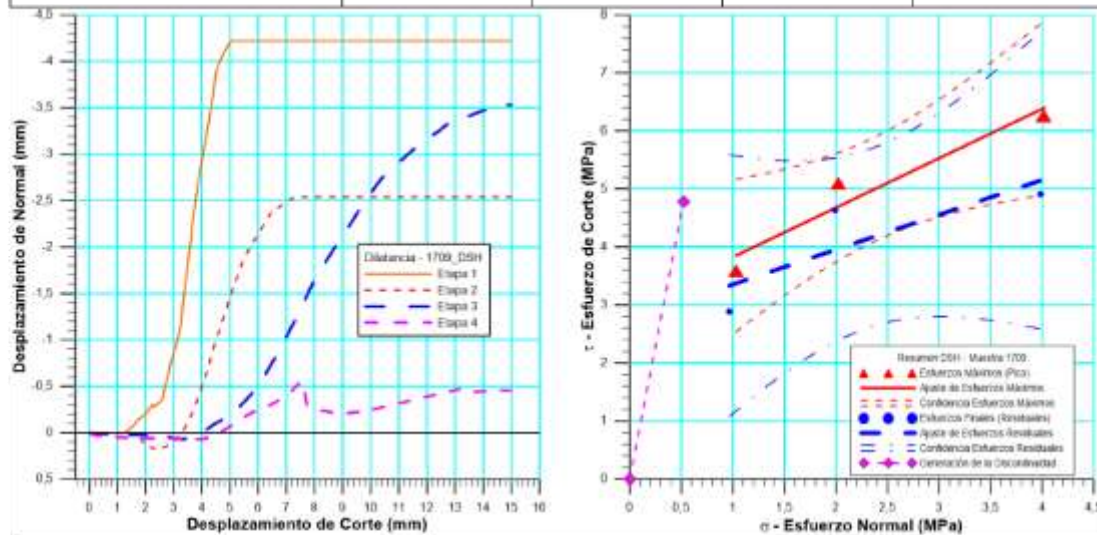
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(038) * s + 001$	$t = \tan(038) * s + 001$
Cohesión (c) (MPa)	1,04	0,82
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	38,19	38,37
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2,35	2,35
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2,89	2,68
Suma de los residuos cuadrados	0,03	0,06
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2,89	2,94
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,99	0,98

Figura 5.16 Espécimen 1708_DSH-CNL

5.2.2.4 *Espécimen 1709*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1	0,52178	4,78599	0,47170	1,00832
2	1,03192	3,58539	0,96735	2,88084
3	2,02639	5,10188	1,99067	4,63815
4	4,01539	6,26140	3,98095	4,91135



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(040) * s + 003$	$t = \tan(031) * s + 003$
Cohesión (c) (MPa)	2,97	2,75
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	40,43	30,98
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2,36	2,31
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4,98	4,14
Suma de los residuos cuadrados	0,25	0,73
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3,35	1,69
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,93	0,70

Figura 5.17 Espécimen 1709_DSH-CNL

5.2.3 **Envolventes de Mohr-Coulomb para el grupo de especímenes**

En la tabla 5.4, se pueden observar estos datos obtenidos para cada muestra de cemento, así como el coeficiente de determinación para cada una de ellas.

Tabla 5.4 Resultados de corte directo para las muestras ensayadas

Especímenes acondicionados a 52 °C y 10,34 MPa (125 °F y 1500 psi)					
Nº Muestra	Resistencia al corte para generar la discontinuidad (MPa) – [psi]	Cohesión (MPa)	Cohesión (psi)	Ángulo de fricción (°)	Coefficiente de Determinación (R2)
1719	3.33 – [483]	0.98	142	28.95	0.92
1720	3.82 – [554]	0.85	123	27.40	0.99
1721	5.09 – [738]	1.02	148	47.77	0.99
Promedio	4.08 – [592]	0.95	138	34.71	
Desviación Estándar	0.91 – [132]	0.09	13	11.34	

Especímenes acondicionados a 288 °C y 10,34 MPa (125 °F y 1500 psi)					
Nº Muestra	Resistencia al corte para generar la discontinuidad (MPa) – [psi]	Cohesión (MPa)	Cohesión (psi)	Ángulo de fricción (°)	Coefficiente de Determinación (R2)
1704	4.43 – [643]	0.70	102	39.68	1.00
1705	5.57 – [808]	0.87	126	30.20	0.99
1708	4.43 – [643]	1.04	151	38.19	0.99
1709	4.79 – [695]	2.97	431	40.42	0.93
Promedio	4.81 – [697]	1.40	203	37.12	
Desviación Estándar	0.54 – [78]	1.06	154	4.71	

Se evidencia un incremento del esfuerzo de corte (τ) para la generación de la discontinuidad en los especímenes acondicionados a 288 °C (550 °F) de 15,18 % en relación a los especímenes curados a 52 °C (125 °F). Los esfuerzos de corte promedio para cada condición (52 y 288 °C) son de 4,08 y 4,81 MPa (592 y 698 psi), cuyos valores representan el esfuerzo de corte máximo para que la muestra rompa, con desviaciones estándar de 0,91 y 0,54 (132 y 78) respectivamente.

Los resultados promedio de cohesión y ángulo de fricción, obtenidos aplicando el criterio en la condición de 52 °C (125 °F) fueron 0,95 MPa (138 psi) y 34,71 ° mientras que para 288 °C

(550 °F) fueron de 1,40 (203 psi) y 37,12 °, siendo notorio un incremento en ambos parámetros para la condición de 288 °C. También se debe acotar que ambos valores de ángulo de fricción están en el rango de 25 a 45 ° al cual pertenecen la mayoría de las rocas. Por lo tanto los valores de cohesión y ángulo de fricción en ambas condiciones reflejan que se requieren de altos esfuerzos para poder cizallar el cemento, evitando un problema en el pozo cuando está sometido algún esfuerzo de corte.

Por otro lado, en la Figura 5.18 se muestra el esfuerzo de corte junto con la edad de las muestras en estudio.

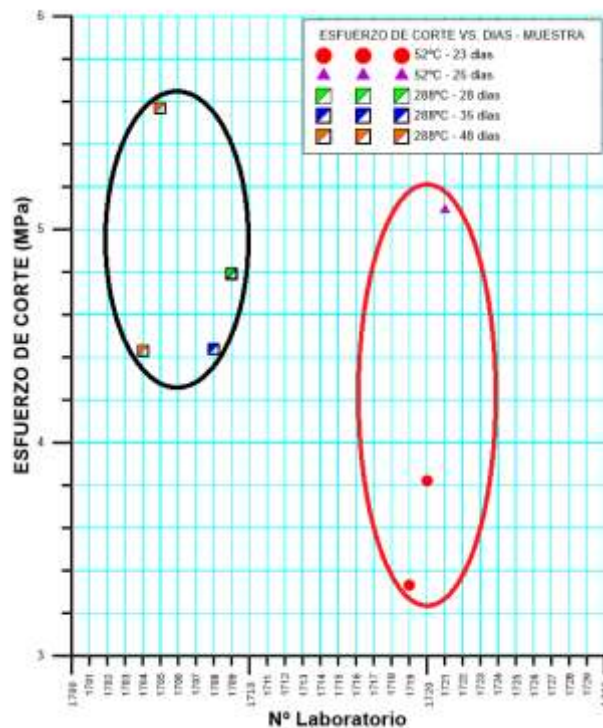


Figura 5.18 Edad del cemento en ensayo de corte directo para muestras acondicionadas a 52 y 288 °C

Se observa que los dos círculos y el triángulo representan las muestras curadas a 52 °C (125 °F) con edad de 23 y 25 días obteniendo valores de esfuerzo de corte entre 3,2 - 5,2 MPa (464 - 754 psi) y por otro lado se tienen las muestras acondicionadas a 288 °C (550 °F) con edades de 28-48 días que evidencian mayores valores de esfuerzo de corte que van desde 4,4 - 5,6 MPa (638 - 812 psi).

En la Figura 5.19, se muestra la recta que mejor ajusta los esfuerzos de corte máximos de las últimas tres etapas de las muestras curadas a 52 °C (125 °F).

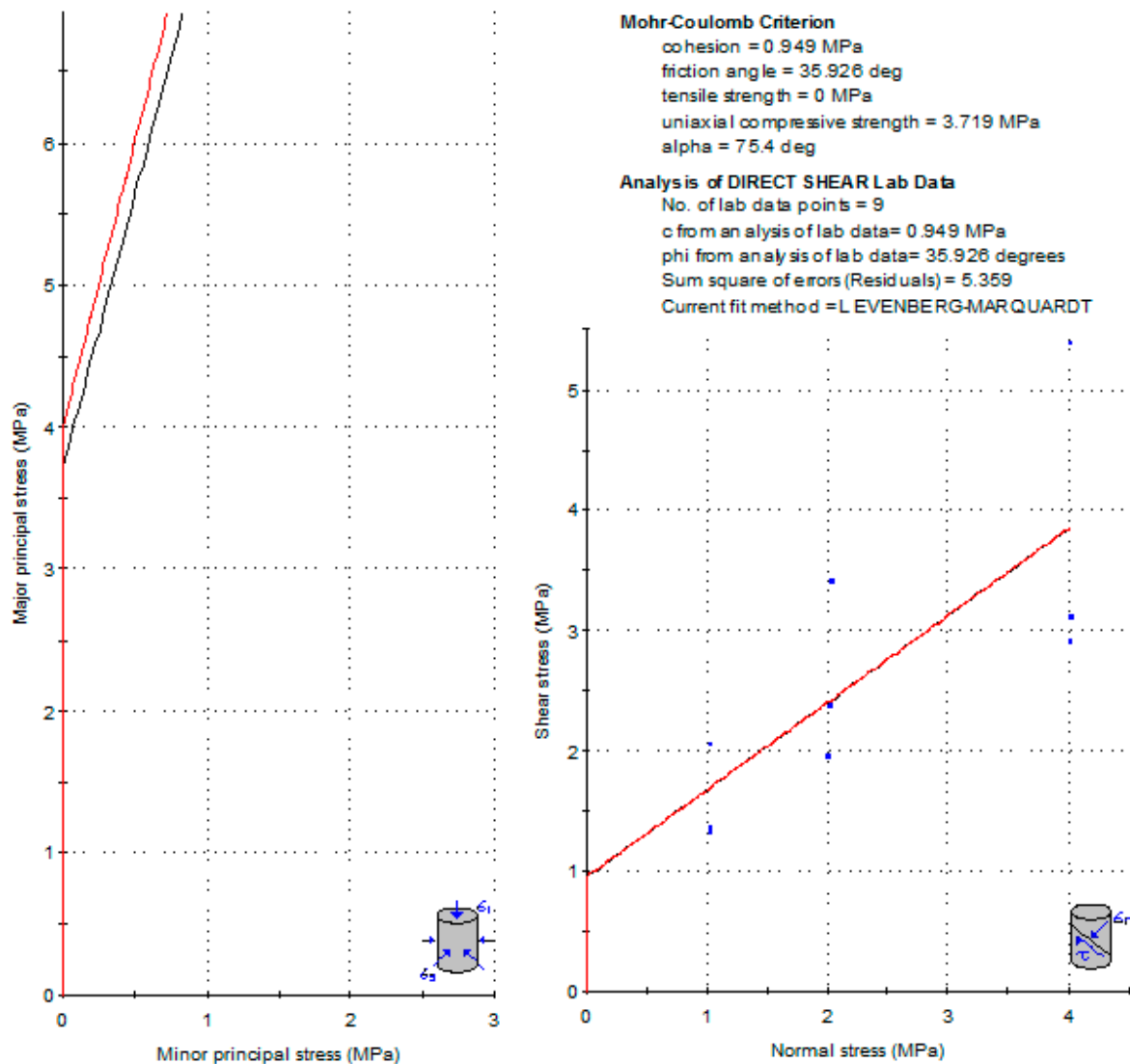


Figura 5.19 Criterio de Mohr Coulomb aplicado a muestras curadas a 52 °C

De la Figura 5.19, se obtienen valores de cohesión y ángulo de fricción igual a 0,95 MPa (138 psi) y 35,93 ° respectivamente.

De igual manera en la Figura 5.20, se muestra la recta que se ajusta mejor a los esfuerzos de corte máximos de las últimas tres cargas normales para los especímenes acondicionados a 288 °C (550 °F).

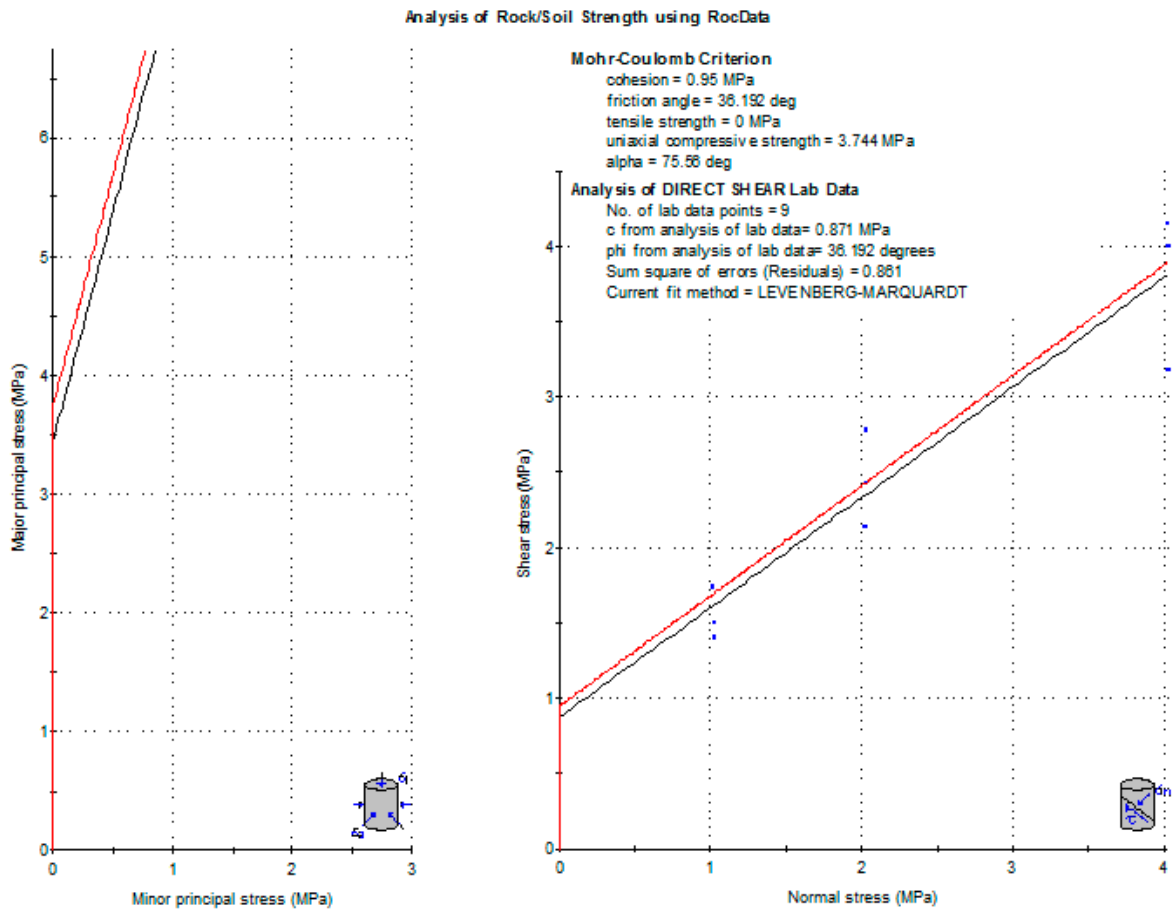


Figura 5.20 Criterio de Mohr Coulomb aplicado a muestras curadas a 288 °C

Para resumir, se incluye la Tabla 5.5, donde se comparan los resultados obtenidos en la condición estática de pozo y la de simulación de estimulación térmica.

Tabla 5.5 Comparación de resultados obtenidos a 52 y 288 °C en el criterio de Mohr-Coulomb a partir del ensayo de corte

Parámetro	Condición de 52 °C	Condición de 288 °C	Observación (Comparación con respecto a 52 °C)
Cohesión (MPa)	0.95	0.95	No hubo variación
Ángulo de Fricción (°)	35.93	36.19	Incremento del 0.72%

También es importante tener en cuenta los valores obtenidos de dilatación. Esta es la separación que se va a presentar después de que se ha generado la discontinuidad en la

muestra a medida que se aplican bajas cargas normales, para que las caras de la muestra se desplacen entre sí (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, y Oteo, 2004). En la tabla 5.6, se observan los resultados obtenidos, donde las muestras poseen un valor de dilatación promedio de 3.13 mm para las muestras acondicionadas a 52 °C y 10.34 MPa y para las muestras curadas a 288 °C y 10.34 MPa de 3.56 mm, evidenciando que el cemento al momento de una posible rotura cuando se encuentre en el pozo presentará alta rugosidad. Es decir, las caras no se deslizarán entre sí con facilidad para bajos esfuerzos normales, para este tipo de ensayo.

Tabla 5.6 Valores de dilatación para las diferentes muestras ensayadas en la etapa de generación de la discontinuidad

Especímenes acondicionados a 52 °C y 10.34 MPa (125 °F y 1500 psi)		Especímenes acondicionados a 288 °C y 10.34 MPa (550 °F y 1500 psi)	
N° de Espécimen	Dilatancia (mm)	N° de Espécimen	Dilatancia (mm)
1719	0.88	1704	2.38
1720	2.99	1705	2.54
1721	3.32	1708	3.77
Promedio	2.40	1709	4.22
Desviación Estándar	1.32	Promedio	3.23
		Desviación Estándar	0.91

5.2.4 Conclusiones para este tipo de cemento

- El sistema cementante propuesto cumple con los requerimientos exigidos en la FPO en cuanto a sus propiedades físicas.
- En el ensayo de corte directo bajo la condición de carga normal constante las muestras acondicionadas a 288 °C (550 °F) presentan un incremento en el esfuerzo de corte de 17,89 % con respecto a las muestras curadas a 52 °C (125 °F).

5.3 Propuesta para Reducción de Tamaño de Minerales No Metálicos: Caso Charnockita, Cerro La Danta, Sector Cambalache, Estado Bolívar

Este caso corresponde al Trabajo Especial de Grado presentado por Bermúdez A, (2016). Parte de dicho trabajo consistió en la caracterización de las propiedades mecánicas de la Charnoquita, del Cerro La Danta. Al igual que en los casos anteriores sólo se hará referencia a los ensayos de Corte Directo en roca, sobre las muestras provenientes de dicho yacimiento.

El Cerro La Danta, está ubicado en la zona norte de la ciudad de Puerto Ordaz (Figura 5.21), municipio Caroní, parroquia Unare, estado Bolívar. Zona Industrial Cambalache, entre la zona industrial de Matanza y Puerto Ordaz. Enclavado a la margen derecha del Rio Orinoco, aproximadamente 10 kilómetros aguas arriba de la confluencia del Rio Caroní con el Rio Orinoco.



Figura 5.21 Ubicación relativa del Cerro La Danta (Bermúdez A, 2016)

5.3.1 Especímenes en estudio

Los especímenes en estudio son muestras cilíndricas extraídas de bloques masivos transportados al laboratorio. El diámetro de las muestras es de 18.03 mm, con una altura de 74.50 mm en promedio. Dichas rocas pueden clasificarse como rocas duras y abrasivas.

Las charnoquitas, son rocas granoblásticas que contienen antipertita, plagioclasa sódica, hiperstena, diópsido, granate y minerales metálicos. Las charnockitas son, por tanto, variedades de granulitas en el sentido más amplio, caracterizados por la presencia de uno o varios piroxenos. La mayoría de las rocas llamadas granitos piroxénicos son similares a las

charnockitas y las charnockitas félsicas (ácidas) son granulitas en sentido estricto (tomado de (Bermúdez A, 2016), citando a Nieves, 2012. P. 21).

Según Mendoza, (1974) citado por (Bermúdez A, 2016), del análisis microscópico de muestras Provenientes del Cerro La Danta, presentan minerales potásicos (tipo mesopertita, antipertita, pertita, y microclino), con alto porcentaje de cuarzo, cantidades menores de piroxeno, mica biotita, óxidos e hidróxidos de hierro y como accesorios circón, epidoto y apatito y algunas con trazas de hornblenda;

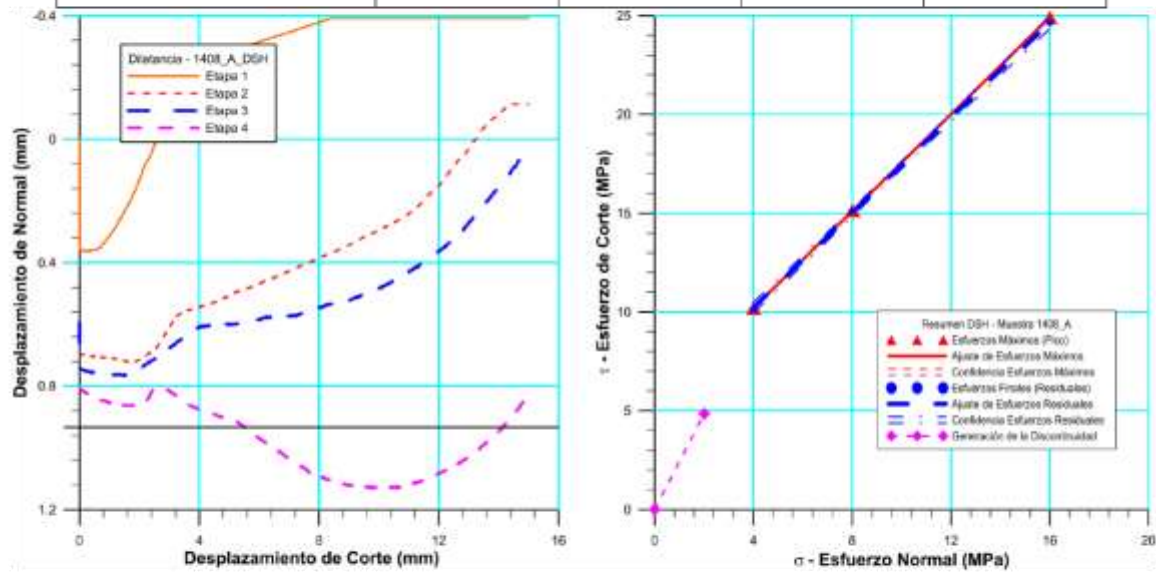
Según Bermúdez A, (2016) citando a (Loran, 2012, p. 119), su descripción petrográfica sobre muestras de mano, puede decirse que, son rocas duras, frescas, homogéneas, de grano fino a medio, de color gris verdoso. Microscópicamente se observa una textura granoblástica inequigranular ligeramente cataclástica, definida por minerales de tamaño grueso, medios y finos, la mayoría son xenoblásticos, de bordes corroídos, donde los fenocristales por disgregación mecánica han producido agregados suturados y recristalizados. Presenta estructura masiva y una composición mineralógica con predominancia del feldespato potásico, seguida del cuarzo, anfíbol y piroxenos. Una pequeña cantidad de minerales opacos (3% aproximadamente) como apatito, hidróxido de hierro y mica biotita también se encuentran presentes en la muestra analizada.

A continuación se presentarán tres (3) ensayos de corte realizados sobre muestras provenientes del Cerro La Danta: Sólo se incluyen el resumen de los ensayos.

5.3.1.1 *Espécimen 1408-A*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	2.0077	4.85203	1.9988	4.843
2	4.00803	10.19636	3.9972	10.160
3	8.0237	15.1408	8.0017	15.1191
4	16.0081	24.9087	15.998	24.626



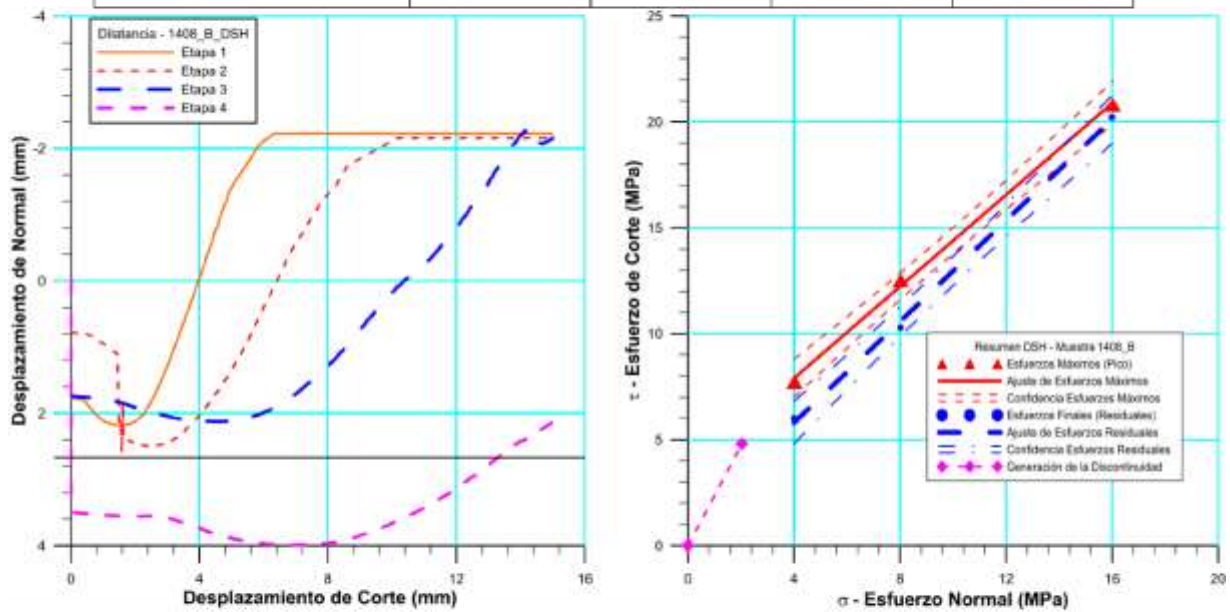
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(50.80) * s + 5.29$	$t = \tan(50.26) * s + 5.41$
Cohesión (c) (MPa)	5.29	5.41
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	50.80	50.26
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	9.34	9.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	16.75	16.64
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	112.10	108.07
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

Figura 5.22 *Espécimen 1408-A_DSH-CNL- Cerro La Danta*

5.3.1.2 *Espécimen 1408-B*

Cuadro Resumen de los Resultados

Punto	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	2.0319	4.802	1.997	3.3055
2	4.0201	7.7396	4.0039	6.0141
3	8.0204	12.5222	8.018	10.292
4	16.024	20.815	15.996	20.2138



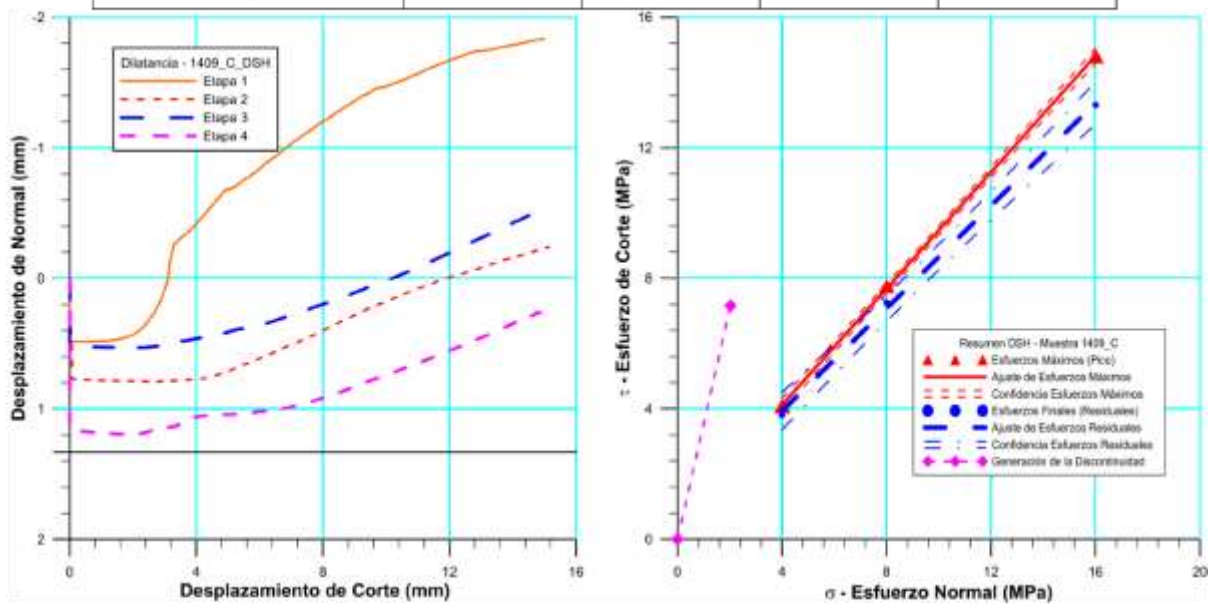
Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(47.25) * s + 3.57$	$t = \tan(50.02) * s + 1.04$
Cohesión (c) (MPa)	3.57	1.04
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	47.25	50.02
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	9.36	9.34
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	13.69	12.17
Suma de los residuos cuadrados	0.12	0.14
Regresión Suma de los residuos cuadrados	87.42	105.98

Figura 5.23 *Espécimen 1408-B_DSH-CNL- Cerro La Danta*

5.3.1.3 Espécimen 1409-C

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0	0		
1	2.0232	7.1587	1.9957	2.079
2	4.0069	4.0818	3.990	3.808
3	8.0121	7.756	8.002	7.253
4	16.013	14.804	16.002	13.609



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(41.71) * s + 0.55$	$t = \tan(38.17) * s + 0.79$
Cohesión (c) (MPa)	0.55	0.79
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	41.71	38.17
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	9.34	9.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	8.88	8.12
Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.05
Regresión Suma de los residuos cuadrados	59.38	46.22
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

Figura 5.24 Espécimen 1409-C_DSH-CNL- Cerro La Danta

5.3.2 Envoltentes de Mohr-Coulomb para el grupo de especímenes

En la Tabla 5.7, se pueden observar estos datos obtenidos para cada muestra de charnoquita, así como el coeficiente de determinación para cada una de ellas.

Tabla 5.7 Resultados de corte directo para las muestras ensayadas

Nº Muestra	Resistencia al corte para generar la discontinuidad (MPa) con $\sigma_n = 2$ MPa	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción (°)	Coefficiente de Determinación (R ²)
1408-A	4.85	5.29	50.80	1.00
1408-B	4.82	3.57	47.25	1.00
1409-C	7.16	0.55	41.71	1.00
Promedio	4.08	3.14	46.59	
Desviación Estándar	0.91	2.40	4.58	

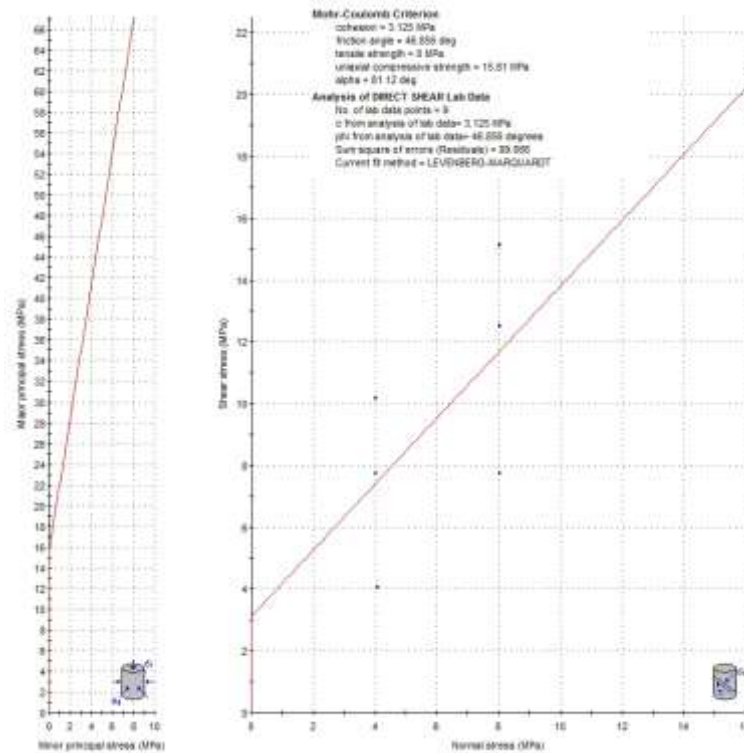


Figura 5.3.5 Criterio de Mohr Coulomb aplicado a los especímenes provenientes del Cerro La Danta

A continuación se incluye la Tabla Resumen (Tabla 5.8) de los parámetros de resistencia obtenido sde todos puntos de los ensayos de corte.

Tabla 5.8 Resultados de los parámetros de resistencia aplicando el criterio de Mohr-Coulomb a partir del ensayo de corte

Parámetro	
Cohesión (MPa)	3.13
Ángulo de Fricción (°)	46.86
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99

Como podemos observar los parámetros obtenidos en este tipo de roca ígnea son bastante elevados con respecto a los obtenidos de los especímenes de cemento presentados anteriormente.

Con respecto a la dilatación registrada en los ensayos se incluyó la Tabla 5.9, para su mejor comprensión.

Tabla 5.9 Valores de dilatación para las diferentes muestras ensayadas en la etapa de generación de la discontinuidad

Cerro La Danta	
N° de Especímen	Dilatancia (mm)
1408-A	0.75
1408-B	3.65
1409-C	2.33
Promedio	2.24
Desviación Estándar	1.45

De los gráficos de dilatación de cada uno de los especímenes observa que una vez alcanzada la generación de la discontinuidad, debido al tipo de roca y a los granos de los minerales que la componen, la superficie queda lisa ya que la dilatación se vuelve constante.

Esto lo observamos en el gráfico de tiempo de la Etapa 1 de cada ensayo (Figuras 5.26, 5.27, 5.28)

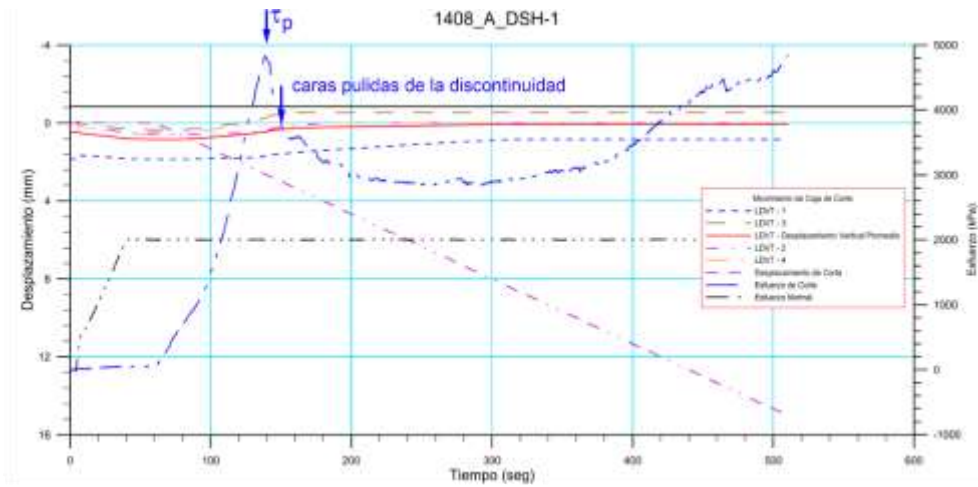


Figura 5.26 Desarrollo del ensayo de la muestras 1408-A en el tiempo - Cerro La Danta

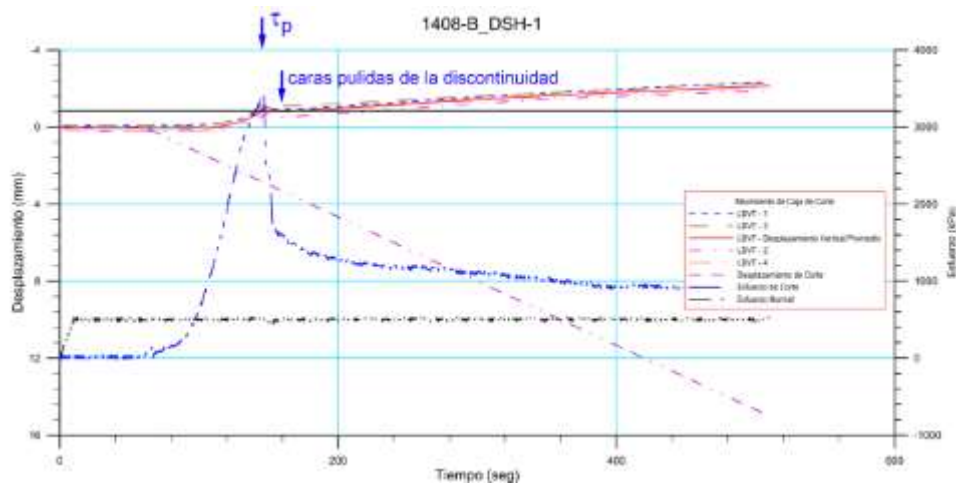


Figura 5.27 Desarrollo del ensayo de la muestras 1408-B en el tiempo - Cerro La Danta

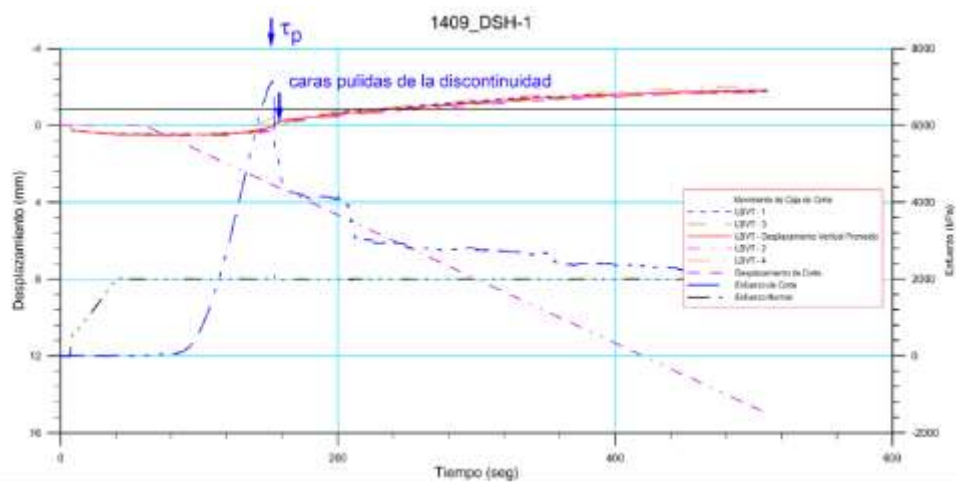


Figura 5.28 Desarrollo del ensayo de la muestras 1409-C en el tiempo - Cerro La Danta

Las inclinaciones en las dilataciones son debidas al plano inclinado sobre la cual el espécimen, generó la discontinuidad. Como puede observar de las fotografías obtenidas al finalizar el ensayo (Figuras 5.29, 5.30, 5.31), las cuales se muestran a continuación, las superficies están lisas.



Figura 5.29 Caras del Especimen 1408-A_DSH, una vez finalizado el ensayo - Cerro La Danta

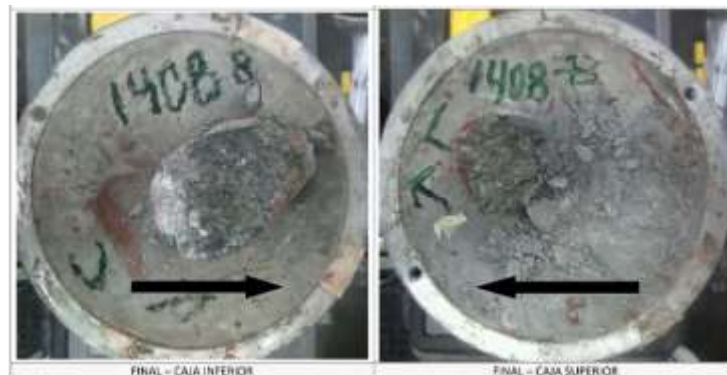


Figura 5.30 Caras del Especimen 1408-B_DSH, una vez finalizado el ensayo - Cerro La Danta



Figura 5.31 Caras del Especimen 1409-C_DSH, una vez finalizado el ensayo - Cerro La Danta

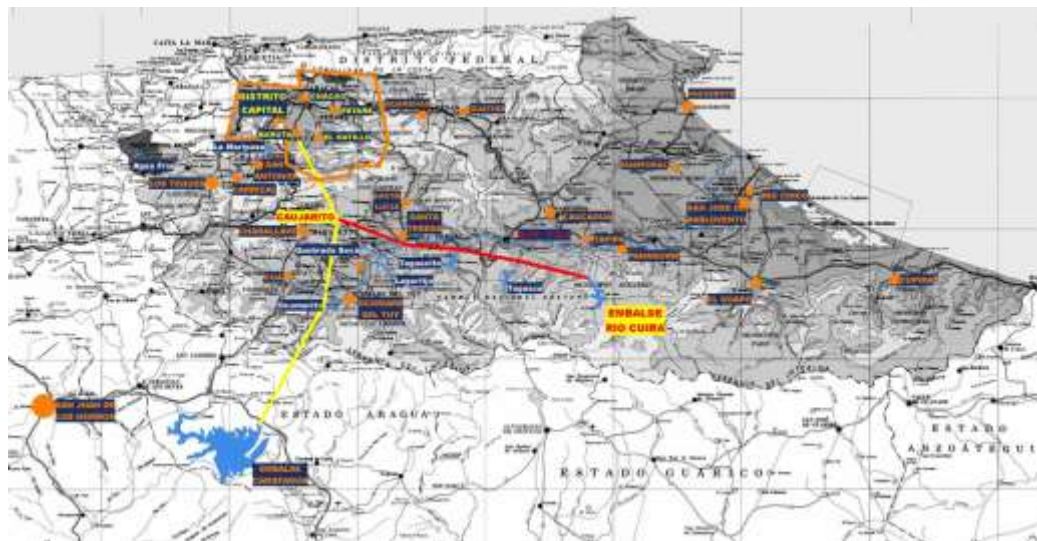


Figura 5.34 Ubicación del Embalse sobre el Río Cuira (Manuel Rico, 2016)

5.4.2 Geología de la zona

5.4.2.1 Geología Regional

La litología expuesta tanto en el sitio de presa como en el vaso de almacenamiento de la presa El Dinero, sobre el Río Cuira, pertenece en términos generales a la Formación las Hermanas, la cual presenta un complejo de rocas metaígneas, con índices de metamorfismo bajo a medio, de origen Arco volcánico, la cual puede relacionarse con la Faja del Grupo Villa de Cura.

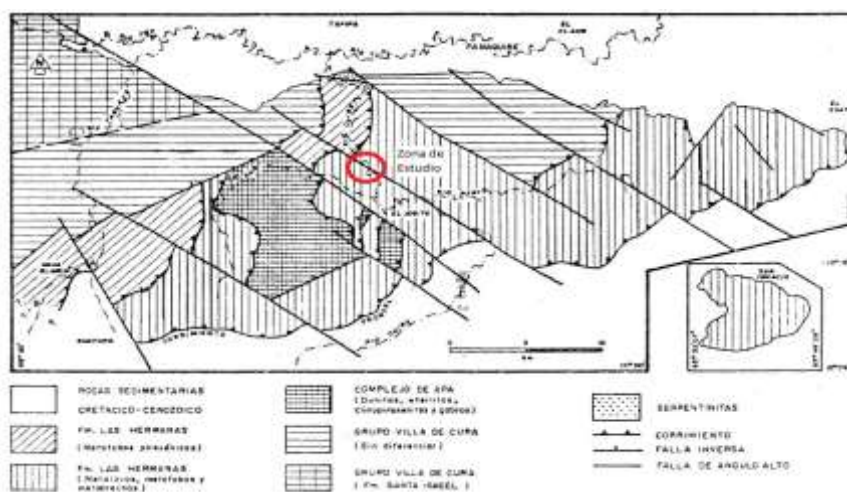


Figura 5.35 Mapa Geológico Simplificado del Área Guatopo – El Guapo, Edos. Miranda y Guárico. (Urbani, Chirinos, & Marquina, 1990)

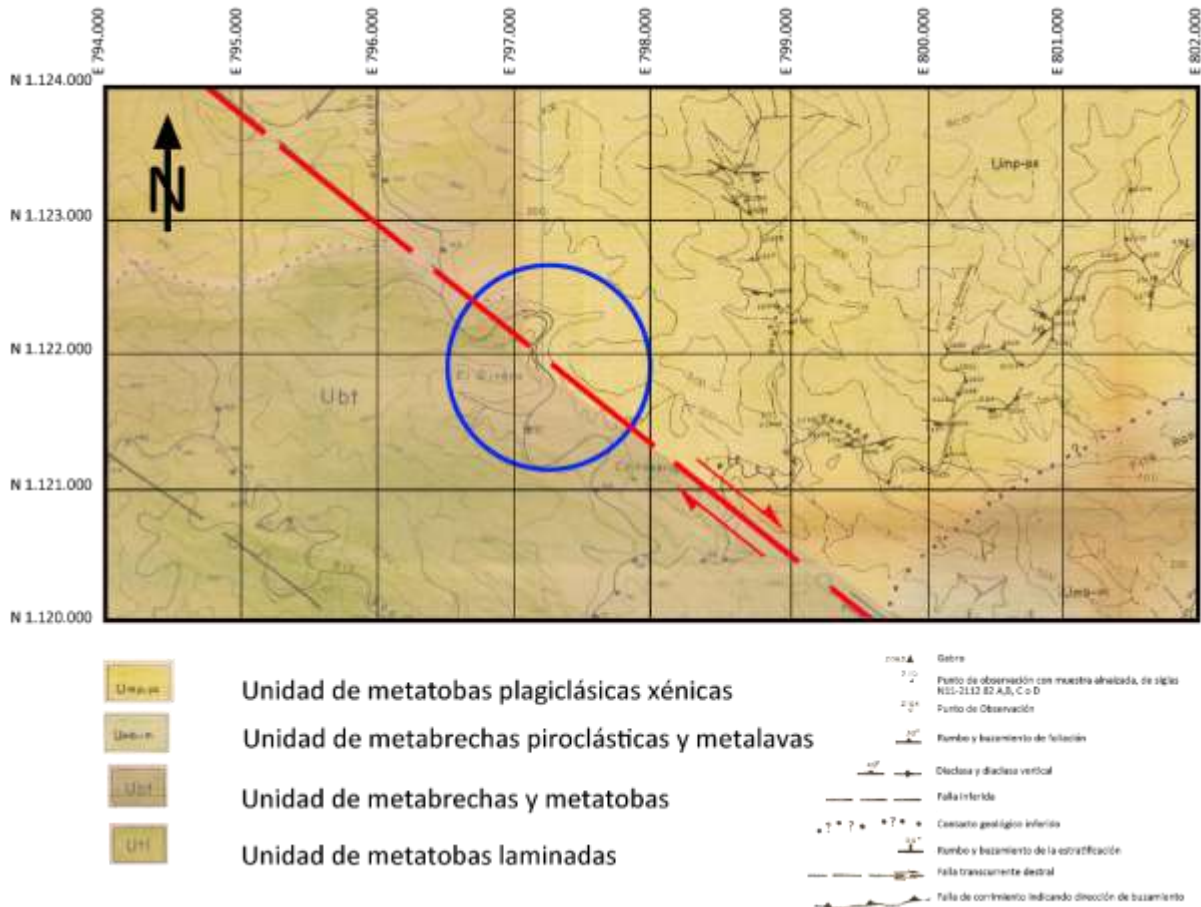


Figura 5.36 Mapa Geológico de la zona de El Dinero (Cortiula , 1983) & (Perez D'Gregorio, 1986)



Figura 5.37 Vista panorámica de la zona de presa donde se puede observar la ubicación de una falla rumbo N60W, 76N (030,76)



Figura 5.38 Vista panorámica en en sitio de construcción de la presa con la presencia de la falla rumbo N60W, 76W (030,76)

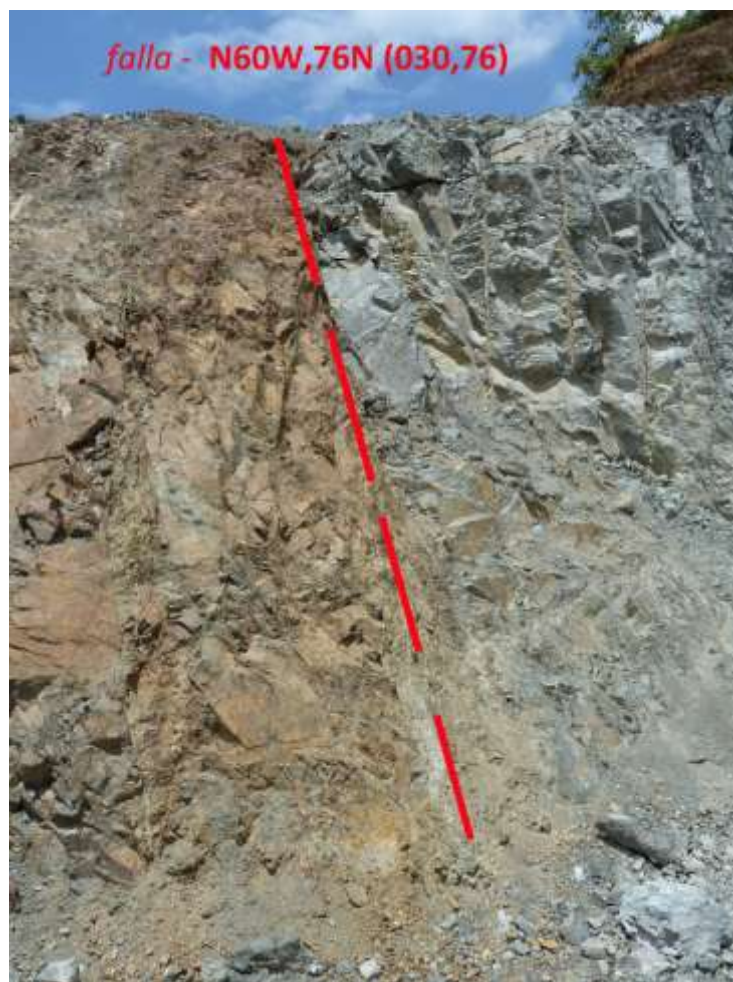


Figura 5.39 Detalle de la falla falla rumbo N60W, 76W (030,76)

5.4.2.1.1 Formación Las Hermanas

Según (Urbani, Chirinos, & Marquina, 1991), al Este de San Sebastián (Aragua), afloran rocas metavolcánicas constituidas fundamentalmente por lava, brecha y toba, inicialmente cartografiadas como "Formación Tiara", por correlacionarlas con las que afloran cerca de Tiara. Más recientemente, por las características petrológicas y geoquímicas distintivas, y proponen la separación de ambas unidades como formaciones Tiara y Las Hermanas, para las localidades de Tiara y San Sebastián respectivamente. El nombre de la formación proviene de la localidad tipo en la Quebrada Las Hermanas, al Este de San Sebastián.

Los autores que han realizado estudios geológicos y geoquímicos en la metalava basáltica de esta formación en San Sebastián, concuerdan en señalar que corresponden a un ambiente de arco volcánico y ubican a la Formación Tiara dentro de la "Napa de Loma de Hierro" y a la Formación Dos Hermanas (sic) en la "Napa de Villa de Cura". Así mismo cartografía a esta formación a través de una faja casi ininterrumpida desde San Sebastián (Aragua) hasta Las Colonias en el Parque Nacional Guatopo.

La zona cartografiada como Formación Las Hermanas es del Grupo Villa de Cura, por su carácter masivo y carencia de estructuras planares, además por el predominio de lavas andesíticas.

La Formación Las Hermanas se ha podido subdividir en dos unidades cartografiables separadamente, a saber:

- **Subunidad de Metatoba**

Esta subunidad aflora en las Hoyas de los ríos Taguaza, Apa y Cuira, en forma de faja dislocada por fallas transcurrentes dextrales y limitada por corrimientos, y cubre un área de 81 km². Al norte está en contacto de corrimiento y de falla con el Grupo Villa de Cura, al sur el contacto de corrimiento sobre la unidad de metalava y en su sección más occidental sobrecorre a la Caliza de Las Colonias.

Está caracterizada por la presencia de metatoba lítica piroxénica, que constituye prácticamente el 99% de la unidad, encontrándose además metalava andesítica, granofel

y metaftanita. Es notable la casi total ausencia de cristales de anfíbol en comparación con las unidades metamórficas restantes. La unidad es de carácter masivo en las Hoyas de los ríos Taguaza y Apa. Sin embargo hacia la parte norte de la boya del río Cuira, la metatoba presenta un bandeamiento incipiente.

- **Litología**

Metatoba Los mejores afloramientos de este tipo litológico están en la naciente del río Taguaza, de las quebradas Los Casupitos y Mondongo, en curso inferior del río Cuira entre los caseríos El Cambur y El Oro y en la parte media del río Apa.

Presenta un color que varía desde verde oliva claro y gris verdoso a verde oliva oscuro o verde oscuro y meteoriza tanto a verde oscuro como a pardo claro. Los fragmentos de rocas pueden ser de colores verdosos más claros o más oscuros. En el extremo norte de la unidad se puede observar un bandeamiento grueso con colores alternantes gris verdoso claro y gris verdoso oscuro, paralelo a la estratificación volcánica original de la roca. Las bandas tienen un espesor de hasta 3 cm. Afloran como cuerpos discontinuos masivos, por lo general fracturados y diaclasados y están cortados por vetas de epidoto. Aunque no se observaron los contactos en el campo, se pudo observar en varios puntos de toda la unidad, una gradación en el tamaño y abundancia de los fragmentos de roca, pasando de metatoba lítica a metatoba cristalina.

Se encuentran cinco tipos de metatoba así: metatoba lítica, metatoba lítocristalina, metatoba cristalino-lítica, metatoba cristalina y metabrecha piroclástica, donde la primera es la que caracteriza la unidad.

La mayoría de los fragmentos son de ceniza gruesa y lapilli. Al microscopio se puede observar fragmentos de lava y escasamente de ftanita y metatoba.

En los fragmentos de lava hay microlitos de plagioclasa que definen una textura afieltrada y menos frecuentemente tranquílica.

Ocasionalmente las amígdalas definen una textura vesicular. Los cristales son de plagioclasa y clinopiroxeno y en menor cantidad se observa clorita. Son abundantes las

amígdalas con un diámetro máximo de 2 mm y están rellenas de clorita, epidoto, clinozoisita, prehnita, pumpellita y escasamente cuarzo y calcita. Por lo general la matriz de estos fragmentos está muy alterada a laucoxeno y material no identificable. Los fragmentos de metatoba contienen a su vez fragmentos de metalava andesítica con microlitos de plagioclasa y la matriz está alterada a leucoxeno. Los fragmentos de metaftanita alcanzan hasta 8 mm de diámetro. La matriz es oscura y de material no identificable. Se observan fósiles de radiolarios no identificables y algunos pequeños fragmentos de plagioclasa.

Los cristales de la metatoba son de plagioclasa alterada a sericita y abundante clinopiroxeno con diámetro de hasta 2,5 mm. Ocasionalmente estos fenocristales están muy fracturados. La matriz es de grano fino, compuesta de cuarzo, plagioclasa, clorita, epidoto, abundante clinozoisita, pumpellita, prehnita, material cuarzo-albítico y escasamente actinolita. Las vetas son poco abundantes y están rellenas de clorita, prehnita, epidoto, clinozoisita, pumpellita y muy escasamente cuarzo y plagioclasas.

Mineralogía detallada: Cuarzo, Plagioclasa, Matriz cuarzo-albítica, Clorita, Epidoto, Clinozoisita, Actinolita, Hornblenda, Clinopiroxeno, Prehnita, Pumpellita, Calcita, Esfena y Leucoxeno.

Metalava: Es muy escasa y solamente se encuentra en la naciente del río Taguaza y en las quebradas Pequeño Apa y Mondongo. Es de tipo andesítica y presenta color gris verdoso a verde oliva. Por lo general es masiva, aunque ocasionalmente se observa una gruesa foliación, son poco resistentes a la meteorización y están poco fracturadas. Aunque no se observaron los contactos en el campo, se sugiere que están intercaladas con la metatoba.

Al microscopio, la plagioclasa muestra textura intersectal, y también definen textura traquítica, aunque la textura dominante es la porfírica. De igual manera, se pudo observar textura perlítica. La matriz está constituida por microlitos de plagioclasa y abundante clorita, epidoto y clinozoisita y en menor proporción pumpellita. Las vetas

son muy escasas y están rellenas de epidoto, clinozoisita y prehnita. Las pocas amígdalas observadas están rellenas de clorita, pumpellita, clinozoisita y calcita.

Mineralogía detallada: Cuarzo, Plagioclasa, Matriz cuarzo-albítica, Sericita, Epidoto, Clinozoisita, Pumpellita, Calcita, Estilpnomelana, Pirita y Leucoxeno.

○ **Metamorfismo**

Para esta subunidad, las asociaciones metamórficas típicas son las siguientes:

- Metaboba cristalina: Albita - Cuarzo - clorita ± sericita ± epidoto ± clinozoisita.
- Metatoba lítica y metabrecha: Albita - cuarzo - clorita ± sericita ± epidoto ± clinozoisita - actinolita.
- Metalava andesítica: Plagioclasa - cuarzo - clorita ± epidoto ± sericita ± clinozoisita.

En esta subunidad se observó la asociación: clorita - clinozoisita - actinolita- sericita, que corresponde a la facies de los esquistos verdes (zona de la clorita).

● **Subunidad de Metalava**

Esta subunidad aflora en la parte central-sur y oriental de la región en estudio y sus mejores afloramientos están en las Hoyas de los ríos Taguaza, Apa, Carapa, Casupo Grande, Paria, Taguay y San José. Esta dislocada por fallas transcurrentes dextrales y se acuña hacia el noroeste: La franja de afloramientos muestra una orientación Este-Oeste. Ocupa un área de 372 km², es decir que es la unidad con mayor extensión del área estudiada.

En la parte central y nororiental, la subunidad está en contacto de corrimiento estructuralmente por debajo del Grupo Villa de Cura y en su extrema nororiental está cubierta por sedimentos de la Formación Caucagua. Al Oeste y Suroeste particularmente en las Hoyas de los ríos Apa y Carapa, la subunidad está en contacto de corrimiento con el Grupo Villa de Cura, la subunidad de Metatoba de la Formación Las Hermanas y el Complejo Apa. Hacia el Sur y Sureste el contacto también es de corrimiento por encima de unidades sedimentarias: Calizas de las Colonias, Flysch de Guatopo y la Formación Río Aragua.

La subunidad está caracterizada por la presencia de metalava, metatoba y metabrecha con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol, siendo la metalava el tipo litológico dominante.

- **Litología**

Metatoba: son de color verde oscuro a claro, meteorizando a pardo rojizo y pardo verdoso. En el río Casupo Grande así como en sus afluentes, el tamaño de los granos es muy variable observándose desde cenizas hasta bloques, por lo que algunas se clasificaron como metabrecha piroclástica. En la sección media del río Paria, predomina la metatoba con piroclastos en disposición caótica dentro de una matriz verde amarillenta.

Dichos piroclastos presentan tamaños desde cenizas hasta lapilli. Son de aspecto masivo y en general se encuentran intercaladas con los demás tipos litológicos.

Al microscopio, la mayoría de los fragmentos de rocas son de tamaño lapilli y están constituidos por metalava y escasamente por metatoba de ceniza, alcanzando hasta 3 cm de diámetro. Están caracterizados por tener fenocristales de piroxenos de hasta 4 mm, anfíbol y plagioclasa, así como también amígdalas. Los cristales de plagioclasa están muy alterados a clorita y sericita y los microlitos presentes en la matriz definen algunas veces textura afieltrada o traquítica. El piroxeno está en su mayoría muy fracturado y ocasionalmente se observa uralitización a actinolita en los bordes de los cristales. Las amígdalas de estos fragmentos de metalava están alargadas y alcanzan un diámetro máximo de 4 mm. Se encuentran rellenas de calcita, clorita, cuarzo en los bordes y escasamente prehnita.

Los fenocristales de la metatoba están constituidos por plagioclasa y actinolita con hábito fibroso a acicular. Dentro de la matriz de la metatoba es frecuente encontrar numerosas agujas de actinolita, epidoto, plagioclasa, calcita, clinozoisita y esfena alterada a leucoxeno. Las vetas están rellenas de epidoto.

Mineralogía detallada: Plagioclasa, Matriz de cristales asociados, Clorita, Epidoto, Clinozoisita, Actinolita, Hornblenda, Anfíbol verde azul, Clinopiroxeno, Calcita, Pirita y Prehnita.

Metalava: presenta color variable entre verde claro, verde oscuro y gris claro azulado a oscuro. En el río Casupo Grande son visibles las estructuras volcánicas, principalmente texturas residuales porfirítica y vesicular y en menor proporción traquítica, afieltrada e interpenetrativa. Son visibles los cristales de piroxeno y plagioclasa que alcanzan, hasta 2,5 cm de diámetro. En el río Taguay la metalava de tonalidad oscura son de afinidad basáltica y está atravesada por vetillas de epidoto; la de tipo andesítico está atravesada por vetillas oscuras que podrían representar trenes de trituración.

En general es de carácter masivo y se encuentra intercalada con metatoba aunque no se visualizó claramente el contacto entre ambos tipos litológicos.

Al microscopio los cristales de la metalava están constituidos por anfíbol, clinopiroxeno y plagioclasa. Por lo general las muestras presentan anfíbol y plagioclasa o piroxeno y plagioclasa.

La matriz está constituida por material no identificable debido al grado de alteración. Sin embargo, se observan microlitos de plagioclasa definiendo una textura afieltrada o traquítica, además de clorita, actinolita acicular, calcita en forma de parches, prehnita y esfena alterada a leucoxeno. Ocasionalmente hay amígdalas rellenas de calcita, clorita, epidoto, clinozoisita, pumpellita y prehnita. Hacia el norte de la unidad se puede observar deformación de las amígdalas produciendo su alargamiento, así como también minerales orientados, seguramente debido a las fallas del contacto con el Grupo Villa de Cura. Las vetas encontradas están rellenas de calcita, clorita, epidoto, prehnita, cuarzo y leucoxeno.

Mineralogía detallada: Plagioclasa, Clinopiroxeno, Hornblenda, Clorita, Calcita, Cuarzo, Actinolita, Prehnita, Matriz cuarzo-albitica, Epidoto, Clinozoisita y esfena.

- **Metamorfismo**

Para esta unidad, las asociaciones mineralógicas metamórficas típicas son las siguientes:

- Metalava Basáltica:

- a) Albita ± clorita ± epidoto ± actinolita ± pumpellita ± sericita ± cuarzo.
- b) Albita ± clorita ± epidoto ± clinozoisita ± actinolita ± actinolita verde azulada.
- c) Albita - clorita ± clinozoisita ± actinolita ± cuarzo ± epidoto.

- Metalava andesítica:

- a) Albita ± clorita ± prehnita.
- b) Albita ± clorita ± pumpellita ± epidoto.
- c) Albita ± clorita ± actinolita verde azulada ± actinolita ± clinozoisita.
- d) Albita ± clorita ± epidoto ± cuarzo ± sericita ± actinolita ± clinozoisita.

- Metatoba cristalina:

- a) Albita ± prehnita ± clorita.
- b) Albita ± clorita ± pumpellita ± actinolita.
- c) Albita ± clorita ± epidoto ± actinolita ± clinozoisita ± actinolita verde azulada.
- d) Albita - clorita ± actinolita ± clinozoisita ± epidoto.

- Metatoba lítica y metabrecha:

- a) Albita ± clorita ± prehnita.
- b) Albita ± pumpellita ± clorita.
- c) Albita ± clorita ± actinolita ± actinolita verde azulada ± clinozoisita.
- d) Albita - clorita ± actinolita ± clinozoisita ± epidoto.

En sentido Sureste a Noreste son varias las asociaciones que dentro de esa unidad indican carácter progresivo del metamorfismo regional en los diferentes tipos litológicos. Estas asociaciones son:

- Muy bajo grado (facies de la prehnita-pumpellita y pumpellita-actinolita)

- a) Clorita - prehnita - pumpellita.
- b) Clorita - actinolita - pumpellita.

- Bajo grado (facies de los esquistos verdes, zona de la clorita)
 - a) Clorita - actinolita verde azulada - actinolita - clinzoisita - pumpellita.
 - b) Clorita - clinzoisita -actinolita -sericita.

5.4.3 Propiedades Índices

Tabla 5.10 Resultados de las Propiedades Índices

Especímenes 790, 791, 813, 814, 816, 817, 818

  RIF: G-20000062-7		LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Ensayo de Absorción, Porosidad, PU (Húmedo y Seco)			 RIF: J-29574492-7		
SISTEMA TUY IV PRESA SOBRE EL RIÓ CUIRA							
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 1 de 1			
	M. CASTILLEJO		07/05/2014				
NORMAS UTILIZADAS	ISRM	Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption (1979)					
	ASTM						
DATOS GENERALES							
Proyecto	SISTEMA TUY IV PRESA SOBRE EL RIÓ CUIRA						
Origen del Espécimen	Suministrado por el cliente		Formación Geológica	Grupo Villa de Cura			
Clasificación	Metavolcánicas		Profundidad	Ver Tabla			
RESULTADOS							
Número de Muestra	Perforación	Muestra	Profundidad (m)	Absorción (%)	Porosidad (%)	P.U. Húmedo γ_w (g/cm ³)	P.U. Seco γ_d (g/cm ³)
790	P07 EXP	9 –Estribo Derecho	38 - 39	0.23	0.65	2.81	2.80
791	P08 EXP	10 – Estribo Derecho	22 - 23	0.93	2.57	2.78	2.75
813	P55	Estribo Derecho	22.40 - 22.75	0.17	0.51	2.91	2.91
814	Muestra de Mano	Bloque estribo Derecho N20E, 70S	Superficie	0.65	1.77	2.74	2.72
816	Muestra de Mano	Bloque Estribo Izquierdo N55W,40N	Superficie	0.34	0.86	2.56	2.55
817	Muestra de Mano	Bloque Estribo Derecho N20E,90	Superficie	0.33	0.93	2.81	2.80
818	Muestra de Mano	Bloque Estribo Izquierdo N90E,45S	Superficie	0.42	1.19	2.82	2.81

5.4.4 Estudios Petrográficos

Especímenes 790, 791, 813, 814, 817, 823, 824, 816, 818, 819, 820, 821, 825, 826, 827

**Tabla 5.11 Resultados petrográficos
estribo derecho - Río Cuira**

Muestra	Roca	
	Minerales	Nombre
790	Plagioclasa, epidoto, calcita, biotita, clorita, serpentina	Metatoba
791	Plagioclasa, epidoto, calcita, biotita, clorita y serpentina	Metatoba
813	clorita, epidoto, plagioclasa y piroxenos	Metatoba basáltica
814	clorita, fragmentos líticos de lava, epidoto y calcita	Metatoba basáltica
817	Ortopiroxeno, plagioclasas calcicas	Metagabro
823	labradorita, epidoto, augita y crisotilo	Metandesita porfídica
824	Epidoto, feldespatos, sericita y carbonatos	Metatoba

**Tabla 5.12 Resultados petrográficos
estribo izquierdo - Río Cuira**

Muestra	Roca	
	Minerales	Nombre
816	Carbonatos, cuarzo, calcita, clorita y serpentina	Metatoba
818	plagioclasas, piroxenos, epidoto y calcita	Metalava andesítica
819	Plagioclasas, calcita, epidoto, augita y crisotilo	Metatoba basáltica
820	Plagioclasa, epidoto y labradorita	Metandesita porfídica
821	Feldespatos, epidoto, apatito, cuarzo y calcita	Metandesita porfídica
825	Feldespatos, epidoto, apatito, cuarzo y calcita	Metandesita porfídica
826	Plagioclasas, sericita, epidoto y calcita	Metatoba
827	plagioclasa, sericita y epidoto	Metandesita porfídica

Mediante los estudios petrográficos se obtuvieron los parámetros básicos para definir la litología del área de estudio, como lo son la mineralogía (minerales predominantes y minerales accesorios), textura y estructura, tratándose de rocas metaígneas como metatobas, metalavas, metandesitas y metagabro, donde se observan minerales característicos de metamorfismo como la serpentina, el crisotilo, la prehnita y la actinolita, caracterizándolas dentro de las facies metamórficas de prehnita-pumpellita y esquistos verdes, asociándolas a un metamorfismo de bajo grado (baja temperatura, baja presión y baja profundidad), coincidiendo con el tipo de roca encontrado en la bibliografía preexistente y en el léxico estratigráfico, citado anteriormente en la geología regional.

Como muestran los ensayos de propiedades índices, se obtuvo una densidad promedio de 2.7 ton/m³ y un tipo de roca poco permeable, debido a que los valores de porosidad y

absorción son muy bajos, no sobrepasando el 1 %. Esto indica que el macizo no tendrá problemas de estabilidad por efectos del agua, lo cual puede verse reflejado en el Trabajo Especial de Grado de (Diaz & Ochoa, 2009), donde obtuvieron bajos niveles de permeabilidad aun cuando la roca presentaba bajos niveles de RQD. Esto puede explicarse, ya que las discontinuidades están perfectamente acopladas unas con las otras, es decir la separación entre las caras de la discontinuidad es ninguno.

5.4.5 Ensayos de Corte

Los ensayos de Corte para este caso pueden ser divididos en dos tipos:

- Ensayos de Resistencia al Corte sobre caras lisas (Figura 5.40)
- Ensayos de Resistencia al Corte sobre superficies rugosas

Con esto se quería verificar la influencia de la rugosidad en los parámetros de corte. Adicionalmente se dividieron también en estribo derecho y estribo izquierdo, por las diferencias de roca presente como se ha reportado en las petrografías, causado por una falla presente.

Con la finalidad de ilustrar como se prepararon estos especímenes, se mostraran la muestra original y la muestra cortada y lisa.

Todos los ensayos se realizaron con las superficies secas (sin agua).





Figura 5.40 Muestras sobre las cuales se elaboraron superficies lisas - Río Cuira

5.4.5.1 Ensayos de Resistencia al Corte sobre caras lisas

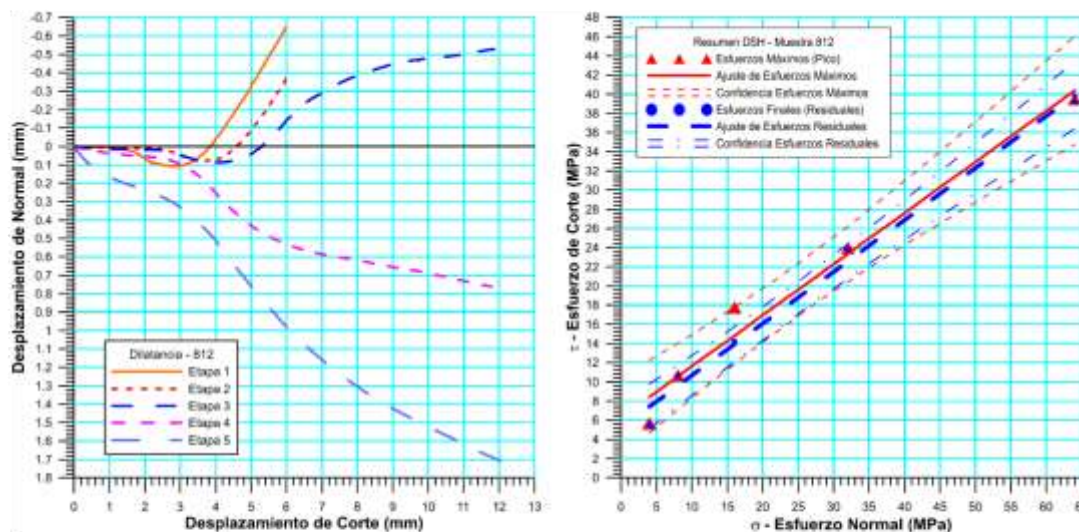
5.4.5.1.1 Estribo Derecho

Espécimen 812

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 8
	M. CASTILLEJO		06/06/2015	Espécimen: 812

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.15175	3.76516	3.99928	3.35700
2	4.22378	3.87632	2.74784	3.14498
3	16.00716	17.74391	15.99576	14.21575
4	32.00798	23.95566	31.98783	23.75878
5	64.01318	39.51834	64.00881	39.18893



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.62607 * s + 5.11$	$t = 0.61446 * s + 4.33$
Cohesión (c) (MPa)	5.11	4.33
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	32.05	31.57
Número de puntos	5	5
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.0087	14.9954
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	14.5089	13.5440
Suma de los residuos cuadrados	12.3594	3.5870
Regresión Suma de los residuos cuadrados	180.2895	173.5456
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9358	0.9797

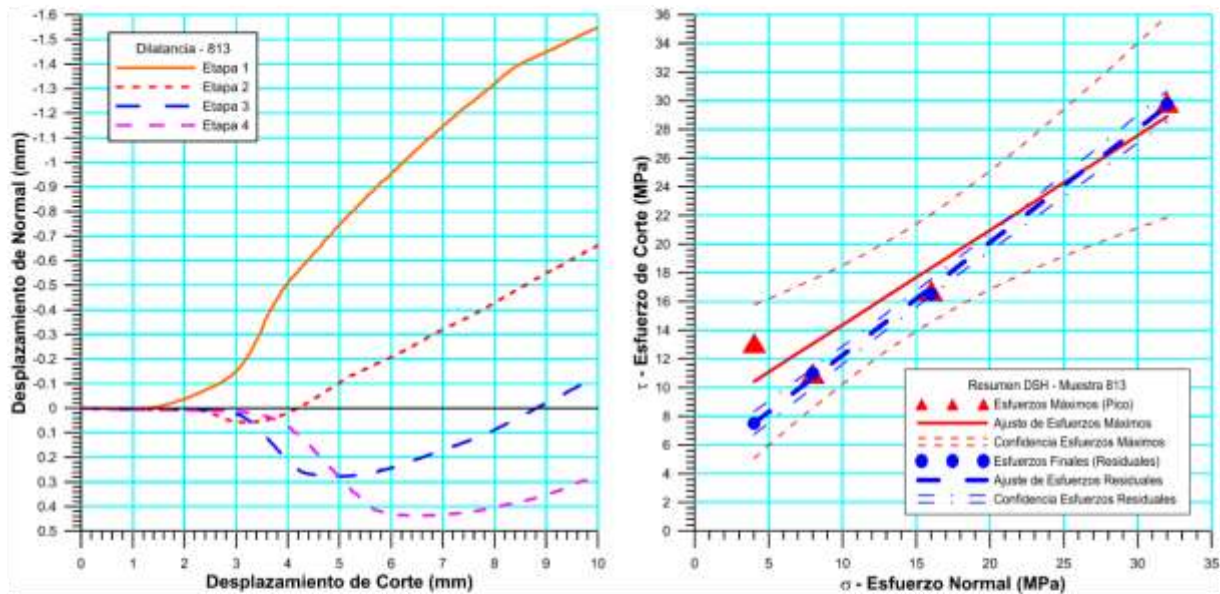
Figura 5.41 Espécimen 812_DSH-CNL - Río Cuirá

Espécimen 813

 <p>RIF: G-20000062-7</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  <p>RIF: J-29574492-7</p>
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	08/2016	06/06/2014	Espécimen: 813

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.02401	13.11263	4.00190	7.49757
2	7.99599	10.99399	7.99599	10.98908
3	16.00813	16.74896	15.99270	16.52365
4	32.00625	29.87009	32.00367	29.76265



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.65976 * s + 7.78$	$t = 0.78923 * s + 4.36$
Cohesión (c) (MPa)	7.78	4.36
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	33.42	38.28
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.0086	14.9986
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	17.6814	16.1932
Suma de los residuos cuadrados	14.9041	0.3326
Regresión Suma de los residuos cuadrados	200.1246	286.6034
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9307	0.9988

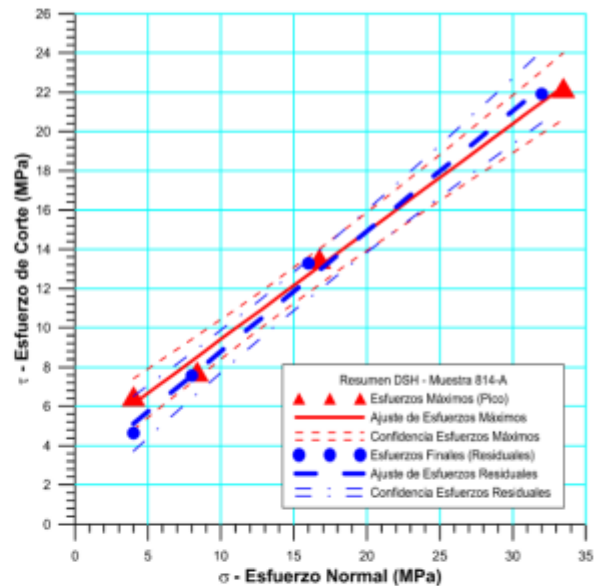
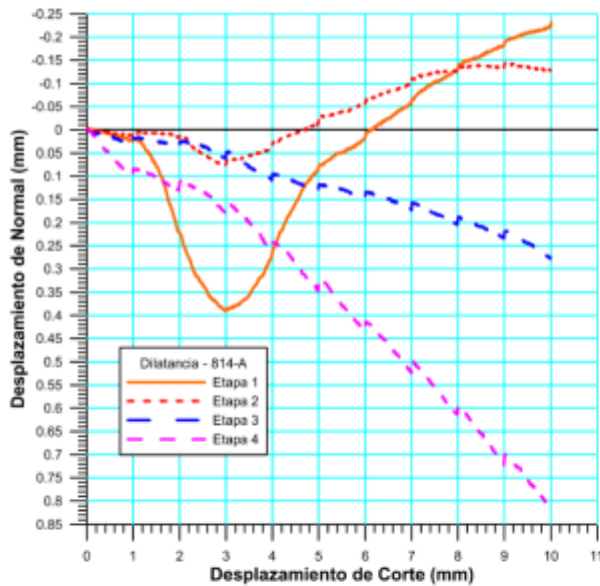
Figura 5.42 Espécimen 813_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 814-A

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	08/2016	06/06/2014	Espécimen: 814-A

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.00715	6.52116	3.99928	4.64538
2	8.36911	7.78089	7.99906	7.57470
3	16.73821	13.51748	15.99859	13.28003
4	33.47643	22.22956	32.00071	21.91736



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.54877 * s + 3.93$	$t = 0.61247 * s + 2.67$
Cohesión (c) (MPa)	3.93	2.67
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	28.76	31.49
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.6477	14.9994
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	12.5123	11.8544
Suma de los residuos cuadrados	0.8707	1.0071
Regresión Suma de los residuos cuadrados	152.8448	172.5743
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9943	0.9942

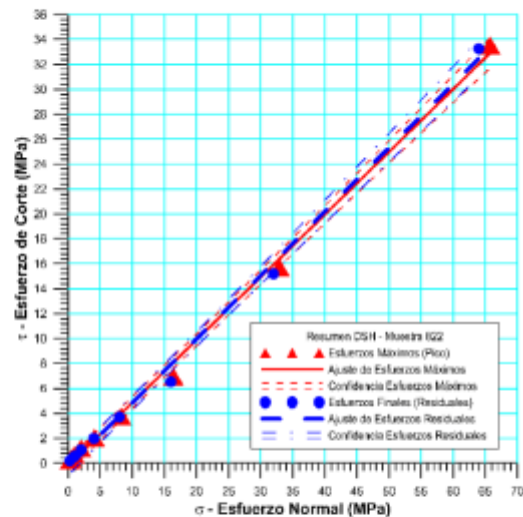
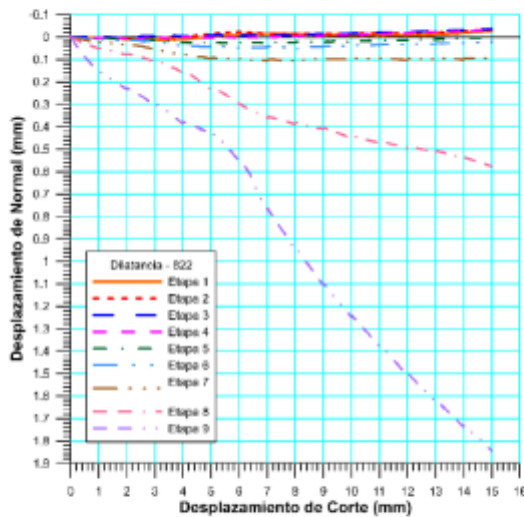
Figura 5.43 Espécimen 814-1_DSH-CNL - Río Cuirá

Espécimen 822

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV 
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 11 de 12
	M. CASTILLEJO	9/14,08/16	16/07/2014	Espécimen: 822

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.51440	0.38819	0.50193	0.34001
2	1.02691	0.67145	1.00360	0.55180
3	2.00395	1.20686	1.99842	1.06270
4	4.07857	2.05525	4.00532	1.98959
5	8.26176	3.75773	7.97856	3.70158
6	16.38526	6.95506	16.00638	6.52865
7	32.90079	15.71944	32.00098	15.19391
8	65.75194	33.51489	64.00007	33.25778
9	0.51440	0.38819	0.50193	0.34001



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(26.70) * s + 0.00$	$t = \tan[27.11] * s + 0.00$
Cohesión (c) (MPa)	0.00	0.00
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	26.70	27.11
Número de puntos	9	9
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	14.58	14.19
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	7.16	6.98
Suma de los residuos cuadrados	2.53	3.86
Regresión Suma de los residuos cuadrados	974.62	956.40
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

Figura 5.44 Espécimen 822_DSH-CNL - Río Cuira

5.4.5.1.2 Conclusión de ensayos con caras lisas Estribo Derecho

Tabla 5.13 Resultados totales Estribo Derecho caras lisas (valores pico)

Ensayo	Cohesión (MPa)	ϕ (°)
810	0.70	19.43
812	0.51	21.14
813	0.35	23.47
814-1	0.30	23.57
822	0.00	26.70

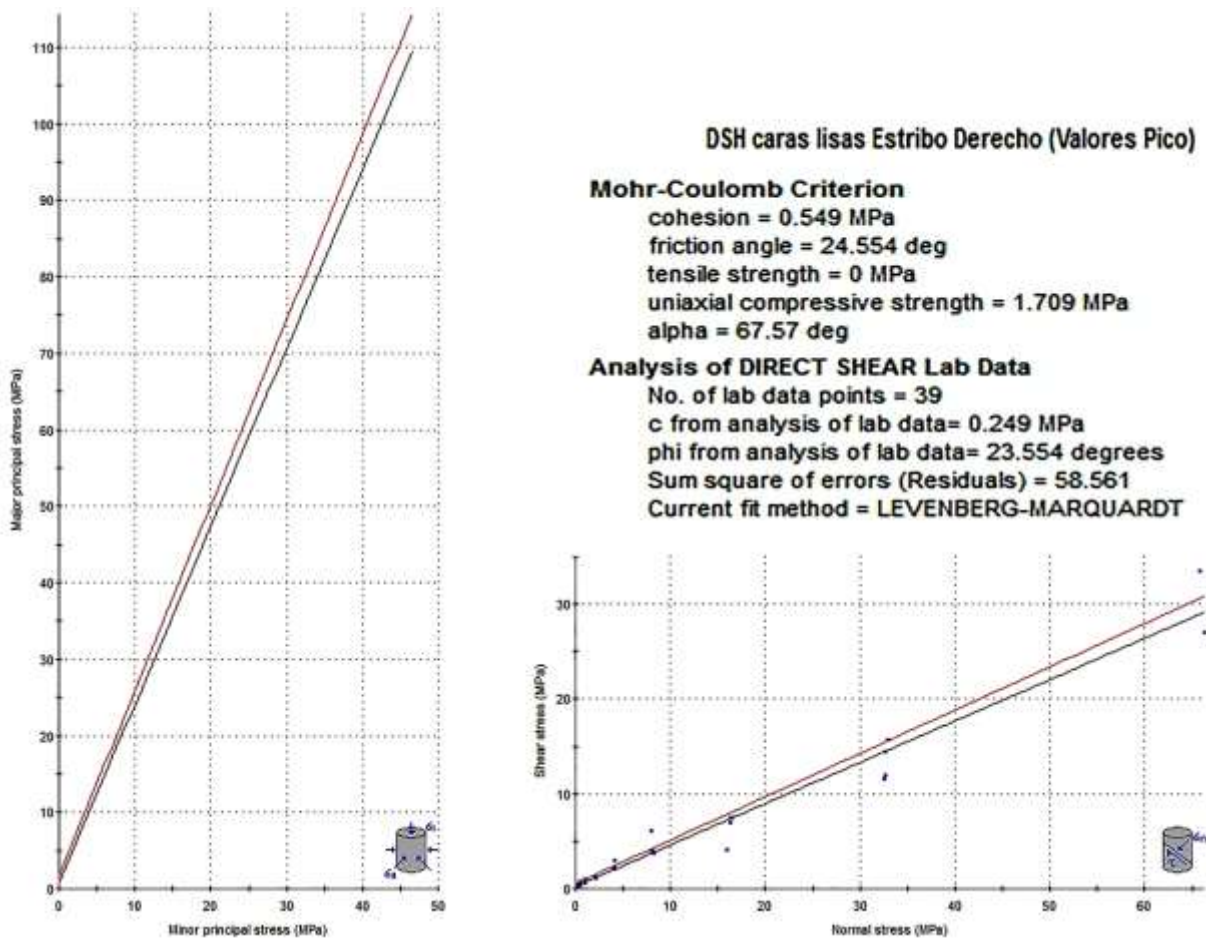


Figura 5.45 Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Derecho caras lisas (valores pico) - Río Cuira

Tabla 5.14 Resultados totales Estribo Derecho caras lisas (valores residuales)

Ensayo	Cohesión (MPa)	ϕ (°)
810	0.40	15.08
812	0.30	19.50
813	0.19	24.53
814-1	0.25	23.86
822	0.00	27.11

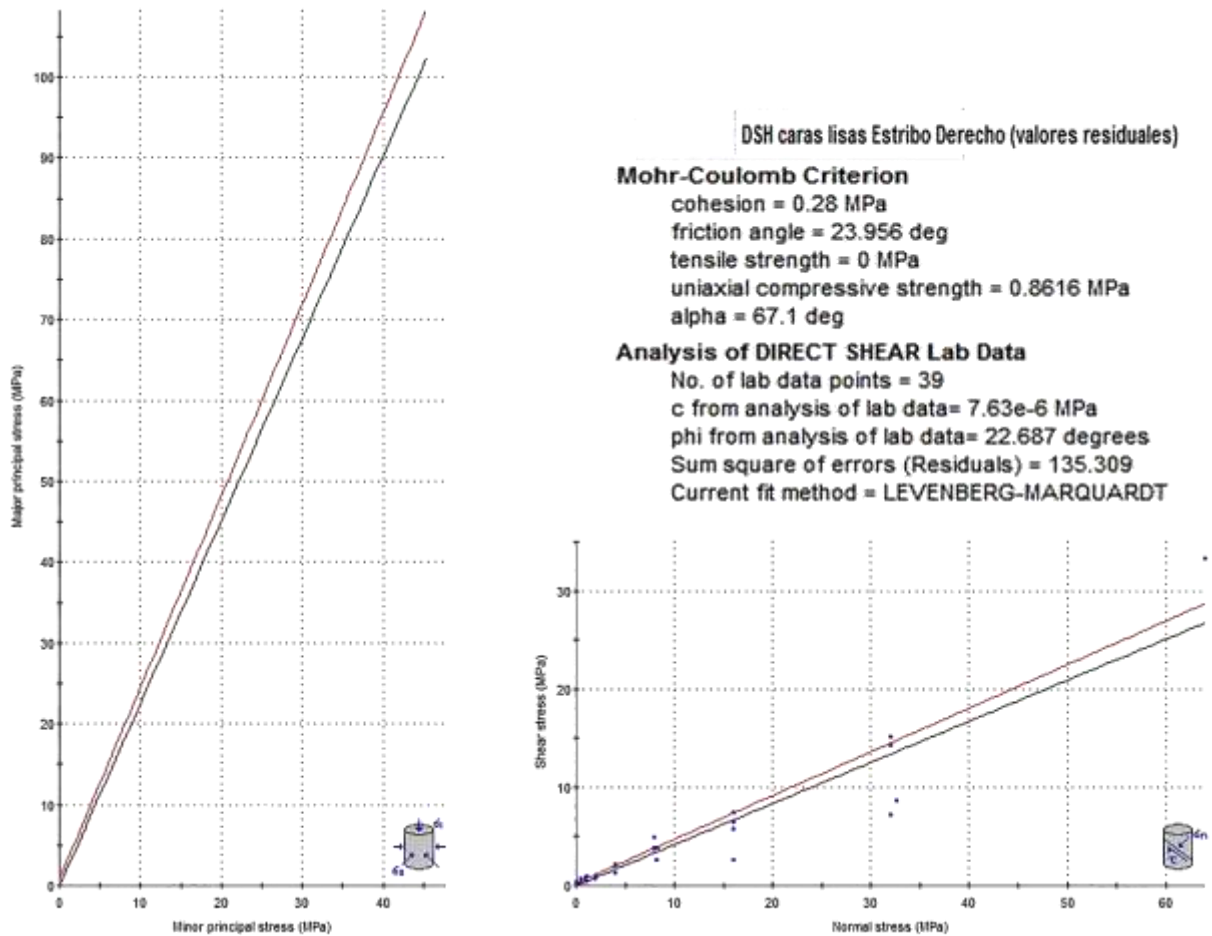




Figura 5.46 Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Derecho caras lisas (valores residuales) - Río Cuirá

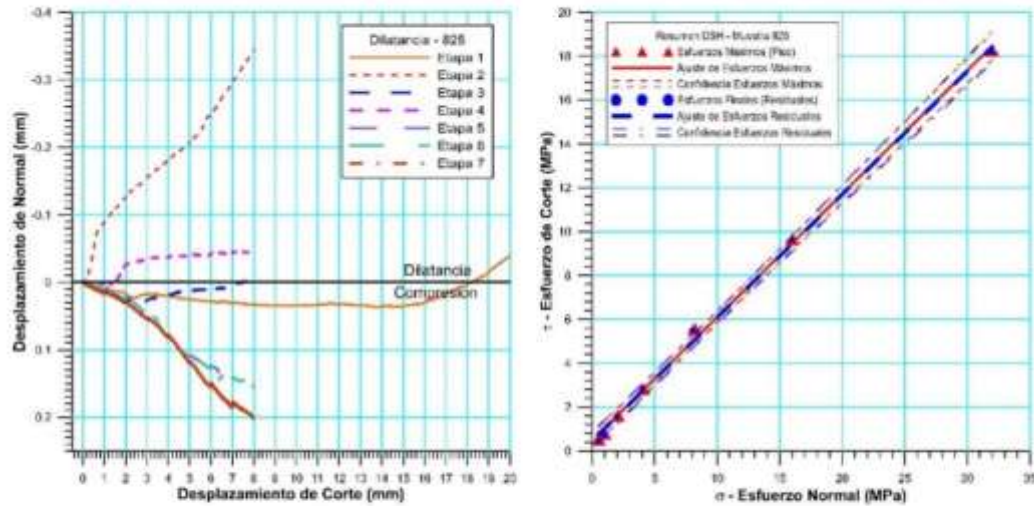
5.4.5.1.3 Estribo Izquierdo

Espécimen 825

 RIF: J-40242570-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 9 de 9
	M. CASTILLEJO		16/07/2014	Espécimen: 825

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.52128	0.53577	0.51086	0.46793
2	1.00067	0.79858	1.00124	0.71858
3	2.05122	1.61393	1.99756	1.57415
4	4.08279	2.82372	4.03189	2.81416
5	8.19406	5.57779	7.99720	5.50076
6	16.00240	9.64597	15.99973	9.64437
7	32.00044	18.26108	31.99963	18.19817



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(29.34) * s + 0.48$	$t = \tan(29.31) * s + 0.46$
Cohesión (c) (MPa)	0.48	0.46
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	29.34	29.31
Número de puntos	7	7
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	9.12	9.08
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.61	5.56
Suma de los residuos cuadrados	0.43	0.57
Regresión Suma de los residuos cuadrados	248.54	248.63
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

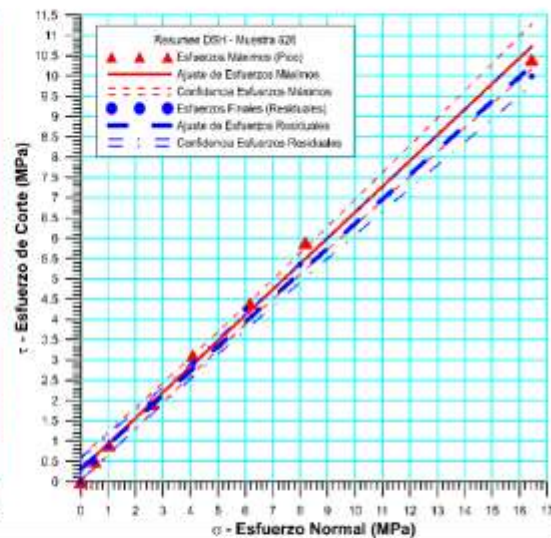
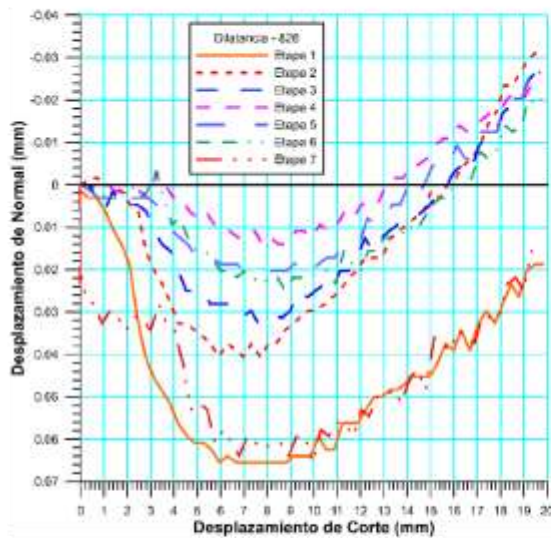
Figura 5.47 Espécimen 825_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 826

 RIF: J-40242570-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 9 de 10
	M. CASTILLEJO	9/14; 8/16	11/07/2014	Espécimen: 826

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.58202	1.91535	2.52175	1.90486
2	0.51602	0.49768	0.49920	0.47594
3	1.03281	0.89847	0.99525	0.86839
4	1.03281	0.89847	0.99525	0.86839
5	6.17698	4.39988	6.00290	4.25338
6	8.19370	5.89426	7.99666	5.35653
7	16.43732	10.40454	16.44045	9.99215



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.62508 * s + 0.39$	$t = 0.59562 * s + 0.40$
Cohesión (c) (MPa)	0.39	0.40
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	32.01	30.78
Número de puntos	7	7
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.5749	5.5116
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.8737	3.6823
Suma de los residuos cuadrados	0.3352	0.0265
Regresión Suma de los residuos cuadrados	71.3505	64.6516
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9953	0.9965

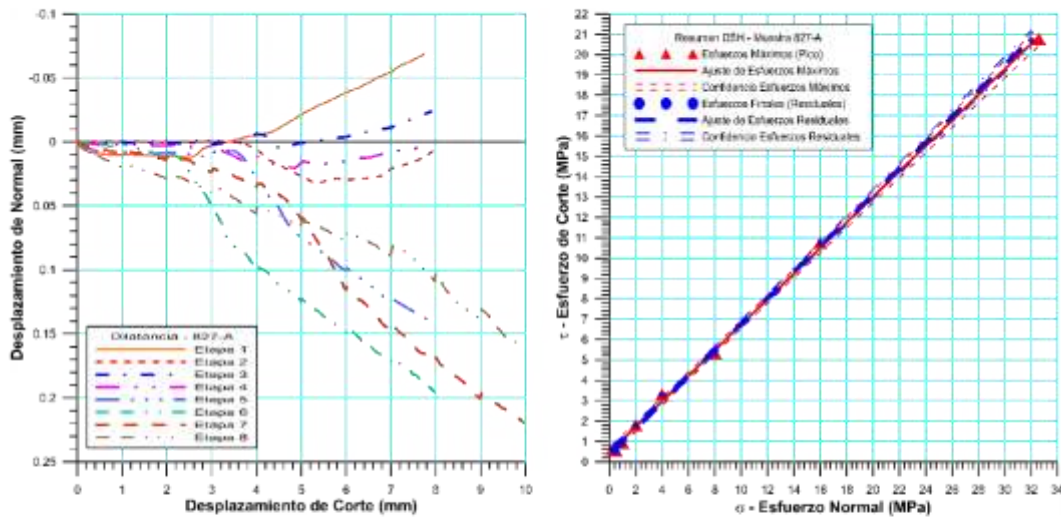
Figura 5.48 Espécimen 826_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 827-A

 RIF: J-40242570-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 10 de 11
	M. CASTILLEJO	9/14; 08/2016	24-06-2014	Espécimen: 827-A

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.25004	0.60385	0.24854	0.58515
2	0.50146	0.53160	0.50236	0.50735
3	1.00089	0.92430	1.00076	0.92100
4	2.00148	1.78714	2.00014	1.77764
5	3.99860	3.31025	3.99627	3.29641
6	8.00258	5.34847	8.00126	5.34450
7	16.00110	10.75661	16.00118	10.72044
8	32.59457	20.77123	32.00093	20.70654



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(32.10) * s + 0.46$	$t = \tan(32.47) * s + 0.41$
Cohesión (c) (MPa)	0.46	0.41
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	32.10	32.47
Número de puntos	8	8
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	8.04	7.97
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.50	5.48
Suma de los residuos cuadrados	0.31	0.24
Regresión Suma de los residuos cuadrados	348.73	347.04
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

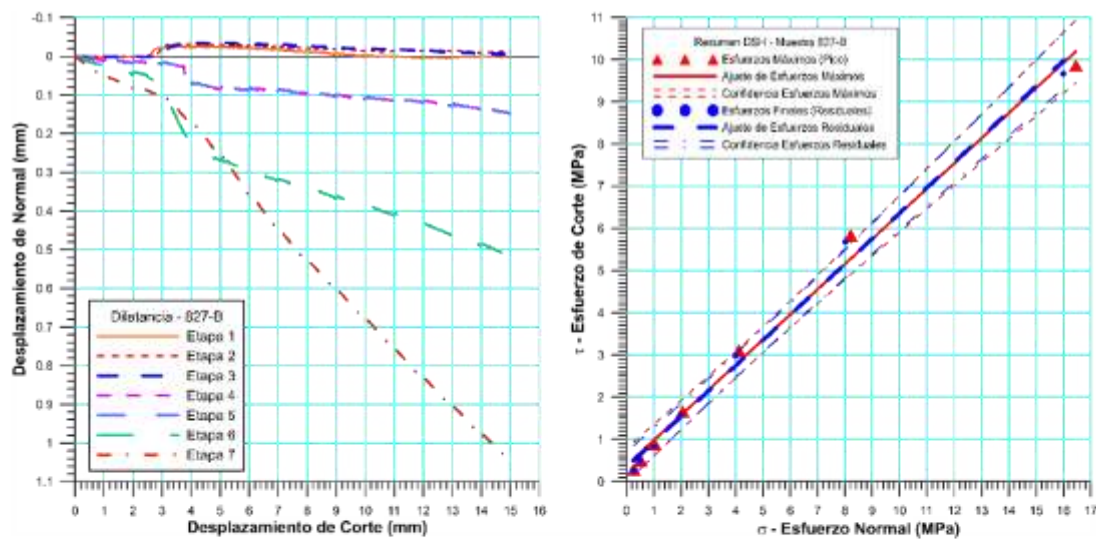
Figura 5.49 Espécimen 827-1_DSH-CNL - Río Cuirá

Espécimen 827-B

 9/14 RIF: J-40242570-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 9 de 10
	M. CASTILLEJO	9/14;08/2016	16-07-2014	Espécimen: 827-B

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26656	0.28693	0.25836	0.28200
2	0.51694	0.50212	0.50022	0.49432
3	1.02709	0.89653	1.00445	0.83425
4	2.05843	1.66103	2.00318	1.57740
5	4.12064	3.10842	3.99976	2.97547
6	8.20933	5.83925	8.01886	5.68160
7	16.45665	9.86191	15.99703	9.66967



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(30.83) * s + 0.38$	$t = \tan(31.06) * s + 0.34$
Cohesión (c) (MPa)	0.38	0.34
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	30.83	31.06
Número de puntos	7	7
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	4.67	4.54
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.16	3.07
Suma de los residuos cuadrados	0.62	0.49
Regresión Suma de los residuos cuadrados	74.28	71.53
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.99

Figura 5.50 Espécimen 827-2_DSH-CNL - Río Cuirá

5.4.5.1.4 Conclusión de ensayos con caras lisas Estribo Izquierdo

Tabla 5.15 Resultados totales Estribo Izquierdo caras lisas (valores pico)

Ensayo	Cohesión (MPa)	ϕ (°)
825	0.70	19.43
826	0.39	32.01
827-1	0.46	32.10
827-2	0.38	30.82

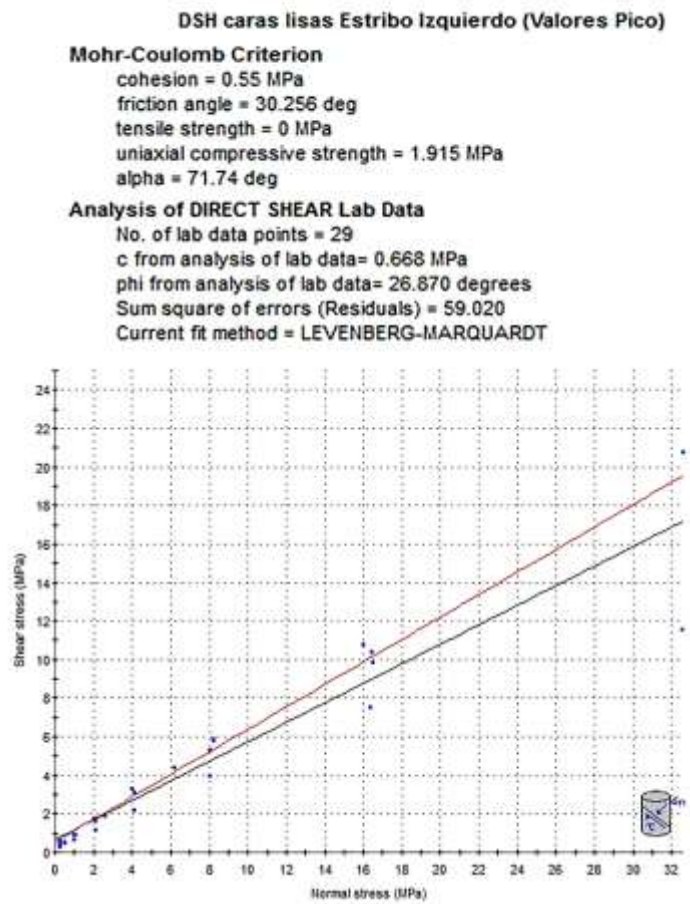
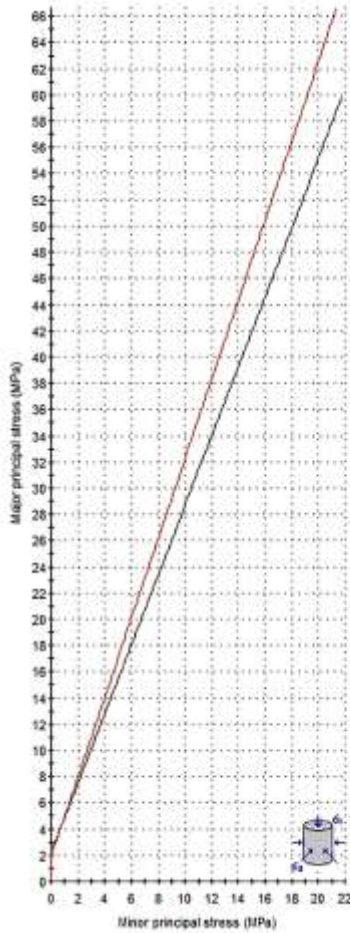


Figura 5.51 Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Izquierdo caras lisas (valores pico) - Río Cuira

Tabla 5.16 Resultados totales Estribo Izquierdo caras lisas (valores residuales)

Ensayo	Cohesión (MPa)	ϕ (°)
825	0.404	15.08
826	0.399	30.779
827-A	0.412	32.465
827-B	0.339	31.057

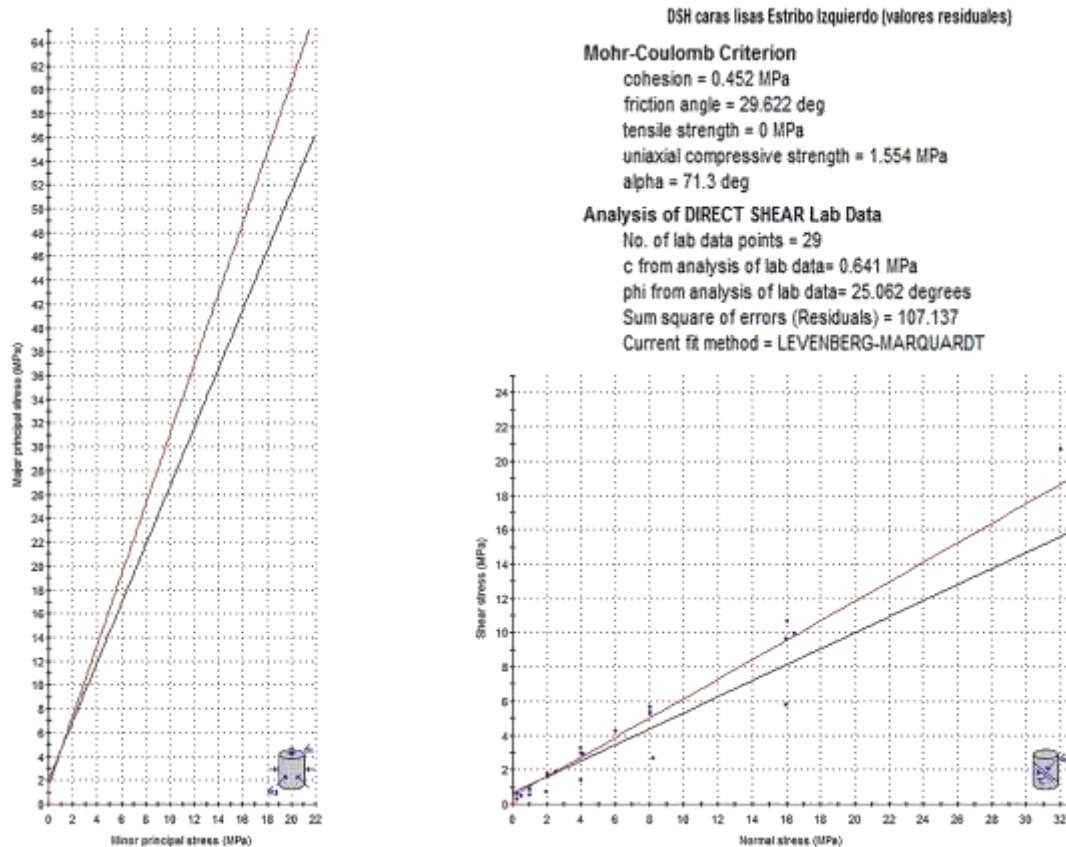


Figura 5.52 Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Izquierdo caras lisas (valores residuales) - Río Cuira

5.4.5.2 Conclusión de ensayos con caras lisas ambos Estribos

Tabla 5.17 Tabla resumen de la Resistencia al Corte sobre caras lisas en ambos estribos

ESTRIBO	Valores Pico				Valores Residuales			
	Mohr-Coulomb		Ajuste de datos de Lab.		Mohr-Coulomb		Ajuste de datos de Lab.	
	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (°)	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (°)	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (°)	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (°)
Derecho	0.549	24.554	0.668	26.870	0.280	23.956	0.249	23.554
Izquierdo	0.550	30.256	0.641	25.062	0.452	29.622	0.220	22.687
Promedio	0.550	27.405	0.655	25.966	0.366	26.789	0.235	23.121



Con los ensayos de corte directo con caras lisas realizados se comprobó la afectación de la rugosidad en las discontinuidades del macizo. Además, se logró definir la variación del ángulo de fricción con respecto a los ensayos de corte directo con caras lisas, que oscilan entre 25° en el estribo derecho y 30° en el estribo izquierdo, indicando que para ángulos mayores con valores de rugosidad muy bajos (por degradación de la roca por acción del agua o del aire), como algunos observados en los frentes de los taludes, las rocas estarán más propensas a deslizarse y caer. Por otro lado, se obtuvieron valores de cohesión bajos en un rango de 0.3 - 0.5 MPa. Esto sugiere que aunque los valores de rugosidad sean muy bajos, siempre se poseerá un valor de cohesión pequeño que favorecerá el aumento de la resistencia al corte, reflejando así, una roca muy rugosa inclusive luego de sufrir altos grados de meteorización, esta ayuda a mantener los bloques en las caras de los taludes en función de la inclinación de la discontinuidad que genere el deslizamiento.

Algo observado en los taludes después de periodo de inactividad en la obra y periodos de lluvia, el agua que percola por las discontinuidades de las rocas que están aflorando en las caras de los taludes, favorece a la generación de caídas de bloques. Hay que recordar que Díaz & Ochoa, (2009), determinaron que la permeabilidad de la zona es secundaria (a través de las diaclasas) y a profundidad debido al cerramiento existente entre las caras de la discontinuidad, esta es muy baja o nula.

5.4.5.3 Ensayos de Resistencia al Corte sobre caras rugosas

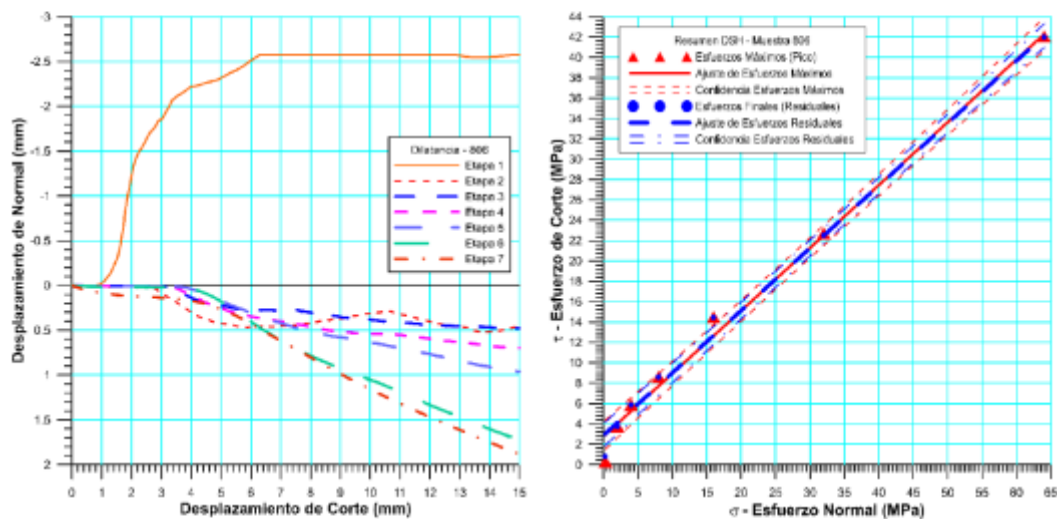
5.4.5.3.1 Estribo Derecho

Espécimen 806

 RIF: G-2000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	SISTEMA TUY IV PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 9 de 11
	M. CASTILLEJO	09/2016	22-08-2014	Espécimen: 806

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.29903	0.29903	0.23669	0.23669
2	2.02979	3.76099	1.99813	1.99813
3	4.01407	5.86835	4.00951	4.00951
4	8.01923	8.61551	7.99648	7.99648
5	16.00751	14.48344	15.99872	15.99872
6	32.01070	22.71906	32.00523	32.00523
7	64.01548	42.05398	63.99001	63.99001



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.60966 \cdot \sigma + 3.33$	$\tau = 0.61956 \cdot \sigma + 2.81$
Cohesión (c) (MPa)	3.33	2.81
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	31.37	31.78
Número de puntos	7	7
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	18.0565	18.0335
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	14.3428	13.9865
Suma de los residuos cuadrados	3.2453	9.0201
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1182.4185	1221.6803
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9973	0.9927

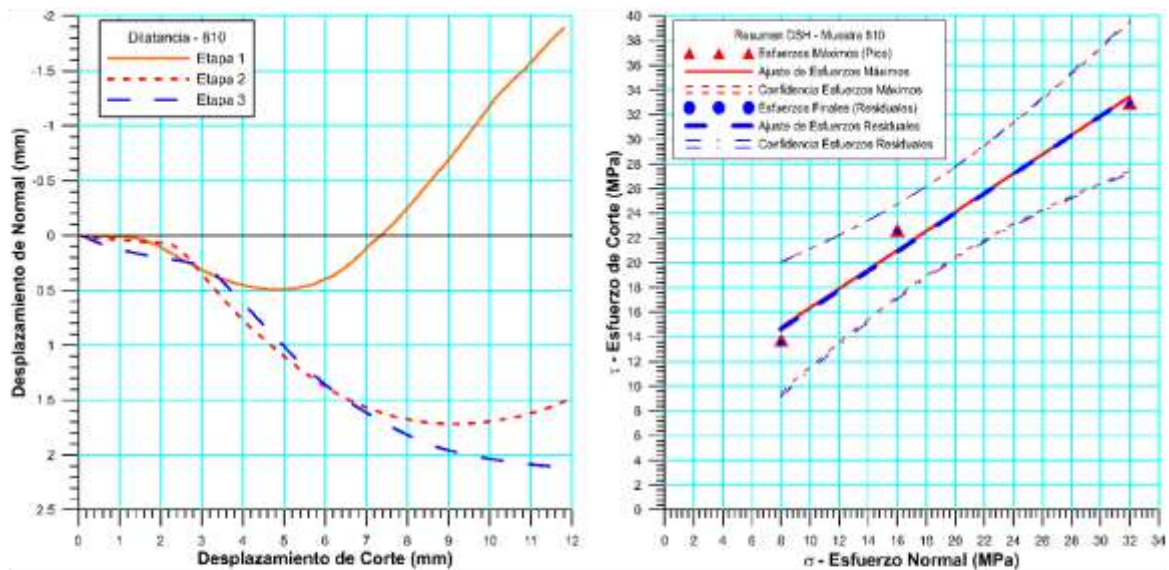
Figura 5.53 Espécimen 806_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 810

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO	08/2016	02/07/2014	Espécimen: 810

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	8.02	8.02	7.99	13.52
2	16.01	22.65	15.99	22.56
3	32.01	32.94	31.99	32.90



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(37.88^\circ) * s + 8.57$	$t = \tan(38.13^\circ) * s + 8.35$
Cohesión (c) (MPa)	8.57	8.35
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	37.88	38.13
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	18.6835	18.6580
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	23.1069	22.9945
Suma de los residuos cuadrados	4.0695	4.3022
Regresión Suma de los residuos cuadrados	180.6219	183.8675
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9780	0.9771

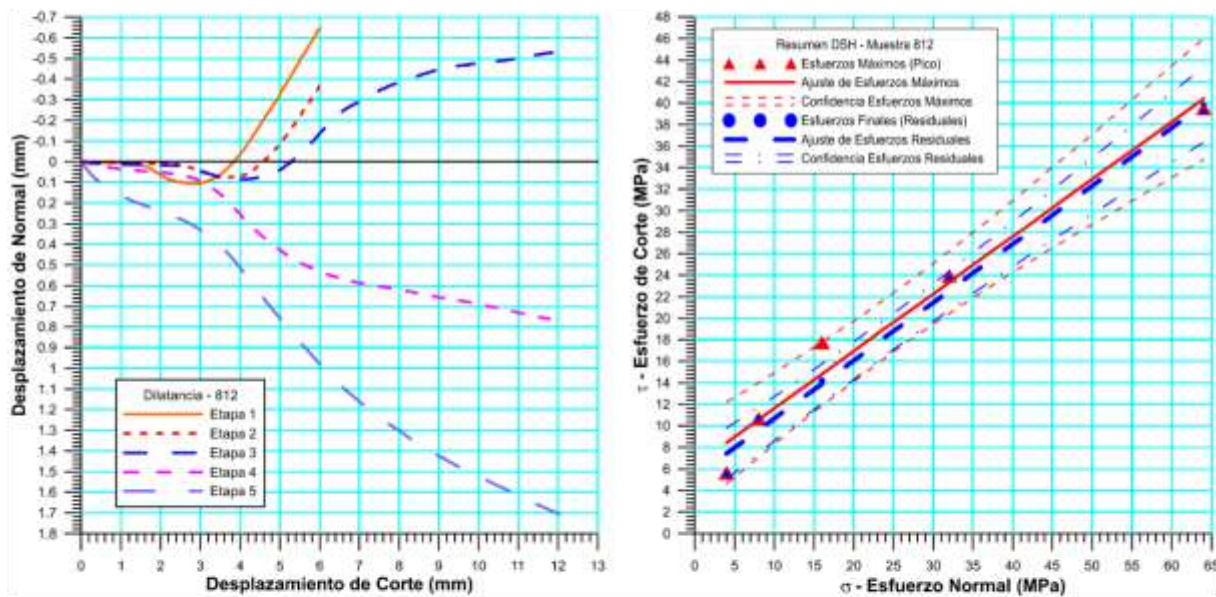
Figura 5.54 Espécimen 810_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 812

 RIF: G-2000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 8
	M. CASTILLEJO		06/06/2015	Espécimen: 812

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.15175	3.76516	3.99928	3.35700
2	4.22378	3.87632	2.74784	3.14498
3	16.00716	17.74391	15.99576	14.21575
4	32.00798	23.95566	31.98783	23.75878
5	64.01318	39.51834	64.00881	39.18893



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.62607 * s + 5.11$	$t = 0.61446 * s + 4.33$
Cohesión (c) (MPa)	5.11	4.33
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	32.05	31.57
Número de puntos	5	5
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.0087	14.9954
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	14.5089	13.5440
Suma de los residuos cuadrados	12.3594	3.5870
Regresión Suma de los residuos cuadrados	180.2895	173.5456
Coefficiente de Determinación (R ²)	0.9358	0.9797

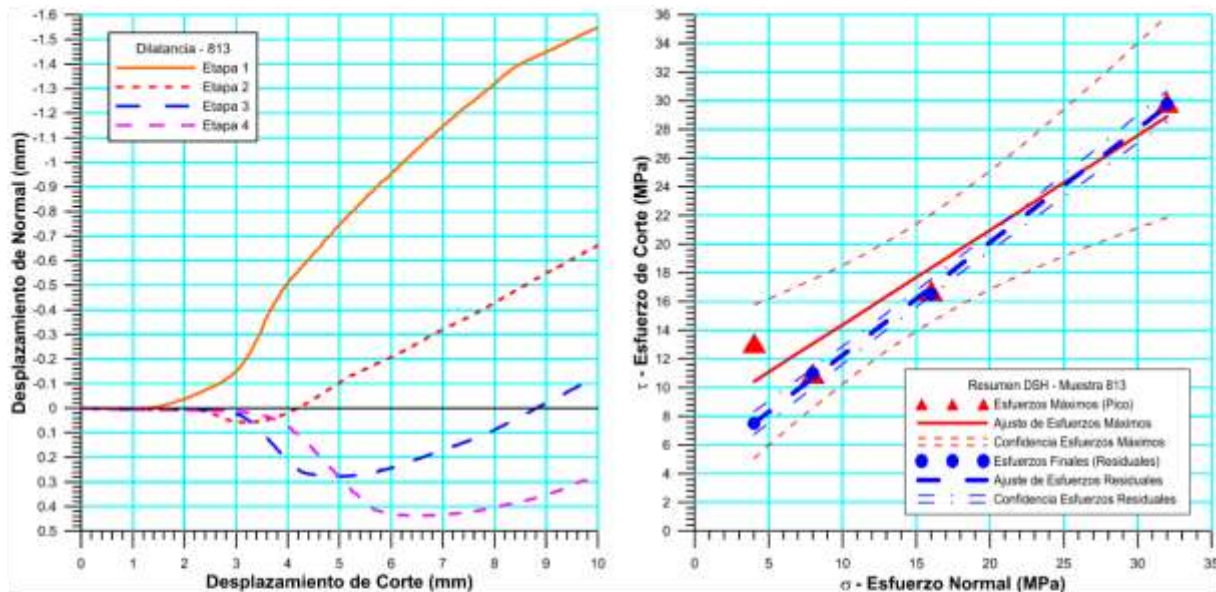
Figura 5.55 Espécimen 812_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 813

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	08/2016	06/06/2014	Espécimen: 813

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.02401	13.11263	4.00190	7.49757
2	7.99599	10.99399	7.99599	10.98908
3	16.00813	16.74896	15.99270	16.52365
4	32.00625	29.87009	32.00367	29.76265



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.65976 * s + 7.78$	$t = 0.78923 * s + 4.36$
Cohesión (c) (MPa)	7.78	4.36
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	33.42	38.28
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.0086	14.9986
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	17.6814	16.1932
Suma de los residuos cuadrados	14.9041	0.3326
Regresión Suma de los residuos cuadrados	200.1246	286.6034
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9307	0.9988

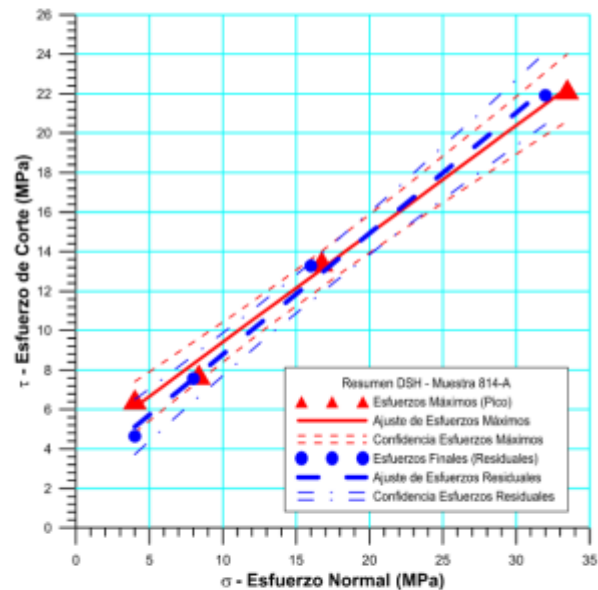
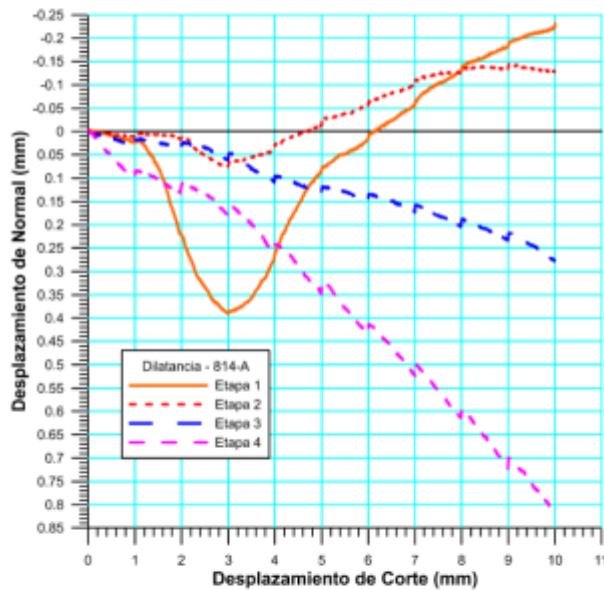
Figura 5.56 Espécimen 813_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 814-A

 <p>RIF: G-20000062-7</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 <p>RIF: J-29574492-7</p>
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	08/2016	06/06/2014	Espécimen: 814-A

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.00715	6.52116	3.99928	4.64538
2	8.36911	7.78089	7.99906	7.57470
3	16.73821	13.51748	15.99859	13.28003
4	33.47643	22.22956	32.00071	21.91736



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.54877 * s + 3.93$	$t = 0.61247 * s + 2.67$
Cohesión (c) (MPa)	3.93	2.67
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	28.76	31.49
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.6477	14.9994
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	12.5123	11.8544
Suma de los residuos cuadrados	0.8707	1.0071
Regresión Suma de los residuos cuadrados	152.8448	172.5743
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9943	0.9942

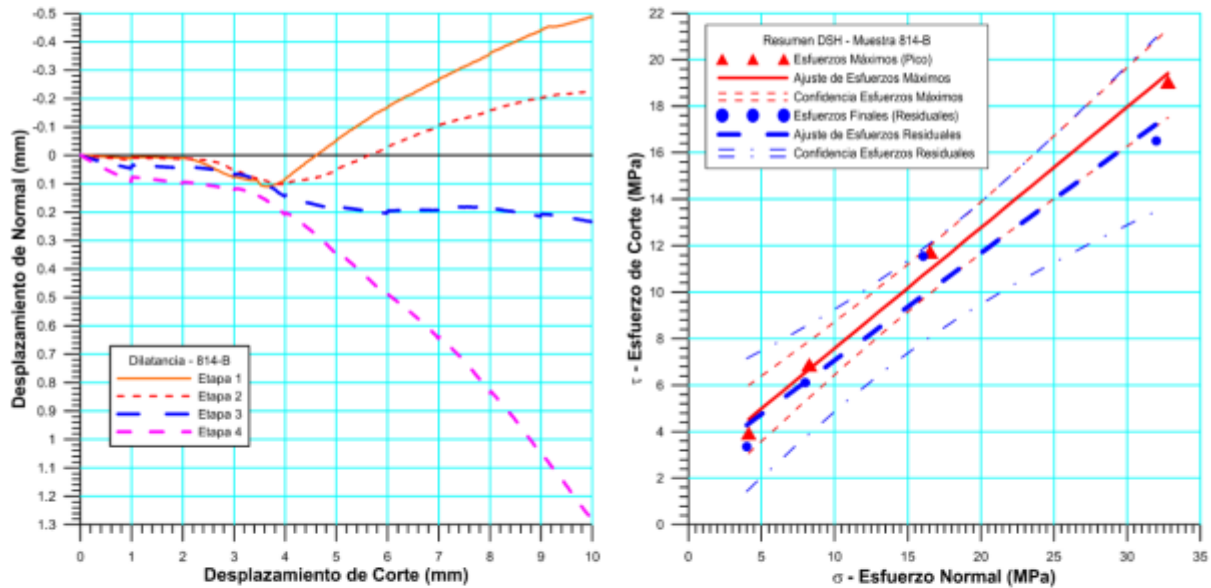
Figura 5.57 Espécimen 814-A_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 814-B

 RIF: G-2000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	06/06/2014	Espécimen: 814-B

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.12633	3.93500	3.99776	3.34890
2	8.27152	6.87369	8.00014	6.11179
3	16.53964	11.73937	16.07600	11.54927
4	32.79893	19.05279	31.99092	16.50793



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.51895 * s + 2.39$	$t = 0.46245 * s + 2.44$
Cohesión (c) (MPa)	2.39	2.44
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	27.43	24.82
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.4341	15.0162
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	10.4002	9.3795
Suma de los residuos cuadrados	1.1075	4.2169
Regresión Suma de los residuos cuadrados	129.7884	98.3517
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9915	0.9589

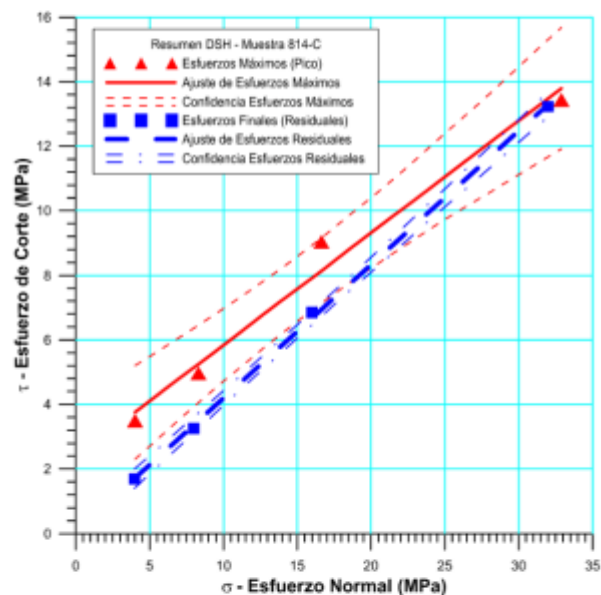
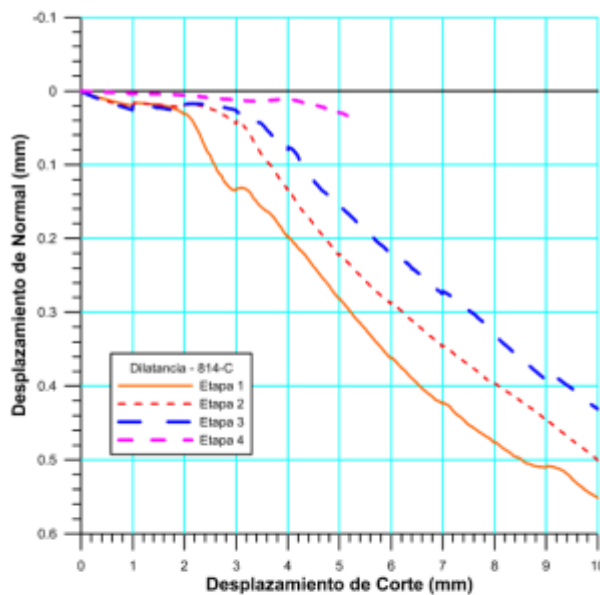
Figura 5.58 Espécimen 814-B_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 814-C

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO CARGA NORMAL CONSTANTE – CONSTANT NORMAL LOAD (CNL)			 RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	06/06/2015	Espécimen: 814-C

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.01400	3.49797	3.97226	1.68932
2	8.32041	4.96638	7.99918	3.25905
3	16.62806	9.03989	15.98597	6.84417
4	32.89173	13.44354	31.99420	13.23359



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.34748 * s + 2.36$	$t = 0.41377 * s + 0.05$
Cohesión (c) (MPa)	2.36	0.05
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	19.16	22.48
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.4636	14.9879
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	7.7369	6.2565
Suma de los residuos cuadrados	1.0801	0.0453
Regresión Suma de los residuos cuadrados	58.8277	78.8237
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9820	0.9994

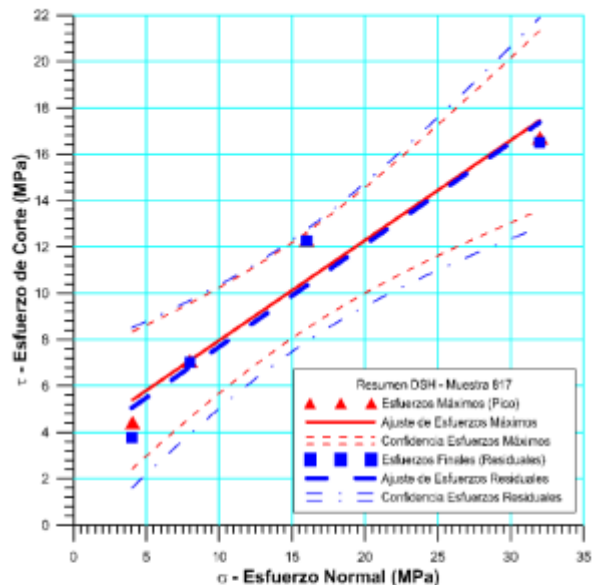
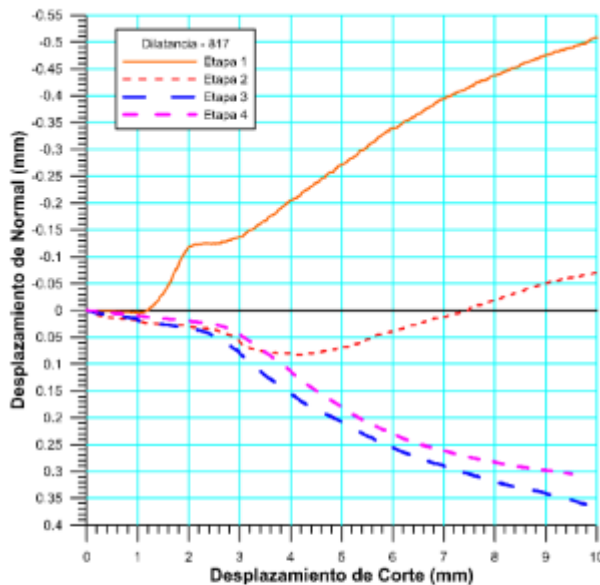
Figura 5.59 Espécimen 814-C_DSH-CNL - Río Cuirá

Espécimen 817

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	06/06/2015	Espécimen: 817

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.04913	4.41662	4.00587	3.76702
2	8.00354	7.07895	7.99633	7.01914
3	16.00622	12.29776	15.99798	12.26620
4	32.00260	16.72238	31.99093	16.51067



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.43180 * s + 3.65$	$t = 0.44013 * s + 3.29$
Cohesión (c) (MPa)	3.65	3.29
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	23.35	23.76
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.0154	14.9978
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	10.1289	9.8908
Suma de los residuos cuadrados	4.5362	6.1810
Regresión Suma de los residuos cuadrados	85.5740	89.0313
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9497	0.9351

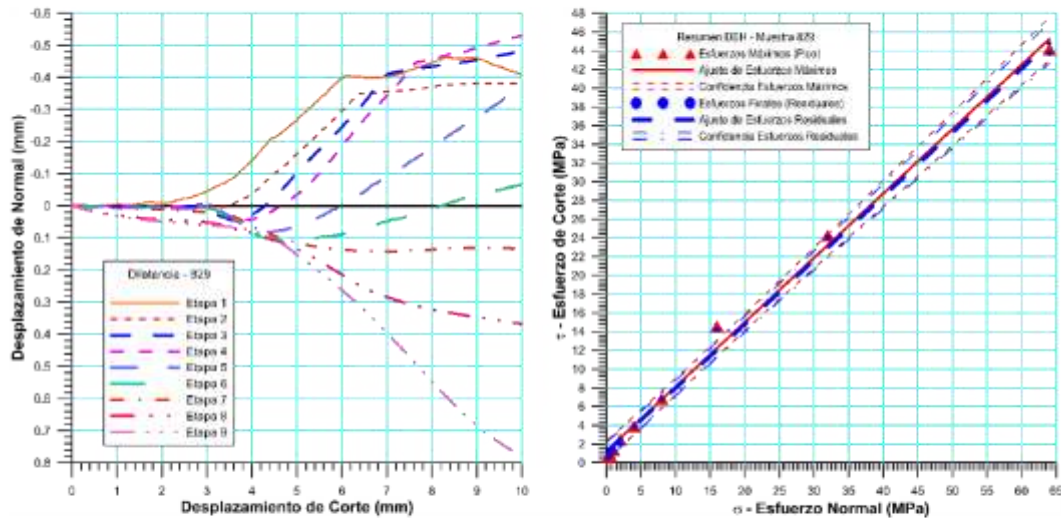
Figura 5.60 Espécimen 817_DSH-CNL - Río Cuirá

Espécimen 829

 RIF: J-40242570-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 11 de 12
	M. CASTILLEJO	09/2016	28-06-2014	Espécimen: 829

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26182	0.59545	0.25330	0.57498
2	0.51733	0.84736	0.50661	0.82511
3	1.01300	1.41269	1.00463	1.39752
4	2.00752	2.44326	2.00502	1.98804
5	4.01441	3.89577	4.00117	3.85718
6	8.00873	6.85282	7.98106	6.81469
7	16.01002	14.56208	16.00820	14.14921
8	32.00866	24.27480	31.99722	24.06156
9	64.00843	44.15538	64.00091	43.72106



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(34.50) * s + 1.24$	$t = \tan(34.30) * s + 1.14$
Cohesión (c) (MPa)	1.24	1.14
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	34.50	34.30
Número de puntos	9	9
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	14.21	14.20
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	11.00	10.82
Suma de los residuos cuadrados	9.18	8.21
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1723.15	1696.86
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	1.00

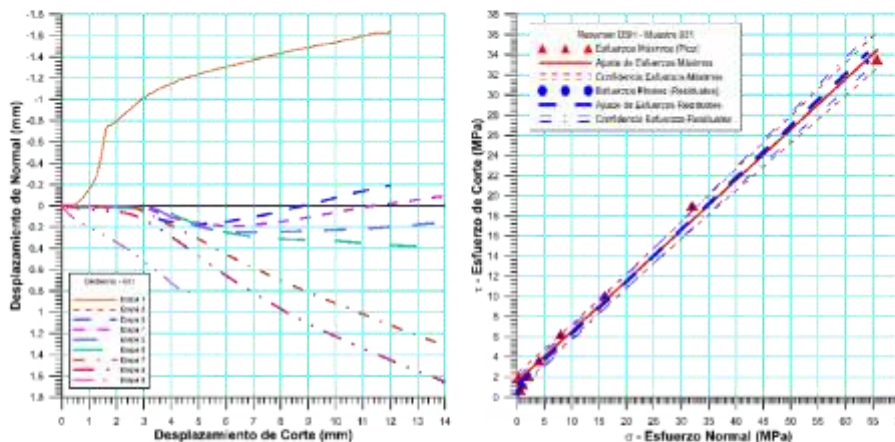
Figura 5.61 Espécimen 829_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 831

 RIF: J-40242570-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 11 de 12
	M. CASTILLEJO	9/14; 09/2016	07-04-2014	Espécimen: 831

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26434	1.94013	0.25686	0.35836
2	0.51333	0.80343	0.50978	0.78321
3	1.00998	1.26213	1.01151	1.21260
4	2.01403	2.16746	2.00009	2.04596
5	4.01148	3.62722	4.00813	3.61322
6	8.00737	6.26404	7.99630	6.05242
7	16.00953	10.06469	15.99929	10.01160
8	32.00892	19.03114	32.00815	18.90595
9	65.75194	33.51489	64.00007	33.25778



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(29.31) * s + 1.16$	$t = 29.82 * s + 0.80$
Cohesión (c) (MPa)	1.16	0.80
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	29.31	29.82
Número de puntos	8	8
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	7.98	7.97
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.65	5.37
Suma de los residuos cuadrados	1.48	1.25
Regresión Suma de los residuos cuadrados	270.17	281.55
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	1.00

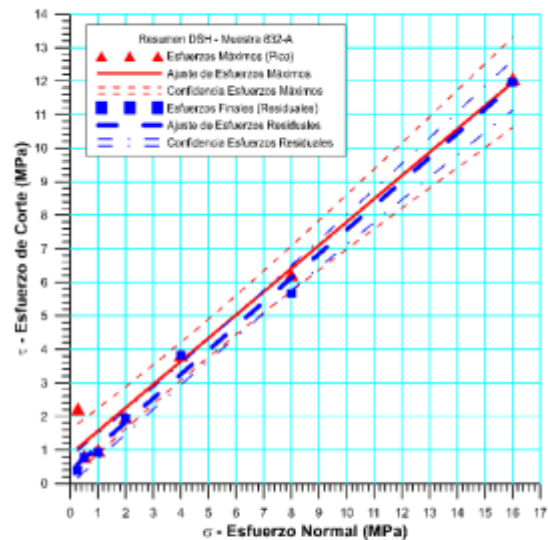
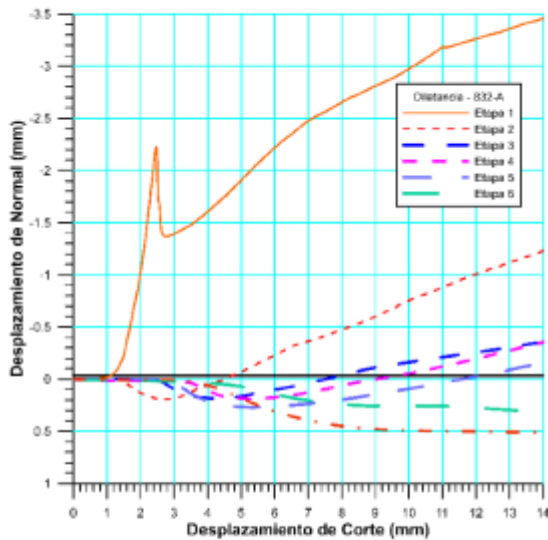
Figura 5.62 Espécimen 831_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 832-A

 RIF: J-40242570-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 9 de 10
	M. CASTILLEJO	09/2016	25-08-2014	Espécimen: 832-A

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27835	2.22238	0.25445	0.38774
2	0.50932	0.81494	0.49389	0.77664
3	1.00543	0.99401	1.00019	0.93583
4	2.00591	1.96271	1.99814	1.93817
5	4.00718	3.83066	4.00374	3.81740
6	8.00086	6.21885	7.99873	5.66062
7	16.01361	12.07592	16.00057	11.96440



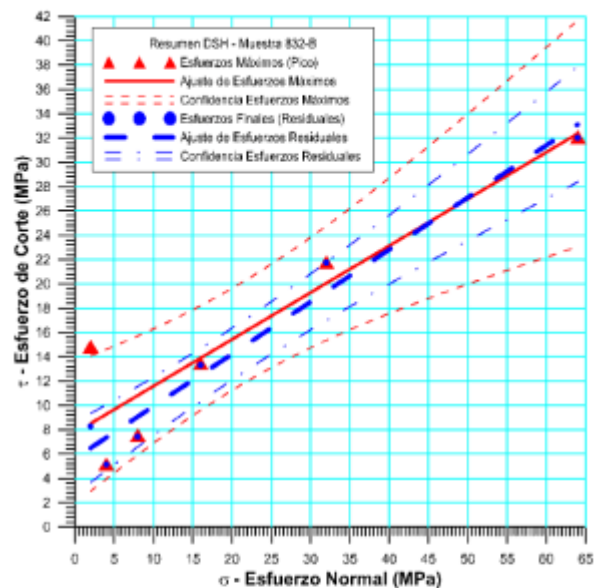
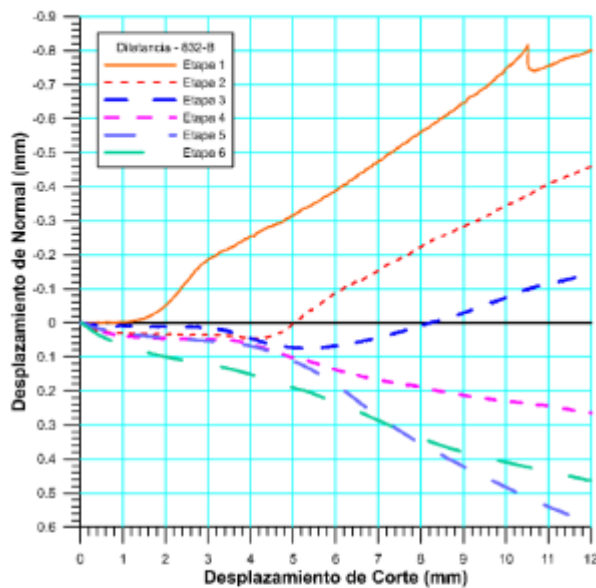
Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(34.71) * s + 0.87$	$t = \tan(35.69) * s + 0.38$
Cohesión (c) (MPa)	0.87	0.38
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	34.71	35.69
Número de puntos	7	7
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	4.55	4.54
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4.02	3.64
Suma de los residuos cuadrados	2.01	0.61
Regresión Suma de los residuos cuadrados	94.65	101.78
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.98	0.99

Figura 5.63 Espécimen 832-A_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 832-B

 <p>RIF: J-40242570-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 8 de 9
	M. CASTILLEJO	09/2016	25-08-2014	Espécimen: 832-B



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.00956	14.86063	1.99474	8.28690
2	4.00655	5.18619	3.99349	5.13252
3	8.01778	7.55899	7.98645	7.41690
4	16.00841	13.47491	16.00507	13.32433
5	32.01154	21.77414	31.99996	21.73723
6	64.00884	32.08378	63.99448	32.01709



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(21.05) * s + 7.74$	$t = \tan(23.23) * s + 5.64$
Cohesión (c) (MPa)	7.74	5.64
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	21.05	23.23
Número de puntos	6	6
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	21.01	21.00
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	15.82	14.65
Suma de los residuos cuadrados	70.94	18.30
Regresión Suma de los residuos cuadrados	416.77	518.69
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.85	0.97

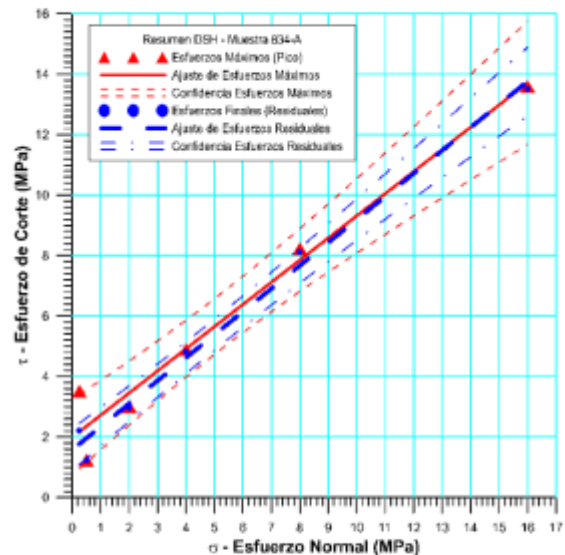
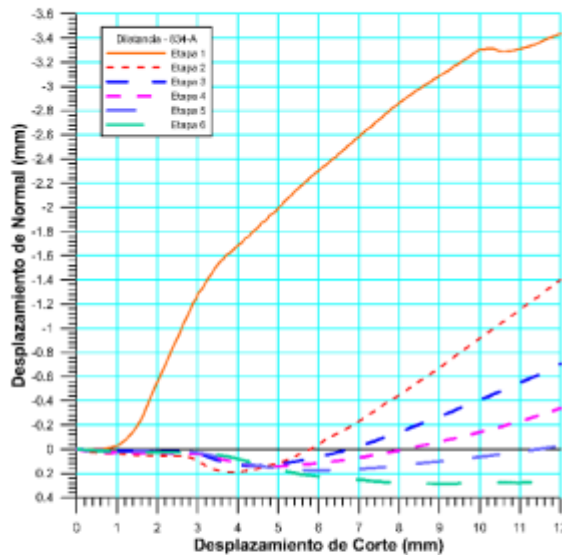
Figura 5.64 Espécimen 832-B_DSH-CNL - Río Cuirá

Espécimen 834-A

 <p>RIF: J-40242570-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 8 de 9
	M. CASTILLEJO	09/14/09/2016	02-07-2014	Espécimen: 834-A

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.25759	3.51630	0.24612	2.21319
2	0.50836	1.22933	0.49894	1.22494
3	2.00806	3.00892	1.99608	2.96662
4	4.00272	4.89287	3.99216	4.82151
5	8.00545	8.23167	7.99780	8.12428
6	16.00280	13.60465	15.99807	13.51406





Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(36.24) \cdot s + 1.99$	$t = \tan(37.29) \cdot s + 1.58$
Cohesión (c) (MPa)	1.99	1.58
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	36.24	37.29
Número de puntos	6	6
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.13	5.12
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.75	5.48
Suma de los residuos cuadrados	3.43	1.07
Regresión Suma de los residuos cuadrados	98.10	106.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.97	0.99

Figura 5.65 Espécimen 834-A_DSH-CNL - Río Cuiira

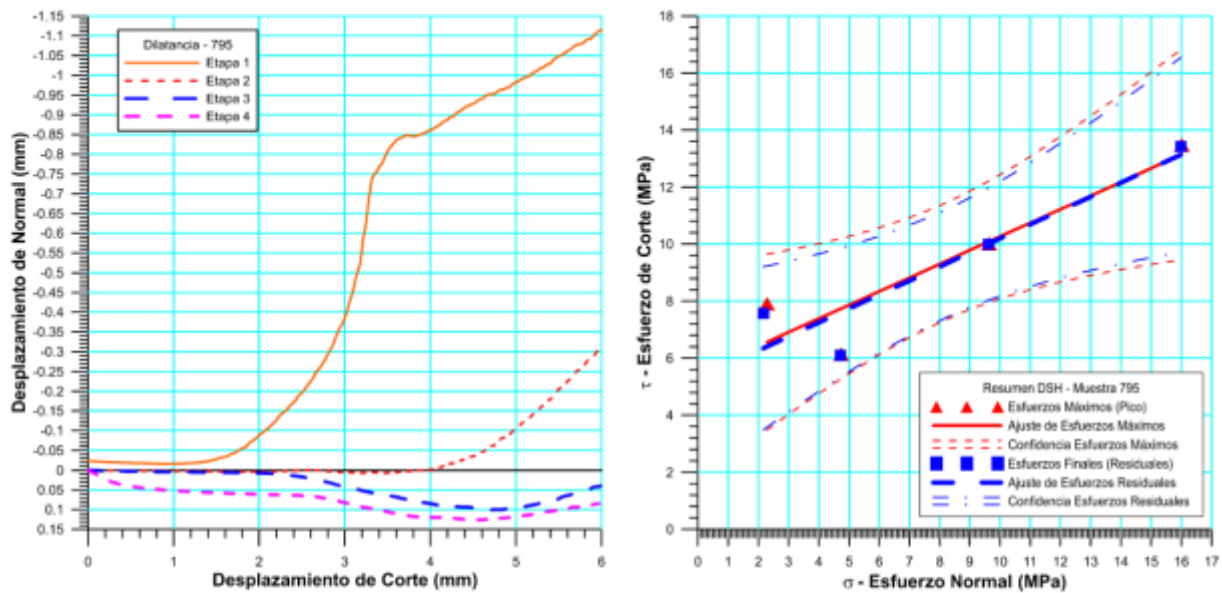
5.4.5.3.2 Estribo Izquierdo

Espécimen 795

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	06/06/2014	Espécimen: 795

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.28209	7.91015	2.16300	7.57400
2	4.73480	6.14010	4.70858	6.10016
3	9.63928	10.01314	9.61749	9.99138
4	16.01460	13.47302	15.98761	13.41809



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.47949 * s + 5.47$	$t = 0.49101 * s + 5.28$
Cohesión (c) (MPa)	5.47	5.28
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	25.62	26.15
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	8.1677	8.1192
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	9.3841	9.2709
Suma de los residuos cuadrados	4.4834	3.8262
Regresión Suma de los residuos cuadrados	25.3277	26.8252
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.8496	0.8752

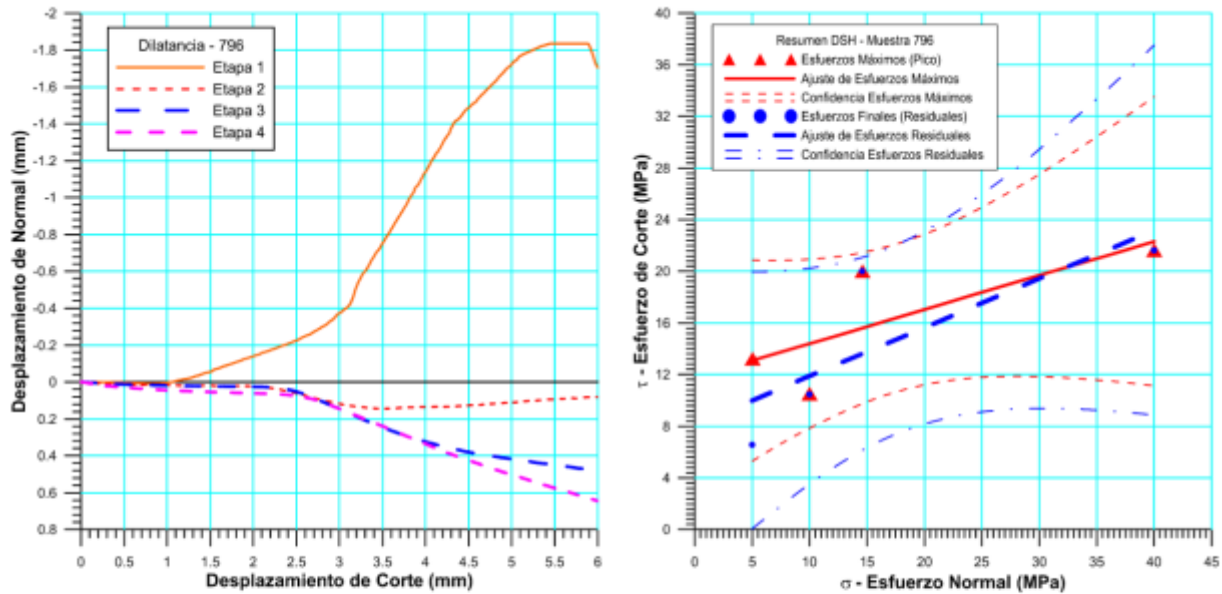
Figura 5.66 Espécimen 795_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 796

 RIF: G-2000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			
	SISTEMA TUY IV PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	07-03-2014	Espécimen: 796

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.28209	7.91015	2.16300	7.57400
2	4.73480	6.14010	4.70858	6.10016
3	9.63928	10.01314	9.61749	9.99138
4	16.01460	13.47302	15.98761	13.41809



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.2638014805 * \sigma + 11.76$	$\tau = 0.4910110979 * \sigma + 5.28$
Cohesión (c) (MPa)	11.76	8.11
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	14.78	20.66
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	17.41	17.39
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	16.36	14.67
Suma de los residuos cuadrados	34.90	57.02
Regresión Suma de los residuos cuadrados	50.61	103.46
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.59	0.64

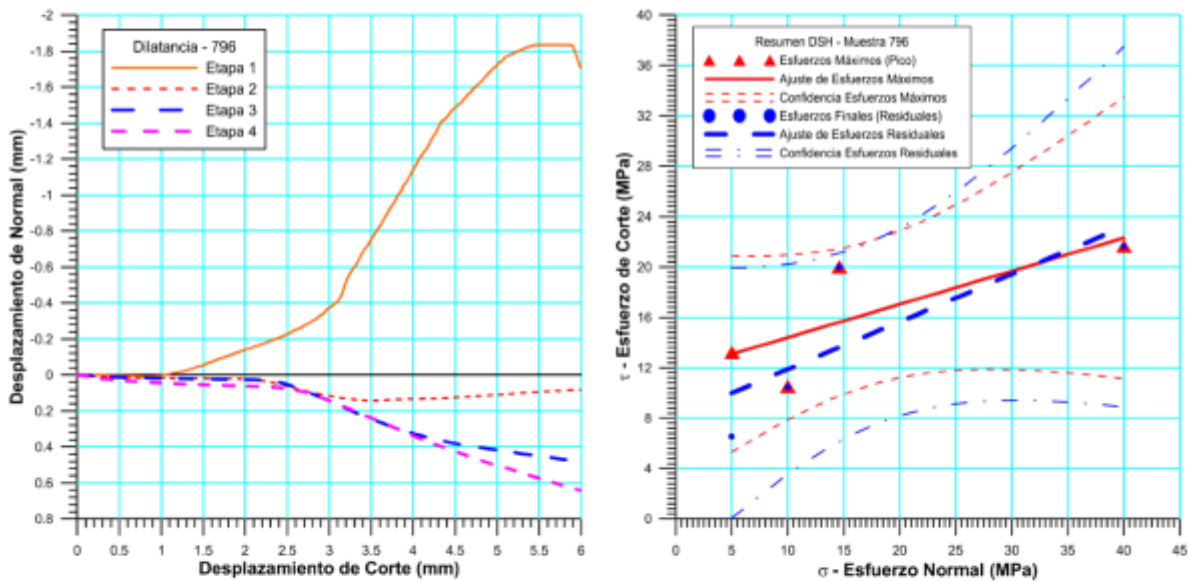
Figura 5.67 Espécimen 796_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 801

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			
	SISTEMA TUY IV PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	07-03-2014	Espécimen: 796

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.28209	7.91015	2.16300	7.57400
2	4.73480	6.14010	4.70858	6.10016
3	9.63928	10.01314	9.61749	9.99138
4	16.01460	13.47302	15.98761	13.41809



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.2638014805 * \sigma + 11.76$	$\tau = 0.4910110979 * \sigma + 5.28$
Cohesión (c) (MPa)	11.76	8.11
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	14.78	20.66
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	17.41	17.39
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	16.36	14.67
Suma de los residuos cuadrados	34.90	57.02
Regresión Suma de los residuos cuadrados	50.61	103.46
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.59	0.64

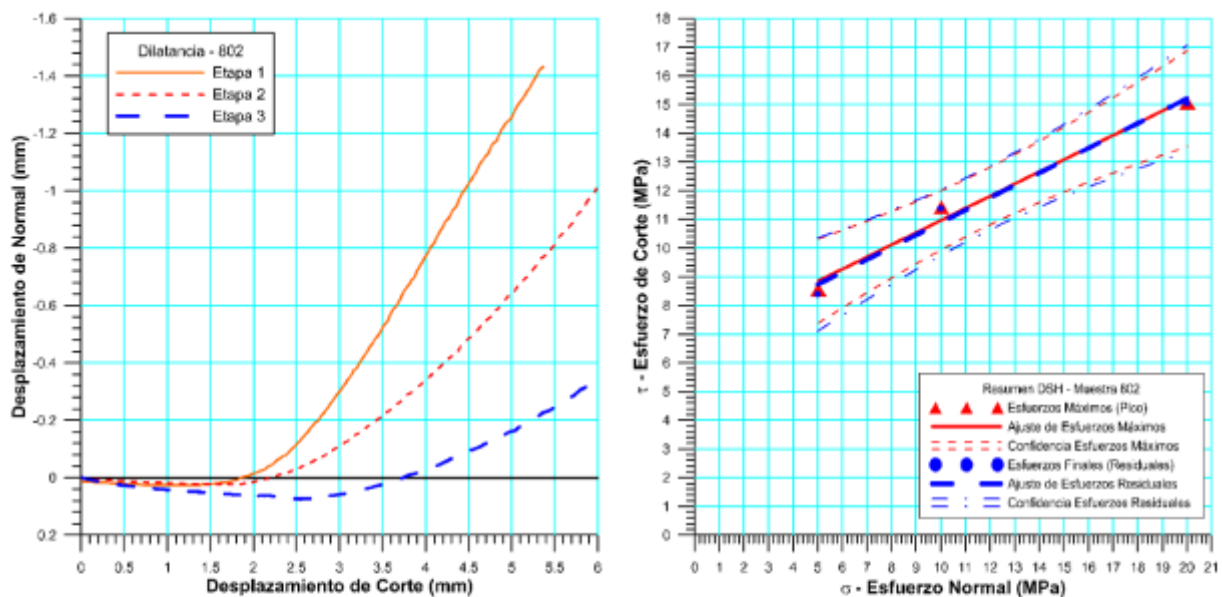
Figura 5.68 Espécimen 801_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 802

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: J-40242570-8
	SISTEMA TUY IV PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO	09/2016	19-03-2014	Espécimen: 802

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	5.02291	8.55421	4.99760	8.39809
2	10.02129	11.41729	9.99282	11.38309
3	20.02082	15.05996	19.99904	15.04254



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.42385 \cdot \sigma + 6.72$	$\tau = 0.43186 \cdot \sigma + 6.57$
Cohesión (c) (MPa)	6.72	6.57
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	22.97	23.36
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	11.6883	11.6632
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	11.6772	11.6079
Suma de los residuos cuadrados	0.3104	0.3836
Regresión Suma de los residuos cuadrados	20.9533	21.7666
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9854	0.9827

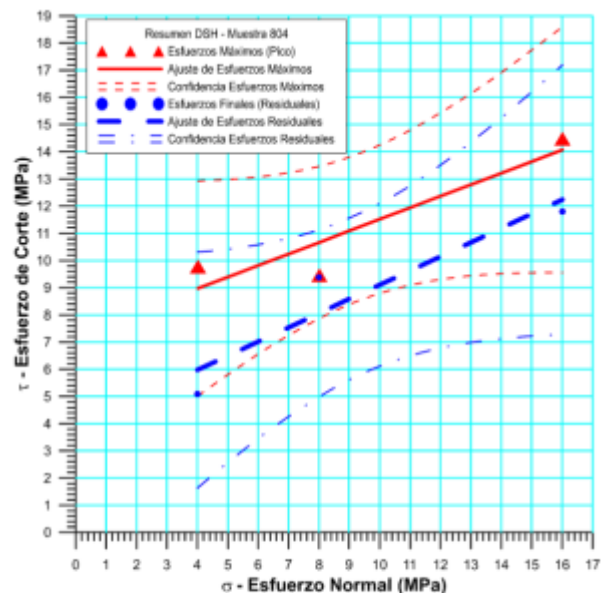
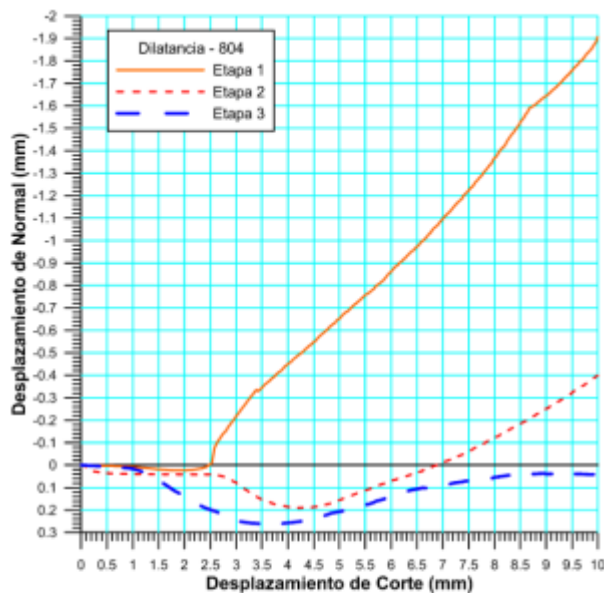
Figura 5.69 Espécimen 802_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 804

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO	09/2016	06/06/2014	Espécimen: 804

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.02071	9.78266	4.00188	5.08783
2	8.00977	9.46004	7.99273	9.38383
3	16.01035	14.47495	16.00850	11.79786



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.42515 \cdot \sigma + 7.27$	$\tau = 0.52180 \cdot \sigma + 3.89$
Cohesión (c) (MPa)	7.27	3.89
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	23.03	27.56
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	9.3469	9.3344
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	11.2392	8.7565
Suma de los residuos cuadrados	2.2807	2.7420
Regresión Suma de los residuos cuadrados	13.4763	20.3606
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.8553	0.8813

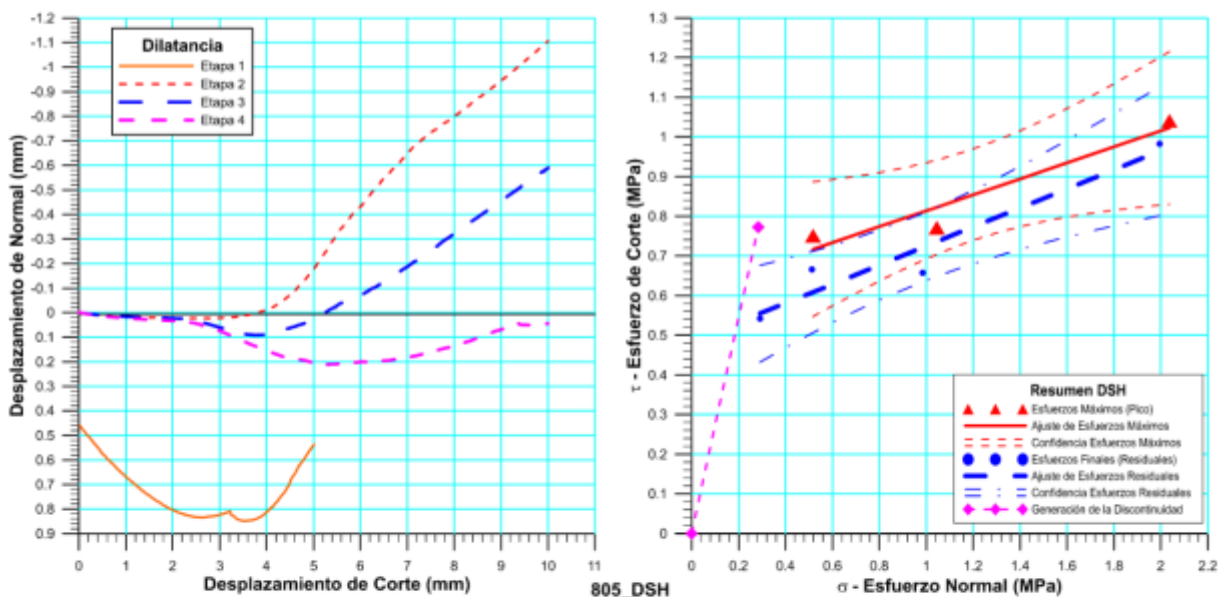
Figura 5.70 Espécimen 804_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 805

 RIF: G-2000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		06/06/2014	Espécimen: 805

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.01363	22.99009	3.99780	15.80084
2	8.02186	20.32693	8.00369	17.06380
3	16.01829	23.09663	15.99461	22.78157
4	32.01456	35.91144	32.01677	33.08279



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.51827 * \sigma + 17.80$	$\tau = 0.63425 * \sigma + 12.67$
Cohesión (c) (MPa)	17.80	12.67
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	27.40	32.38
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.0171	15.0032
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	25.5813	22.1823
Suma de los residuos cuadrados	23.6697	0.8325
Regresión Suma de los residuos cuadrados	123.5385	185.2694
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.8392	0.9955

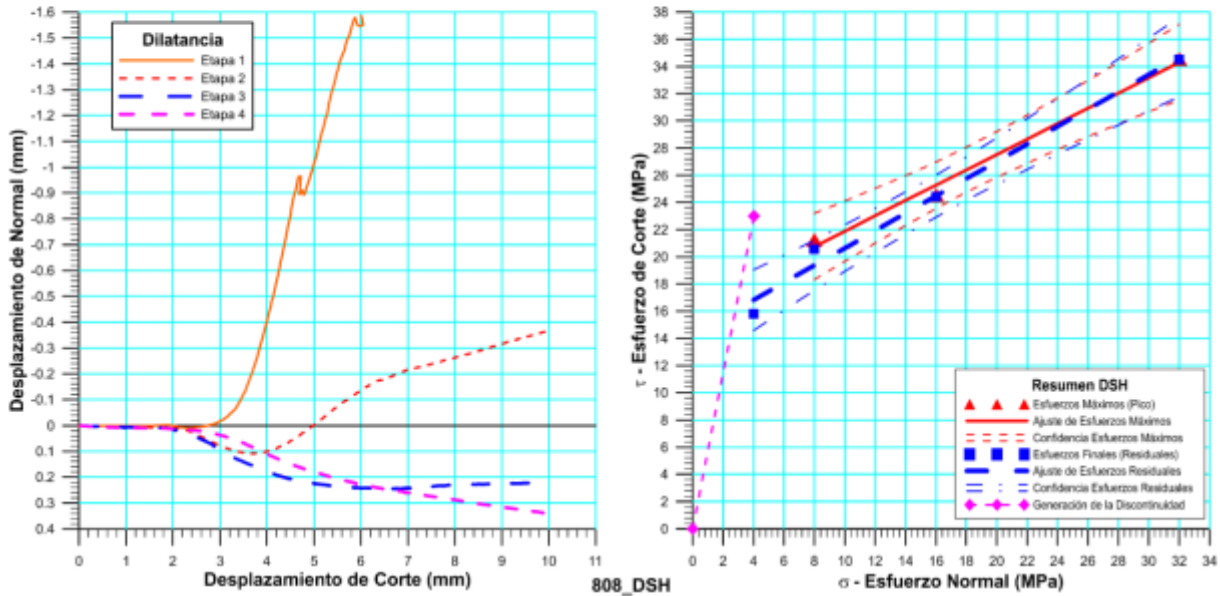
Figura 5.71 Espécimen 805_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 808

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	06/06/2014	Espécimen: 808

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.01363	22.99009	3.99780	15.80084
2	8.00595	21.25508	7.98750	20.58980
3	16.00722	24.52711	15.99323	24.41273
4	32.01254	34.55107	31.99405	34.52390



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(29.43) * s + 16.24$	$t = \tan(32.53) * s + 14.27$
Cohesión (c) (MPa)	16.24	14.27
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	29.43	32.53
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	18.68	14.99
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	25.83	23.83
Suma de los residuos cuadrados	10.66	2.57
Regresión Suma de los residuos cuadrados	96.09	187.10
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.90	0.99

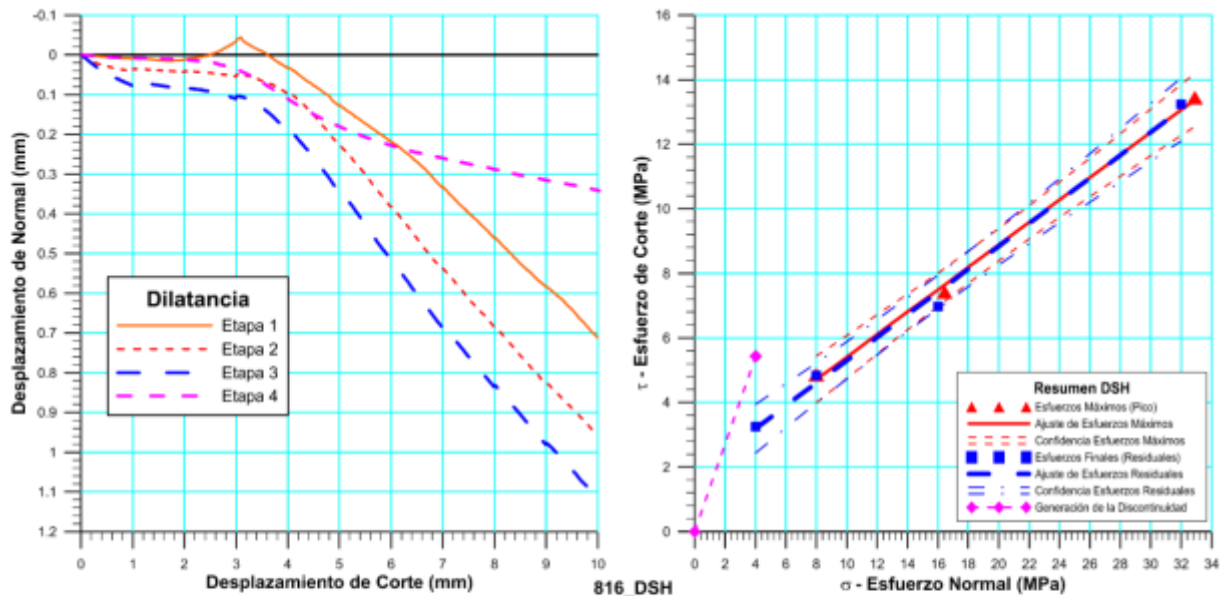
Figura 5.72 Espécimen 808_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 816

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: J-40242570-8
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	24/04/2014	Espécimen: 816

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.00672	5.43573	4.00118	3.24852
2	8.00004	4.86106	8.00437	4.83603
3	16.43703	7.42499	15.99935	6.97039
4	32.89173	13.44354	31.99420	13.23359



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(19.17) * s + 1.93$	$t = \tan(19.45) * s + 1.78$
Cohesión (c) (MPa)	1.93	1.78
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	19.17	19.45
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	19.11	15.00
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	7.79	7.07
Suma de los residuos cuadrados	2.25	0.29
Regresión Suma de los residuos cuadrados	43.96	57.30
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.95	0.99

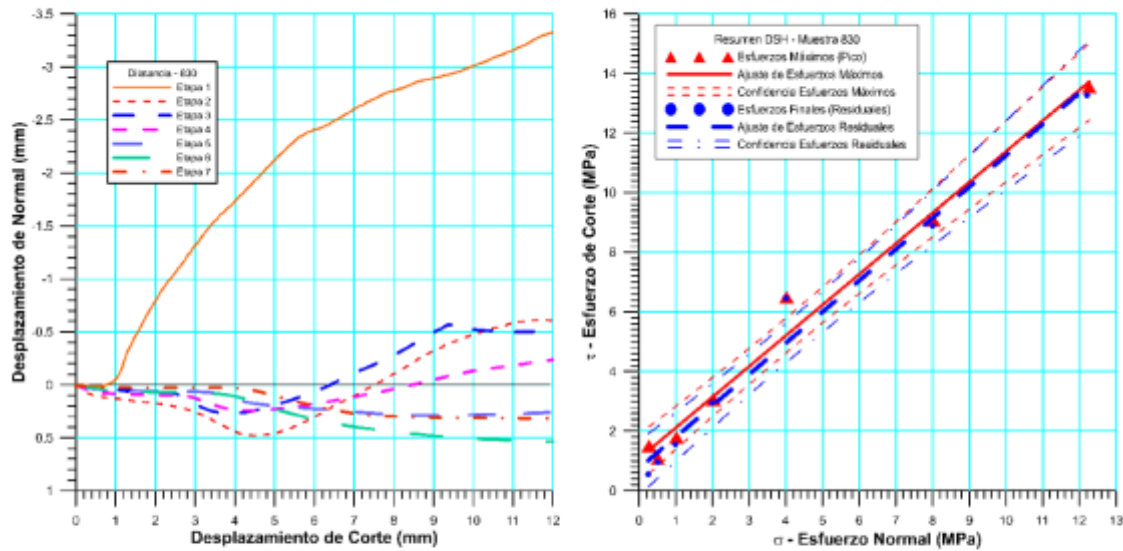
Figura 5.73 Espécimen 817_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 830

 <p>RIF: J-40242570-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 9 de 10
	M. CASTILLEJO	9/14	25-08-2014	Espécimen: 830

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27325	1.51100	0.25064	0.54807
2	0.51382	1.07462	0.50758	0.95310
3	1.01744	1.78951	0.98956	1.55523
4	2.02182	3.06760	1.99847	2.96005
5	4.01880	6.49784	4.00964	6.45632
6	8.02033	9.07148	8.00113	8.88496
7	12.26706	13.54845	12.20413	13.26954



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(45.86) * s + 1.08$	$t = \tan(46.38) * s + 0.76$
Cohesión (c) (MPa)	1.08	0.76
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	45.86	46.38
Número de puntos	7	7
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	4.02	3.99
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.22	4.95
Suma de los residuos cuadrados	2.17	2.79
Regresión Suma de los residuos cuadrados	131.01	135.02
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.98	0.98

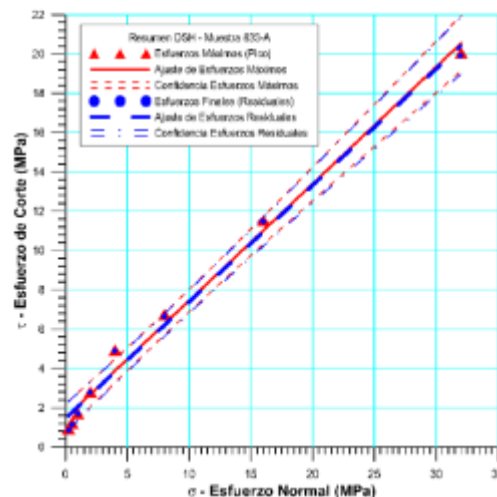
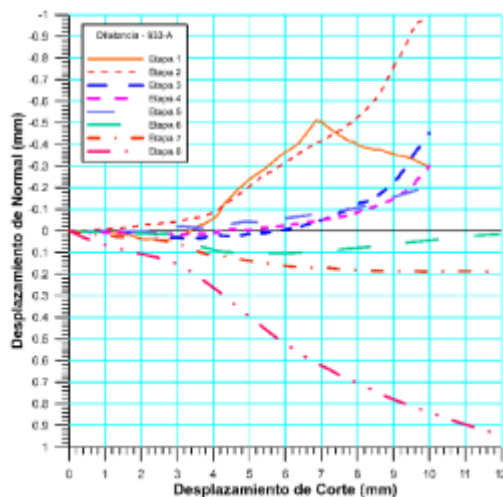
Figura 5.74 Espécimen 830_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 833-A

 RIF: J-40242570-B	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 10 de 11
	M. CASTILLEJO	09/2016	25-06-2014	Espécimen: 834-A

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.25069	0.93346	0.25233	0.85578
2	0.51660	1.23216	0.51127	1.14812
3	1.00191	1.69819	1.00933	1.68927
4	2.01061	2.80270	1.98910	2.77701
5	4.01460	4.93356	3.99287	4.89856
6	8.02019	6.74707	7.99577	6.65043
7	16.03106	11.53006	16.02357	11.48108
8	32.02652	20.05753	31.97811	19.90724



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(30.74) * s + 1.49$	$t = \tan(30.65) * s + 1.45$
Cohesión (c) (MPa)	1.49	1.45
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	30.74	30.65
Número de puntos	8	8
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	7.98	7.97
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	6.24	6.18
Suma de los residuos cuadrados	2.82	2.98
Regresión Suma de los residuos cuadrados	303.73	300.83
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.99

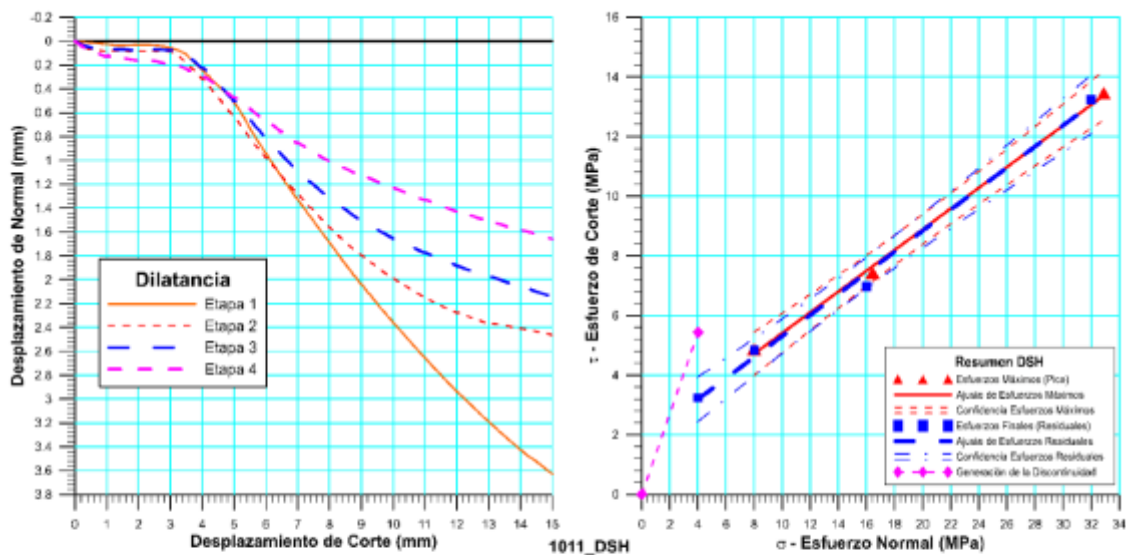
Figura 5.75 Espécimen 833-A_DSH-CNL - Río Cuira

Espécimen 1011

 RIF: J-40242570-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	16/07/2014	Espécimen: 1011

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	8.23531	26.33938	8.09581	26.33340
2	16.58785	11.46671	16.00330	10.98505
3	32.01438	17.32225	31.99516	17.30494
4	62.22059	32.59282	61.12752	31.40741



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(25.12) * s + 3.14$	$t = \tan(11.71) * s + 15.43$
Cohesión (c) (MPa)	3.14	15.43
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	25.12	11.71
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	36.94	29.31
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	21.93	21.51
Suma de los residuos cuadrados	179.29	178.92
Regresión Suma de los residuos cuadrados	84.56	70.76
Coefficiente de Determinación (R ²)	0.32	0.28

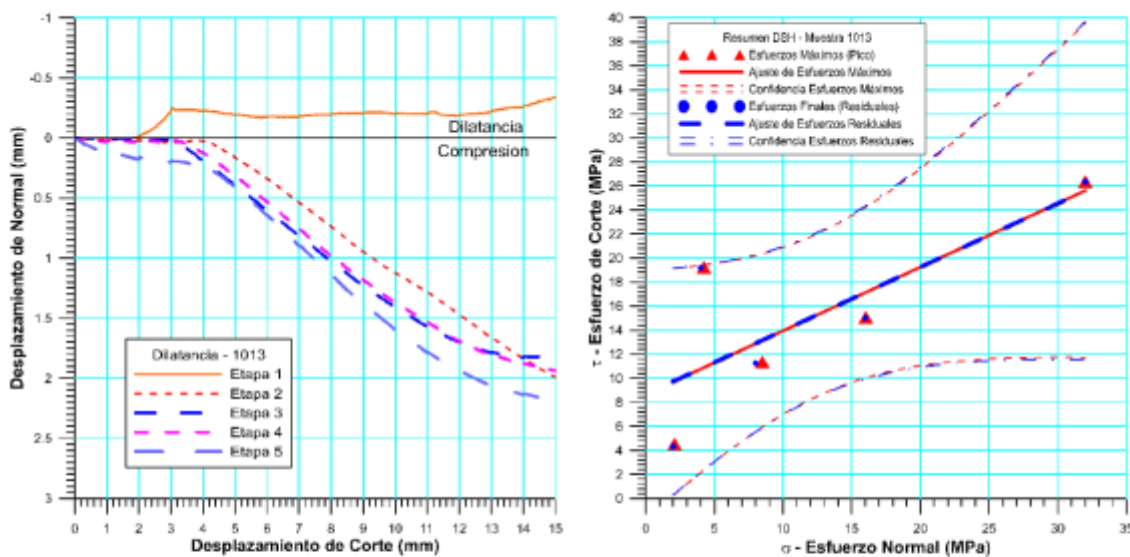
Figura 5.76 Espécimen 1011_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 1013

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV 
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 8
	M. CASTILLEJO		16/07/2014	Espécimen: 1013

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.10716	4.51627	1.99678	4.31403
2	4.24482	19.22399	3.99842	19.17732
3	8.48962	11.36130	8.00799	11.24986
4	16.02525	15.06631	15.98771	15.03088
5	32.01141	26.35744	32.00990	26.33727



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(27.94) * s + 8.64$	$t = \tan(27.87) * s + 8.66$
Cohesión (c) (MPa)	8.64	8.66
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	27.94	27.87
Número de puntos	5	5
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	12.58	12.40
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	15.31	15.22
Suma de los residuos cuadrados	104.92	107.40
Regresión Suma de los residuos cuadrados	164.60	166.59
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.61	0.61

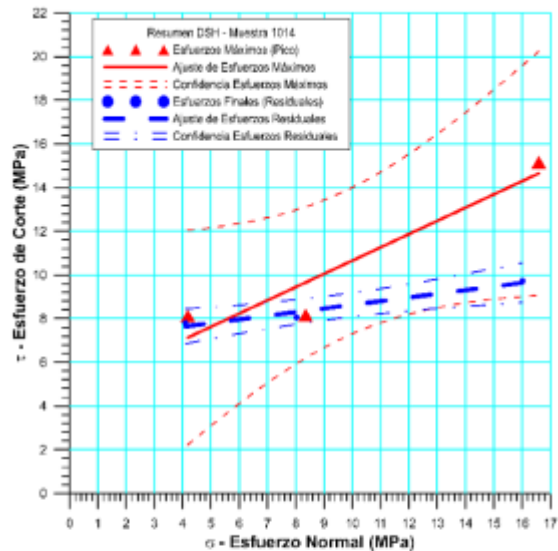
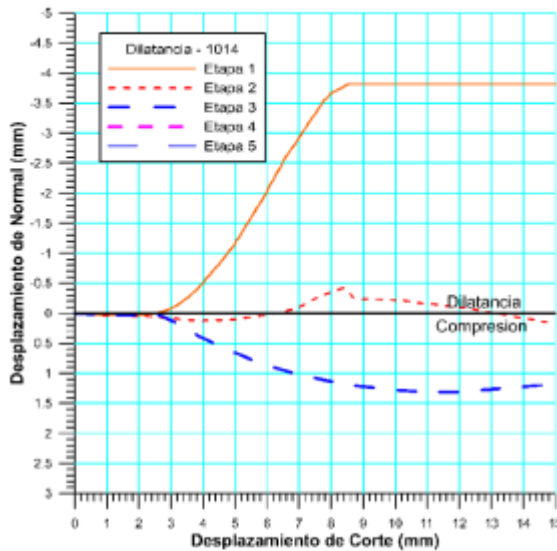
Figura 5.77 Espécimen 1013_DSH-CNL - Río Caira

Espécimen 1014

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV 
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		16/07/2014	Espécimen: 1014

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.17791	8.12313	4.09575	7.80626
2	8.34626	8.15515	8.02069	8.05813
3	16.59105	15.15465	16.01403	9.71959



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(31.22) * s + 4.60$	$t = \tan(9.51) * s + 6.96$
Cohesión (c) (MPa)	4.60	6.96
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	31.22	9.51
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	9.71	9.38
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	10.48	8.53
Suma de los residuos cuadrados	3.49	0.09
Regresión Suma de los residuos cuadrados	29.32	2.07
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.89	0.96

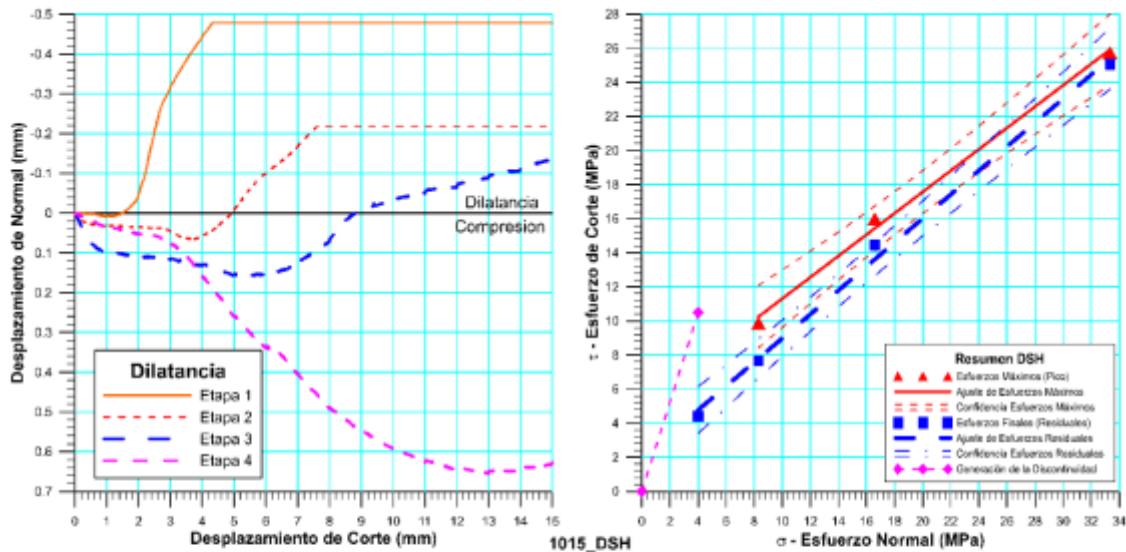
Figura 5.78 Espécimen 1014_DSH-CNL - Río Cuirá

Espécimen 1015

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO	09/2016	16/07/2014	Espécimen: 1015

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.02350	10.49988	4.00160	4.41989
2	8.30325	9.86934	8.01563	7.65223
3	16.58608	15.98882	16.04595	14.45082
4	33.34900	25.73375	31.98951	25.05000



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(32.04) * s + 5.05$	$t = \tan(36.34) * s + 1.85$
Cohesión (c) (MPa)	5.05	1.85
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	32.04	36.34
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	19.41	15.01
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	15.52	12.89
Suma de los residuos cuadrados	4.67	0.89
Regresión Suma de los residuos cuadrados	157.01	248.58
Coefficiente de Determinación (R ²)	0.97	1.00

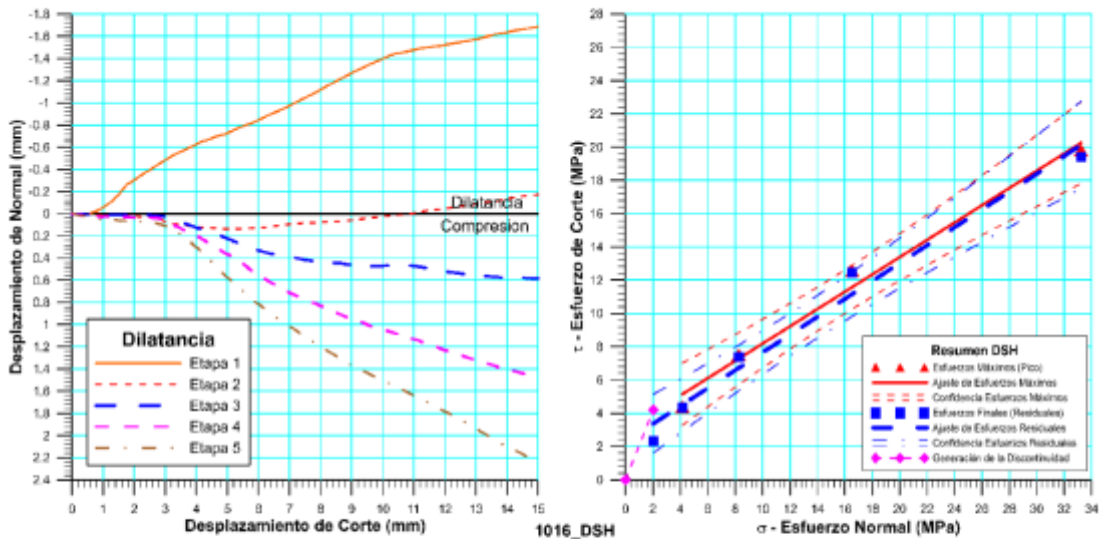
Figura 5.79 Espécimen 1015_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 1016

 <p>RIF: J-40242570-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 8
	M. CASTILLEJO	09/2016	16/07/2014	Espécimen: 1016

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.02315	4.20668	1.99159	2.32449
2	4.15419	4.38522	4.04108	4.33360
3	8.25665	7.51396	7.99262	7.38994
4	16.52622	12.56602	15.95945	12.44174
5	33.22712	19.80235	31.99148	19.40515



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(27.45) * s + 2.99$	$t = \tan(29.17) * s + 2.26$
Cohesión (c) (MPa)	2.99	2.26
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	27.45	29.17
Número de puntos	5	5
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.54	12.40
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	9.69	9.18
Suma de los residuos cuadrados	1.84	3.71
Regresión Suma de los residuos cuadrados	171.64	185.18
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.98

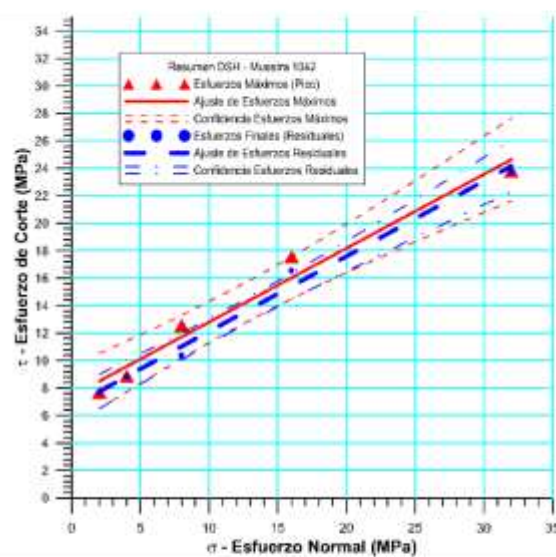
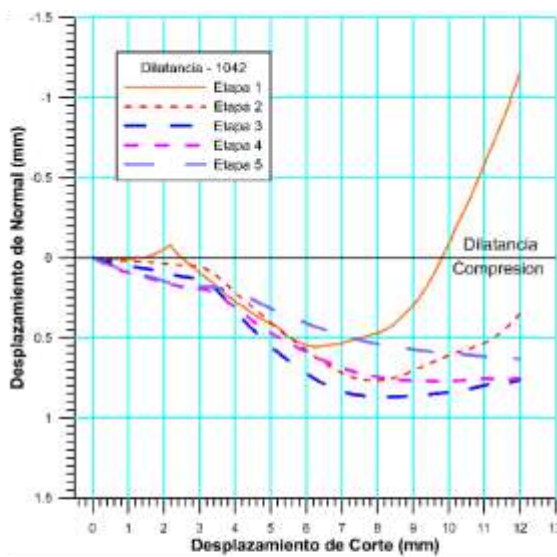
Figura 5.80 Espécimen 1016_DSH-CNL - Río Cuirá

Espécimen 1042

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 8
	M. CASTILLEJO		16/07/2014	Espécimen: 1042

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.01869	7.67930	1.99607	7.65257
2	4.01021	8.87562	4.00556	8.86175
3	8.01232	12.56816	7.99373	10.37081
4	16.01360	17.56653	15.99592	16.54498
5	32.01253	23.80981	32.00817	23.76709



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(28.28) * s + 7.42$	$t = \tan(28.68) * s + 6.66$
Cohesión (c) (MPa)	7.42	6.66
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	28.28	28.68
Número de puntos	5	5
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	12.41	12.40
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	14.10	13.44
Suma de los residuos cuadrados	4.92	1.90
Regresión Suma de los residuos cuadrados	172.25	178.27
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.97	0.99

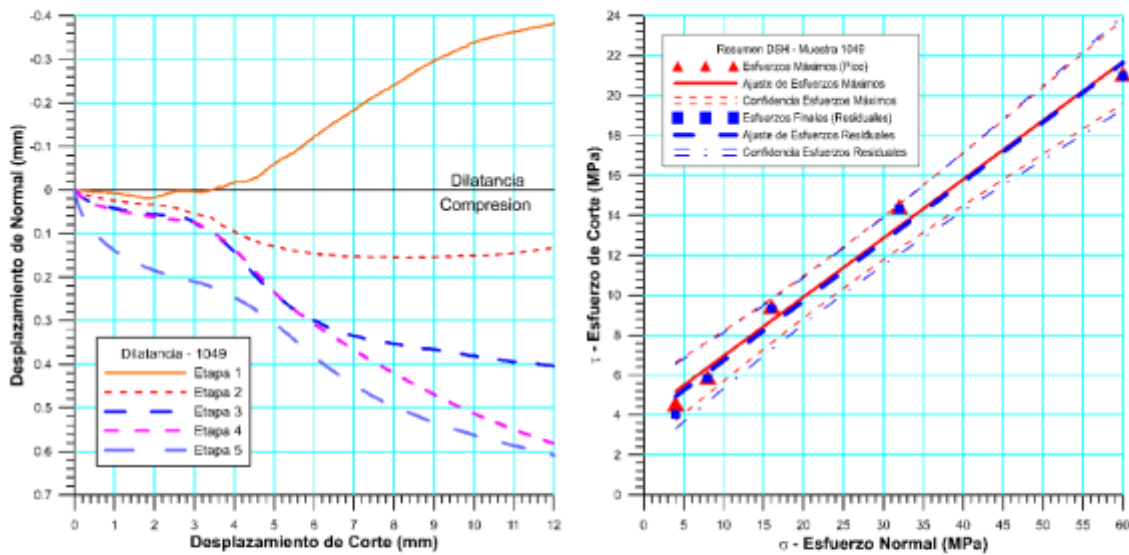
Figura 5.81 Espécimen 1042_DSH-CNL - Río Cuirá

Espécimen 1049

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 8
	M. CASTILLEJO		16/07/2014	Espécimen: 1049

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.00523	4.56313	3.99131	4.03083
2	8.00778	5.90603	7.99493	5.85302
3	16.00842	9.43603	16.01054	9.34097
4	32.00542	14.43959	32.00359	14.31385
5	59.99225	21.08238	59.98238	20.96914



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(16.43) * s + 4.01$	$t = \tan(16.61) * s + 3.74$
Cohesión (c) (MPa)	4.01	3.74
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	16.43	16.61
Número de puntos	5	5
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	24.00	24.00
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	11.09	10.90
Suma de los residuos cuadrados	2.47	3.06
Regresión Suma de los residuos cuadrados	180.80	185.07
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.98

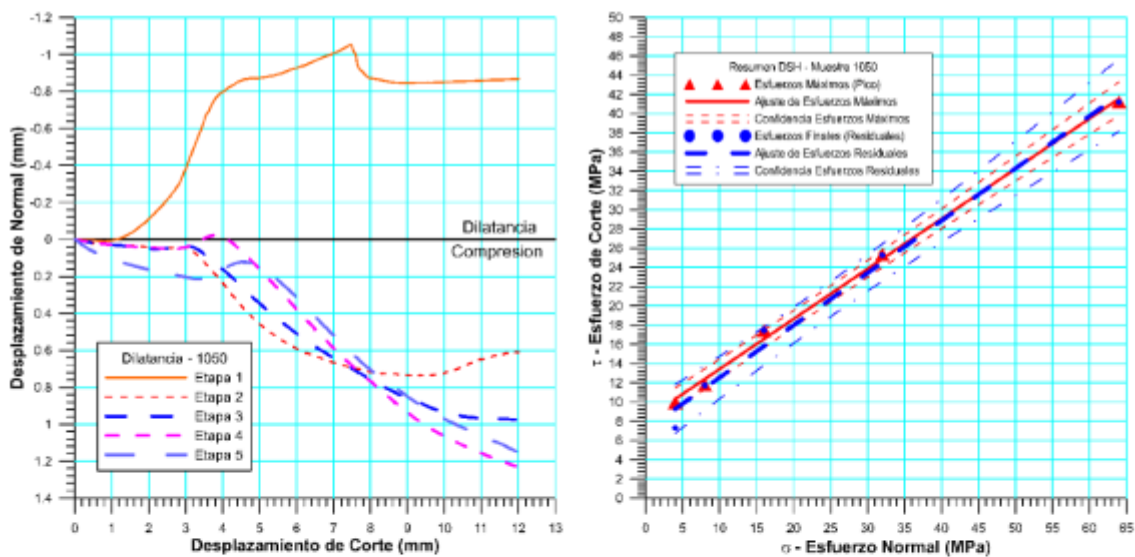
Figura 5.82 Espécimen 1049_DSH-CNL - Río Cuiira

Espécimen 1050

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			SISTEMA TUY IV  RIF: J-29574492-7
	PRESA SOBRE EL RÍO CUIRA SISTEMA TUY IV			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 8
	M. CASTILLEJO		16/07/2014	Espécimen: 1050

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	4.01565	9.94715	3.99406	7.30039
2	8.01129	11.76061	8.00795	11.73510
3	16.01060	17.46348	15.99791	17.44062
4	32.01154	25.32139	31.98678	25.26506
5	64.00887	41.22089	64.00041	41.20820



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(27.51) * s + 8.22$	$t = \tan(28.54) * s + 7.10$
Cohesión (c) (MPa)	8.22	7.10
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	27.51	28.54
Número de puntos	5	5
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	24.81	24.80
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	21.14	20.59
Suma de los residuos cuadrados	1.65	7.74
Regresión Suma de los residuos cuadrados	645.85	704.17
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.99

Figura 5.83 Espécimen 1050_DSH-CNL - Río Cuirá

5.4.5.3.3 Resultados de los Ensayos de Corte Directo

Tabla 5.18 Resultados de Dilatación del Estribo Derecho - Río Cuira

Muestra	Dilatancia (mm)
806	2.6
810	2.0
812	1.0
813	1.6
814-A	0.1
814-B	0.5
814-C	0.0
817	0.5
829	0.5
831	1.8
832-A	3.5
832-B	0.8
834	3.5
Promedio	1.4

Tabla 5.19 Resultados de Dilatación del Estribo Izquierdo - Río Cuira

Muestra	Dilatancia (mm)
795	0.7
796	1.8
801	1.3
802	1.7
804	2.0
805	1.1
808	1.6
816	0.1
828-B	1.6
830	3.3
833-A	1.0
1011	0.0
1013	0.3
1014	3.8
1015	0.5
1016	1.6
1042	0.0
1049	0.4
1050	1.0
Promedio	1.3

Tabla 5.20 Caracterización de las rugosidades del Estribo Derecho - Río Cuira

JRC	Dilatancia (mm)	Valor	Caracterización
0.5	0.1	Mínimo	Plana Pulida
6	1.4	Promedio	Ondulada Pulida
14	3.5	Máximo	Ondulada Rugosa

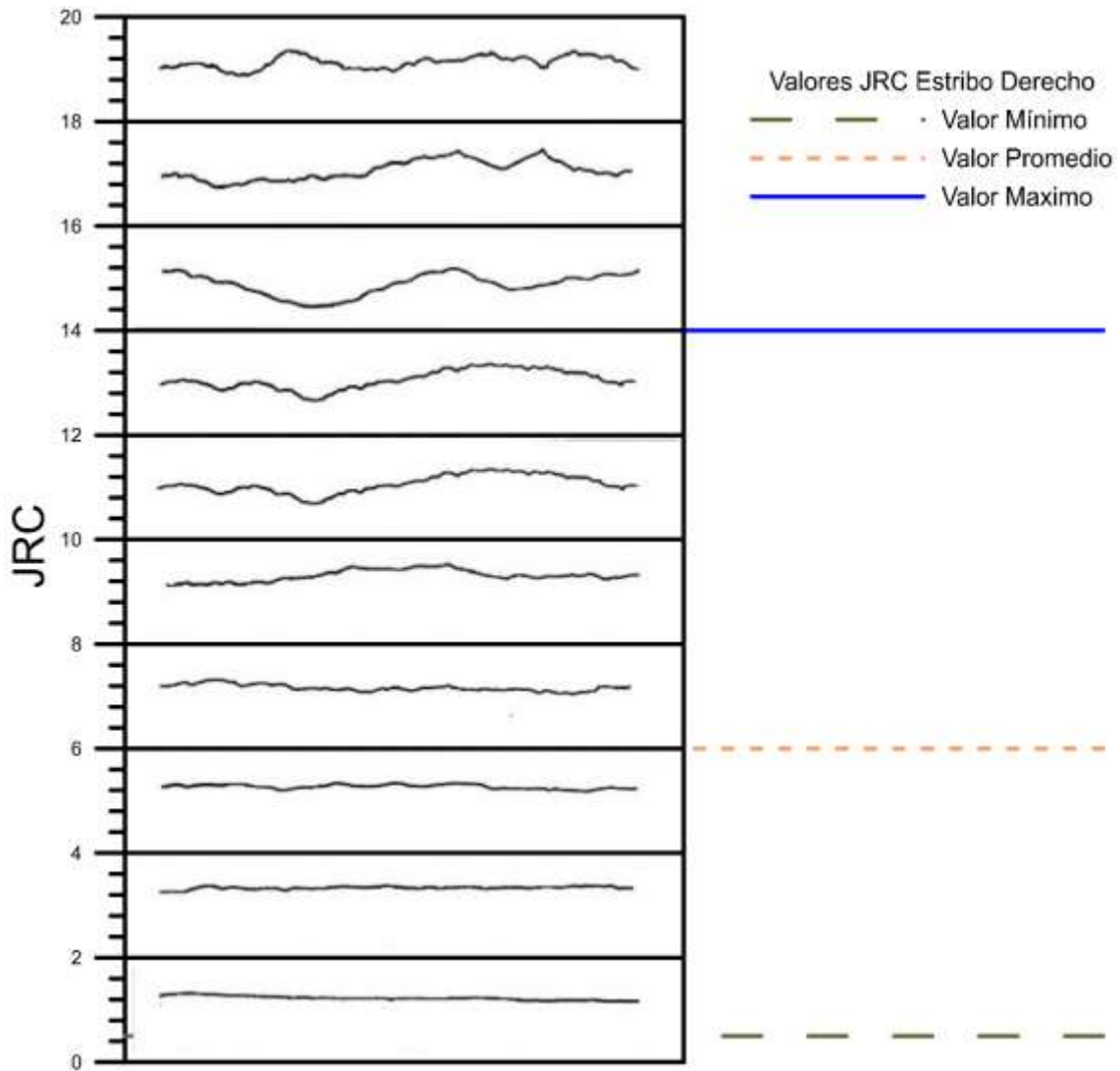


Figura 5.84 Valores del JRC según su perfil de rugosidad, Estribo Derecho - Río Cuira

Tabla 5.21 Caracterización de las rugosidades del Estribo Izquierdo - Río Cuira

JRC	Dilatancia (mm)	Valor	Caracterización
0.5	0	Mínimo	Plana Pulida
5	1.3	Promedio	Ondulada Pulida
15	3.8	Máximo	Intensificada Rugosa

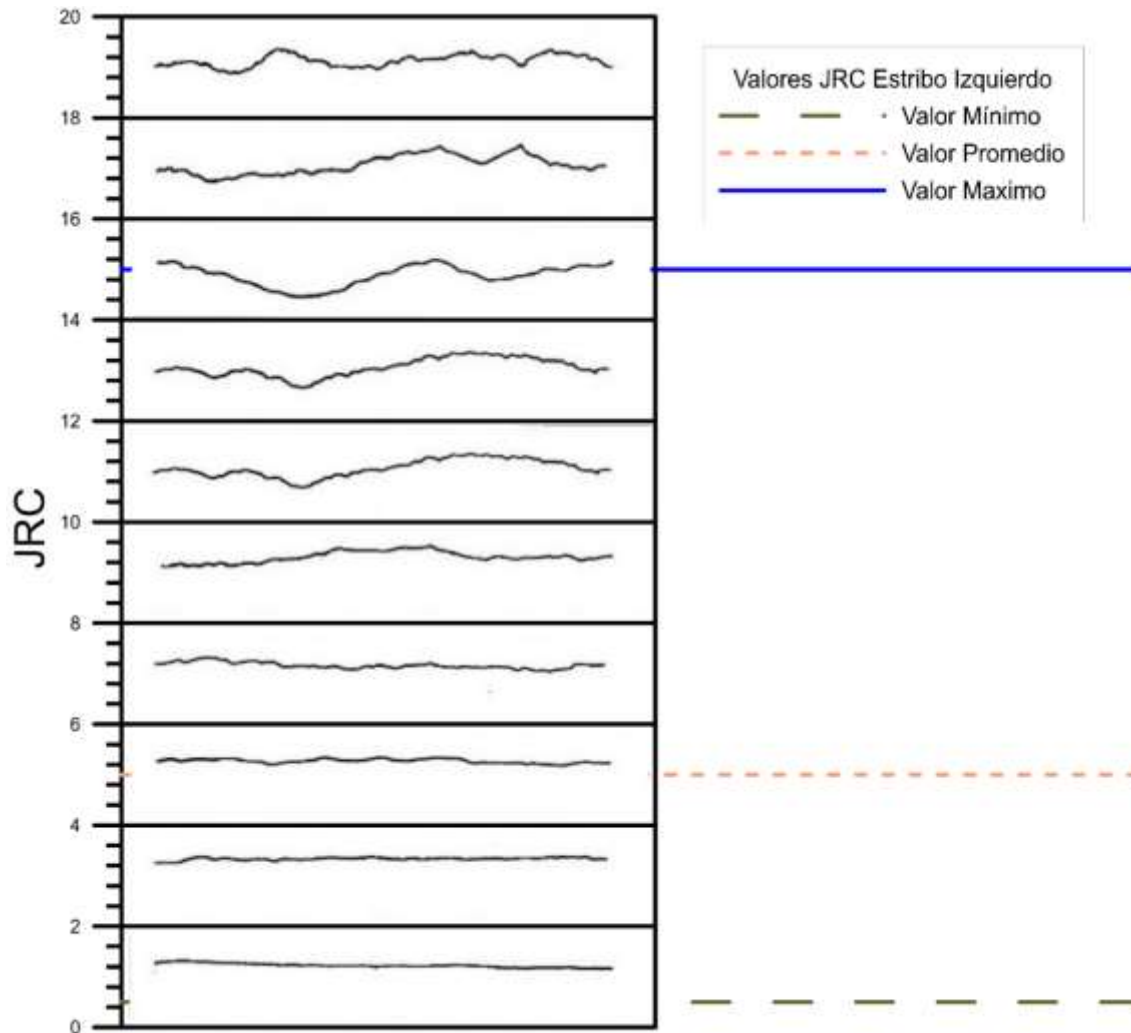


Figura 5.85 Valores del JRC según su perfil de rugosidad, Estribo Izquierdo - Río Cuira

- **Resultados totales y globales de los ensayos de Corte Directo**
 - Estribo Derecho - Río Cuira

Tabla 5.22 Resultados totales Estribo Derecho (valores pico) - Río Cuira

Ensayo	Cohesión (MPa)	ϕ
806	3.334	31.369
810	8.573	37.88
812	6.295	28.044
813	3.255	39.942
814-1	3.925	28.757
814-2	2.391	27.427
814-3	1.527	24.047
817	3.645	23.354
829	1.24	34.502
831	1.153	27.268
832-1	0.868	34.712
832-2	7.737	21.049
834	1.987	36.239

- Río Cuira

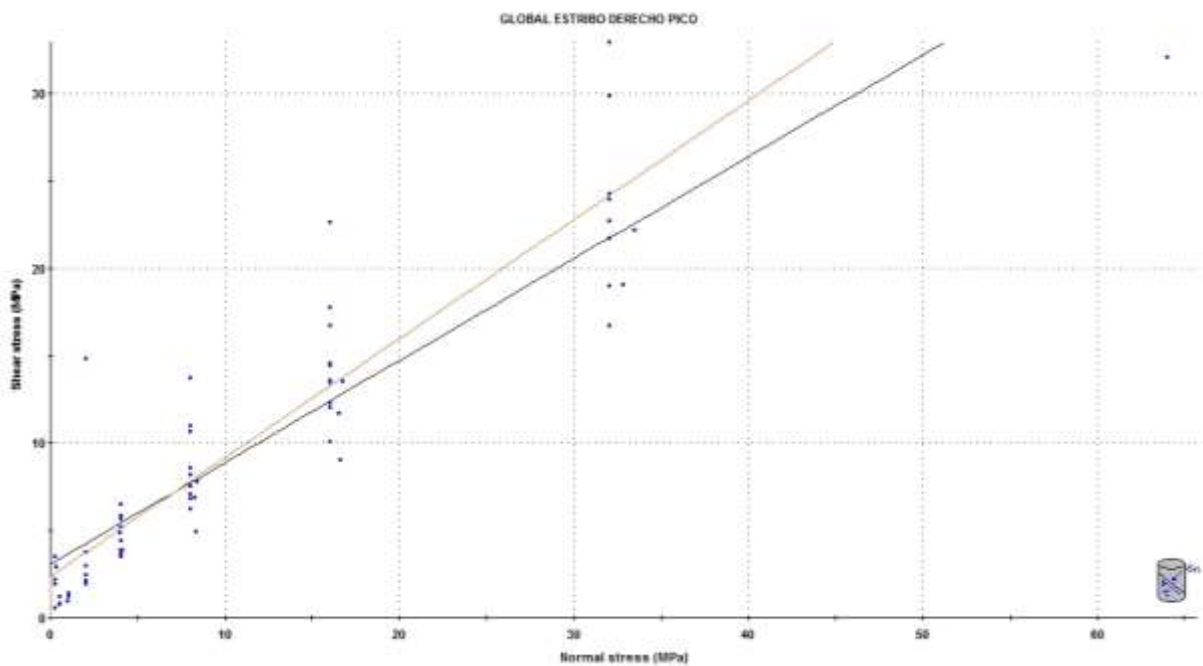


Figura 5.86 Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Derecho (valores pico) - Río Cuira

Tabla 5.23 Resultados Globales Estribo Derecho (valores pico) - Río Cuira

Cohesión (MPa)	ϕ
2.359	34.247

Tabla 5.24 Resultados totales Estribo Derecho (valores residuales) - Río Cuira

Ensayo	Cohesión (MPa)	ϕ
806	2.814	31.781
810	8.351	38.126
812	5.261	28.406
813	3.17	39.889
814-1	2.668	31.486
814-2	2.435	24.818
814-3	0	23.358
817	3.29	23.756
829	1.139	34.296
831	1.54	26.571
832-1	0.383	35.686
832-2	5.639	23.234
834	1.577	37.293

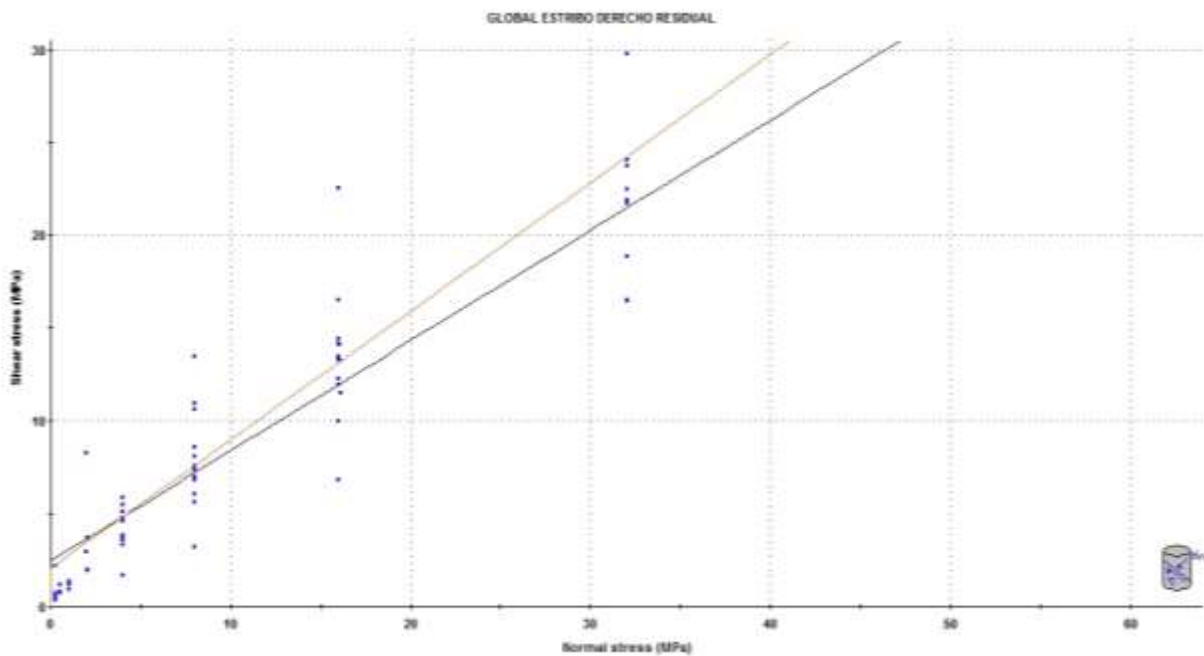


Figura 5.87 Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Derecho (valores residuales) - Río Cuira

Tabla 5.25 Resultados Globales Estribo Derecho (valores residuales) - Río Cuira

Cohesión (MPa)	ϕ
2.064	34.705

- Estribo Izquierdo - Río Cuira

Tabla 5.26 Resultados totales Estribo Izquierdo (valores pico) - Río Cuira

Muestra	Cohesion (MPa)	ϕ
795	5.404	25.198
796	9.652	15.911
801	5.374	18.714
802	5.545	24.585
804	7.265	23.033
805	17.798	27.396
808	19.971	24.561
816	3.206	16.649
828-2	1.737	40.196
830	1.081	45.862
833-1	1.493	30.744
1011	15.283	12.588
1013	8.636	27.936
1014	4.565	31.221
1015	6.829	29.186
1016	3.061	27.329
1042	7.422	28.28
1049	4.007	16.431
1050	8.219	27.514

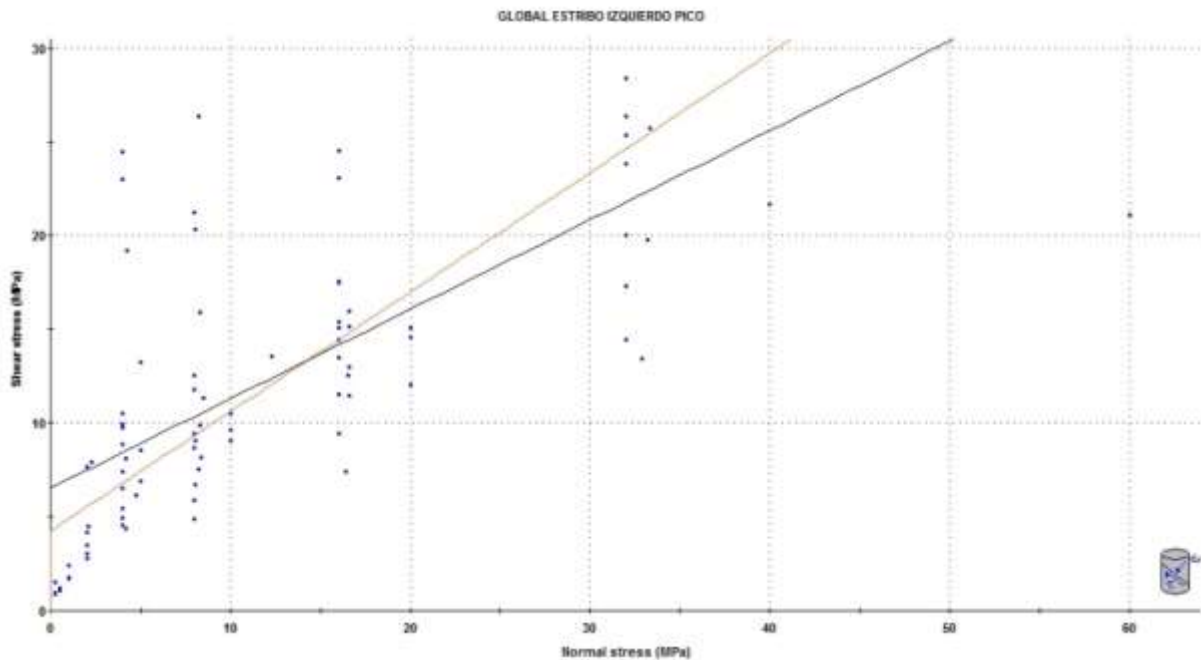


Figura 5.88 Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Izquierdo (valores pico) - Río Cuira

Tabla 5.27 Resultados Globales Estribo Izquierdo (valores pico) - Río Cuira

Cohesión (MPa)	ϕ
4.255	32.486

Tabla 5.28 Resultados totales Estribo Izquierdo (valores residuales) - Río Cuira

Muestra	Cohesión (MPa)	ϕ
795	5.218	25.741
796	5.586	22.398
801	4.77	20.381
802	5.388	24.97
804	3.886	27.556
805	12.666	32.385
808	14.27	32.528
816	1.776	19.446
828-2	1.638	40.024
830	0.756	46.377
833-1	1.453	30.653
1011	15.433	11.711
1013	8.663	27.875
1014	6.957	9.508
1015	1.851	36.336
1016	2.259	29.174
1042	6.655	28.684
1049	3.742	16.613
1050	7.103	28.54

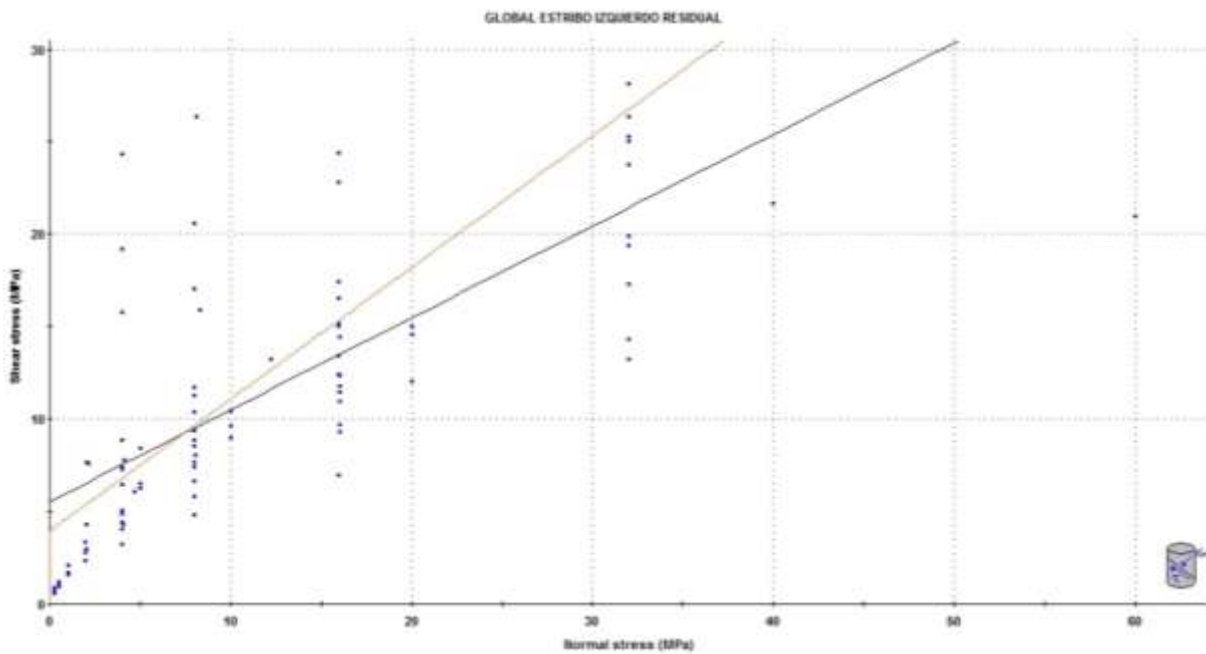


Figura 5.89 Criterio de Mohr-Coulomb del Estribo Izquierdo (valores residuales) - Río Cuira

Tabla 5.29 Resultados Globales Estribo Izquierdo (valores residuales) - Río Cuira

Cohesión (MPa)	ϕ
3.954	35.453

5.4.5.3.4 Conclusiones

Superficies Rugosas

De los resultados obtenidos se concluye que, las dilatacias presentan un desplazamiento promedio de 1.3 mm para el Estribo Izquierdo y 1.4 mm para el Estribo Derecho, pudiéndose considerar como rugosidades tipo ondulada. Los valores mínimos que se obtuvieron, son poco indicativos de la rugosidad real que se encuentra en el macizo. Esto pudo ser consecuencia de la gran degradación que sufrió el espécimen ensayado al momento de aplicarle la carga normal. Por tal motivo se decidió tomar el máximo como parámetro de rugosidad, ya que estos se adecuan con lo que se observó en el macizo, teniendo así como valores $JRC = 14$ para el Estribo Derecho y $JRC = 15$ para el Estribo Izquierdo, ubicándose dentro del tipo de rugosidad ondulada e intensificada respectivamente.

Del análisis de los resultados de corte directo, empleando el Criterio de Resistencia de Mohr-Coulomb reportan valores de cohesión de cerca de 2 MPa y 34° para el estribo derecho y 4 MPa de cohesión y 32° de fricción para el estribo izquierdo. Estos valores son bastante altos para que se produzcan inestabilidades en los taludes.

Del ensayo se puede concluir que la rugosidad de las discontinuidades es de gran importancia en la estabilidad de los taludes presentes, que los esfuerzos aplicados sobre ellas deben superar el valor de cohesión, altamente influenciado por la rugosidad de las discontinuidades, siendo lo más probable que ocurra la caída de bloques aislados superficiales sueltos. En otras palabras debe superarse el entramamiento de bloques por rugosidad. Dicho esto, el macizo rocoso con este tipo de roca es de muy buena calidad. Pero al analizar separadamente los datos del Estribo Derecho e Izquierdo, en el Estribo Derecho existe mayor probabilidad de que ocurran desprendimientos por obtener en los ensayos realizados una menor cohesión, menor rugosidad y una roca más meteorizada y fracturada por la presencia de la falla.

5.5 Estudio de las limos duros en el cauce del Río Guarenas

Aproximadamente a 25 kilómetros al este del Valle de Caracas, se encuentran las ciudades de Guarenas y Guatire, que han tenido un crecimiento demográfico bastante acelerado en los últimos 15 años como ciudades dormitorio de la capital. Las mismas se han convertido en ciudades “satélites” de la capital, con una gran expansión urbanística por toda el área que conforman. Con su consecuente crecimiento poblacional, también se ha desarrollado su expansión en cuanto a servicios, establecimientos recreacionales, urbanizaciones, entre otros. Ambas ciudades forman parte de un gran valle enclavado en la cadena montañosa al norte el país.

El área de estudio se encuentra en Guatire, Municipio Zamora, Estado Miranda, en la parte nor-central de Venezuela. Esta zona constituye un valle enclavado en el sistema montañoso norte costero del país (Figura 5.90).

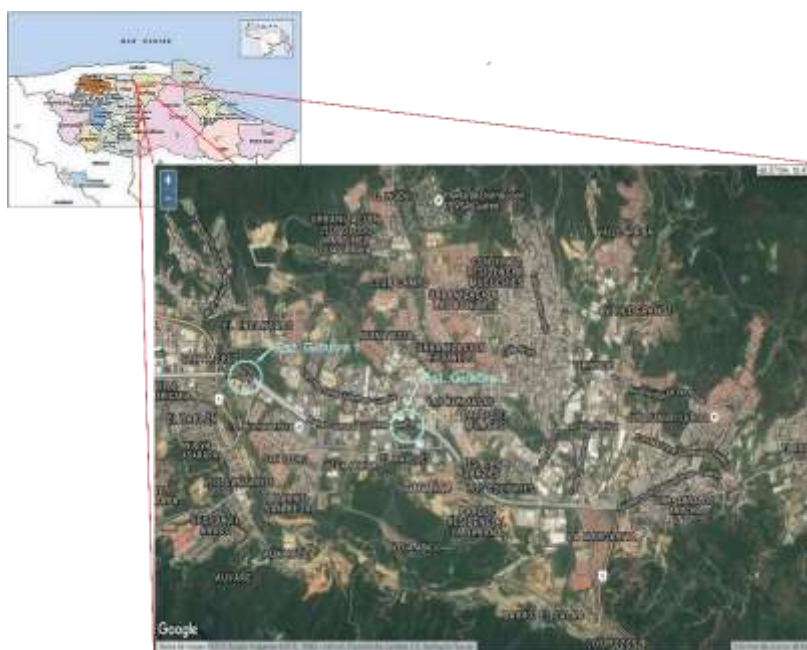


Figura 5.90 Plano de Ubicación de las Estaciones Guatire I y Guatire II



Figura 5.91 Detalle de la ubicación de la Estación Guatire I

Este caso de estudio corresponde a los ensayos realizados para la Empresa Geocyma, el estudio para el emplazamiento de la Estación Guatire I (Figura 5.91), del Sistema de Transporte Masivo Caracas – Guarenas – Guatire, ubicada en el municipio Zamora del Estado Miranda.

La estructura del sistema de transporte Caracas-Guatire contará con 92 pilas (las cuales sirven de sostén) con una altura de 21 metros. El tramo Guarenas-Guatire contará con cuatro estaciones elevadas: Guarenas 1, frente al terminal de pasajeros y Guarenas 2 en las adyacencias a la Villa Panamericana. En Guatire: Guatire 1, cerca del distribuidor Zamora y Guatire 2 frente a la urbanización el Marqués. El tramo que comprende Guarenas-Guatire tendrá una trayectoria de 12,7 kilómetros. Por su parte, el tramo montañoso (desde Caracas a Guarenas) tendrá una estación en Ciudad Belén, en el municipio Plaza, y la segunda en Caucaguita, en el municipio Sucre, con una longitud de 18 kilómetros. El trayecto Caracas-Guatire formará parte del tramo suburbano de la futura Línea 6 del Metro de Caracas, el cual partirá desde una estación con transferencia en Petare norte, hasta Guatire.

5.5.1 Geología

5.5.1.1 Geología Regional

La Cuenca de Guatire pertenece geológicamente a la Cordillera de la Costa, la cual constituye la cadena montañosa ubicada en el norte de Venezuela en la zona costera del país. Este sistema forma parte de la amplia zona de interacción entre la placa tectónica del Caribe y la placa tectónica Suramericana, mediante un conjunto de fallas tipo transcurrente dextrales, la mayoría con orientación Este-Oeste y sísmicamente activas.

El valle conformado por las ciudades de Guarenas y Guatire (25 km al este de la ciudad de Caracas) constituye una cuenca con formación post-orogénica rellena principalmente por sedimentos clásticos que van desde consolidados a no consolidados, y acumulación de aluviones a lo largo de los tres ríos principales presentes en el área (Guarenas, Guatire y Pacairigua). Dicha cuenca se encuentra emplazada en una depresión limitada al norte por el Macizo del Ávila y al sur por el cerro Colorado, en la Cordillera de la Costa.

HESS y DENG (1949) informalmente realizaron las primeras observaciones geológicas en la región de Guarenas-Guatire. De acuerdo al Código Geológico de Venezuela (PDVSA, 2011) la zona en estudio pertenece a la Formación Guatire, siendo reconocida inicialmente por Mencher et al. (1951), en un cuadro de correlaciones, aun cuando no realizaron ninguna descripción de la unidad. Nicklas (1953), describe la formación, sin asignarle nombre. Dusenury (1956, *Léxico Estratigráfico de Venezuela*), publicó la primera descripción formal para los sedimentos expuestos en las cuencas de Santa Lucía-Guatire y Barlovento. Seiders (1965), restringió el sentido, al proponer el término Capas de Caucagua, para designar los sedimentos incluidos anteriormente en la Formación Guatire, en la región de Barlovento. Bermúdez (1966) restringió la Formación Guatire a la cuenca Guarenas-Guatire. Picard y Pimentel (1968), restringen el término de Formación Guatire para la cuenca Guarenas-Guatire. Picard (1976), estudió la unidad en forma detallada.

La primera mención del nombre de Formación Guatire fue realizada por Mencher et al. (1951), en un cuadro de correlaciones, aun cuando no realizaron ninguna descripción de la unidad.

Los afloramientos están restringidos a la cuenca Guarenas-Guatire, desde Guarenas hasta aproximadamente 5 km al este de Guatire (en sentido oeste-este), y una extensión norte-sur de aproximadamente 5 km.

Picard (1976), indica que los estudios estratigráficos y de paleocorrientes, sugieren que la cuenca Guarenas-Guatire fue un lago del Plio-Pleistoceno, enclavado en la Cordillera de la Costa y controlado por fallas y movimientos basculantes. El drenaje fue esencialmente similar al drenaje actual. La paleopendiente más pronunciada es la del macizo del Avila, que aportaba a la cuenca volúmenes considerables de material derivado de las formaciones Peña de Mora, Las Brisas y los granitos de la cordillera. Picard y Pimentel (1968) refieren que esta unidad se encuentra en los cauces de los ríos que atraviesan la cuenca. Las diferencias de pendiente, originaron un lago asimétrico, con una costa abrupta al Norte y una costa baja, de poca profundidad, en el lado Sur, con desarrollo de pantanos y charcas. El relleno de la cuenca se efectuó desde el lado Norte y Oeste. La Formación Guatire es discordante sobre las rocas metamórficas del Grupo Caracas (Formación Las Mercedes), e infrayace localmente a terrazas aluvionales y aluviones recientes, en una cuenca sinclinal (Picard, 1976, p. 97). Hacia el centro de la cuenca, coincidiendo con la zona más profunda, hay acumulación de arcillas recubiertas por secuencia fluvial (Picard, 1976).

Su edad puede ser Pleistoceno Temprano. Picard y Pimentel (1968, p. 861) indican que la Formación Guatire puede considerarse equivalente a la parte superior de la Formación Tuy, esto es, Pleistoceno Temprano-Pleistoceno Medio.

Picard (1976) señala que, Hacia el Suroeste hay mayor proporción de carbonato de calcio, con capas de calizas, margas y conglomerados y hacia el centro de la cuenca se encuentran espesas capas de arcillas laminares. Los conglomerados y gravas presentan capas de espesores individuales variables de hasta 3 m y alcanzan un 30 % del volumen de la formación. Están mal escogidos, con matriz en el rango de arena fina-arcilla y a veces se encuentran cementados; los colores varían entre amarillo verdoso y amarillo gris, con cierto grado de oxidación por meteorización. Las arenas y limos constituyen el 26 % del volumen de la unidad. Las arenas se presentan en capas de espesores variables de hasta 6 m con estratificación interna pobre,

colores gris amarillento a gris verdoso, frecuentemente oxidadas y su composición es de arenas líticas arcósicas, mal escogidas y con asimetría hacia lo fino. Las arcillas de la Formación Guatire, constituyen el 40 % del volumen total. Algunas capas sobrepasan los 20 m de espesor, y preservan laminación. Su composición mineralógica es de caolinita y clorita y su color varía de gris amarillento a gris amarillo moderado. Las calizas están ubicadas en el suroeste de la cuenca y constituyen el 2 % del volumen de la formación. Se presentan en capas de 50 cm hasta 2 m, con colores gris oliva claro a gris amarillento, criptocristalinas, compuestas por calcita micrítica con bioclastos, con fósiles de *Hemisinus* de 2 a 3 mm de longitud.

5.5.1.2 Geología Local

La zona en estudio no posee afloramientos, llevando a la necesidad de realizar una campaña de sondeos exploratorios para verificar las condiciones del subsuelo donde se apoya la superestructura de la Estación Guarenas 1.

Se realizaron varias campañas de sondeos exploratorios, que abarcaron los sitios de construcción de las pilas y los emplazamientos de las estaciones a lo largo de todo el tramo sub-urbano. En el año 2007, la empresa GEOMIN, C.A., realizó cuatro perforaciones para el reconocimiento del subsuelo identificadas de la siguiente manera

Tabla 5.30 Ubicación de las perforaciones realizadas por la Empresa Geomin, C.A.

Perf.	Ubicación	Referencia	Prog	Coordenadas	Cota	Long. (m)
P74	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE. RETIRO IZQUIERDO, CERCA DE VALLA "LAS ISLAS"	26+400	1158525N, 764565E	342	19.00
P75	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, RETIRO IZQUIERO, FRENTE MAKRO, EN LETRERO DE FARMAMAKRO	26+650	1158440N, 764752E	349	24.65
P76	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, ENTRE FARMATODO Y BUENAVENTURA. AL NIVEL DE LETRERO RUFINO BLANCO FOMBONA	26+900	1158299N, 765049E	358	25.00
P77	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, ANTES DEL SEMÁFORO DEL BUENAVENTURA	27+200	1158200N, 765216E	362	24.75
P78	ESTACIÓN GUATIRE 1	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, FRENTE A VALLA DE BURGER KING	27+300	1158080N, 765423E	359	24.85

Tabla 5.30 Ubicación de las perforaciones realizadas por la Empresa Geomin, C.A. (continuación)

Perf.	Ubicación	Referencia	Prog	Coordenadas	Cota	Long. (m)
P79	ESTACIÓN GUATIRE 1	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, FRENTE A C.C. BUENAVENTURA VISTA PLACE	27+400	1158334.105N, 765661E	354	24.70
P80	ESTACIÓN GUATIRE 1	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, FRENTE A C.C. OASIS	27+700	1157933N, 765913E	351	24.70
P81	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, FRENTE A CONSTRUCCIÓN, ANTES DE PROMARINE	27+950	1157943N, 766151E		24.65
P82	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, FRENTE A CONSTRUCCIÓN, ANTES DE PROMARINE	28+200	1157953N, 766391E		24.65
P83	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, DESPUÉS DE LA TOYOTA EQUIPO INDUSTRIAL	28+450	1157969N, 766665E	343	25.00
P84	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, FRENTE A LA SHICK ESQUINA OESTE	28+700	1157972N, 766767E	343	24.70
P85	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, ENTRE LA SHICK Y PLASTEK	28+950	1157977N, 766875E	338	25.00
P86	SUBTRAMO GUATIRE 1 - GUATIRE 2	ISLA CENTRAL EN INTERCOMUNAL GUARENAS-GUATIRE, FRENTE A MOVIMIENTO DE TIERRA	29+200	1157980N, 7677102E	334	25.00

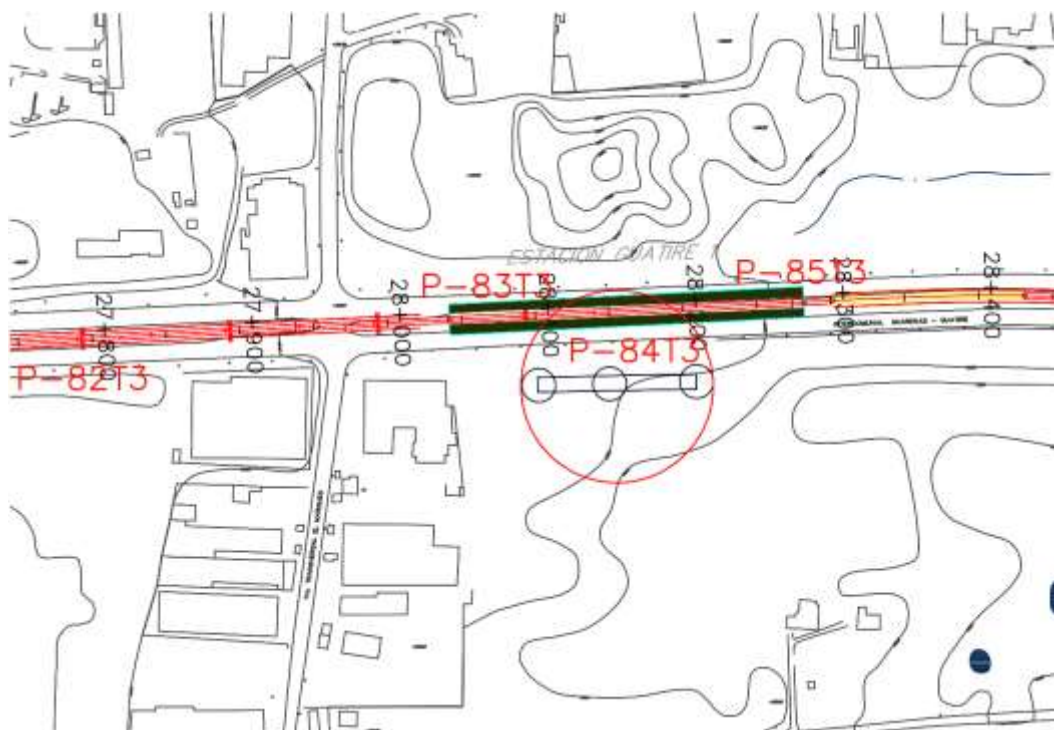


Figura 5.92 Ubicación de las perforaciones realizadas por Geomin, C.A. para la estación Guatire 1

De las columnas estratigráficas de las planillas de perforación de dichas perforaciones (Figura 5.93) se observa que la formación Guatire empieza a aflorar en la Perforación P83 a una profundidad de 15 m, en la perforación P84 a una profundidad de 17m, en la perforación P85 a una profundidad de 18m y la perforación P86 a una profundidad de 14m, lo que indica la dirección de profundidad de la cuenca paleolacustre.

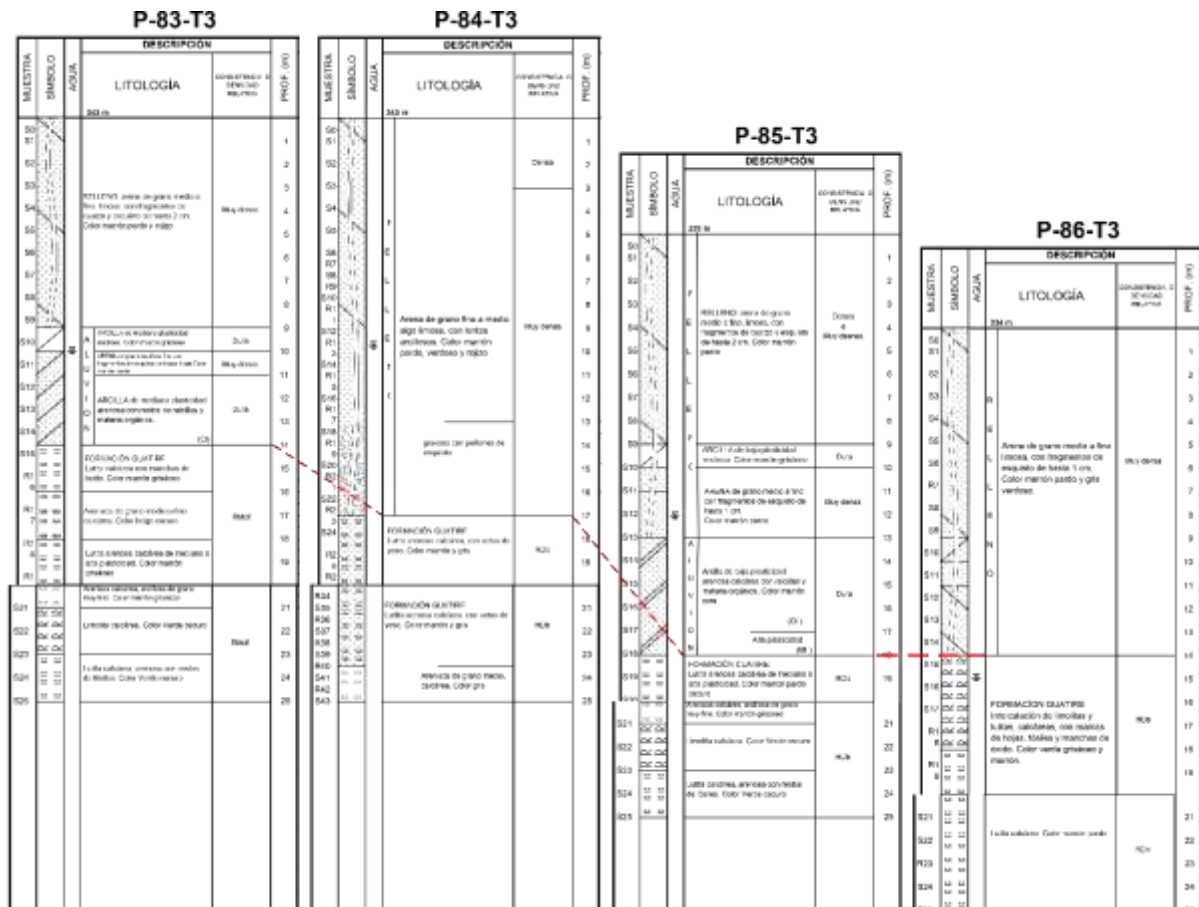


Figura 5.93 Correlación de los datos reportados en las planillas de perforación (P83 a P86) realizadas por la empresa Geomin, C.A.

Los ensayos presentados a continuación realizados en muestras de la formación Guatire están comprendidos a profundidades que van desde los 21 a 43 m, lo cual concuerda con las perforaciones realizadas por Geomin, ya que las realizadas por Geocyma se encuentran más al este siguiendo la tendencia de profundización de la Formación Guatire.

La empresa Geocyma, C.A., en el año 2014 realiza cinco perforaciones (Figura 5.94)

Tabla 5.31 Coordenadas del emplazamiento de las perforaciones realizadas por Geocyma

Perforación	Coordenadas	Cota
GT-01	1157966.00N, 766631.00E	338.310
GT-02	1157969.00N, 766708.00E	336.960
GT-03	1157971.00N, 766738.00E	336.590
GT-04	1157974.00N, 766789.00E	335.600
GT-05	1157976.00N, 766859.00E	334.561

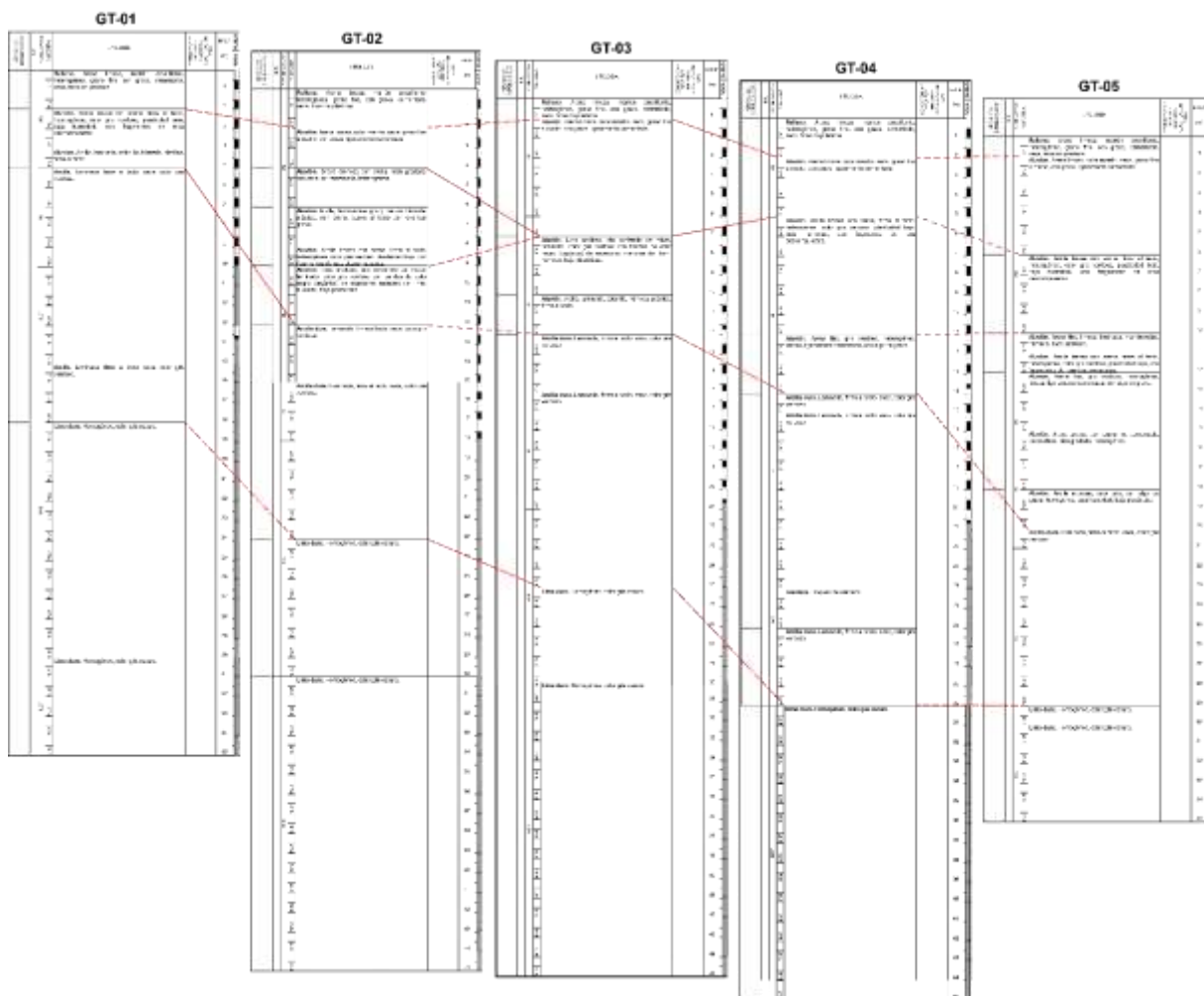


Figura 5.94 Correlación de los datos reportados en las planillas de perforación realizadas por la empresa Geocyma, C.A.

Las muestras provenientes de perforaciones para la ejecución de los ensayos, corresponden solamente a la perforación GT-01, y son limos duros, que por su resistencia a la compresión simple entrarían en el campo de la Mecánica de Roca. A fin de demostrar esta afirmación se

presenta el resumen de los ensayos de compresión simple y triaxiales realizados sobre diez y ocho (18) muestras.

Los colores de las muestras están en correspondencia por los descritos por Picard (1976), que van desde el gris amarillento a gris verdoso.

5.5.2 Caracterización Geomecánica

5.5.2.1 Ensayos de Compresión Uniaxial, Triaxial, "Slake Durability"

De los resultados obtenidos las muestras de los ensayos a compresión simple y triaxial, las muestras presentan un comportamiento de roca según el ISRM (1979), de resistencia de muy baja a baja.

Aún siendo suelos muy sobreconsolidados que tienen un comportamiento similar a la roca, bajo presencia de agua se disgregan totalmente, ya que no han alcanzado por el proceso de litificación (calidad de roca) y por lo tanto deben ser considerados como suelos duros (Tabla 5.32).

Tabla 5.32 Tabla de resultados de los ensayos de compresión simple y triaxiales

N° Lab	Perforación	Profundidad (m)	Tipo de ensayo	σ_3 (MPa)	σ_{1DES} (MPa)
892	GT-01	21.00	TRX	1.50	2.50
895	GT-01	21.00	TRX	1.50	13.40
899	GT-01	33.00	TRX	3.50	2.20
901	GT-01	23.00	TRX	2.50	10.30
901	GT-01	23.00	UCS	0.00	4.60
903	GT-01	27.00	UCS	0.00	5.10
905	GT-01	31.00	TRX	3.00	13.90
905	GT-01	31.00	UCS	0.00	5.10
907	GT-01	36.00	TRX	4.50	2.30
908	GT-01	38.00	TRX	4.00	8.40
912	GT-01	29.00	TRX	3.00	12.80
914	GT-01	33.00	TRX	3.50	15.10
916	GT-01	38.00	UCS	0.00	4.50
920	GT-01	32.00	UCS	0.00	5.70
922-1	GT-01	34.00	UCS	0.00	8.30
922-2	GT-01	34.00	UCS	0.00	7.80
924	GT-01	43.00	TRX	4.00	16.50
925	GT-01	33.00	UCS	0.00	5.50
930	GT-01	35.00	TRX	4.00	13.00

De los ensayos de compresión simple y triaxiales se elaboró el criterio de resistencia de las muestras ensayadas de acuerdo a Mohr-Coulomb y Hoek-Dietrichs, el cual se presenta en las Figura 5.95, 5.96 y 5.97.

Del ajuste simple de los datos se obtuvieron los siguientes valores: cohesión de 2.1 MPa, un ángulo de fricción de 20.91° , una resistencia a la compresión de 6.159 MPa. Con el criterio de Mohr-Coulomb, se obtuvo una cohesión de 2.12 MPa, un ángulo de fricción de 20.1° y una resistencia a la compresión de 6.159 MPa.

Para la Clasificación de Hoek-Brown, resistencia a la compresión uniaxial 15 MPa, GSI=72, $m_i=9$, factor de perturbación de 0.8, Módulo de la Roca Intacta (E_i) 37.50MPa, Relación de modulos (MR) =250. Criterio de Hoek-Brown, $m_b=1.70$, $s=0.0144$, $a=0.501$. Ajuste de Mohr-Coulomb, cohesión=1.0 MPa y un ángulo de fricción = 27.83° .

Parámetros del macizo rocoso, resistencia a la tracción = -0.127 MPa, resistencia a la compresión uniaxial = 1.789 MPa, Resistencia Global= 2.90 MPa, Módulo de deformación = 1200 MPa.





 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE Y TRIAXIALES			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 14/11/2014	Página 1 de 3	
DATOS GENERALES				
Proyecto	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG	Especímenes del análisis	892-TRX-1.5 / 895-TRX-1.5 / 899-TRX-3.5 / 901-TRX-2.5 / 901-TRX-0 / 903-TRX-0 / 905-TRX-3 / 905-TRX-0 / 907-TRX-4.5 / 908-TRX-4 / 912-TRX-3 / 914-TRX-3.5 / 920-TRX-0 / 922-A-TRX-0 / 922-B-TRX-0 / 924-TRX-4 / 925-TRX-0 / 930-TRX-4	
Origen del Espécimen	Suministrado por el cliente	Perforaciones	GT1-01/02/03/04/05	
Clasificación Geológica del Espécimen	Arcillas Duras	Formación Geológica	Cuenca del Río Guareñas - Guatire	
Tipo de Roca	Blanda	Número de puntos en el análisis	18	Puntos
Nota:	Todas las muestras corresponden al estrato denominado LUTITA en la lámina N° GG-219-00-DA, que corresponde al archivo GG-219-00-DA-01.DWG, excepto las muestras identificadas con los números 892 que corresponde a una ARCILLA LAMINADA.			

Número	Muestra	Máximo (Pico)	
		σ_{3max}	σ_{1max}
1	892-TRX-1.5	1.40	3.90
2	895-TRX-1.5	2.00	15.40
3	899-TRX-3.5	4.00	6.20
4	901-TRX-2.5	2.70	13.00
5	901-TRX-0	0.00	4.60
6	903-TRX-0	0.00	5.10
7	905-TRX-3	2.60	16.60
8	905-TRX-0	0.00	5.10

9	907-TRX-4.5	4.20	6.50
10	908-TRX-4	4.10	12.50
11	912-TRX-3	3.20	15.90
12	914-TRX-3.5	3.80	18.90
13	920-TRX-0	0.00	5.70
14	922-A-TRX-0	0.00	8.30
15	922-B-TRX-0	0.00	7.80
16	924-TRX-4	5.20	21.70
17	925-TRX-0	0.00	5.50
18	930-TRX-4	4.30	17.30

<p>Procedimiento</p> <ol style="list-style-type: none"> Para realizar el análisis de procedió a dividir la población de los ensayos en dos partes, los esfuerzos picos o máximos y los esfuerzos residuales, analizándolos de manera independiente. Los análisis se realizaran por los criterios de Mohr-Coulomb y Hoek-Diederichs (2006). <ol style="list-style-type: none"> Mohr-Coulomb, determina los parámetros de cohesión c y ángulo de fricción ϕ Hoek-Diederichs, Se elaborarán las envolventes de falla a partir de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio y se establecerán los parámetros mencionados anteriormente de acuerdo al criterio a emplear. Se empleará el programa RocData V4.0
--

Figura 5.95 Análisis de los resultados de compresión simple y triaxiales de la Estación Guatire 1

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE Y TRIAXIALES			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 14/11/2014	Página 2 de 3	

Criterio de Mohr-Coulomb

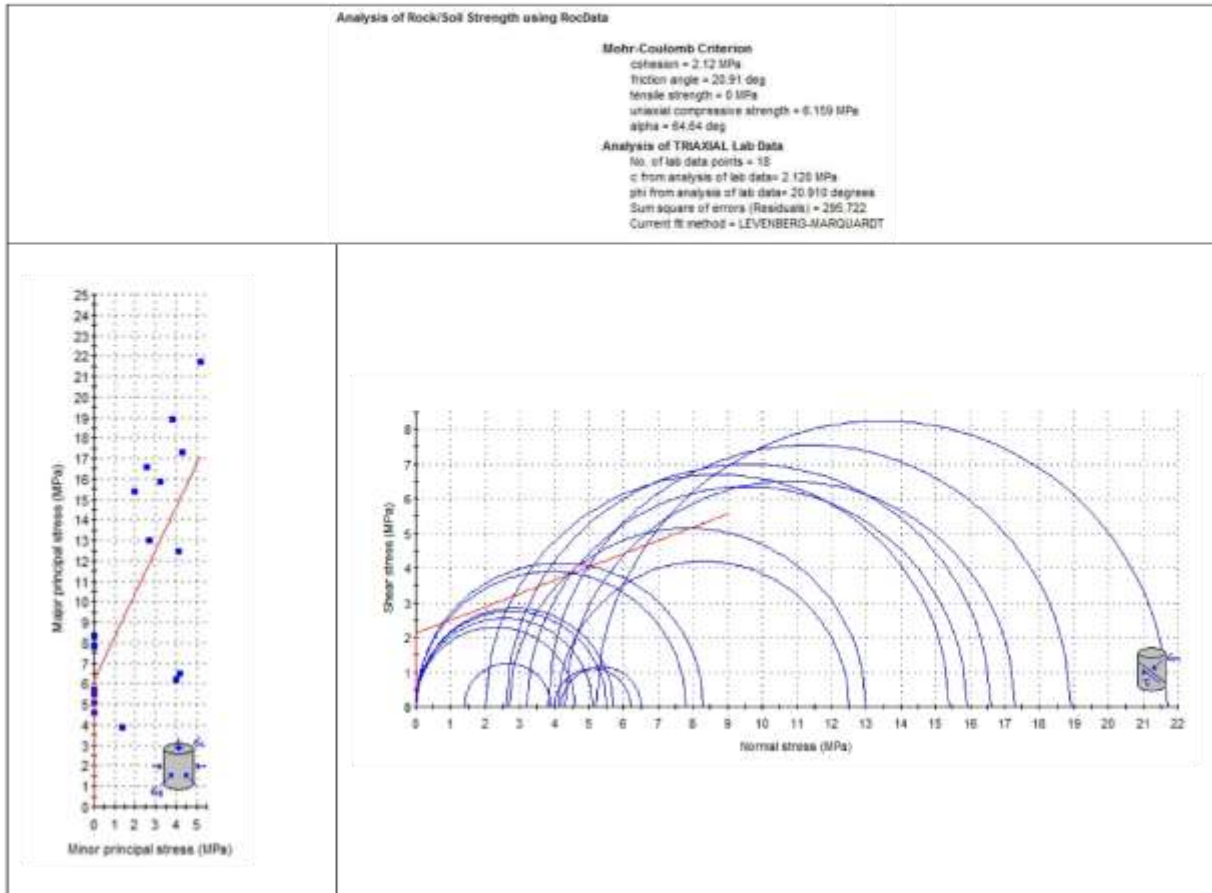






Figura 5.96 Análisis de los resultados de compresión simple y triaxiales de la Estación Guatire 1 (continuación)

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE Y TRIAXIALES			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 14/11/2014	Página 3 de 3	

Criterio de Hoek-Diederichs

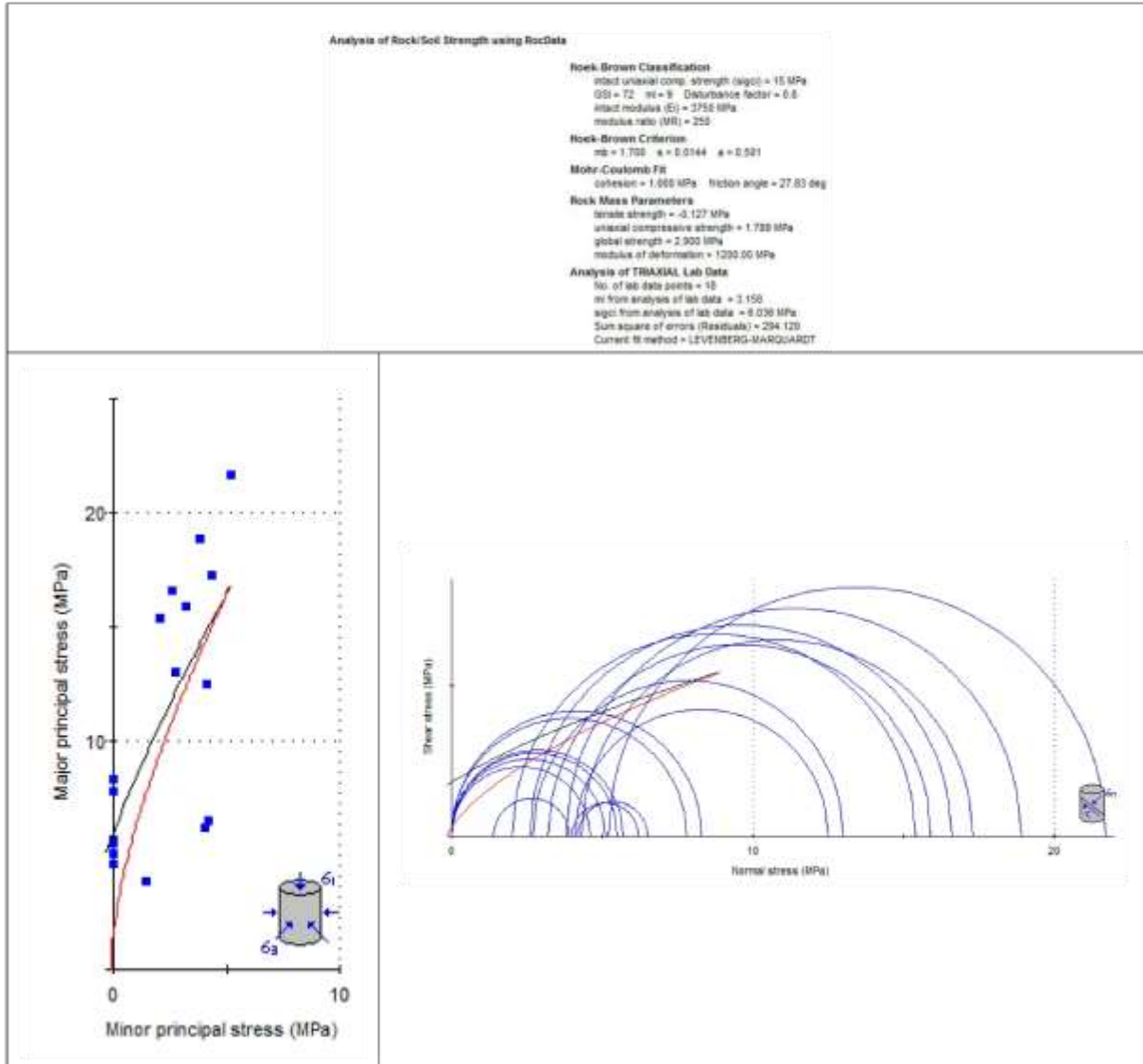






Figura 5.97 Análisis de los resultados de compresión simple y triaxiales de la Estación Guatire 1 (continuación)

Para comprobar que las muestras ensayadas son un suelo o una roca, se procedió a realizar doce (12) ensayos de meteorización acelerada (slake durability) por el método de la jarra, que consiste en observar el comportamiento de la muestra en presencia de agua a temperatura

ambiente. Los resultados obtenidos para todas las muestras es que es un suelo muy duro. Solo se presentará un ensayo a manera de ejemplo (Figura 5.98).

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO SLAKE-DURABILITY INDEX (Jar-Slake, I_J)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 1 de 1	
M. CASTILLEJO		03-10-2014	Especimen: 892	

NORMAS UTILIZADAS	ISRM	1979 - Suggested Methods for Determining Slake-Durability Index Properties
	ASTM	D4644-08 - Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks
Método A	Jar-Slake Test	
	Es un método cualitativo con seis grados descriptivos de meteorización o desintegración determinado de la observación. El Jar-Slake, es un ensayo básico recomendado de descarte. La reacción en el Jar-Slake generalmente ocurre dentro de los primeros 10 a 30 minutos. Se recomienda una observación estándar de 24 horas. Con la experiencia obtenida para una formación en particular, el tiempo del ensayo puede ser reducida a 2 horas o menos.	
DATOS GENERALES		I _J Categorías descriptivas de comportamiento
Equipo	Laboratorio	1 Se degrada en un montón de copos o barro
Proyecto	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG	2 Se degrada rápidamente y / o formularios muchos granos
		3 Se degrada rápidamente y / o formularios pocas granos
		4 Escapadas lentamente y / o formas varias fracturas
		5 Rompe algunas fracturas lentamente y / o pocas fracturas
Especimen	892	6 Sin cambio
Origen del Especimen	Suministrado por el cliente	Observaciones:
Coordenadas de la muestra		
Muestra	M11	
Perforación	GT1-01	
Clasificación Geológica del Especimen	Limo Duro	
Formación Geológica	Cuenca del Río Guarenas - Guatire	
Tipo de Roca	Blanda	
Peso de la muestra	- gramos	
Clasificación final de la Muestra	1 - Se degrada en un montón de copos o barro	

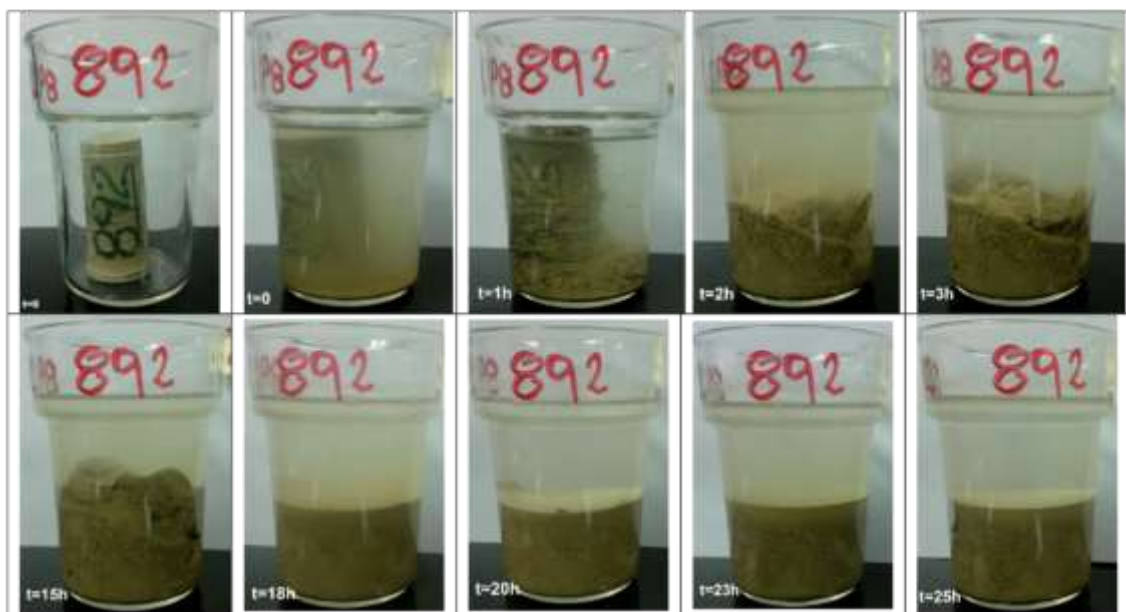


Figura 5.98 Ensayo de Meteorización Acelerada (Jar Slake) sobre la muestra de laboratorio 892





5.5.2.2 Ensayos de Resistencia al Corte

A continuación se presentarán los ensayos de resistencia al corte sobre estos limos duros. En esta oportunidad se realizaron con Carga Normal Constante (CNL) y también se ejecutaron ensayos bajo la modalidad de Rigidez Normal Constante (CNS), para observar el comportamiento de los limos duros, ya que estos se encontrarían totalmente confinados y con una carga litostática considerable, la posibilidad que el desplazamiento de las fracturas ocurriera con un movimiento relativo de los bloques, en consecuencia, para que el pilote se pueda desplazar debe superar la rigidez del limo.

En los casos de CNS, solo se realizó el ensayo en la condición limo-limo, faltando verificar la condición de adherencia de concreto-limo.

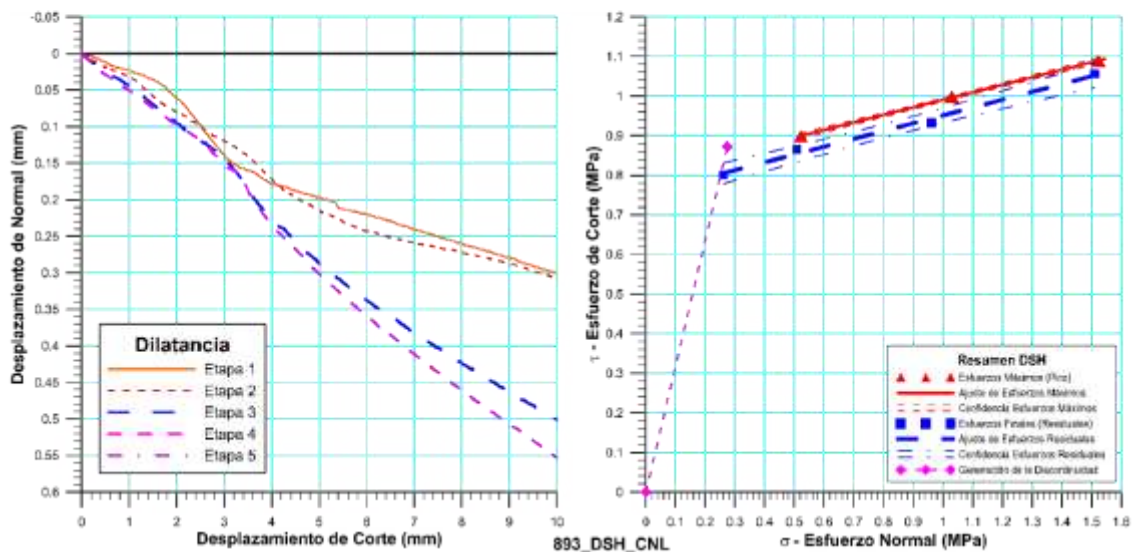
Primero se mostrarán los ensayos realizados en la modalidad CNL y posteriormente se agruparan los realizados en CNS.

5.5.2.2.1 *Espécimen 893 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  R.F: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 893	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27408	0.87239	0.26098	0.80019
2	0.52167	0.89869	0.50827	0.86627
3	1.03019	0.99818	0.96148	0.93216
4	1.52435	1.08869	1.51108	1.05602



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(10.73) * s + 0.80$	$t = \tan(10.38) * s + 0.76$
Cohesión (c) (MPa)	0.80	0.76
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	10.73	10.38
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.03	3.00
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.00	0.87
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.02	0.01
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.97

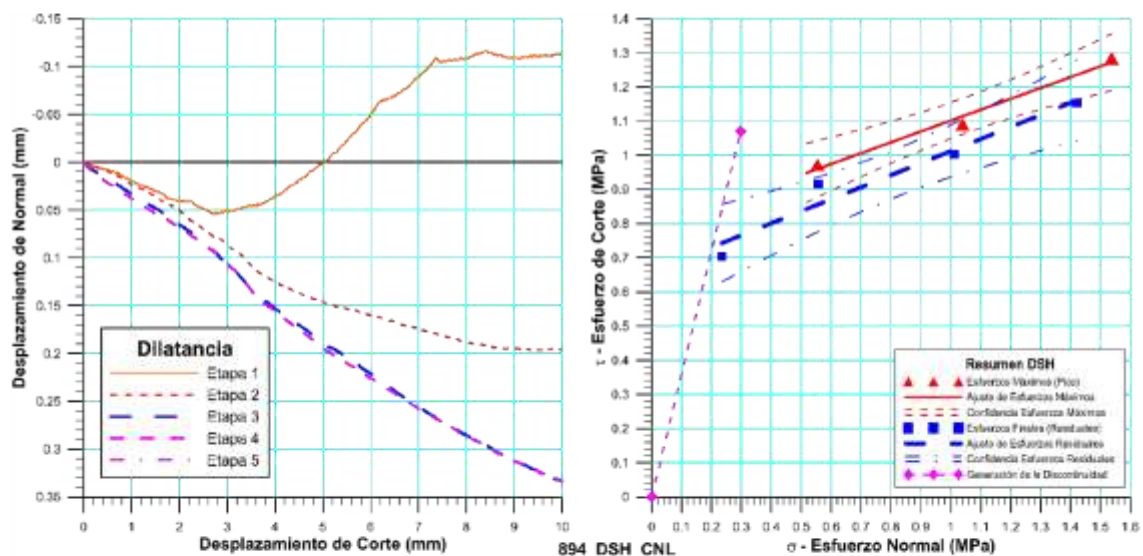
Figura 5.99 *Espécimen 893_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2 *Espécimen 894 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMC GG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 894	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.29713	1.07068	0.23451	0.70421
2	0.55413	0.97213	0.55707	0.91565
3	1.03932	1.09013	1.01153	1.00369
4	1.53781	1.28420	1.42173	1.15315



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(13.67) * s + 0.78$	$t = \tan(19.39) * s + 0.66$
Cohesión (c) (MPa)	0.78	0.66
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	13.67	19.39
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.04	0.81
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.12	0.94
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.05	0.10
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.98	0.95

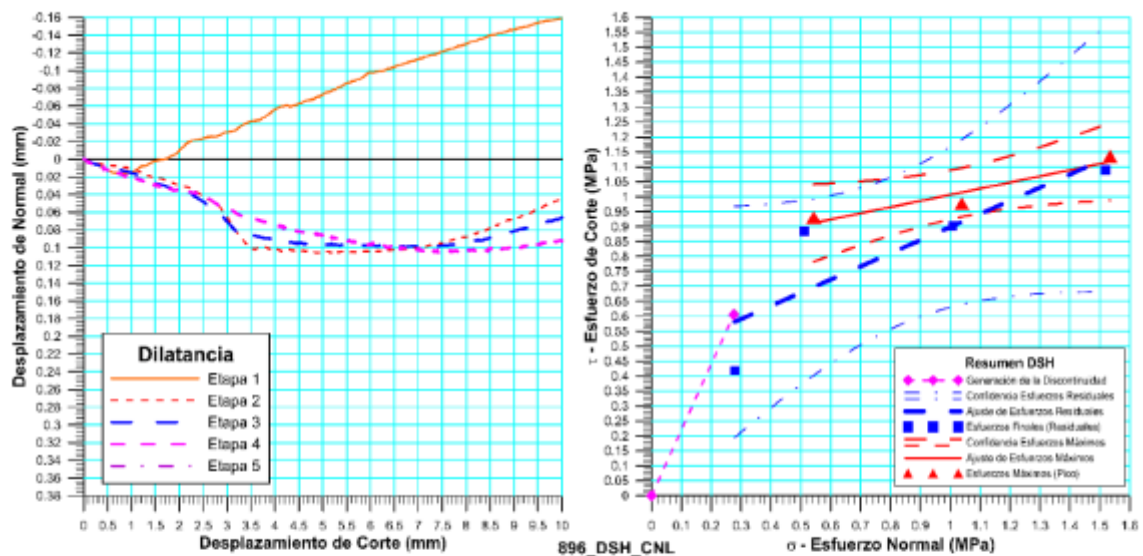
Figura 5.100 *Espécimen 894_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.3 *Espécimen 896 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-2000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 896	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27515	0.60591	0.27901	0.41891
2	0.54250	0.93089	0.51153	0.88440
3	1.03822	0.97718	1.00763	0.90308
4	1.53414	1.13542	1.51914	1.08925



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(5.33) * s + 0.80$	$t = \tan(23.74) * s + 0.46$
Cohesión (c) (MPa)	0.80	0.46
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	5.33	23.74
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.04	0.83
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.01	0.82
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.07
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.02	0.18
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.91	0.72

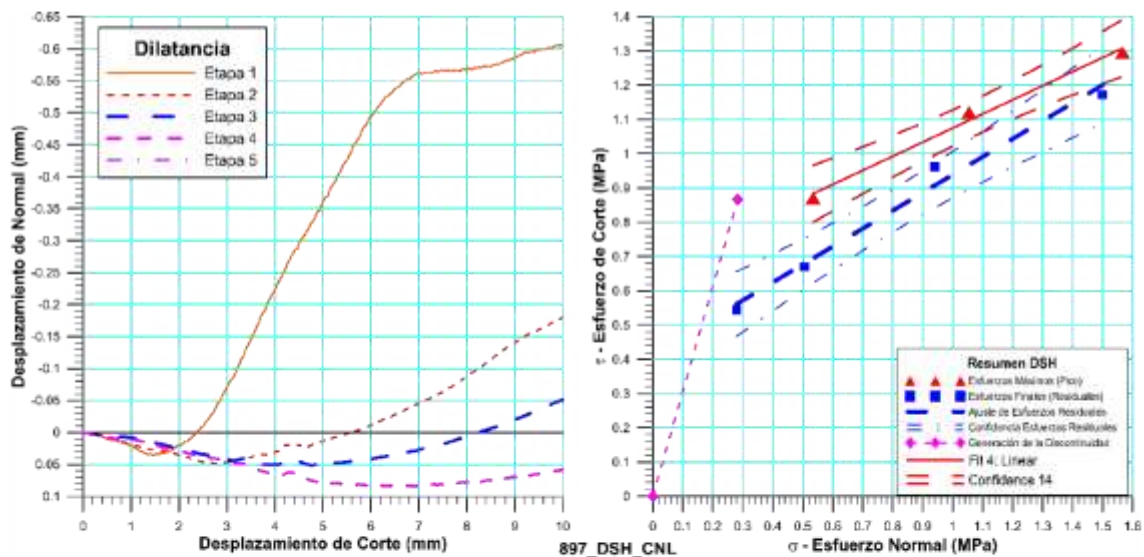
Figura 5.101 *Espécimen 896_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.4 *Espécimen 897 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 897	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.28264	0.86660	0.27877	0.54413
2	0.53449	0.87128	0.50513	0.66951
3	1.05451	1.12128	0.94060	0.96242
4	1.56628	1.29604	1.49825	1.17185



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(25.68) * s + 0.66$	$t = \tan(27.64) * s + 0.41$
Cohesión (c) (MPa)	0.66	0.41
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	25.68	27.64
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.05	0.81
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.10	0.84
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.09	0.24
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.98

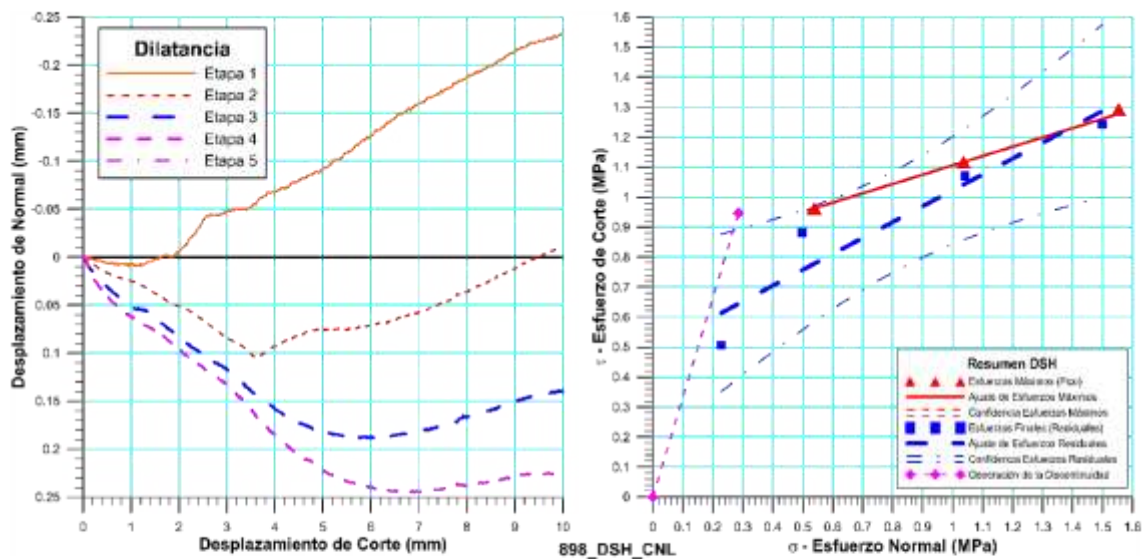
Figura 5.102 *Espécimen 897_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.5 *Espécimen 898 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMGCG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 898	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.28546	0.94665	0.22821	0.50540
2	0.53886	0.96236	0.49921	0.88230
3	1.03631	1.11688	1.04120	1.07075
4	1.55379	1.29274	1.49794	1.24235



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(17.26) * s + 0.78$	$t = \tan(27.91) * s + 0.49$
Cohesión (c) (MPa)	0.78	0.49
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	17.26	27.91
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.04	0.82
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.12	0.93
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.03
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.05	0.27
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.90

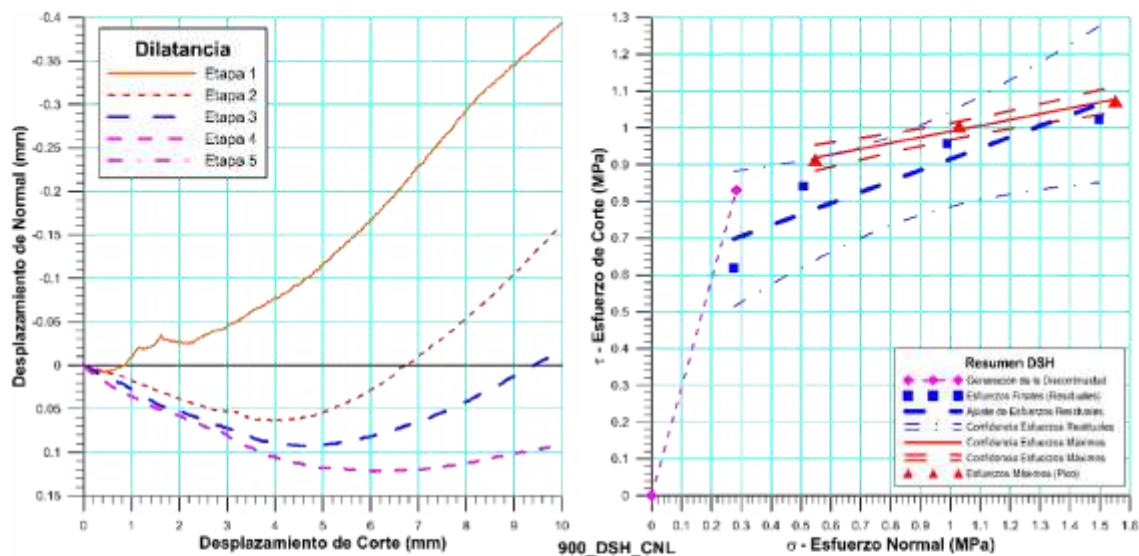
Figura 5.103 *Espécimen 898_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.6 *Espécimen 900 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-2000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 900	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.28346	0.82991	0.27472	0.61871
2	0.54781	0.91298	0.50824	0.84147
3	1.02841	1.00470	0.98907	0.95702
4	1.55211	1.07239	1.49712	1.02287



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(10.57) * s + 0.80$	$t = \tan(16.67) * s + 0.62$
Cohesión (c) (MPa)	0.80	0.62
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	10.57	16.67
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	0.85	0.82
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.95	0.86
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.02
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.03	0.08
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.97	0.84

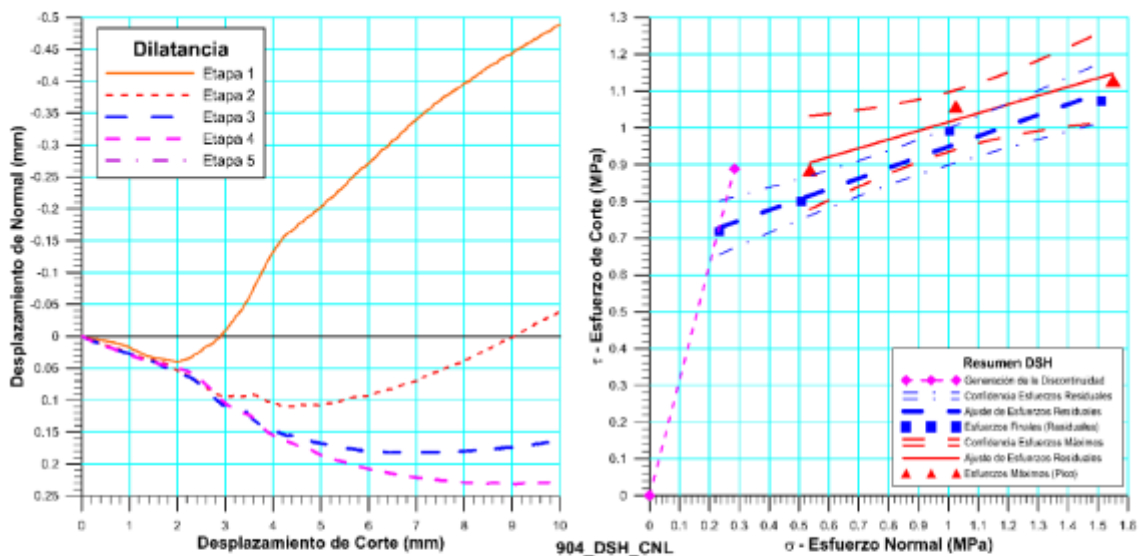
Figura 5.104 *Espécimen 900_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.7 *Espécimen 904 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-2000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 904	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.28341	0.88803	0.23351	0.71770
2	0.53650	0.88608	0.50824	0.80022
3	1.02451	1.05831	1.00275	0.98996
4	1.55076	1.12916	1.51090	1.07239



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(19.44) * s + 0.78$	$t = \tan(16.03) * s + 0.66$
Cohesión (c) (MPa)	0.78	0.66
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	19.44	16.03
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.04	0.81
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.02	0.90
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.03	0.08
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.93	0.97

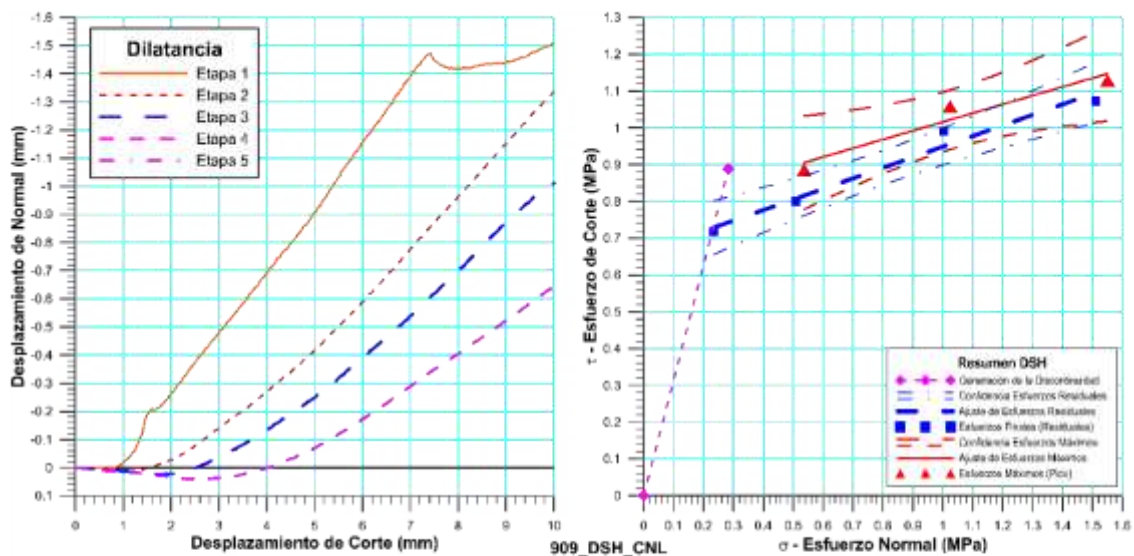
Figura 5.105 *Espécimen 904_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.8 *Espécimen 909 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 909	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.28248	1.95804	0.26099	0.84147
2	0.55452	1.43771	0.50824	1.33645
3	1.04878	2.11047	0.98910	1.94710
4	2.04010	2.92741	2.00562	2.83807



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(53.70) * s + 0.97$	$t = \tan(47.74) * s + 0.71$
Cohesión (c) (MPa)	0.97	0.71
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	53.70	47.74
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.21	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.16	1.74
Suma de los residuos cuadrados	0.02	0.06
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1.09	2.16
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.98	0.97

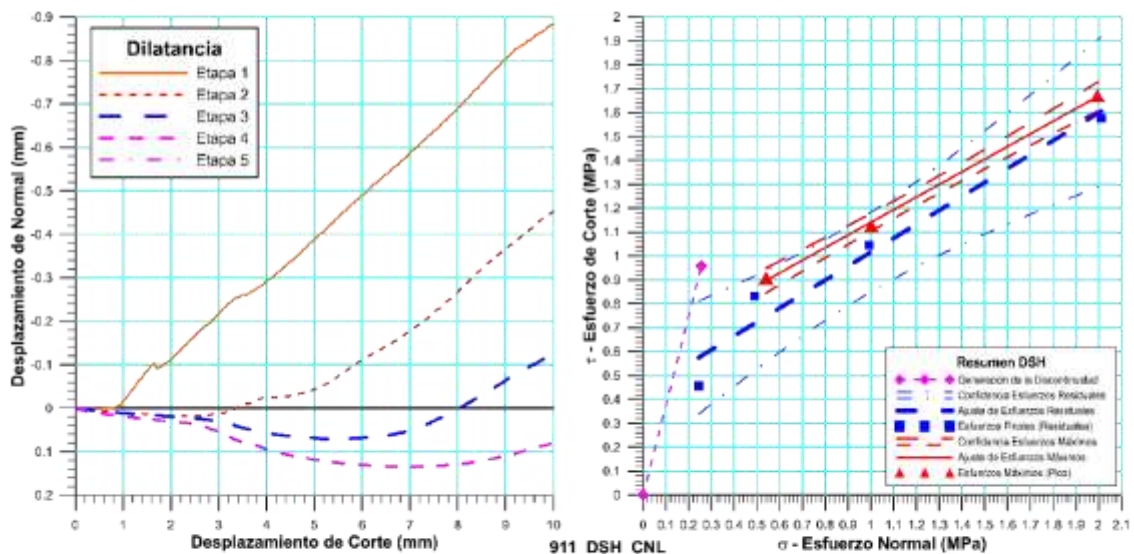
Figura 5.106 *Espécimen 909_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.9 *Espécimen 911 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 911	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.25610	0.95780	0.24465	0.45711
2	0.54018	0.90838	0.48929	0.83260
3	1.00199	1.12540	0.99221	1.04486
4	1.99508	1.67117	2.01148	1.57535



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(25.17) * s + 0.61$	$t = \tan(30.24) * s + 0.43$
Cohesión (c) (MPa)	0.61	0.43
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	25.17	30.24
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.18	0.93
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.23	0.98
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.03
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.31	0.62
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.96

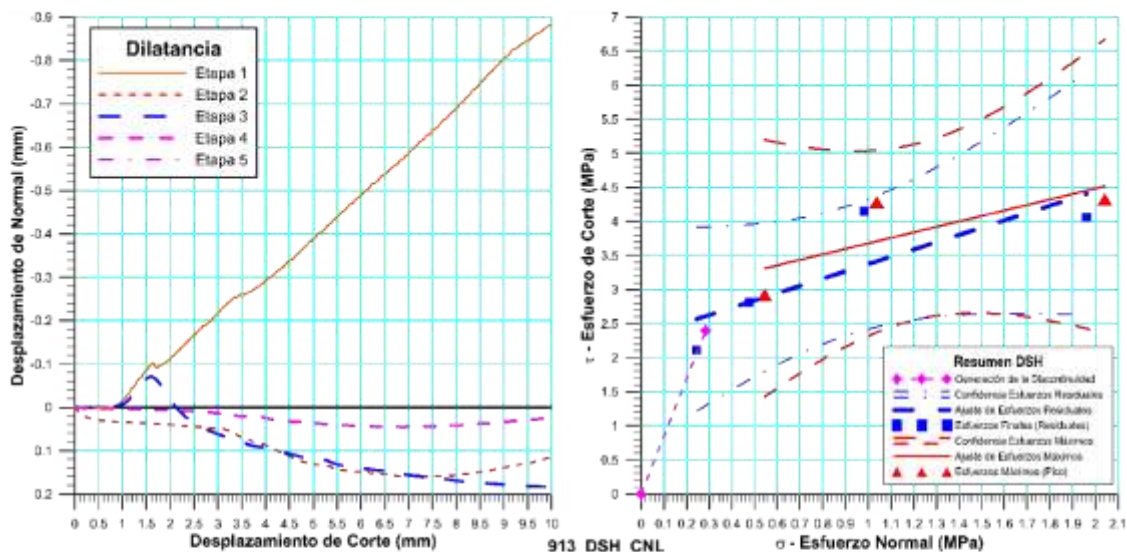
Figura 5.107 *Espécimen 911_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.10 *Espécimen 913 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-2000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 913	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.28401	2.39541	0.24514	2.11313
2	0.54435	2.92509	0.47585	2.81453
3	1.03789	4.28539	0.98057	4.14832
4	2.04177	4.32638	1.96126	4.06198



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(70.06) * s + 2.87$	$t = \tan(46.92) * s + 2.31$
Cohesión (c) (MPa)	2.87	2.31
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	70.06	46.92
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.21	0.92
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.85	3.28
Suma de los residuos cuadrados	0.52	0.95
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.75	1.99
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.59	0.68

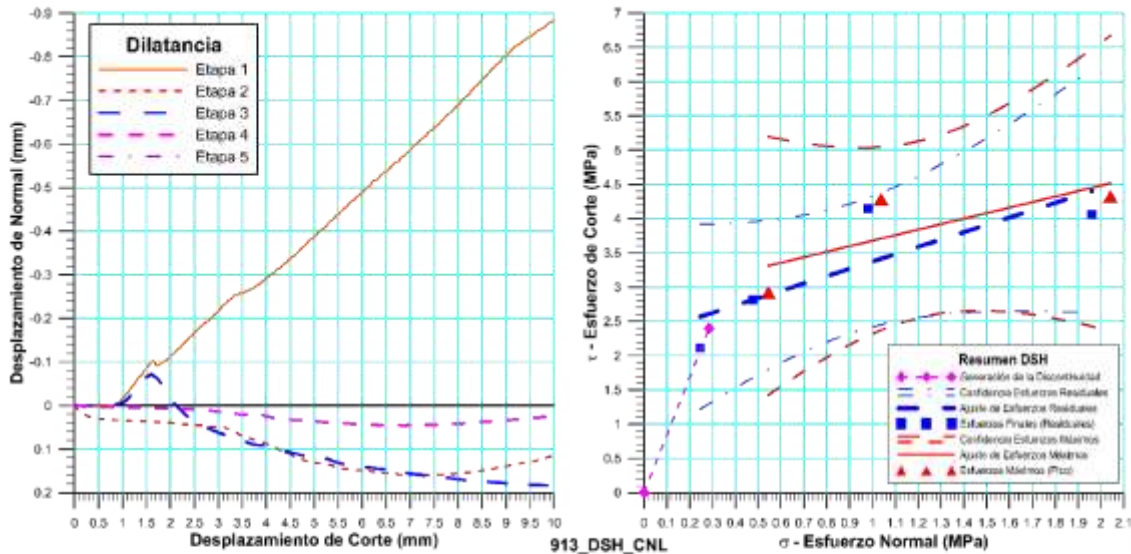
Figura 5.108 Espécimen 913_DSH-CNL-Estación Guatire I

5.5.2.2.11 *Espécimen 915 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-2000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 915	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.28248	0.98560	0.25764	0.76455
2	0.55497	0.99991	0.50005	0.93736
3	1.04405	1.25406	0.96996	1.13776
4	1.54748	1.51024	1.47110	1.34803



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(27.46) * s + 0.72$	$t = \tan(25.05) * s + 0.67$
Cohesión (c) (MPa)	0.72	0.67
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	27.46	25.05
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.05	0.80
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.25	1.05
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.13	0.19
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.99

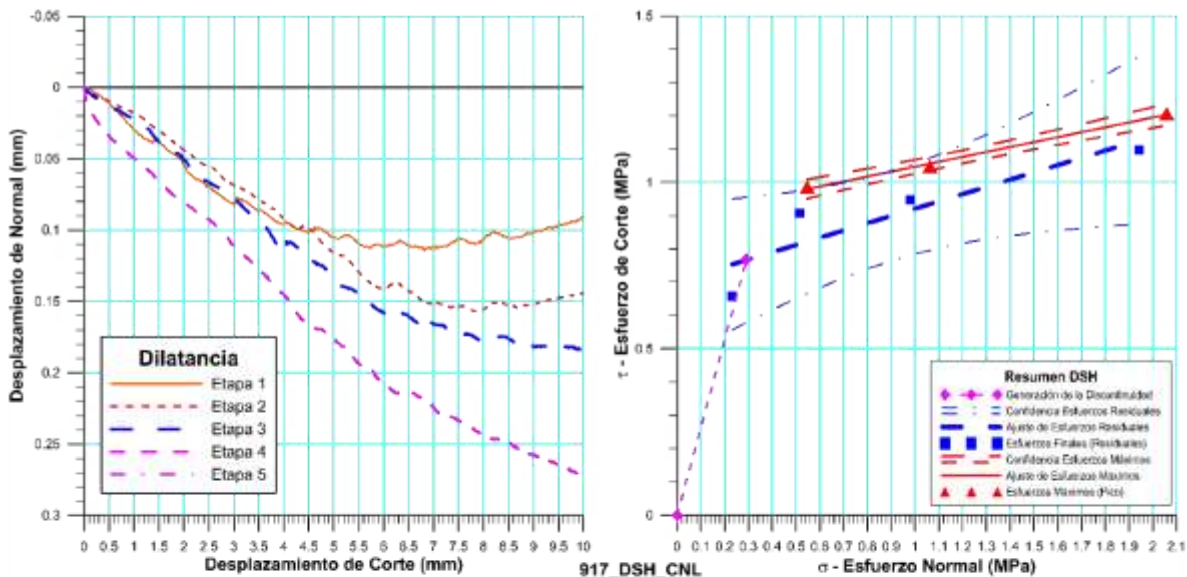
Figura 5.109 Espécimen 915_DSH-CNL-Estación Guatire I

5.5.2.2.12 *Espécimen 917 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7	
M. CASTILLEJO	09/2016	03-10-2014	Espécimen: 917	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.29157	0.76855	0.23258	0.65849
2	0.54701	0.98557	0.51492	0.90779
3	1.06284	1.04723	0.98014	0.94782
4	2.05819	1.20619	1.94360	1.09744



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(6.82) * s + 0.90$	$t = \tan(12.29) * s + 0.70$
Cohesión (c) (MPa)	0.90	0.70
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	6.82	12.29
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.22	0.92
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.08	0.90
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.02
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.03	0.08
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.80

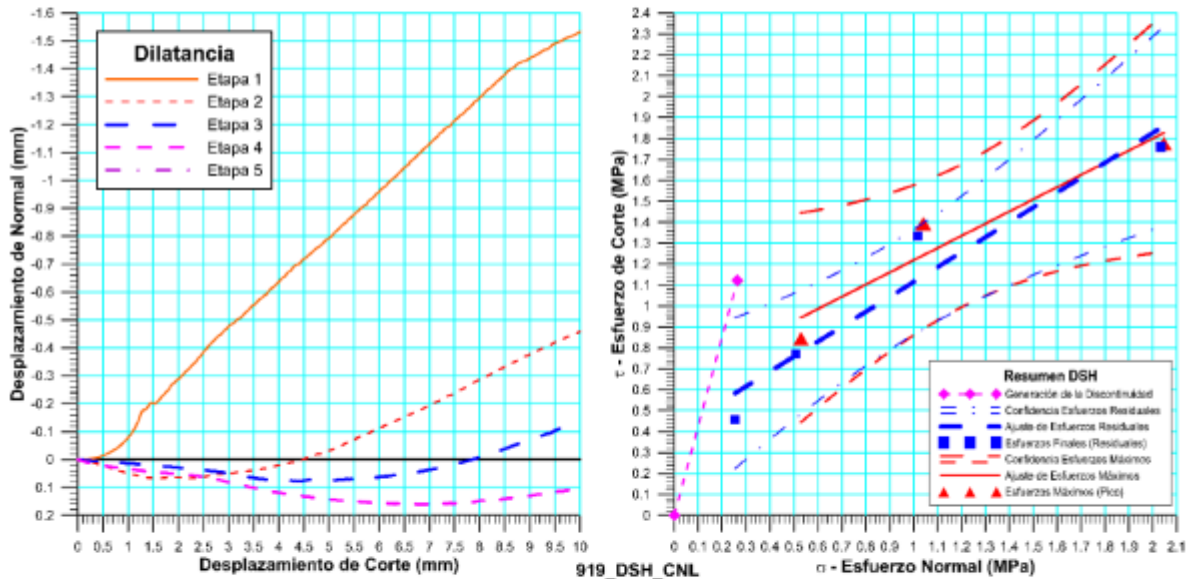
Figura 5.110 Espécimen 917_DSH-CNL-Estación Guatire I

5.5.2.2.13 *Espécimen 919 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 919	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26345	1.12132	0.25416	0.45792
2	0.52984	0.84326	0.50834	0.77128
3	1.04069	1.39427	1.01697	1.33404
4	2.04676	1.77556	2.03344	1.75954



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(47.17) * s + 0.64$	$t = \tan(35.45) * s + 0.40$
Cohesión (c) (MPa)	0.64	0.40
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	47.17	35.45
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.21	0.95
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.34	1.08
Suma de los residuos cuadrados	0.04	0.07
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.40	0.94
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.92	0.93

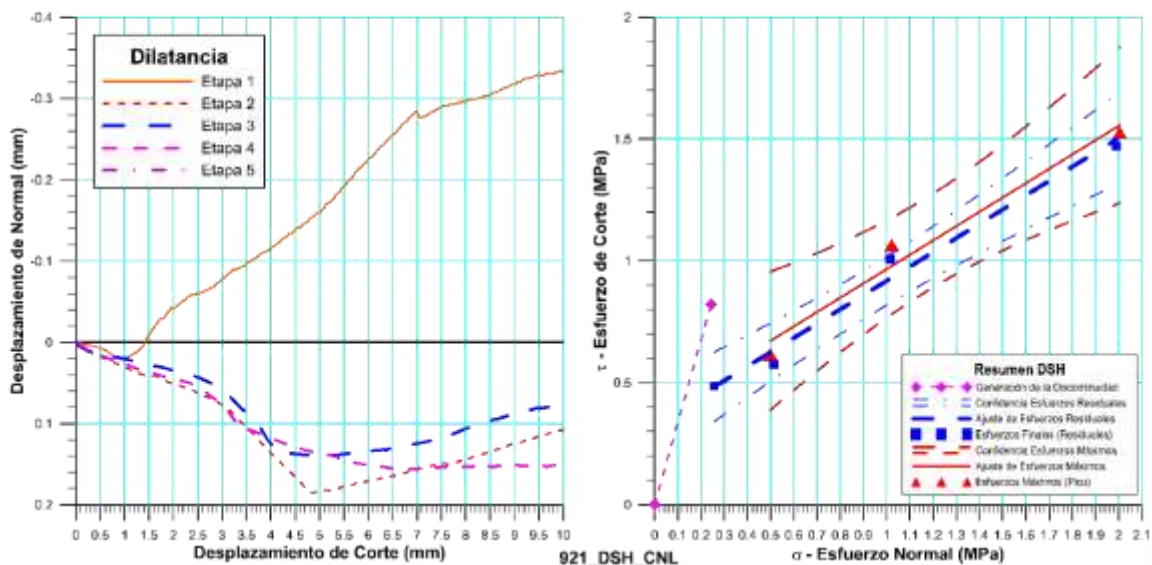
Figura 5.111 Espécimen 919_DSH-CNL-Estación Guatire I

5.5.2.2.14 *Espécimen 921 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 921	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.24345	0.82156	0.25687	0.48716
2	0.49919	0.61581	0.51372	0.57646
3	1.02141	1.06544	1.01401	1.00686
4	2.00427	1.52686	1.98922	1.47100



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(40.73) * s + 0.38$	$t = \tan(30.34) * s + 0.33$
Cohesión (c) (MPa)	0.38	0.33
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	40.73	30.34
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.17	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.07	0.89
Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.40	0.60
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.97	0.98

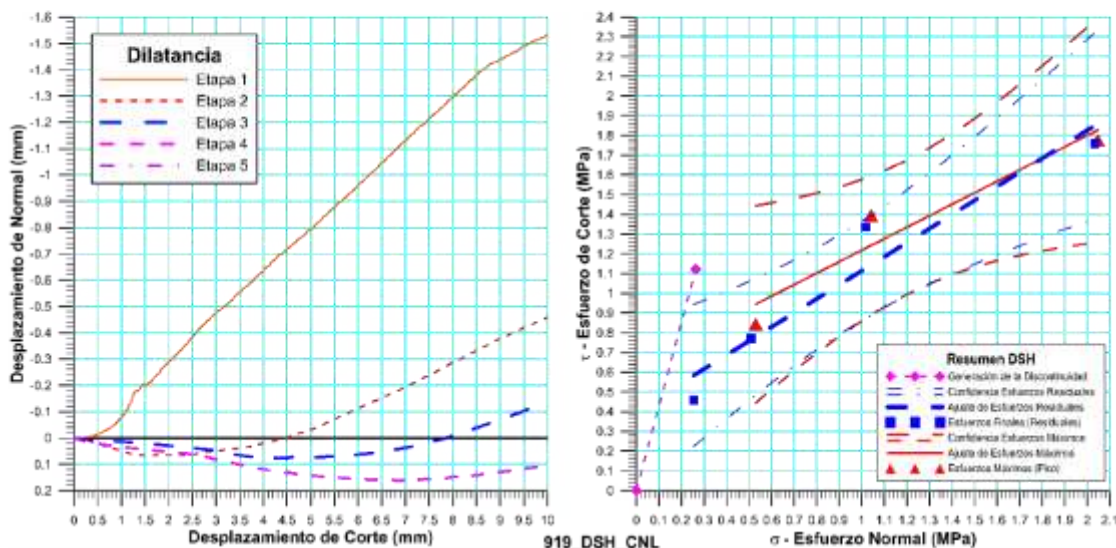
Figura 5.112 Espécimen 921_DSH-CNL-Estación Guatire I

5.5.2.2.15 *Espécimen 923 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 923	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.24765	0.74366	0.23954	0.65764
2	0.49408	0.96183	0.49618	0.92481
3	1.00698	1.12754	0.97539	1.00716
4	2.01495	1.42549	2.00191	1.35644



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	$t = \tan(17.90) * s + 0.82$	$t = \tan(19.73) * s + 0.65$
Ecuación de la recta	0.82	0.65
Cohesión (c) (MPa)	17.90	19.73
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	3	4
Número de puntos	1.17	0.93
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.17	0.99
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.00	0.02
Suma de los residuos cuadrados	0.11	0.23
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1.00	0.94
Coefficiente de Determinación (R^2)	$t = \tan(17.90) * s + 0.82$	$t = \tan(19.73) * s + 0.65$

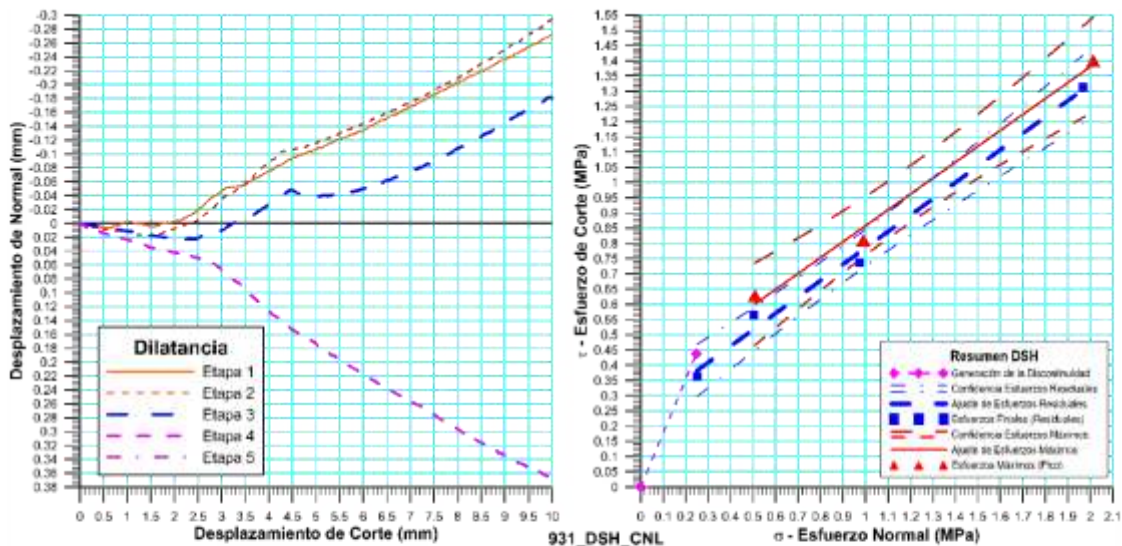
Figura 5.113 *Espécimen 923_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.16 *Espécimen 931 - CNL*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-2000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 6 de 7 Espécimen: 931	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.24802	0.43811	0.25215	0.36344
2	0.50882	0.62914	0.50428	0.56533
3	0.99040	0.81110	0.97497	0.73698
4	2.01315	1.40048	1.96681	1.31247



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(20.70) * s + 0.33$	$t = \tan(28.26) * s + 0.25$
Cohesión (c) (MPa)	0.33	0.25
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	20.70	28.26
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.17	0.92
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.95	0.74
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.32	0.50
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.99

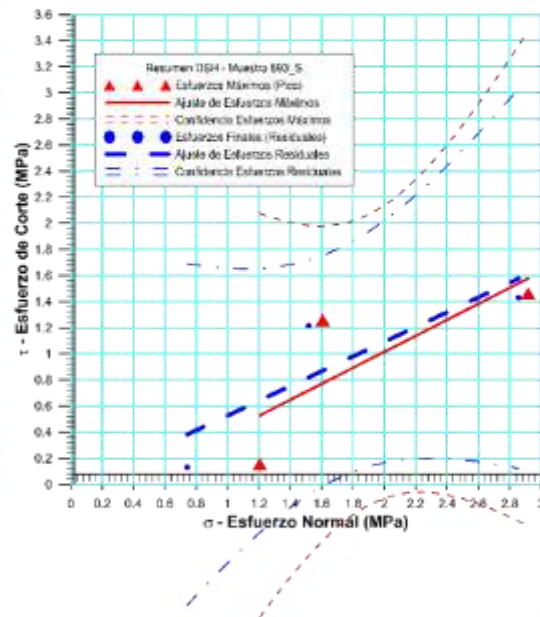
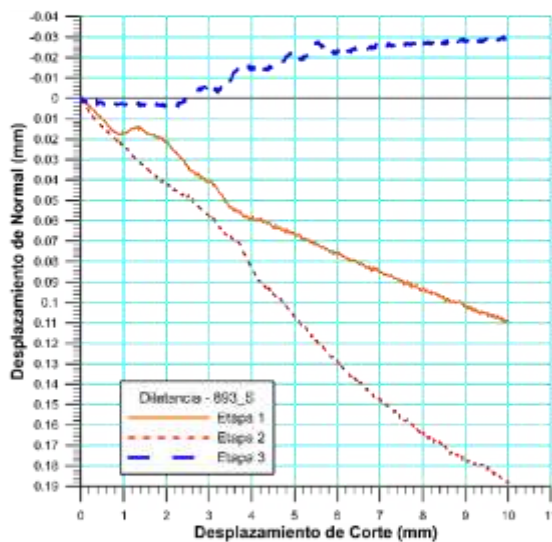
Figura 5.114 *Espécimen 931_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.2.17 *Espécimen 893 – CNS*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNS)		  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG		
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión: 09/2016	Fecha: 03-10-2014	Página 5 de 6 Espécimen: 893-S

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	1.60682	1.25912	1.51807	1.21562
2	2.91779	1.46350	2.85658	1.43130
3	1.20527	0.15549	0.74184	0.12979



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(37.37) * s + 0.00$	$t = \tan(28.70) * s + 0.00$
Cohesión (c) (MPa)	0.00	0.00
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	37.37	28.70
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.06	1.71
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.96	0.93
Suma de los residuos cuadrados	0.39	0.24
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.60	0.73
Coefficiente de Determinación (R ²)	0.61	0.75

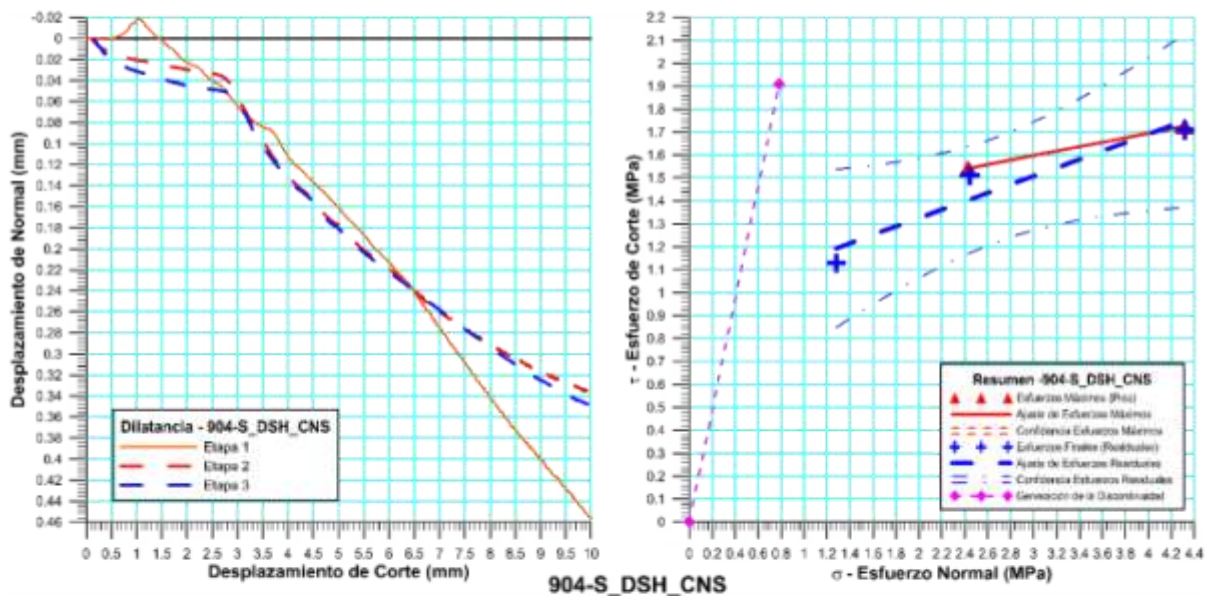
Figura 5.115 Espécimen 893_DSH-CNL-Estación Guatire I

5.5.2.2.18 *Espécimen 904 – CNS*

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – RIGIDEZ NORML CONSTANTE - (CNS) SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMGCG			 RIF: G-2000062-7
	Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 12/09/2016		Página 5 de 6 Espécimen:904_CNS

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	-	-	-
1	0.78296	1.90927	1.27961	1.12973	
2	2.43095	1.54245	2.44589	1.51020	
3	4.31546	1.72509	4.31546	1.70858	



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(5.54) * s + 1.31$	$t = \tan(10.36) * s + 0.96$
Cohesión (c) (MPa)	1.31	0.96
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	5.54	10.36
Número de puntos	2	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	3.37	2.68
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.63	1.45
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.02
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.16
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.91

Figura 5.116 *Espécimen 904_DSH-CNL-Estación Guatire I*

5.5.2.3 *Envolvente de Falla*

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 1 de 6	
M. CASTILLEJO		14/11/2014		

DATOS GENERALES			
Proyecto	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG	Especímenes del análisis	893/894/896/897/898/900/904/909/911/913/915/917/919/921/923/931/893-S/896-S/904-S
Origen del Especímen	Suministrado por el cliente	Perforaciones	GT1-01/02/03/04/05
Clasificación Geológica del Especímen	Arcillas Duras	Formación Geológica	Cuenca del Río Guarenas - Guatire
Tipo de Roca	Blanda	Número de puntos en el análisis	71 Puntos
Nota:	Todas las muestras corresponden al estrato denominado LUTITA en la lámina N° GG-219-00-DA, que corresponde al archivo GG-219-00-DA-01.DWG, excepto las muestras identificadas con los números 892 que corresponde a una ARCILLA LAMINADA.		

Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_x	τ	σ_x	τ	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}
1	893	1	0.274076	0.872395	0.260981	0.800194	-0.598319	1.146470	-0.539213	1.061176
2	893	2	0.521674	0.898689	0.508274	0.866270	-0.377015	1.420363	-0.357996	1.374544
3	893	3	1.030189	0.998182	0.961480	0.932157	0.032008	2.028371	0.029323	1.893637
4	893	4	1.524352	1.088689	1.511085	1.056024	0.435663	2.613042	0.455060	2.567109
5	893-S	1	1.606818	1.259118	1.518070	1.215624	0.347700	2.865936	0.302445	2.733694
6	893-S	2	2.917787	1.463504	2.856584	1.431298	1.454284	4.381291	1.425286	4.287883
7	893-S	3	1.205272	0.155491	0.741840	0.129788	1.049781	1.360764	0.612053	0.871628
8	896	1	0.297126	1.070678	0.234511	0.704210	-0.773552	1.367804	-0.469699	0.938721
9	896	2	0.554133	0.972125	0.557072	0.915650	-0.417992	1.526259	-0.358578	1.472723
10	896	3	1.039318	1.090134	1.011527	1.003693	-0.050815	2.129452	0.007834	2.015220
11	896	4	1.537805	1.284201	1.421728	1.153146	0.253605	2.822006	0.268582	2.574873
12	897	1	0.282639	0.866596	0.278774	0.544129	-0.583957	1.149236	-0.265355	0.822904
13	897	2	0.534485	0.871284	0.505134	0.669509	-0.336799	1.405769	-0.164376	1.174643
14	897	3	1.054512	1.121278	0.940596	0.962420	-0.066766	2.175791	-0.021825	1.903016
15	897	4	1.566280	1.296035	1.498249	1.171848	0.270245	2.862315	0.326401	2.670097
16	898	1	0.285458	0.946646	0.228207	0.505396	-0.661187	1.232104	-0.277189	0.733603
17	898	2	0.538858	0.962358	0.499205	0.882299	-0.423500	1.501216	-0.383094	1.381505
18	898	3	1.036308	1.116876	1.041200	1.070751	-0.080568	2.153184	-0.029551	2.111951
19	898	4	1.553785	1.292736	1.497944	1.242347	0.261049	2.846521	0.255598	2.740291
20	900	1	0.283457	0.829909	0.274716	0.618707	-0.546453	1.113366	-0.343990	0.893423
21	900	2	0.547813	0.912984	0.508243	0.841467	-0.365172	1.460797	-0.333224	1.349709
22	900	3	1.028413	1.004696	0.989074	0.957021	0.023717	2.033110	0.032053	1.946095
23	900	4	1.552105	1.072392	1.497118	1.022866	0.479713	2.624497	0.474251	2.519984
24	904	1	0.283406	0.888034	0.233511	0.717700	-0.604628	1.171440	-0.484189	0.951211
25	904	2	0.536504	0.886080	0.508243	0.800219	-0.349576	1.422584	-0.291976	1.308462
26	904	3	1.024506	1.058305	1.002748	0.989961	-0.033799	2.082812	0.012787	1.992709
27	904	4	1.550765	1.129161	1.510898	1.072392	0.421603	2.679926	0.438506	2.583290
28	909	1	0.282479	1.958045	0.260989	0.841468	-1.675566	2.240524	-0.580479	1.102457

Figura 5.117 Análisis de datos para los ensayos de corte Estación Guatire 1








 		LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG						 RIF: G-20000062-7		
Cálculo:			Revisión:		Fecha:		Página 2 de 6			
M. CASTILLEJO					14/11/2014					
Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_n	τ	σ_n	τ	σ_{max}	σ_{max}	σ_{min}	σ_{min}
29	909	2	0.554518	1.437714	0.508243	1.336447	-0.883196	1.992232	-0.828204	1.844689
30	909	3	1.048778	2.110474	0.989105	1.947103	-1.061696	3.159252	-0.957998	2.936208
31	909	4	2.040101	2.927410	2.005621	2.838066	-0.887309	4.967512	-0.832446	4.843687
32	911	1	0.256101	0.957804	0.244647	0.457112	-0.701703	1.213905	-0.212465	0.701758
33	911	2	0.540183	0.908380	0.489292	0.832596	-0.368197	1.448563	-0.343304	1.321889
34	911	3	1.001995	1.125396	0.992207	1.044859	-0.123401	2.127390	-0.052651	2.037066
35	911	4	1.995078	1.671169	2.011475	1.575355	0.323909	3.666246	0.436121	3.586830
36	913	1	0.284012	2.395410	0.245142	2.113133	-2.111398	2.679422	-1.867991	2.358275
37	913	2	0.544347	2.925086	0.475849	2.814534	-2.380739	3.469433	-2.338684	3.290383
38	913	3	1.037887	4.285395	0.980568	4.148320	-3.247508	5.323281	-3.167752	5.128889
39	913	4	2.041773	4.326380	1.961261	4.061976	-2.284608	6.368153	-2.100714	6.023237
40	915	1	0.282483	0.985596	0.257638	0.764549	-0.703113	1.268079	-0.506911	1.022188
41	915	2	0.554972	0.999910	0.500054	0.937362	-0.444938	1.554882	-0.437308	1.437416
42	915	3	1.044045	1.254057	0.969958	1.137760	-0.210011	2.298102	-0.167803	2.107718
43	915	4	1.547475	1.510238	1.471099	1.348031	0.037237	3.057713	0.123068	2.819130
44	917	1	0.291574	0.768548	0.232576	0.658488	-0.476973	1.060122	-0.425912	0.891064
45	917	2	0.547012	0.985569	0.514916	0.907789	-0.438557	1.532580	-0.392873	1.422706
46	917	3	1.062836	1.047235	0.980137	0.947823	0.015601	2.110071	0.032315	1.927960
47	917	4	2.058187	1.206191	1.943596	1.097441	0.851995	3.264378	0.846156	3.041037
48	919	1	0.263453	1.121319	0.254157	0.457922	-0.857866	1.384772	-0.203766	0.712079
49	919	2	0.529840	0.843256	0.508345	0.771284	-0.313416	1.373096	-0.262939	1.279628
50	919	3	1.040694	1.394266	1.016967	1.334044	-0.353572	2.434960	-0.317077	2.351011
51	919	4	2.046757	1.775559	2.033441	1.759543	0.271198	3.822317	0.273898	3.792984
52	921	1	0.243448	0.821557	0.256866	0.487162	-0.578109	1.065005	-0.230296	0.744028
53	921	2	0.499192	0.615811	0.513717	0.576458	-0.116619	1.115003	-0.062741	1.090175
54	921	3	1.021413	1.065443	1.014009	1.006864	-0.044030	2.086855	0.007145	2.020873
55	921	4	2.004273	1.526862	1.989223	1.471000	0.477410	3.531135	0.518223	3.460222
56	923	1	0.247649	0.743658	0.239537	0.657644	-0.496008	0.991307	-0.418107	0.897181
57	923	2	0.494081	0.961827	0.496181	0.924812	-0.467745	1.455908	-0.428631	1.420993
58	923	3	1.006982	1.127537	0.975390	1.007159	-0.120555	2.134519	-0.031768	1.982549
59	923	4	2.014946	1.425490	2.001910	1.356439	0.589456	3.440436	0.645471	3.358349
60	926	1	0.278880	1.753708	0.197010	1.676200	-1.474827	2.032588	-1.479190	1.873211
61	926	2	0.508859	1.833649	0.459708	1.804442	-1.324789	2.342508	-1.344734	2.264150
62	926	3	1.002735	1.303163	0.975488	1.261078	-0.300428	2.305899	-0.285590	2.236566
63	926	4	1.992635	1.451768	2.003012	1.419888	0.540867	3.444404	0.583124	3.422900
64	931	1	0.248023	0.438108	0.252147	0.363440	-0.190085	0.686131	-0.111293	0.615587
65	931	2	0.508815	0.629139	0.504276	0.565332	-0.120324	1.137954	-0.061055	1.069608
66	931	3	0.990398	0.811102	0.974968	0.736976	0.179296	1.801500	0.237992	1.711944

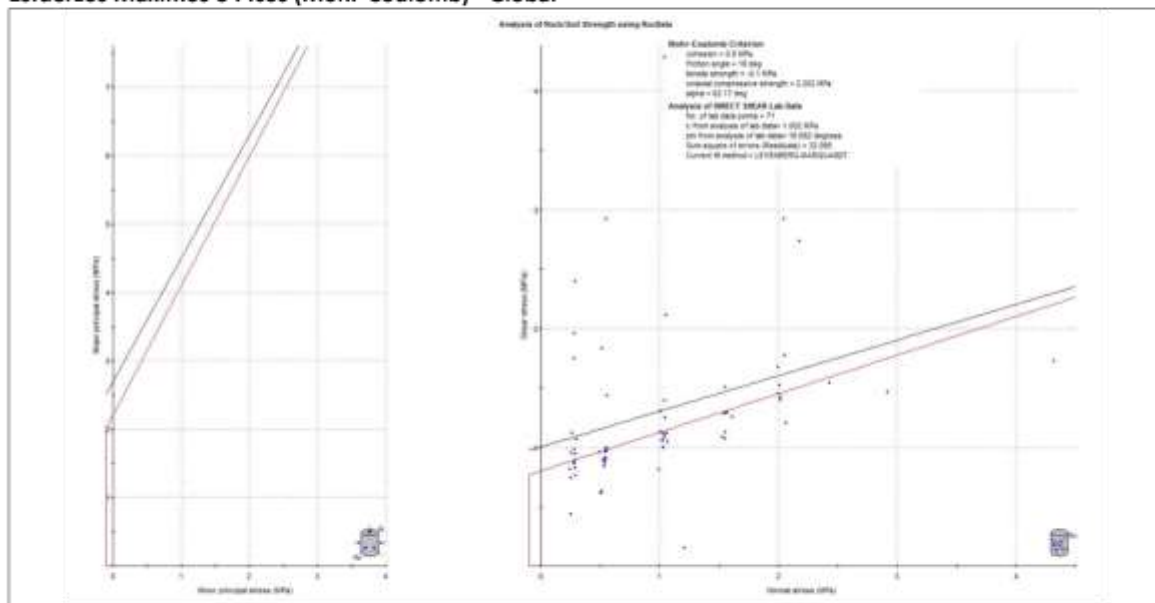
Figura 5.117 Análisis de datos para los ensayos de corte Estación Guatire 1 (continuación)

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 14/11/2014	Página 3 de 6	

Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_n	τ	σ_n	τ	σ_{max}	σ_{min}	σ_{min}	σ_{min}
67	931	4	2.013146	1.400480	1.966815	1.312468	0.612666	3.413626	0.654347	3.279283
68	896-S	2	2.173940	2.734920	2.051055	2.673598	-0.560980	4.908860	-0.622543	4.724653
69	896-S	3	6.791214	2.866071	5.453487	2.659378	3.925143	9.657285	2.794108	8.112865
70	904-S	2	2.430946	1.542454	2.445888	1.510205	0.888492	3.973401	0.935683	3.956092
71	904-S	3	4.315456	1.725087	4.315456	1.708580	2.590368	6.040543	2.606876	6.024035





- Procedimiento**
1. Para realizar el análisis de procedió a dividir la población de los ensayos en dos partes, los esfuerzos picos o máximos y los esfuerzos residuales, analizándolos de manera independiente.
 2. Los análisis se realizaron por los criterios de Mohr-Coulomb y Barton-Bandis.
 - a. **Mohr-Coulomb**, determina los parámetros de cohesión c y ángulo de fricción ϕ
 - b. **Barton-Bandis**, determina los parámetros de JRC y JCS de la discontinuidad a partir de los resultados de corte directo.
 3. Se elaborarán las envolventes de falla a partir de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio y se establecerán los parámetros mencionados anteriormente de acuerdo al criterio a emplear.
 4. Se empleará el programa RocData V4.0

Esfuerzos Máximos o Picos (Mohr-Coulomb) - Global



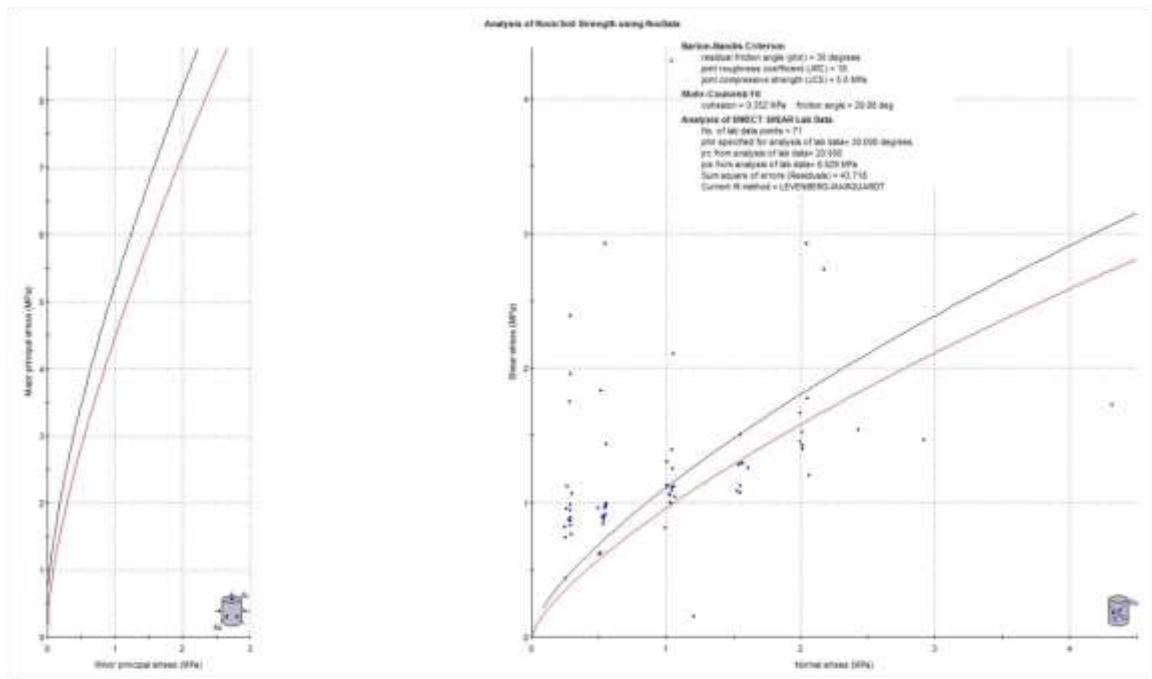
- Criterio de Mohr-Coulomb (máximos o picos)**
- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marquadt: parámetros obtenidos: $c = 1.00$ MPa y $\phi = 16.682$ grados, suma de los errores (residuos) 32.095
 - La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $c = 0.80$ MPa y $\phi = 18.00$ grados, resistencia a la tracción de -0.10 MPa, Resistencia a la compresión 2.202 MPa y $\alpha = 62.17$ grados

Figura 5.118 Criterio Mohr-Coulomb Estación Guatire 1 (Picos)

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 14/11/2014	Página 4 de 6	

Esfuerzos Máximos o Picos (Barton-Bandis) - Global





Criterio de Barton-Bandis (máximos o picos)



Este criterio al igual que el anterior en programa realiza un ajuste el cual es mostrado con la línea negra y los valores sugeridos con la línea roja.

- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marquadt: parámetros obtenidos: $\phi = 30$ grados, $JRC = 20.00$, $JCS = 8.029$ MPa y suma de los errores (residuos) 43.718
- Ajuste de Mohr-Coulomb: $c = 0.482$ MPa y $\phi = 26.80$ grados
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $\phi = 30$ grados, $JRC = 18.00$, $JCS = 5.80$ MPa

Figura 5.119 Criterio Barton-Bandis Estación Guatire 1 (Picos)

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 14/11/2014	Página 5 de 6	

Esfuerzos Mínimos o residuales (Mohr-Coulomb) - Global

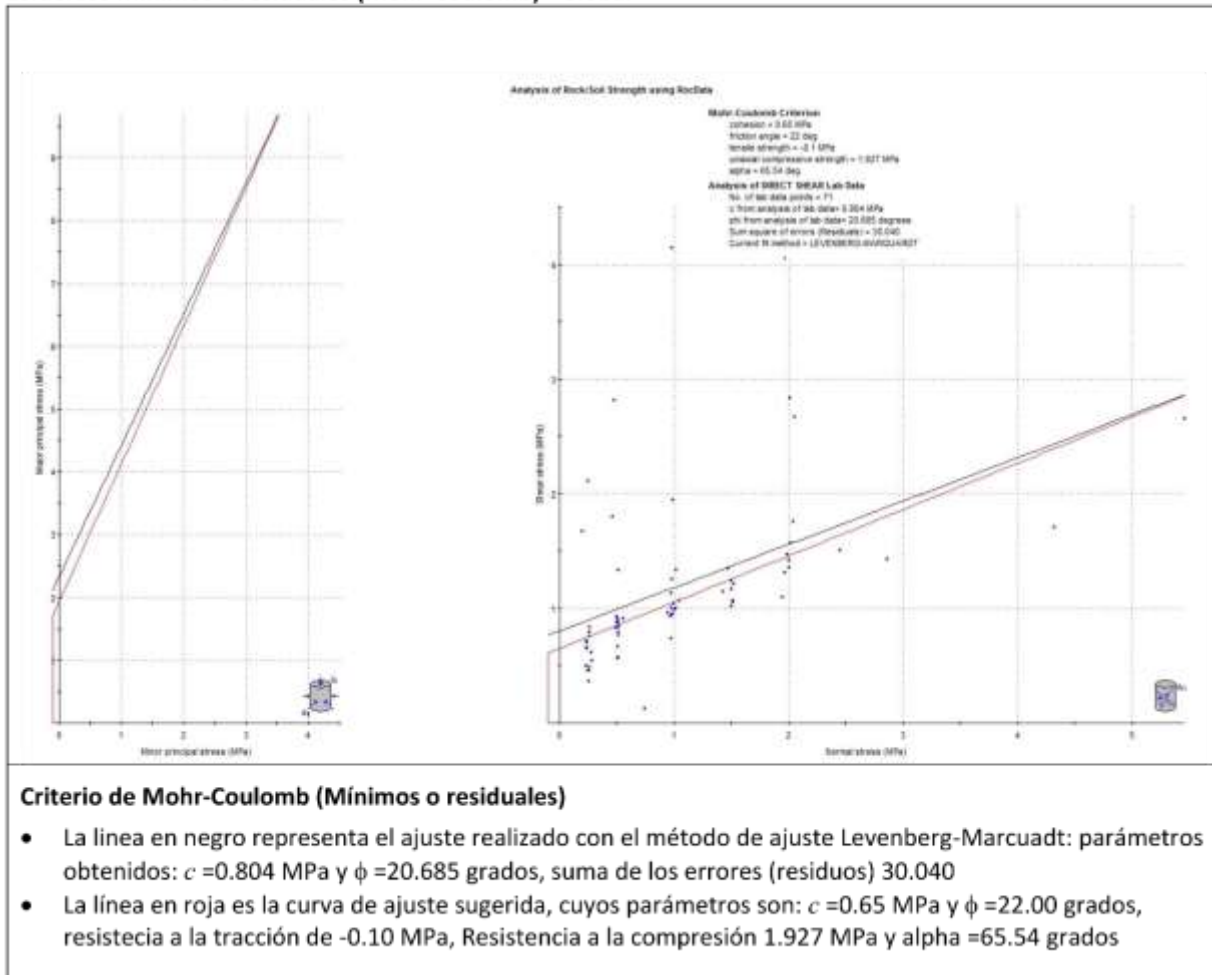




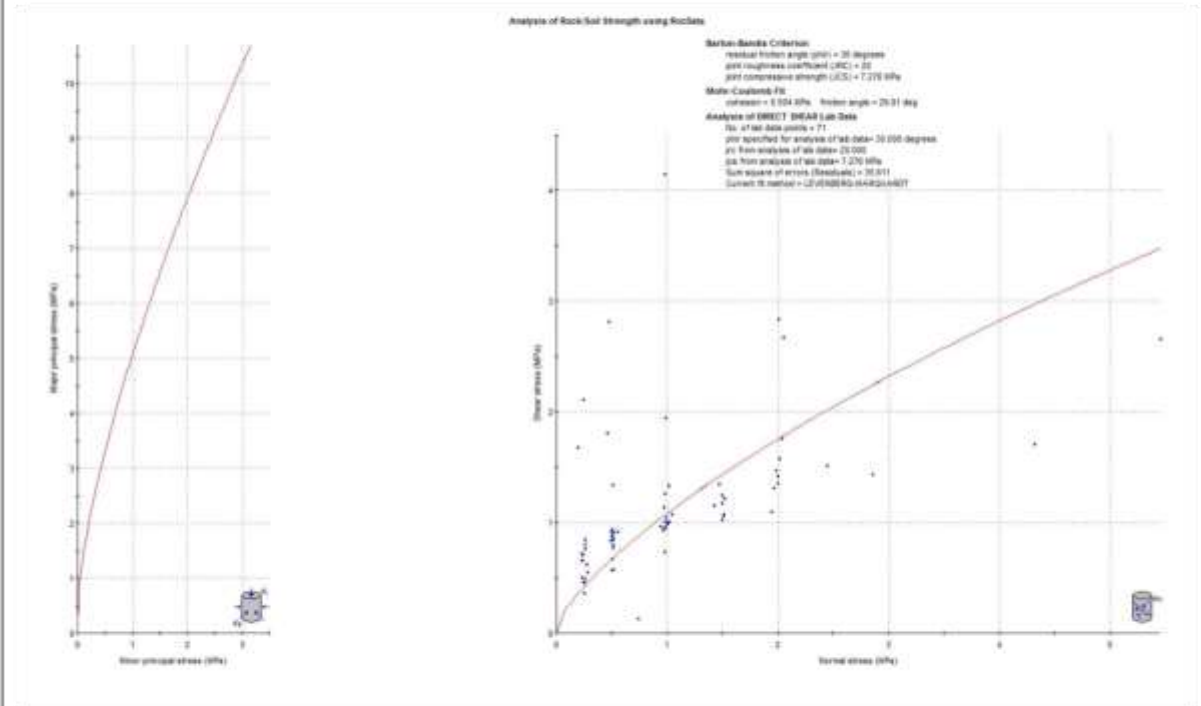


Figura 5.120 Criterio Mohr-Coulomb Estación Guatire 1 (Residuales)

 	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			  RIF: G-20000062-7
	SONDEOS EXPLORATORIOS PARA EL CUERPO DE LAS ESTACIONES GUARENAS 1 Y 2 Y GUATIRE 1 Y 2, DE LAS SECCIONES CG04 Y CG05 DEL STMCGG			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 14/11/2014	Página 6 de 6	

Esfuerzos Mínimos o residuales (Barton-Bandis) - Global

Criterio de Barton-Bandis (Mínimos o residuales)



Este criterio al igual que el anterior en programa realiza un ajuste el cual es mostrado con la línea negra y los valores sugeridos con la línea roja.

- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marquadt: parámetros obtenidos: $\phi = 30$ grados, $JRC = 20.00$, $JCS = 7.276$ MPa y suma de los errores (residuos) 35.611
- Ajuste de Mohr-Coulomb: $c = 0.504$ MPa y $\phi = 29.91$ grados
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $\phi = 30$ grados, $JRC = 20.00$, $JCS = 7.276$ MPa

Figura 5.121 Criterio Barton-Bandis Estación Guatire 1 (Residuales)

5.6 Estudio EOCENO-FRAC

5.6.1 Area de estudio

El área del Eoceno Frac, corresponde a una extensión del subsuelo de aproximadamente 230 Km², ubicada al Noreste del Lago de Maracaibo en el área de Lagunillas, en donde se han definido los Miembros informales B-2-X y B-3-X como principales arenas productoras de hidrocarburos de la Formación Misoa de Edad Eoceno, clasificando el yacimiento B2-X-68 como el primero en reservas a nivel de campo y como el segundo a nivel de la cuenca occidental.

EL yacimiento B2-X-68 contiene un crudo de 24°API. Los trabajos comenzaron en el año 1927 perforando el primer pozo LL-005 como el descubridor del área. Este yacimiento posee una consolidación importante la cual agrava el problema de poca fluidez de hidrocarburo a las intermediaciones del pozo, el fracturamiento hidráulico ha sido tradicionalmente el procedimiento para incrementar el recobro de petróleo.

Posee actualmente cuarenta y nueve (49) pozos de los cuales se encuentran en diferentes estados, siendo activos dieciséis (16), inactivos seis (6), abandonados siete (7), tres (3) esperando abandono y finalmente diecisiete (17) esperando trabajos de reacondicionamiento. Para la fecha de 13 de enero de 2013, el principal problema que afecta la producción de dichos pozos es la poca productividad de los pozos.

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar geomecánicamente el yacimiento Eoceno Frac B2-X-68 para el diseño optimizado de fracturas en la unidad de producción Lagunillas Lago, Lago Norte. Este es un estudio que en la actualidad se encuentra en ejecución, como parte del Trabajo Especial de los Bachilleres Yorman O., Azocar I. y Ricardo J.Guacuto, para optar el título de Ingeniero de Petróleo.




Las muestras que se describirán a continuación, corresponden a los ensayos de corte realizados. La Tabla 5.33 resume las muestras sobre las cuales se realizó este ensayo, bajo la modalidad de Rigidez Normal Constante (CNS).

Tabla 5.33 Ensayos de corte realizados sobre muestras del EOCENO-FRAC

Espécimen	Pozo	Profundidad (pies)	Diámetro (pulgadas)	Formación	Tipo de Roca	Dirección esfuerzo de corte (τ)
2179-1	LL-2925	3868	3	Misoa	Arenisca	Paralelo estratificación
2179-2	LL-2925	3868	3	Misoa	Arenisca	Perpendicular estratificación
2180-1	LL-2925	3821	3	Misoa	Arenisca	Perpendicular estratificación
2180-2	LL-2925	3821	3	Misoa	Arenisca	Paralelo estratificación
2181	LL-2925	3821	3	Misoa	Arenisca	Perpendicular estratificación
2186-1	LL-2925	6240	3	Misoa	Arenisca	Paralelo estratificación
2186-1	LL-2925	6240	3	Misoa	Arenisca	Paralelo estratificación
2186-2	LL-2925	6240	3	Misoa	Arenisca	Perpendicular estratificación
2187-1	LL-2925	6235	8	Misoa	Arenisca	Paralelo estratificación
2187-2	LL-2925	6235	8	Misoa	Arenisca	Perpendicular estratificación

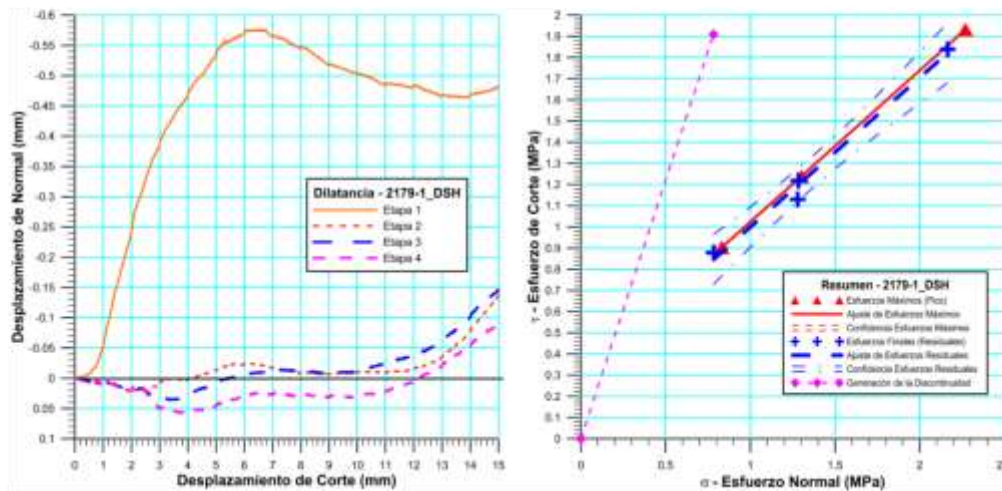
5.6.2 Casos ensayos CNS

5.6.2.1 *Especimen 2179-1*

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO –RIGIDEZ NORML CONSTANTE - (CNS)			  <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82			
Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016	Página 6 de 7 Especimen:2179-1_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados




Datos del Especimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
1	0.78296	1.90927	1.27961	1.12973	1600
2	0.83145	0.90308	0.78414	0.87814	322.66
3	1.30167	1.23832	1.28490	1.21827	685.19
4	2.26941	1.93199	2.16507	1.83879	888.23



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(35.59) * s + 0.31$	$t = \tan(35.21) * s + 0.29$
Cohesión (c) (MPa)	0.31	0.29
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	35.59	35.21
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.47	1.38
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.36	1.27
Suma de los residuos cuadrados	0.55	0.49
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.01
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.99

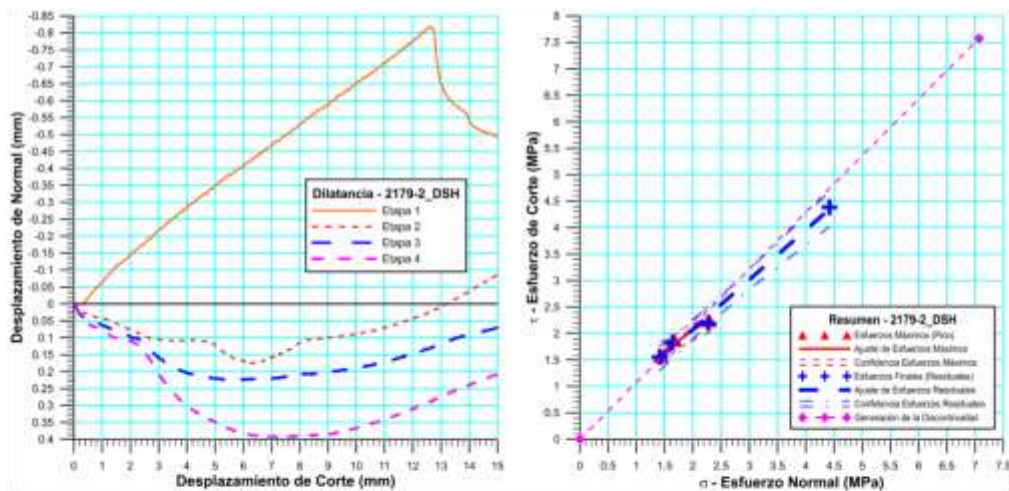
Figura 5.122 Especimen 2179-1-CNS-EOCENO-FRAC

5.6.2.2 *Espécimen 2179-2*

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	<p align="center">LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO –RIGIDEZ NORML CONSTANTE - (CNS)</p> <p align="center"><i>EOCENO FRAC</i> <i>Yacimiento B2X82</i></p>			  <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p>Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar</p>	<p>Revisión: Miguel Castillejo</p>	<p>Fecha: 26-07-2016</p>	<p>Página 6 de 7 Espécimen:2179-2_DSH</p>

Cuadro Resumen de los Resultados


Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
1	7.06806	7.57490	4.41923	4.38470	1638.48
2	1.67225	1.87472	1.63710	1.82192	103.95
3	1.43199	1.57906	1.41434	1.55434	137.83
4	2.28711	2.24832	2.27697	2.18869	569.36



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(36.80) * s + 0.56$	$t = \tan(43.19) * s + 0.20$
Cohesión (c) (MPa)	0.56	0.20
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	36.80	43.19
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.80	2.44
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.90	2.49
Suma de los residuos cuadrados	0.22	4.97
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.03
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.97	0.99

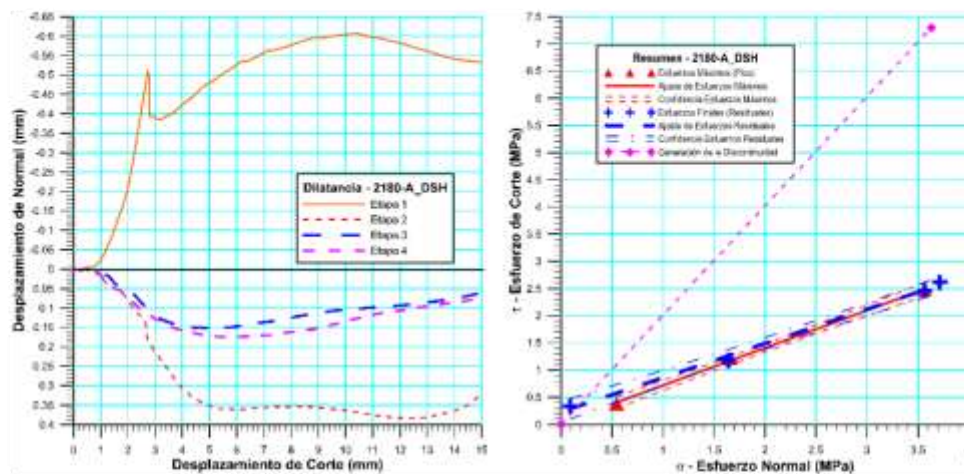
Figura 5.123 Espécimen 2179-2-CNS-EOCENO-FRAC

5.6.2.3 *Espécimen 2180-1*

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO –RIGIDEZ NORML CONSTANTE - (CNS)			 <p>RIF: G-2000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82			
Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016	Página 6 de 7 Espécimen:2180-A_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
1	3.63018	7.29623	3.71346	2.61287	3195
2	0.54515	0.38248	0.09010	0.33627	187.18
3	1.66028	1.20583	1.64098	1.17877	357.50
4	3.56195	2.47130	3.56567	2.46228	1163



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(34.59) * s + 0.03$	$t = \tan(32.16) * s + 0.23$
Cohesión (c) (MPa)	0.03	0.23
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	34.59	32.16
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.92	2.25
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.35	1.65
Suma de los residuos cuadrados	2.21	3.52
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.01
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

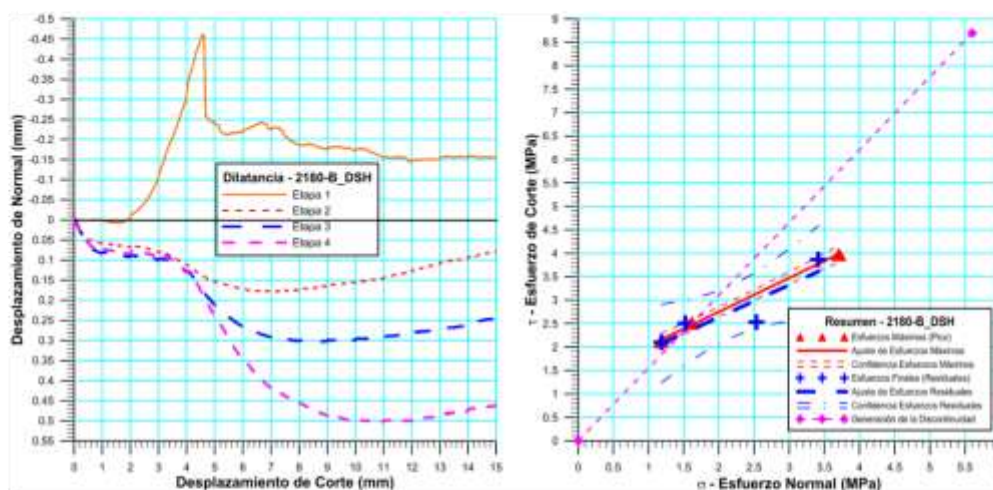
Figura 5.124 Espécimen 2180-1-CNS-EOCENO-FRAC

5.6.2.4 *Espécimen 2180-2*

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO –RIGIDEZ NORML CONSTANTE - (CNS)			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82			
Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016	Página 6 de 7	
				Espécimen:2180-B_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
1	5.60074	8.69497	2.53491	2.52965	3357
2	1.17815	2.11886	1.18455	2.09963	708.54
3	1.61525	2.51549	1.52435	2.50289	498.94
4	3.70598	3.97691	3.41157	3.86689	1063



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(35.89) * s + 1.30$	$t = \tan(34.52) * s + 1.26$
Cohesión (c) (MPa)	1.30	1.26
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	35.89	34.52
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.17	2.16
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.87	2.75
Suma de los residuos cuadrados	1.91	1.45
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.33
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.81

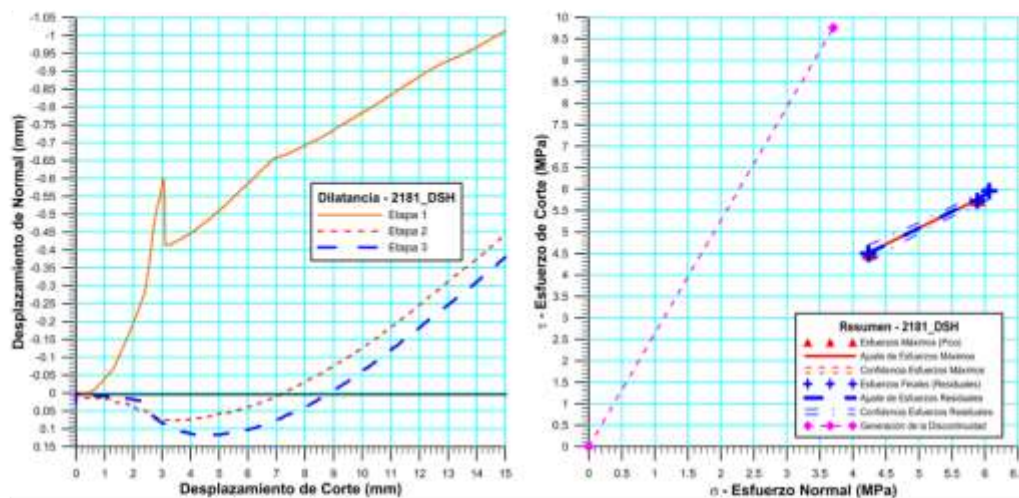
Figura 5.125 Espécimen 2180-2-CNS-EOCENO-FRAC

5.6.2.5 *Espécimen 2181*

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO –RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE - (CNS) <i>EOCENO FRAC</i> <i>Yacimiento B2X82</i>			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016		Página 6 de 7 Espécimen:2181_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
1	3.70271	9.75632	6.06556	5.95660	4230.23
2	4.25046	4.52844	4.23034	4.50125	1015.52
3	5.89580	5.76562	5.88540	5.72791	1310.78



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(36.94) * s + 1.33$	$t = \tan(37.68) * s + 1.23$
Cohesión (c) (MPa)	1.33	1.23
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	36.94	37.68
Número de puntos	2	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.07	5.39
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.15	5.40
Suma de los residuos cuadrados	0.77	1.22
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

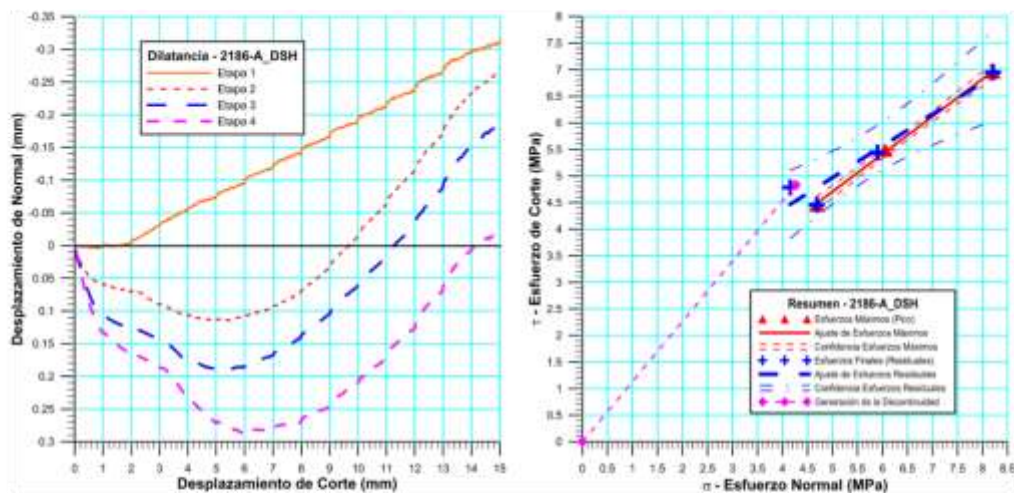
Figura 5.126 *Espécimen 2181-CNS-EOCENO-FRAC*

5.6.2.6 *Espécimen 2186-1*

 RIF: J-30681665-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO –RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE - (CNS)			 RIF: G-20000062-7
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X71			
Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016	Página 6 de 7 Espécimen:2186-A_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
1	4.26508	4.83369	4.15495	4.78376	395.20
2	4.68463	4.45828	4.68463	4.45600	689.73
3	6.05101	5.48760	5.89794	5.44260	758.30
4	8.20894	6.95772	8.20792	6.95002	883



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(35.25) * s + 1.17$	$t = \tan(30.79) * s + 1.99$
Cohesión (c) (MPa)	1.17	1.99
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	35.25	30.79
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	6.31	5.74
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.63	5.41
Suma de los residuos cuadrados	3.15	3.46
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.22
Coefficiente de Determinación (R ²)	1.00	0.94

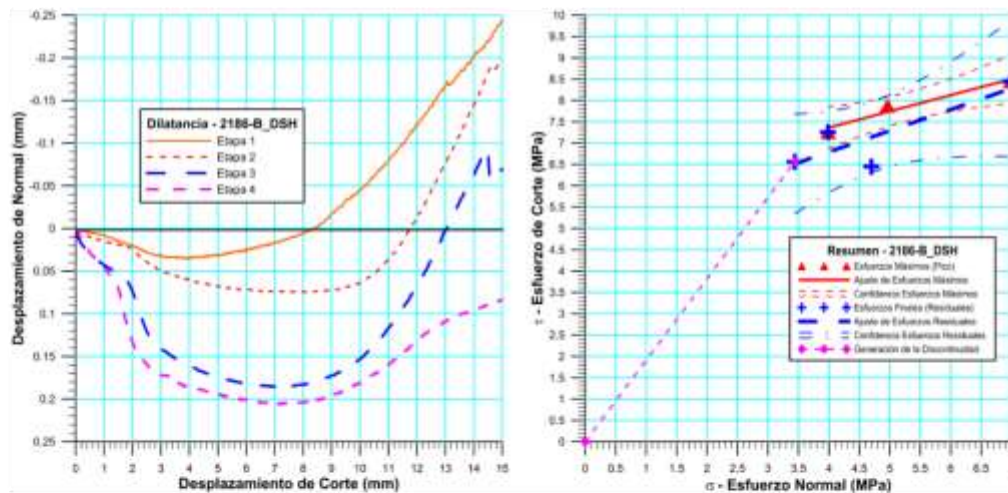
Figura 5.127 *Espécimen 2186-1-CNS-EOCENO-FRAC*

5.6.2.7 *Espécimen 2186-2*

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO –RIGIDEZ NORML CONSTANTE - (CNS)			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X71			
Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 26-07-2016	Página 6 de 7 Espécimen:2186-B_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
1	3.44712	6.58114	3.43890	6.56123	632.12
2	3.98698	7.25679	3.98456	7.25585	1754
3	4.96107	7.87802	4.69793	6.44858	1386.66
4	6.98186	8.44771	6.98186	8.44771	1069.50



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(20.82) * s + 5.84$	$t = \tan(26.42) * s + 4.81$
Cohesión (c) (MPa)	5.84	4.81
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	20.82	26.42
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.31	4.78
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	7.86	7.18
Suma de los residuos cuadrados	0.67	1.80
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.04	0.73
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.95	0.71

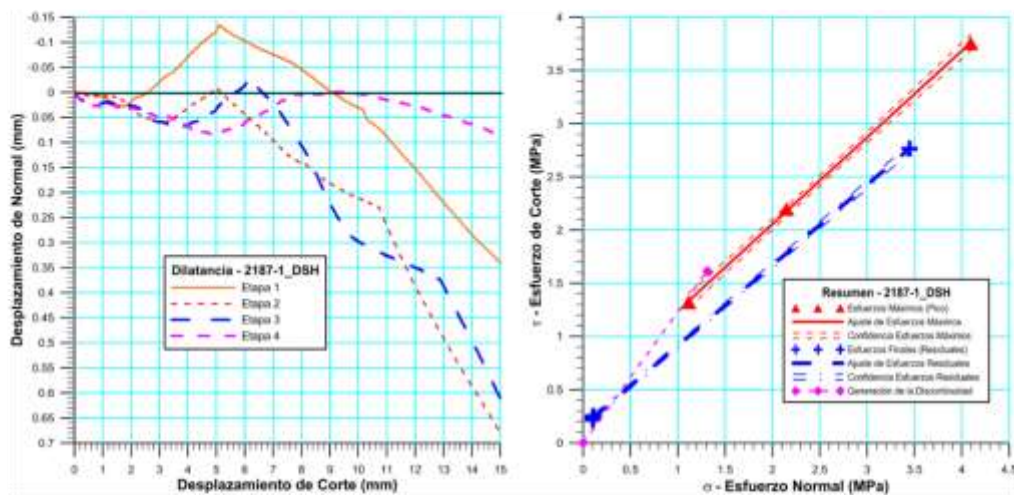
Figura 5.128 *Espécimen 2186-2-CNS-EOCENO-FRAC*

5.6.2.8 *Espécimen 2187-1*

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO –RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE - (CNS)</p> <p><i>EOCENO FRAC</i> <i>Yacimiento B2X71</i></p>			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p>Cálculo: R. Guacuto & Y. Azocar</p>	<p>Revisión: Miguel Castillejo</p>	<p>Fecha: 26-07-2016</p>		Página 6 de 7 Espécimen:2187-1_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		CNS (KPa/mm)
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-
1	1.31188	1.61424	0.10150	0.21716	584.22
2	1.11413	1.32151	0.10150	0.24003	648.94
3	2.14828	2.19776	0.10882	0.25349	1006.47
4	4.09378	3.75375	3.44787	2.76411	1572.09



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(39.15) * s + 0.43$	$t = \tan(37.08) * s + 0.16$
Cohesión (c) (MPa)	0.43	0.16
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	39.15	37.08
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.45	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.42	0.87
Suma de los residuos cuadrados	3.03	4.79
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R ²)	1.00	1.00

Figura 5.129 Espécimen 2187-1-CNS-EOCENO-FRAC



5.6.3 Envolverte de falla

En las Tablas 5.34 y 5.35 presentan los valores obtenidos de esfuerzo de corte, cohesión y ángulo de fricción de las muestras de los pozos LL-2925 y LL-2935.

Tabla 5.34. Ensayo de corte directo-Rigidez Normal Constante (CNS) de las muestras del pozo LL-2925

ENSAYO DE CORTE DIRECTO-RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE (CNS)							
Pozo	Muestra	Profundidad (Pies)	Dirección del esfuerzo de corte	Esfuerzo de Corte MPa (psi)	Cohesión MPa (psi)	Angulo de Fricción (°)	R ²
LL-2925	2179-1	3868'_3"	Paralelo a los planos de estratificación	1.36 (197.25)	0.29 (42.06)	35.21	0.99
LL-2925	2179-2	3868'_3"	Perpendicular a los planos de estratificación	1.90 (275.57)	0.20 (29.01)	43.19	0.99
LL-2925	2180-A	3821'_1"	Perpendicular a los planos de estratificación	1.35 (195.80)	0.23 (33.36)	32.16	1.00
LL-2925	2180-B	3821'_1"	Paralelo a los planos de estratificación	2.87 (416.26)	1.26 (182.75)	34.52	0.81
LL-2925	2181	-	Perpendicular a los planos de estratificación	5.15 (746.95)	1.23 (178.40)	37.68	1.00
PROMEDIO				2.53 (367)	0.64 (93)	36.55	-
Desviación Estándar				1.42 (206)	0.49 (71.07)	3.76	-

Se presenta a continuación el análisis realizado con la envolvente de falla según los criterios de Mohr-Coulomb y Barton-Bandis para los Esfuerzos Picos y Esfuerzos Residuales para el Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82.



 RIF: J-30681665-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNS			 RIF: G-2000062-7
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2925			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 1 de 5	
M. CASTILLEJO		01-02-2017	B2X82 - LL2925	

DATOS GENERALES				
Proyecto	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2925	Especímenes del análisis	2179-1/2179-2/2180-A/2180-B/2181	
Origen del Espécimen	Suministrado por el cliente	Perforaciones	POZO LL2925	
Clasificación Geológica del Espécimen	Areniscas	Formación Geológica	Misoa	
Tipo de Roca	Dura	Número de puntos en el análisis	19	Puntos
Nota:				

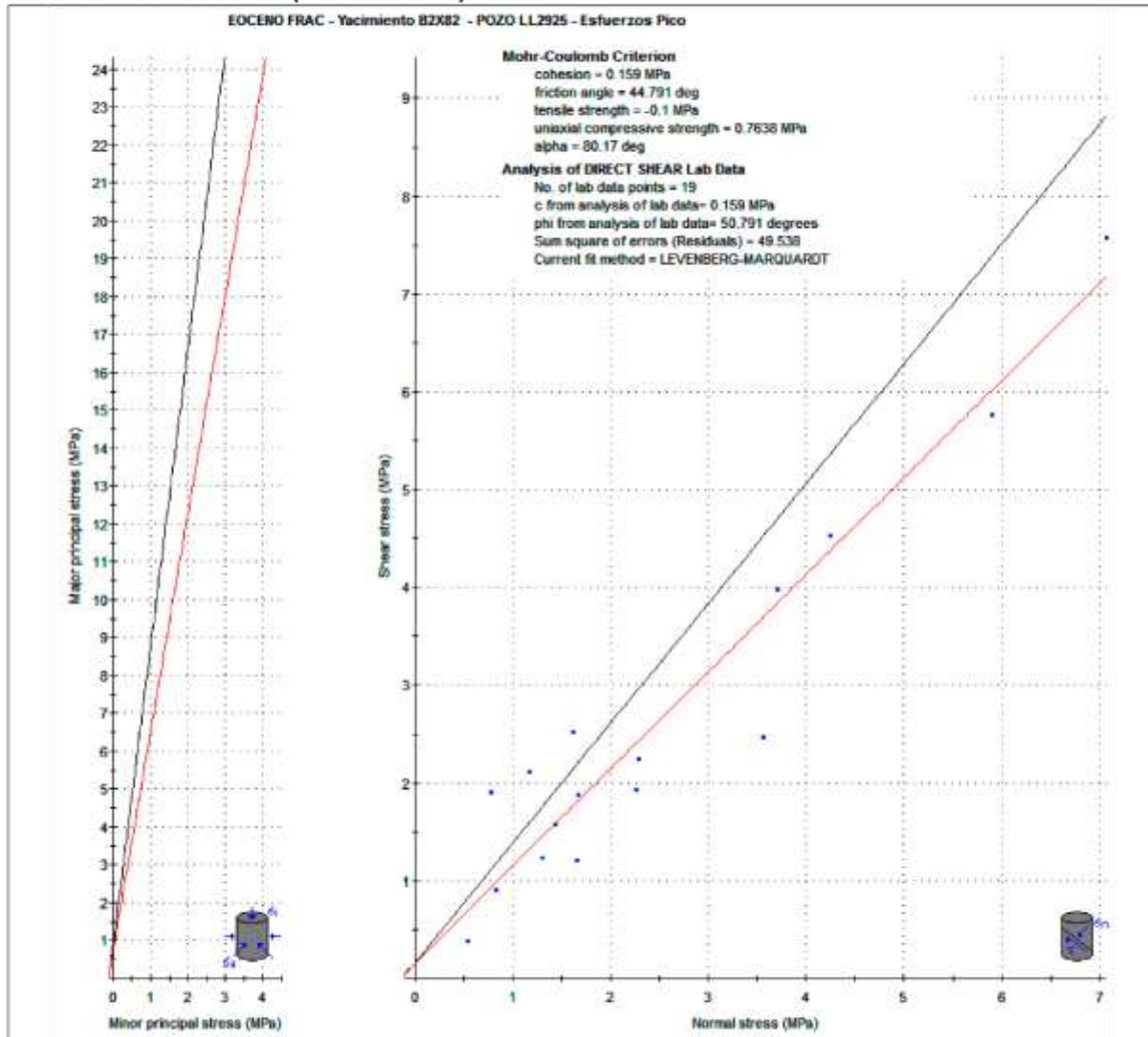
Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_n	τ	σ_n	τ	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}
1	2179-1	1	0.78296	1.90927	1.27961	1.12973	-1.12631	2.69223	0.14988	2.40935
2	2179-1	2	0.83145	0.90308	0.78414	0.87814	-0.07163	1.73453	-0.09400	1.66228
3	2179-1	3	1.30167	1.23832	1.28490	1.21827	0.06335	2.53999	0.06663	2.50316
4	2179-1	4	2.26941	1.93199	2.16507	1.83879	0.33742	4.20140	0.32628	4.00386
5	2179-2	1	7.06806	7.57490	4.41923	4.38470	-0.50685	14.64296	0.03453	8.80393
6	2179-2	2	1.67225	1.87472	1.63710	1.82192	-0.20247	3.54698	-0.18482	3.45902
7	2179-2	3	1.43199	1.57906	1.41434	1.55434	-0.14706	3.01105	-0.13999	2.96868
8	2179-2	4	2.28711	2.24832	2.27697	2.18869	0.03879	4.53542	0.08827	4.46566
9	2180-A	1	3.63018	7.29623	3.71346	2.61287	-3.66605	10.92641	1.10059	6.32633
10	2180-A	2	0.54515	0.38248	0.09010	0.33627	0.16267	0.92763	-0.24617	0.42637
11	2180-A	3	1.66028	1.20583	1.64098	1.17877	0.45446	2.86611	0.46220	2.81975
12	2180-A	4	3.56195	2.47130	3.56567	2.46228	1.09065	6.03326	1.10338	6.02795
13	2180-B	1	5.60074	8.69497	2.53491	2.52965	-3.09423	14.29571	0.00525	5.06456
14	2180-B	2	1.17815	2.11886	1.18455	2.09963	-0.94071	3.29700	-0.91508	3.28418
15	2180-B	3	1.61525	2.51549	1.52435	2.50289	-0.90024	4.13073	-0.97854	4.02723
16	2180-B	4	3.70598	3.97691	3.41157	3.86689	-0.27092	7.68289	-0.45532	7.27846
17	2181	1	3.70271	9.75632	6.06556	5.95660	-6.05361	13.45903	0.10896	12.02215
18	2181	2	4.25046	4.52844	4.23034	4.50125	-0.27798	8.77890	-0.27091	8.73159
19	2181	3	5.89580	5.76562	5.88540	5.72791	0.13018	11.66142	0.15749	11.61332

<p>Procedimiento</p> <ol style="list-style-type: none"> Para realizar el análisis de procedió a dividir la población de los ensayos en dos partes, los esfuerzos picos o máximos y los esfuerzos residuales, analizándolos de manera independiente. Los análisis se realizaron por los criterios de Mohr-Coulomb y Barton-Bandis. <ol style="list-style-type: none"> Mohr-Coulomb, determina los parámetros de cohesión c y ángulo de fricción ϕ Barton-Bandis, determina los parámetros de JRC y JCS de la discontinuidad a partir de los resultados de corte directo. Se elaborarán las envolventes de falla a partir de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio y se establecerán los parámetros mencionados anteriormente de acuerdo al criterio a emplear. Se empleará el programa RocData V4.0

Figura 5.130 Resultados de los Ensayos de Corte para el realizar el análisis por envolvente de falla del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82

 RIF: J-30681665-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNS			 RIF: G-20000062-7
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2925			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 2 de 5 B2X82 - LL2925	



Esfuerzos Máximos o Picos (Mohr-Coulomb) - Global



Criterio de Mohr-Coulomb (máximos o picos)

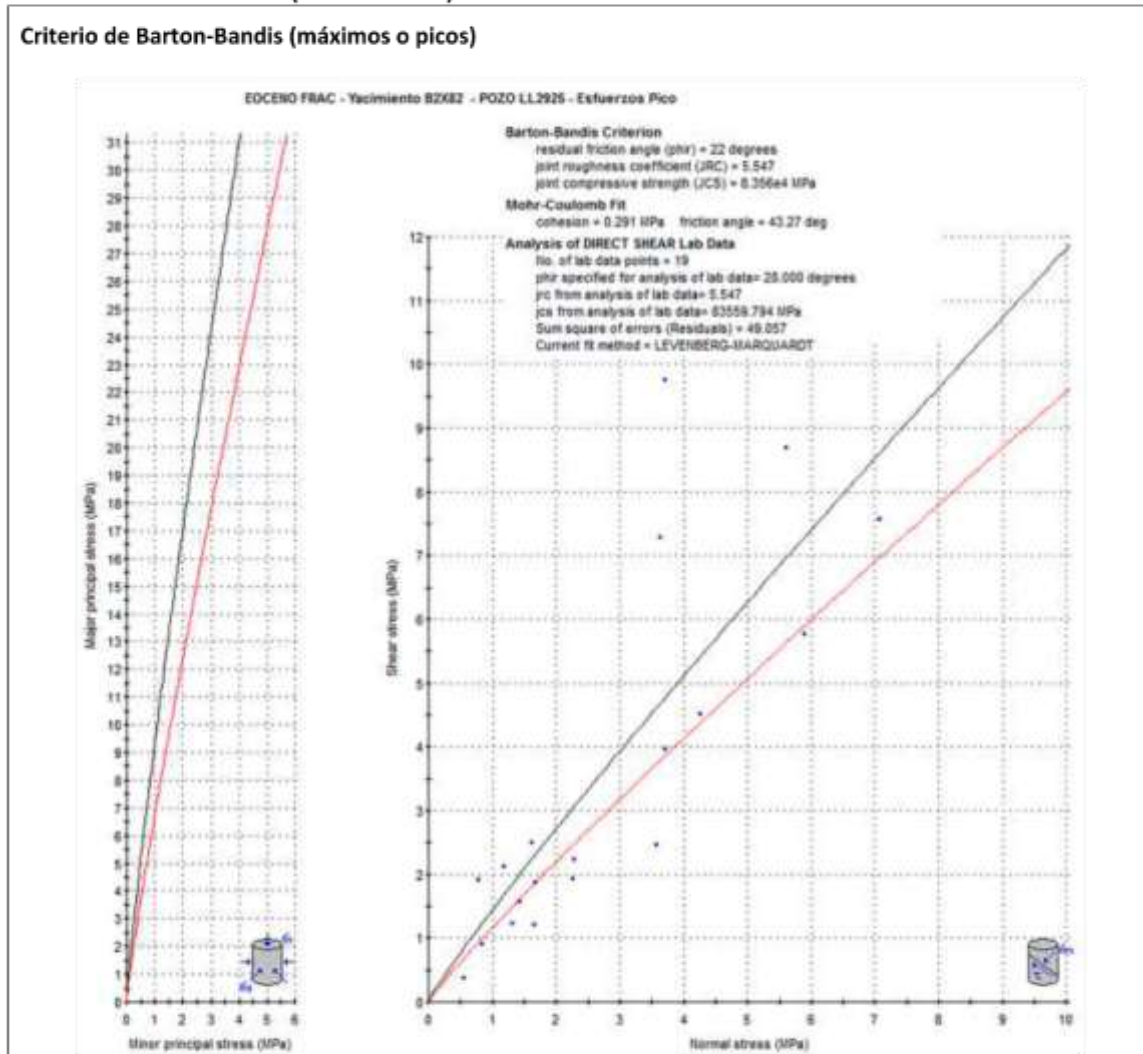
- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marcuadt: parámetros obtenidos: $c = 0.159$ MPa y $\phi = 50.791$ grados, suma al cuadrado de los errores (residuos) 49.538
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $c = 0.159$ MPa y $\phi = 44.791$ grados, resistencia a la tracción de -0.10 MPa, Resistencia a la compresión 0.7638 MPa y $\alpha = 80.17$ grados

Figura 5.131 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82, por Mohr-Coulomb

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNS			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2925			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 3 de 5 B2X82 - LL2925	

Esfuerzos Máximos o Picos (Barton-Bandis) - Global



Criterio de Barton-Bandis (máximos o picos)



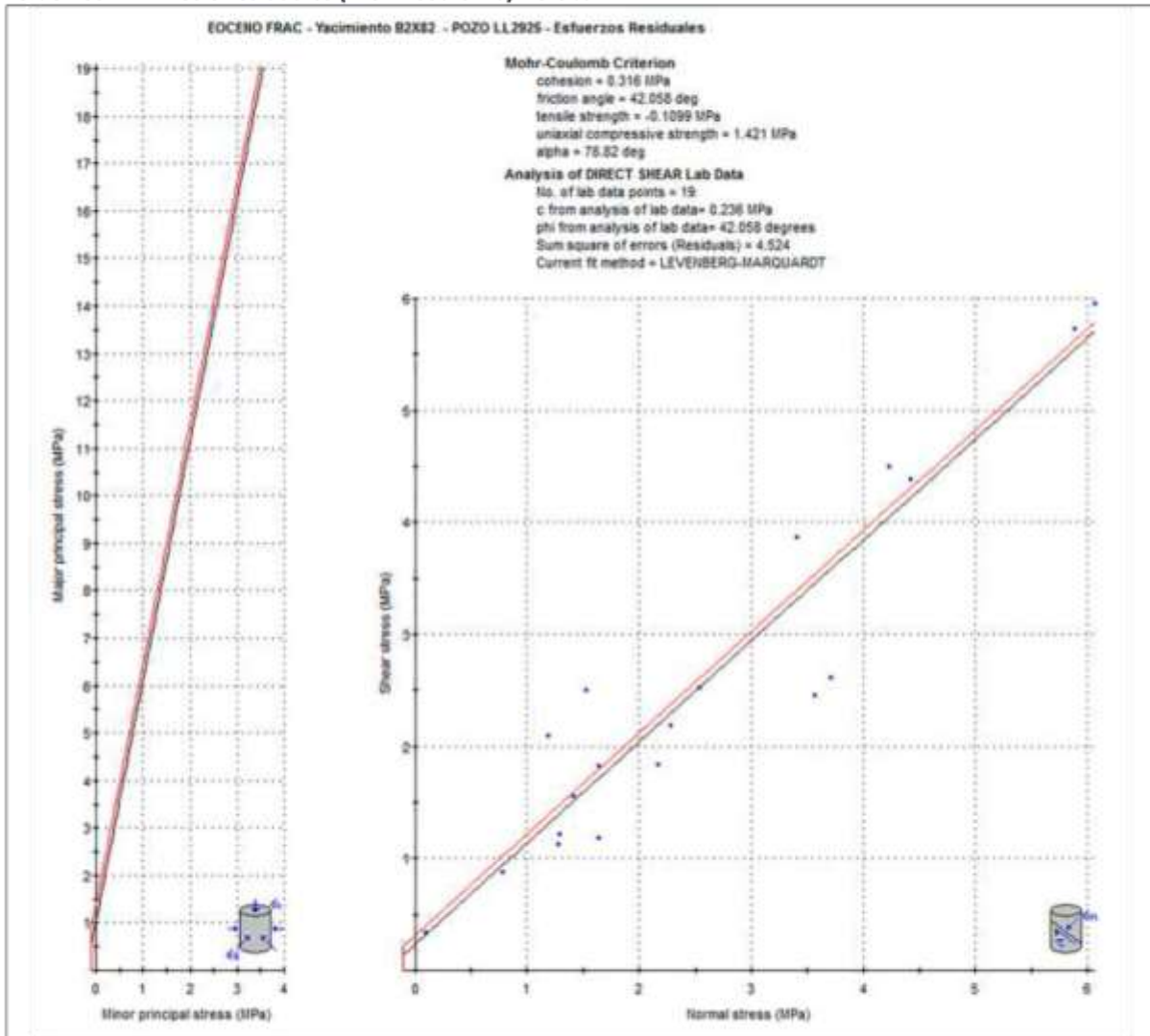
Este criterio al igual que el anterior en programa realiza un ajuste el cual es mostrado con la línea negra y los valores sugeridos con la línea roja.

- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marcuadt: parámetros obtenidos: $\phi_{rh} = 28.00$ grados, $JRC = 5.547$, $JCS = 83559.80$ MPa y suma al cuadrado de los errores (residuos) 43.718
- Ajuste de Mohr-Coulomb: $c = 0.291$ MPa y $\phi = 43.27$ grados
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $\phi_{rh} = 22$ grados, $JRC = 5.547$, $JCS = 83559.80$ MPa

Figura 5.132 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82, por Barton-Bandis



 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNS			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2925			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 4 de 5	
M. CASTILLEJO		01-02-2017	B2X82 - LL2925	

Esfuerzos Mínimos o residuales (Mohr-Coulomb) - Global



- Criterio de Mohr-Coulomb (Mínimos o residuales)**
- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marcuadt: parámetros obtenidos: $c = 0.236$ MPa y $\phi = 42.058$ grados, suma al cuadrado de los errores (residuos) 4.524
 - La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $c = 0.316$ MPa y $\phi = 42.058$ grados, resistencia a la tracción de -0.1099 MPa, Resistencia a la compresión 1.421 MPa y $\alpha = 78.82$ grados

Figura 5.133 Análisis por envoltorio de falla de los Ensayos de Corte Residuales del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82, por Mohr-Coulomb

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTES CNS			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2925			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 5 de 5 B2X82 - LL2925	

Esfuerzos Mínimos o residuales (Barton-Bandis) - Global

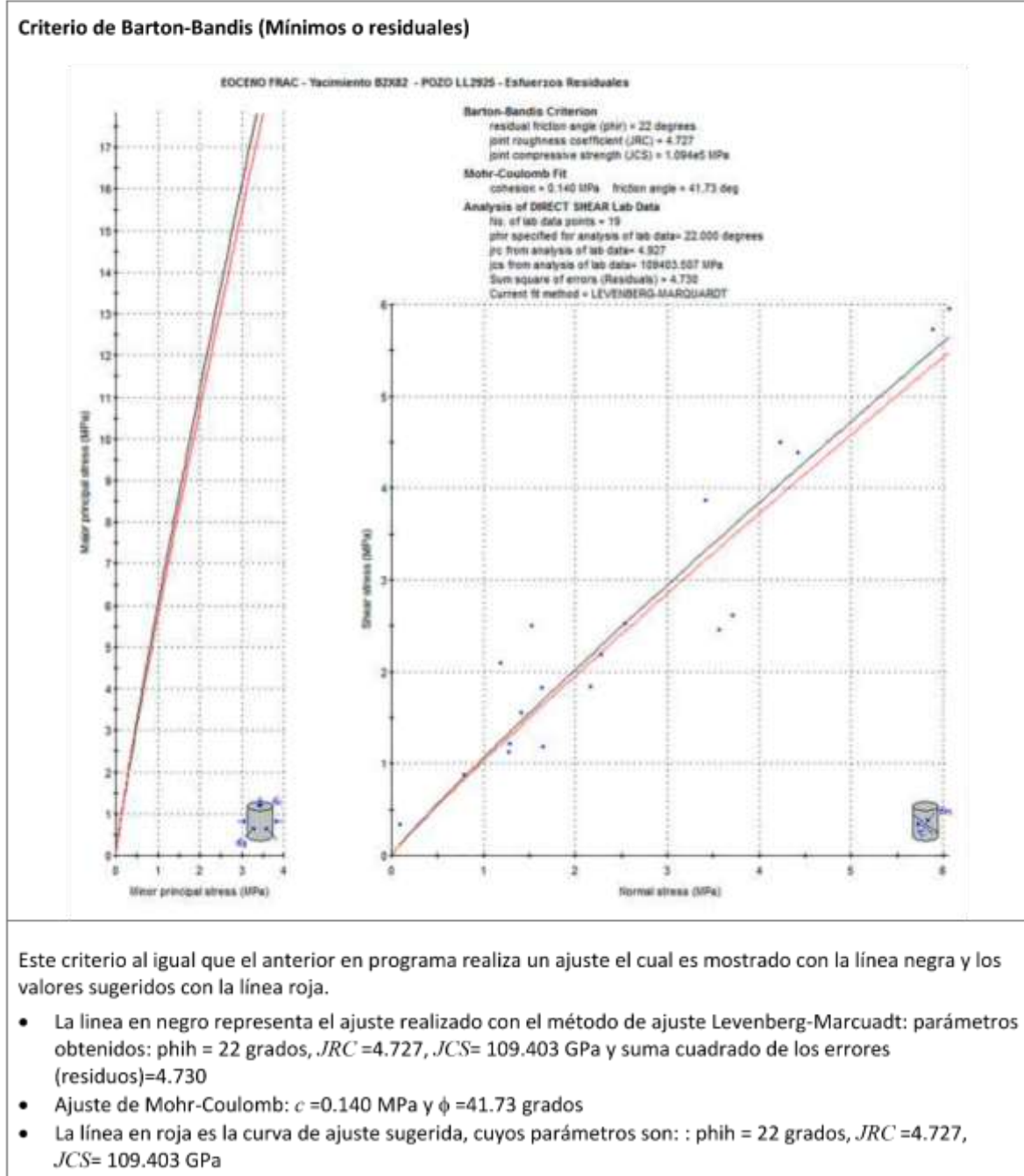




Figura 5.134 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales del Pozo LL2925 del Yacimiento B2X82, por Barton-Bandis

Tabla 5.35. Ensayo de corte directo-Rigidez Normal Constante (CNS) de las muestras del pozo LL-2935

ENSAYO DE CORTE DIRECTO-RIGIDEZ NORMAL CONSTANTE (CNS)							
Pozo	Muestra	Profundidad (Pies)	Dirección del esfuerzo de corte	Esfuerzo de Corte MPa (psi)	Cohesión MPa (psi)	Angulo de Fricción (°)	R ²
LL-2935	2186-A	6240'-2"	Paralelo a los planos de estratificación	5.63 (816.56)	1.99 (288.63)	30.79	0.94
LL-2935	2186-B	6240'-2"	Perpendicular a los planos de estratificación	7.86 (1140.00)	4.81 (697.63)	26.42	0.71
LL-2935	2187	6235'-8"	Paralelo a los planos de estratificación	0.77 (111.68)	0.28 (40.61)	30.38	1.00
LL-2935	2187-1	6235'-8"	Perpendicular a los planos de estratificación	2.42 (350.99)	0.16 (23.21)	37.08	1.00
PROMEDIO				4.17 (605)	1.81 (263)	31.17	
Desviación Estándar				2.76 (400)	1.88 (273)	3.82	

Se presenta a continuación el análisis realizado con la envolvente de falla según los criterios de Mohr-Coulomb y Barton-Bandis para los Esfuerzos Picos y Esfuerzos Residuales para el pozo LL2935 del Yacimiento B2X82.



 RIF: J-30681665-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNS			 RIF: G-20000062-7
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2935			
	Cálculo:	Revisión:	Fecha:		Página 1 de 5
M. CASTILLEJO		01-02-2017	B2X82 - LL2935	

DATOS GENERALES			
Proyecto	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2935	Especímenes del análisis	2186-A/2186-B/2187-1/2187
Origen del Espécimen	Suministrado por el cliente	Perforaciones	POZO LL2935
Clasificación Geológica del Espécimen	Areniscas	Formación Geológica	Misoa
Tipo de Roca	Dura	Número de puntos en el análisis	14 Puntos
Nota:			

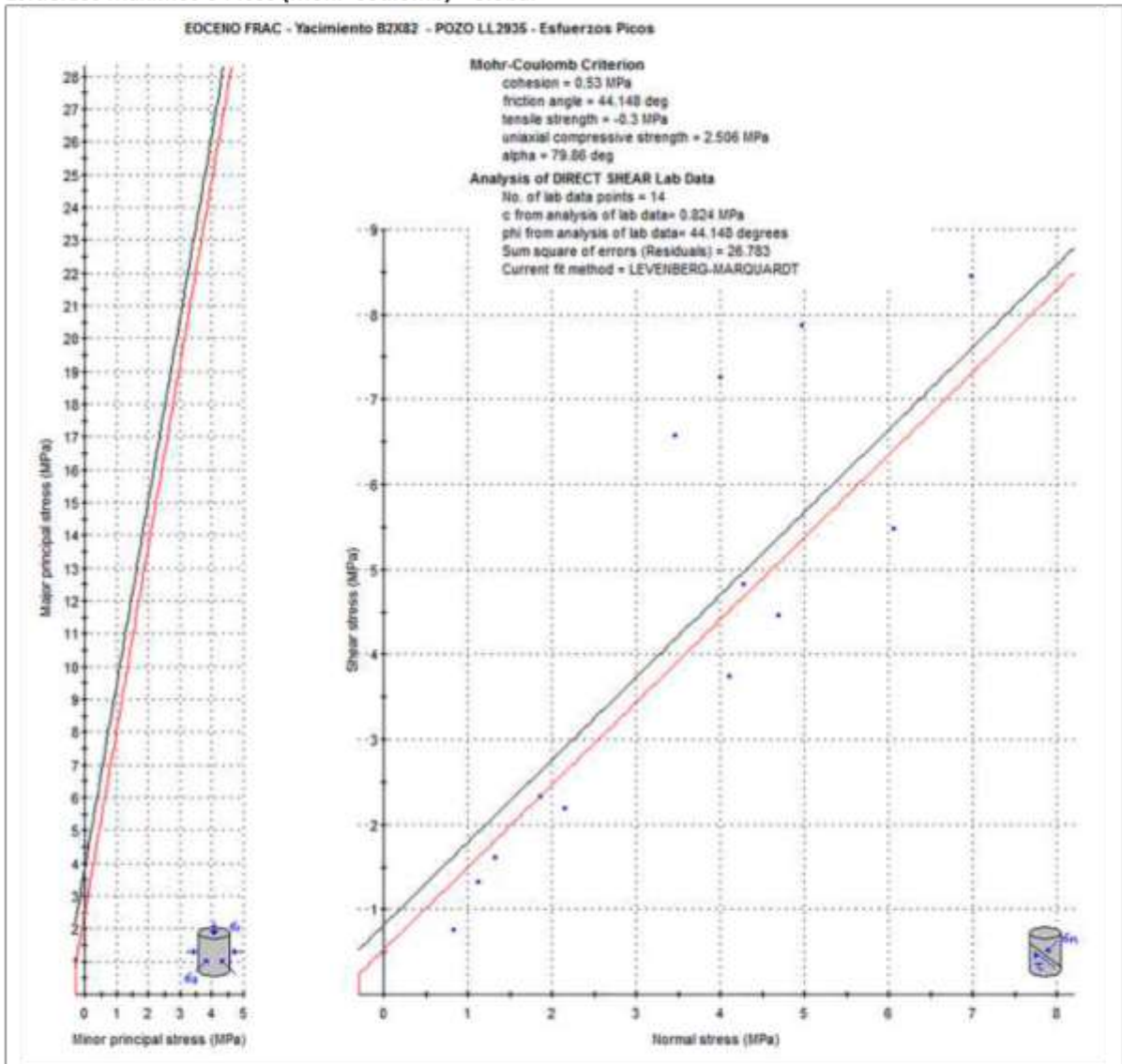
Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_n	τ	σ_n	τ	σ_{1max}	σ_{2max}	σ_{3min}	σ_{2min}
1	2186-A	1	4.26508	4.83369	4.15495	4.78376	-0.56861	9.09877	-0.62881	8.93871
2	2186-A	2	4.68463	4.45828	4.68463	4.45600	0.22635	9.14290	0.22863	9.14063
3	2186-A	3	6.05101	5.48760	5.89794	5.44260	0.56341	11.53860	0.45534	11.34053
4	2186-A	4	8.20894	6.95772	8.20792	6.95002	1.25122	15.16665	1.25790	15.15795
5	2186-B	1	3.44712	6.58114	3.43890	6.56123	-3.13402	10.02826	-3.12233	10.00013
6	2186-B	2	3.98698	7.25679	3.98456	7.25585	-3.26981	11.24377	-3.27129	11.24041
7	2186-B	3	4.96107	7.87802	4.69793	6.44858	-2.91696	12.83909	-1.75064	11.14651
8	2186-B	4	6.98186	8.44771	6.98186	8.44771	-1.46585	15.42956	-1.46585	15.42956
9	2187	1	1.85479	2.33700	1.40238	1.10246	-0.48221	4.19179	0.29992	2.50484
10	2187	2	0.82691	0.76525	0.81563	0.75848	0.06166	1.59216	0.05716	1.57411
11	2187-1	1	1.31188	1.61424	0.10150	0.21716	-0.30236	2.92613	-0.11566	0.31866
12	2187-1	2	1.11413	1.32151	0.10150	0.24003	-0.20738	2.43563	-0.13853	0.34153
13	2187-1	3	2.14828	2.19776	0.10882	0.25349	-0.04947	4.34604	-0.14467	0.36230
14	2187-1	4	4.09378	3.75375	3.44787	2.76411	0.34003	7.84754	0.68375	6.21198

Procedimiento	
1.	Para realizar el análisis de procedió a dividir la población de los ensayos en dos partes, los esfuerzos picos o máximos y los esfuerzos residuales, analizándolos de manera independiente.
2.	Los análisis se realizaron por los criterios de Mohr-Coulomb y Barton-Bandis. <ul style="list-style-type: none"> a. Mohr-Coulomb, determina los parámetros de cohesión c y ángulo de fricción ϕ b. Barton-Bandis, determina los parámetros de JRC y JCS de la discontinuidad a partir de los resultados de corte directo.
3.	Se elaborarán las envolventes de falla a partir de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio y se establecerán los parámetros mencionados anteriormente de acuerdo al criterio a emplear.
4.	Se empleará el programa RocData V4.0

Figura 5.134 Resultados de los Ensayos de Corte para el realizar el análisis por envolvente de falla del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82



 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNS			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2935			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 2 de 5	
M. CASTILLEJO		01-02-2017	B2X82 - LL2935	

Esfuerzos Máximos o Picos (Mohr-Coulomb) - Global



- Criterio de Mohr-Coulomb (máximos o picos)**
- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marcuadt: parámetros obtenidos: $c = 0.824$ MPa y $\phi = 44.148$ grados, suma al cuadrado de los errores (residuos) 26.783
 - La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $c = 0.53$ MPa y $\phi = 44.148$ grados, resistencia a la tracción de -0.30 MPa, Resistencia a la compresión 2.506 MPa y $\alpha = 79.86$ grados

Figura 5.135 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82, por Mohr-Coulomb

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNS			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2935			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 3 de 5 B2X82 - LL2935	

Esfuerzos Máximos o Picos (Barton-Bandis) - Global

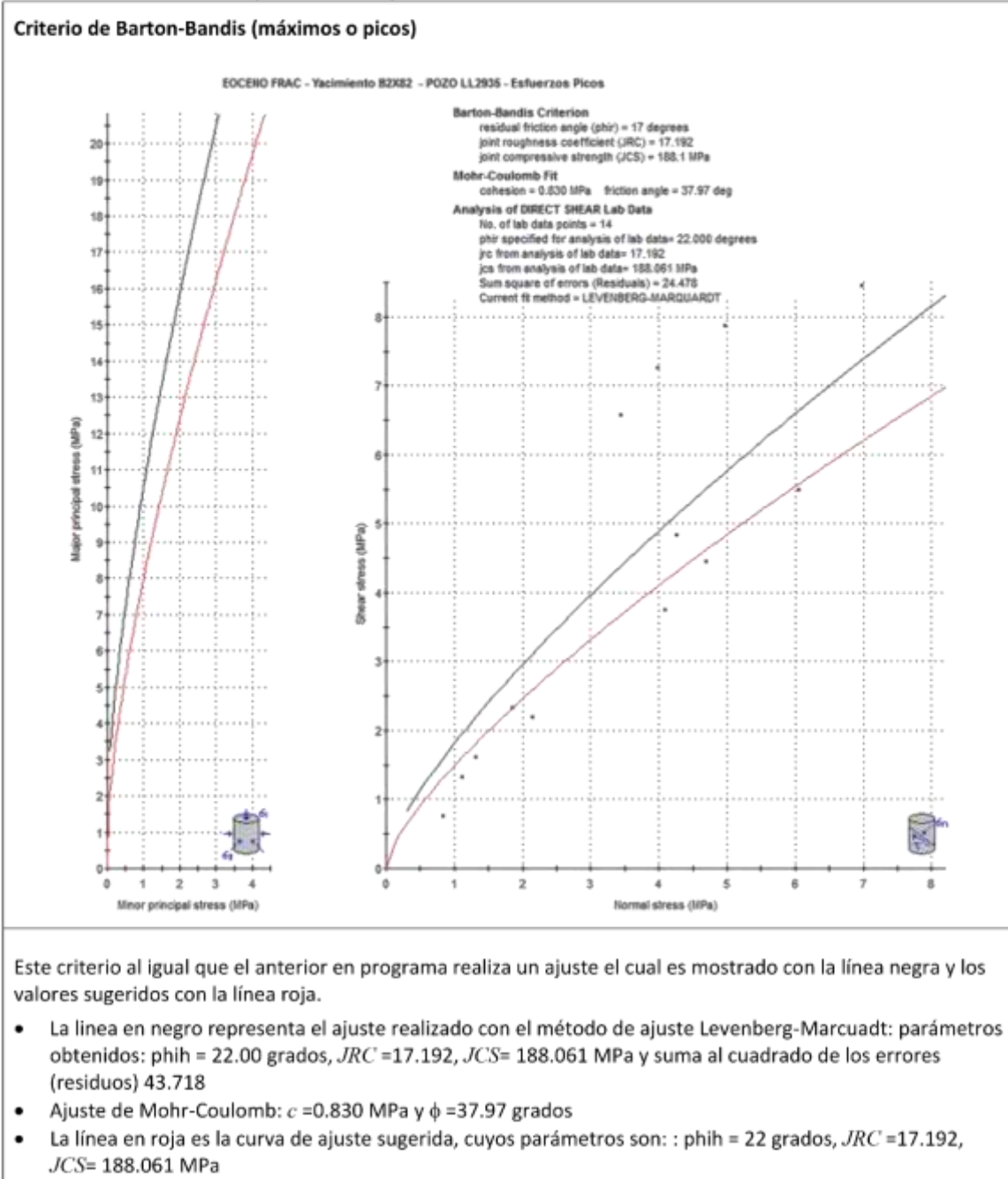




Figura 5.136 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82, por Barton-Bandis

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNS			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2935			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 4 de 5 B2X82 - LL2935	

Esfuerzos Mínimos o residuales (Mohr-Coulomb) - Global

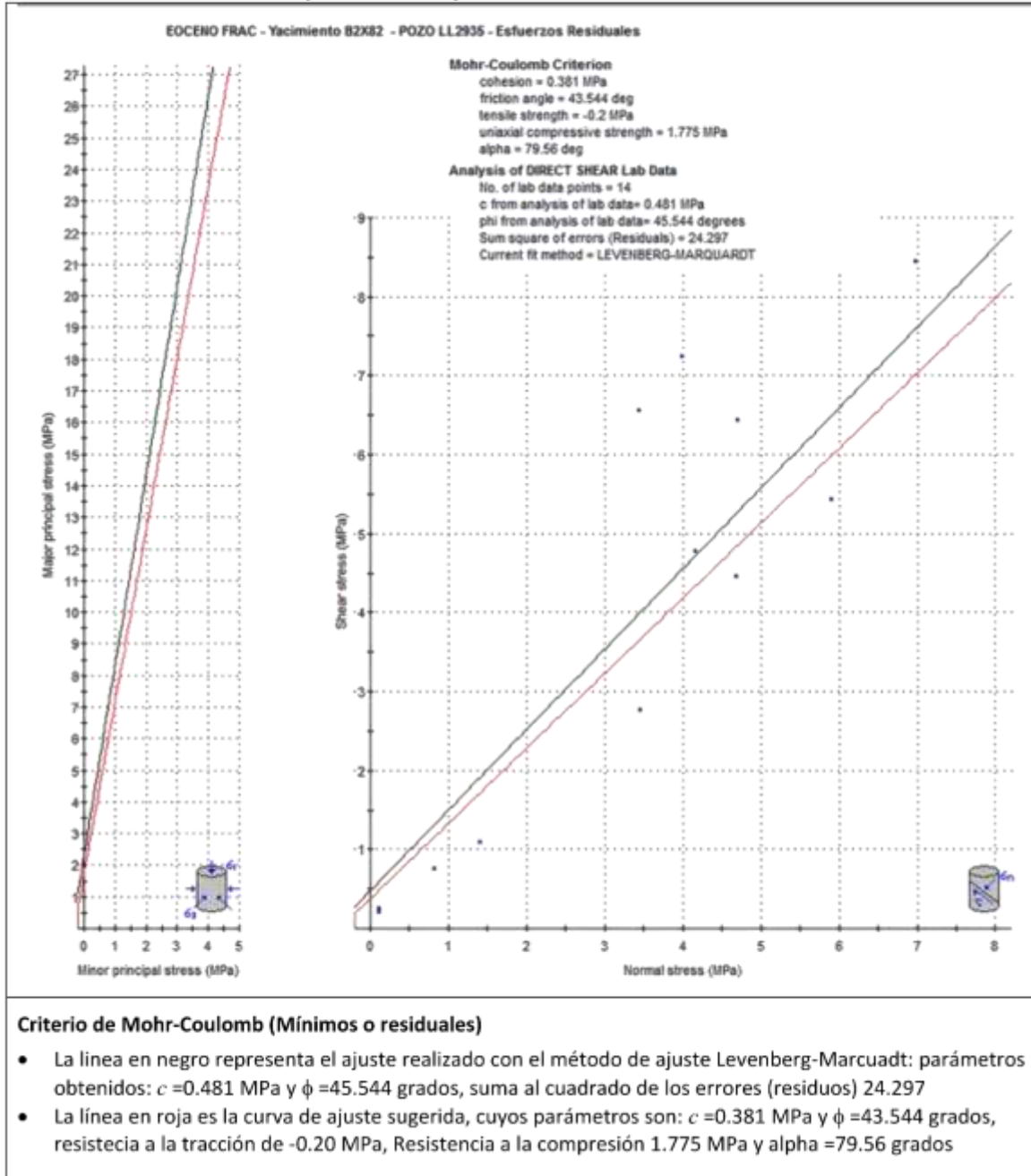




Figura 5.137 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82, por Mohr-Coulomb

 <p>RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNS			 <p>RIF: G-2000062-7</p>
	EOCENO FRAC Yacimiento B2X82 - POZO LL2935			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 5 de 5	
			B2X82 - LL2935	

Esfuerzos Mínimos o residuales (Barton-Bandis) - Global

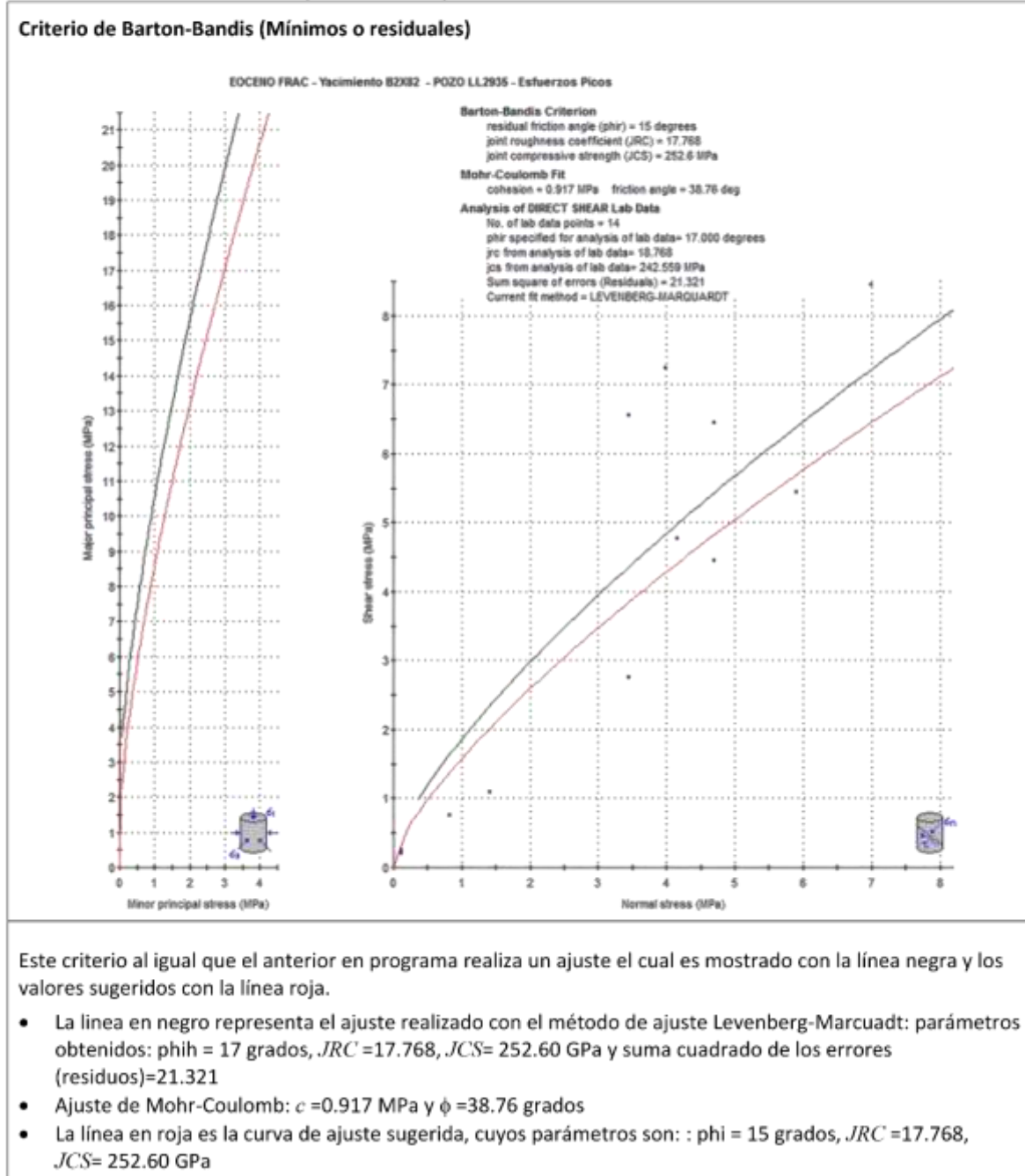


Figura 5.138 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales del Pozo LL2935 del Yacimiento B2X82, por Barton-Bandis

Se evidencia un incremento del esfuerzo de corte (τ) en las muestras de los pozos LL-2935 de 39.33% en relación a las muestras del pozo LL-2925. Los esfuerzos de corte promedio para cada pozo (LL-2925 y LL-2935) son de 2.53 y 4.17 MPa (367 y 605 psi), cuyos valores representan el esfuerzo de corte máximo para que la muestra rompa, con desviación estándar de 1.42 y 2.76 (206 y 400 psi) respectivamente.

En esta investigación las fracturas o discontinuidad se generaron paralelas y perpendiculares a la estratificación que presentaba el espécimen.

En la tabla 5.34 se puede observar en la muestra 2179-1-DSH que el esfuerzo de corte que se encuentra en dirección del plano de estratificación es menor al que se obtiene cuando el esfuerzo de corte es perpendicular al plano de estratificación.

Contar con esfuerzos de corte que estén en sentido de la estratificación como perpendicular a ellas permitirá conocer el esfuerzo requerido para vencer la resistencia que presenta la muestra, conocer el esfuerzo de cizalla en ambos sentidos es de gran importancia porque se puede direccional la fractura pero no se sabe en qué dirección ella se moverá, no es controlable, conocer ambos valores contribuirá controlar tal variable, siempre es ideal considerar en un diseño el peor de los casos, en este caso el esfuerzo de cizalla que se tomaría en cuenta sería el esfuerzo de corte que se obtiene perpendicular a la estratificación porque es el que requiere mayor esfuerzo para romper la muestra y en un caso macro la formación.

5.7 Túnel Baralt (Cienfuegos - Consultores y Gerencia de Proyectos, C.A., 2015)

5.7.1 Introducción

El objetivo de este Caso de Estudio, fue verificar si las propiedades granulométricas y geotécnicas de los materiales provenientes de la excavación del Túnel Baralt (ambos frentes de excavación y ambas galerías) cumplen con las especificaciones definidas en el actual Proyecto Válido para Construcción (VPC)^[1] para los rellenos definidos en los Valles Tacagua y Macayapa.

Para la evaluación de los materiales se recolectaron cuatro (4) muestras representativas, una muestra por cada galería, que fueron sometidas a pruebas especiales y ensayos de clasificación en laboratorio, de acuerdo a lo establecido en diferentes normativas, para determinar si sus propiedades índices cumplen con la condición de uso bajo los criterios y especificaciones establecidas dentro del Proyecto VPC (GEOLAB CONSULTORES C.A., 2013). Las muestras procedentes de los frentes y galerías de excavación se detallan en la *Tabla 5.9.1*.

Tabla 5.36 Frentes y galerías del Túnel Baralt

FRENTE	GALERÍA
Macayapa	Galería Sur Progresiva 0+129,65; bajo una cobertura de 62m
	Galería Norte Progresiva 0+ 74,50; bajo una cobertura de 44m
Baralt	Galería Sur Progresiva 2+242,50; bajo una cobertura de 85m
	Galería Norte Progresiva 2+433,50 bajo una cobertura de 80m

5.7.2 Ubicación y Geología del sitio de muestreo

De acuerdo con el mapa geológico del región de Caracas a escala 1:25.000, hoja 6847-IV-SO del Atlas de la Cordillera de La Costa 2004 (Urbani & Rodríguez, Atlas geológico de la Cordillera de la Costa, 2004), se diferencian dos unidades litológicas presentes en la región de estudio del Túnel Baralt, definidas por el Esquisto de Las Mercedes (CaM) de la Asociación Metasedimentaria Caracas hacia el tramo Oeste del Túnel, y por el Complejo San Julián (ASJ) de la Súper-Asociación Ávila (Urbani & Rodríguez, Atlas geológico de la Cordillera de la Costa, 2004) hacia el tramo Este, las cuales se encuentran en contacto tectónico bajo la influencia de

la Falla Tacagua-El Ávila. A partir de esta información se dividió la caracterización de los materiales en función al frente de excavación, tal como se indica en la Figura 5.9.1.

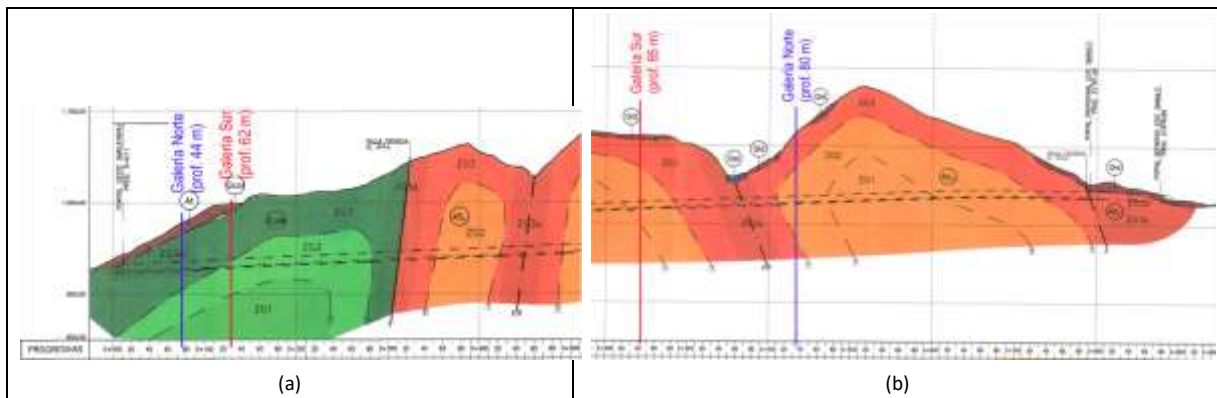




Figura 5.139 Ubicación relativa de los frentes de excavación de donde provienen los materiales analizados. (a) Frente Macayapa (extraído del Plano EST-TB-1215). (b) Frente Baralt (extraído del Plano EST-TB-1220). Se interpreta las unidades geológicas (CaM) en verde y (ASJ) en naranja.

De acuerdo con la información geológica-geotécnica recabada en el perfil longitudinal de diseño del Túnel Baralt (Planos EST-TB-1215 a 1220, suministrado en el proceso de Licitación) aproximadamente en la progresiva 0+300 existe un contacto de falla, entre el Esquisto de Las Mercedes y el Complejo de San Julián, por lo que es previsible que, de allí en adelante, en el frente de excavación de Macayapa se encuentren materiales similar a los proveniente del frente Baralt.

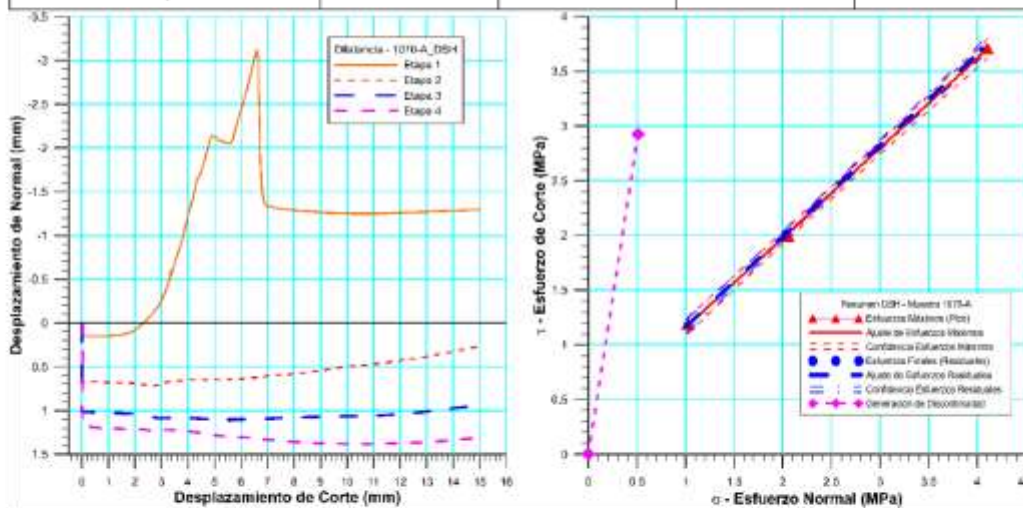
5.7.3 Ensayos de Corte Directo

5.7.3.1 DSH-1170-A_Baralt Sur – Progresiva 2+242.50

 <p>CIENTFUEGOS CONSULTORES Y GENERACIÓN DE PROYECTOS S.A. RIF: J-31695694-6</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	Caracterización Material del Túnel Baralt – Sur - Progresiva 2+242,50			
	Cálculo: Miguel Castillejo	Revisión:	Fecha: 11-08-2015	Página 6 de 7 Espécimen:1170-A_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.51185	2.92758	0.50668	0.59813
2	1.02525	1.19475	1.00911	1.18328
3	2.04904	1.99591	2.00203	1.97837
4	4.10100	3.71106	4.04420	3.70319



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(39.37) * s + 0.34$	$t = \tan(39.77) * s + 0.33$
Cohesión (c) (MPa)	0.34	0.33
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	39.37	39.77
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.39	2.35
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.30	2.29
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3.30	3.32
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

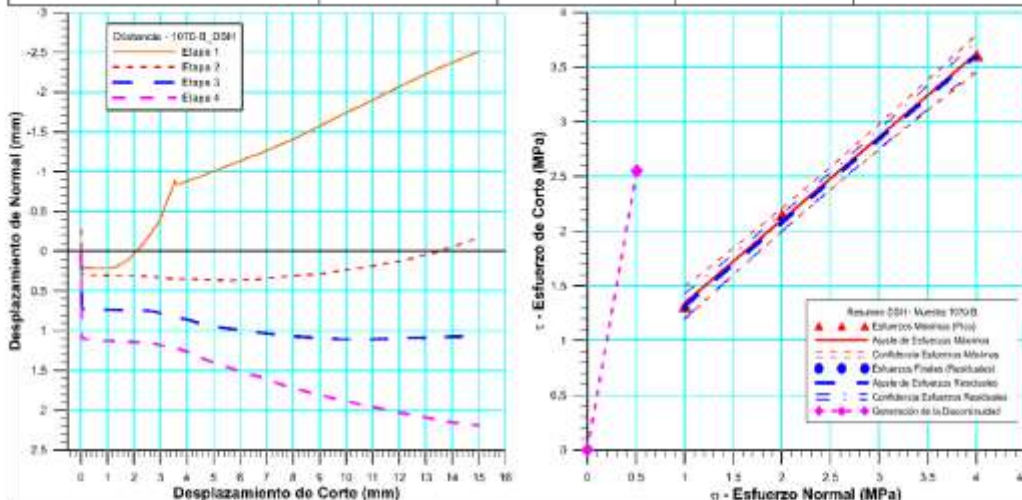
Figura 5.140 Espécimen DSH-1170-A_Baralt Sur – Progresiva 2+242.50

5.7.3.2 DSH-1170-B_Baralt Sur – Progresiva 2+242.50

 <p>CIENTFUEGOS LABORATORIO Y GERENCIA DE PROYECTOS S.A. RIF: J-31695694-6</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	Caracterización Material del Túnel Baralt – Sur - Progresiva 2+242,50			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7	
Miguel Castillejo		11-08-2015	Especimen: 1170-B_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Especimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.50837	2.55108	0.50210	0.71901
2	1.00427	1.31435	1.00130	1.29249
3	2.00293	2.15043	1.99603	2.10980
4	4.00269	3.61024	3.99392	3.58971



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(37.26) * s + 0.58$	$t = \tan(37.37) * s + 0.55$
Cohesión (c) (MPa)	0.58	0.55
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	37.26	37.37
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.34	2.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.36	2.33
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.70	2.71
Coefficiente de Determinación (R ²)	1.00	1.00

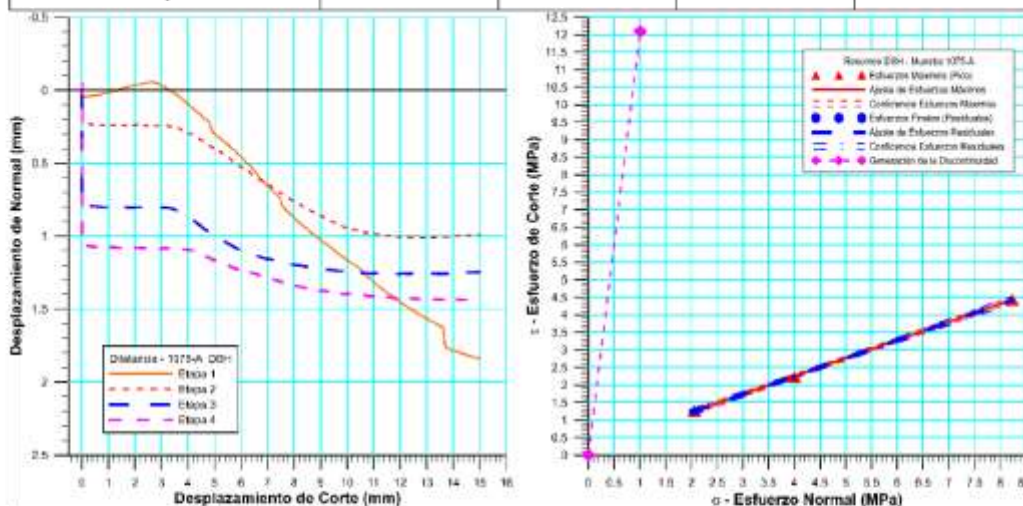
Figura 5.141 Especimen DSH-1170-B_Baralt Sur – Progresiva 2+242.50

5.7.3.3 DSH-1175-A_Baralt Norte – Progresiva 2+433.50

 <p>CIENTFUEGOS LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS RIF: J-31695694-6</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)</p>		 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p><i>Caracterización Material del Túnel Baralt – Norte - Progresiva 2+433,50</i></p>		
<p>Cálculo: Miguel Castillejo</p>	<p>Revisión:</p>	<p>Fecha: 12-08-2015</p>	<p>Página 6 de 7 Especimen:1175-A_DSH</p>

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Especimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	1.00528	12.09322	0.99961	8.07586
2	2.05452	1.26218	2.00038	1.23903
3	4.00433	2.22583	3.99860	2.21894
4	8.22985	4.43943	8.22200	4.43236



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(27.29) * s + 0.18$	$t = \tan(27.25) * s + 0.19$
Cohesión (c) (MPa)	0.18	0.19
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	27.29	27.25
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	4.76	4.74
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.64	2.63
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	5.31	5.35
Coefficiente de Determinación (R ²)	1.00	1.00

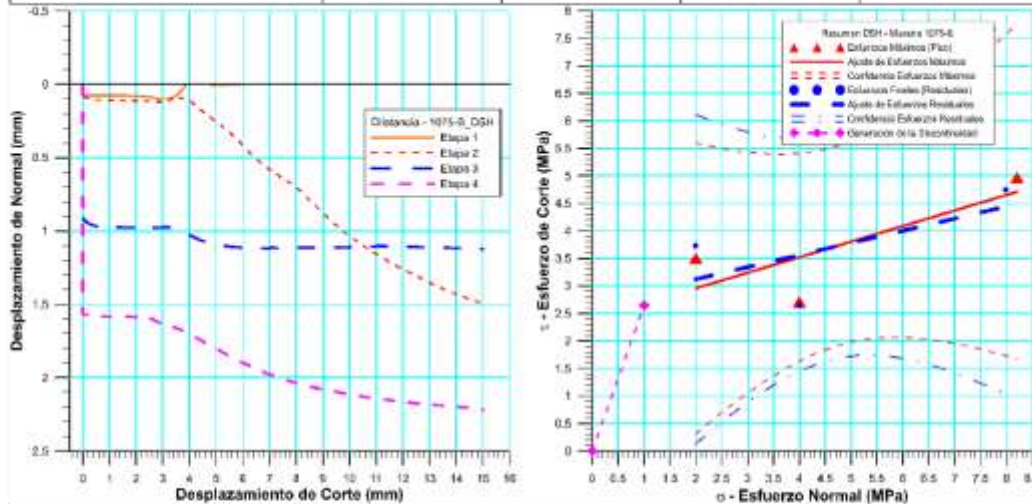
Figura 5.142 Especimen DSH-1175-A_Baralt Norte – Progresiva 2+433.50

5.7.3.4 DSH-1175-B_Baralt Norte – Progresiva 2+433.50

 <p>Cien Fuegos LABORATORIO Y SERVICIO DE PRUEBAS S.A. RIF: J-31695694-6</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Y SUELOS Ensayo Corte Directo – Estático (CNL)			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	Caracterización del Material del Túnel Baralt Baralt Norte - Progresiva 2+433,50 m			
	Cálculo: Miguel Castillejo	Revisión:	Fecha: Agosto 2015	Página 6 de 7 Espécimen: 1175-B_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	1.00340	2.64915	0.99915	1.33852
2	2.00100	3.50500	1.99492	3.72776
3	3.99990	2.71030	4.00187	2.64759
4	8.20296	4.97184	7.98219	4.74683



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(15.92) * s + 2.37$	$t = \tan(20.32) * s + 1.73$
Cohesión (c) (MPa)	2.37	1.73
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	15.92	20.32
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	3.80	3.74
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.46	3.12
Suma de los residuos cuadrados	1.03	2.49
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.48	3.93
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.71	0.61

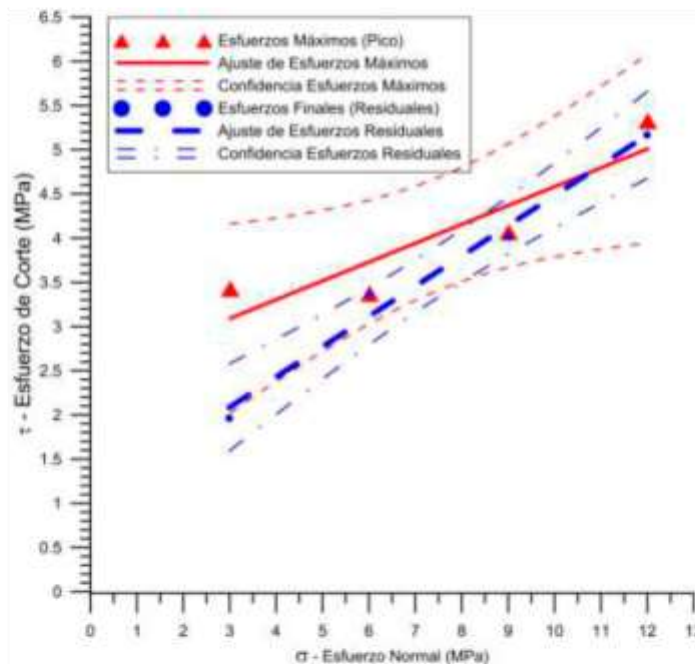
Figura 5.143 Espécimen DSH-1175-B_Baralt Norte – Progresiva 2+433.50

5.7.3.1 DSH-072-1_Ladera Baralt Norte

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			
	CONSORCIO BOYACÁ – LA GUAIRA LADERA NORTE EN BARALT			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		15/03/2013	Espécimen: 072-1

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	3.01260	3.42980	2.99117	1.96377
2	6.01568	3.37545	5.99901	3.35972
3	9.01211	4.07103	9.00504	4.01295
4	12.00986	5.32888	11.99335	5.16899



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.2131371807 * \sigma + 2.450083609$	$\tau = 0.3421561593 * \sigma + 1.061164016$
Cohesión (c) (MPa)	2.45	1.06
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	13.37	18.46
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ _n)	7.51256 MPa	7.49714
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4.05129 MPa	3.62636
Suma de los residuos cuadrados	0.433006	0.0918455
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.04263	5.27262
Coficiente de Determinación (R ²)	0.825093	0.982879

Figura 5.144 Espécimen DSH-072-1_Ladera Baralt Norte

5.7.4 Análisis de resultados - Corte Directo - Baralt Norte – Progresiva 2+433.50

DATOS GENERALES			
Proyecto	Caracterización de los materiales producto de la excavación Túnel, a efectos de evaluar y determinar su condición para ser utilizados en la construcción del relleno previsto ejecutar en el Valle Macayapa, integrado en el componente Distribuidor Macayapa, conforme al establecido en el respectivo Proyecto en condición VPC	Especímenes del análisis	1175-A-DSH-0 / 1175-B-DSH-0 /
Frente: Baralt	Galería: Norte	Progresiva: 2 + 433,50	Tipo de muestra: muestra de Mano, con obtención de Núcleo
Clasificación Geológica del Espécimen	Esquistos Cuarzo Micáceos	Formación Geológica	Complejo San Julián
Tipo de Roca	Moderada	Número de puntos en el análisis	5 Puntos
Nota:	Se descartó punto 2 del ensayo realizado sobre el espécimen 1175B-DSH. Dicho punto sugiere alta resistencia al corte asociado principalmente a la rugosidad remanente en la superficie de la discontinuidad, luego del primer ciclo de carga.		

Procedimiento

1. El análisis se realizó por el criterio de Mohr-Coulomb, para determinar los parámetros de cohesión c y ángulo de fricción ϕ , a través de la envolvente de falla generada con los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio.
2. Se empleó el programa RocData V4.0

Muestra	Punto	Máximo (Pico) – (MPa)	
		σ_n	τ
1175-A_DSH	2	2,05452	1,26184
1175-A_DSH	3	4,00433	2,22583
1175-A_DSH	4	8,22985	4.43943
1175-B_DSH	3	3,99990	2,71030
1175-B_DSH	4	8,20296	4,97184

Resultado

Cohesión c	0,215MPa	21,92t/m ²
Ángulo de Fricción ϕ	28,75°	

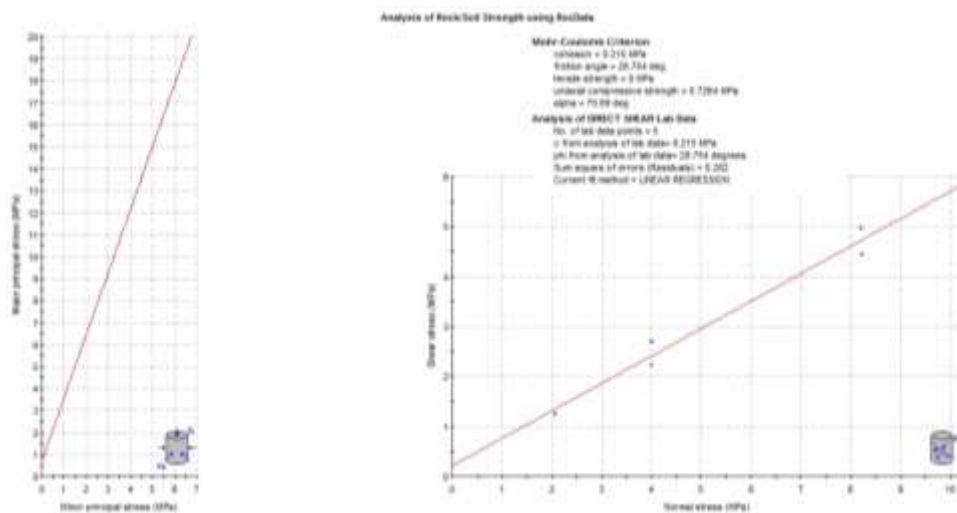


Figura 5.145 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico Baralt Norte – Progresiva 2+433.50, por el Criterio de Falla de Mohr-Coulomb

5.7.5 Análisis de resultados - Corte Directo - Baralt Sur – Progresiva 2+242.50

DATOS GENERALES			
Proyecto	Caracterización de los materiales producto de la excavación Túnel, a efectos de evaluar y determinar su condición para ser utilizados en la construcción del relleno previsto ejecutar en el Valle Macayapa, integrado en el componente Distribuidor Macayapa, conforme al establecido en el respectivo Proyecto en condición VPC	Especímenes del análisis	1170-A-DSH-0 / 1170-B-DSH-0 /
Frente: Baralt	Galería: Sur	Progresiva: 2 + 242,50	Tipo de muestra: muestra de Mano, con obtención de Núcleo
Clasificación Geológica del Espécimen	Esquistos Cuarzo Micáceos	Formación Geológica	Complejo San Julián
Tipo de Roca	Moderada	Número de puntos en el análisis	6 Puntos
Nota:			

Procedimiento

1. El análisis se realizó por el criterio de Mohr-Coulomb, para determinar los parámetros de cohesión c y ángulo de fricción ϕ , a través de la envolvente de falla generada con los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio.
2. Se empleó el programa RocData V4.0

Muestra	Punto	Máximo (Pico) – (MPa)	
		σ_n	σ_1
1170-A_DSH	2	1,02525	1,19475
1170-A_DSH	3	2,04904	1,99591
1170-A_DSH	4	4,10100	3,71106
1170-B_DSH	2	1,00427	1,31435
1170-B_DSH	3	2,00293	2,15043
1170-B_DSH	4	4,00269	3,61024

Resultado		
Cohesión c	0,465MPa	47,42t/m ²
Ángulo de Fricción ϕ	38,21°	

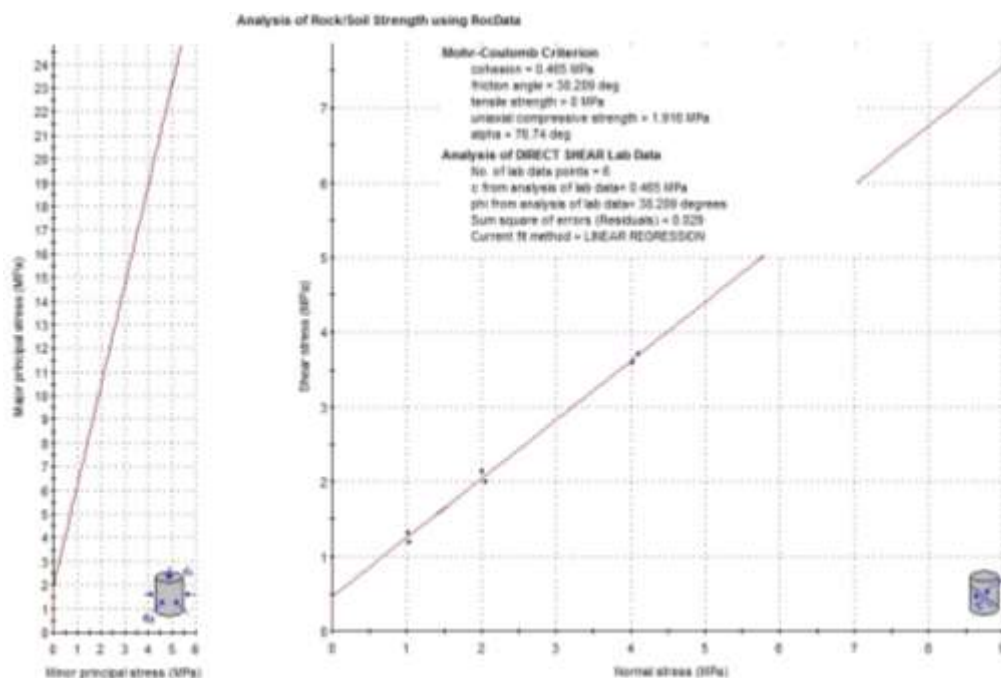


Figura 5.146 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico Baralt Sur – Progresiva 2+242.50, por el Criterio de Falla de Mohr-Coulomb

5.8 Sistema de Transporte Masivo Caracas-Guarenas-Guatire

5.8.1 Introducción

El siguiente Caso de Estudio corresponde a la caracterización geológica y geomecánica del macizo rocoso comprendido entre La Urbina hasta la ciudad de Guarenas, para la excavación de los túneles gemelos del Sistema de Transporte Masivo Caracas-Guarenas-Guatire.

El macizo rocoso donde se construirán los túneles gemelos, corresponden al esquisto de Las Mercedes en la Cordillera de la Costa. Todas las muestras obtenidas para el presente Caso de Estudio, espaciadas aproximadamente 1 km, y con profundidades superiores a los 100 m, que fueron realizadas por la Empresa Odebrecht, con la finalidad de obtener la información necesaria de la geología y también obtener los Parámetros Geomecánicos que suministrarán la información requerida para la adquisición de las topas (TBM), con las cuales se construirán los referidos túneles.

La construcción del sistema de transporte masivo, atravesará al menos 16 km de la Cordillera de la Costa, y para este tipo de construcción es necesario tener información previa con respecto a la litología, geología estructural, hidrogeología y el Comportamiento Geomecánico de la zona para comprender las condiciones del macizo rocoso y anticipar algún inconveniente que pudiera presentarse durante la construcción de los túneles.

Al excavar los túneles se altera el estado de equilibrio de los esfuerzos preexistentes en el macizo rocoso, generando una nueva distribución o reacomodo de los esfuerzos, que llevará al macizo rocoso a un nuevo estado de equilibrio, que aunado a las variaciones de resistencia debido a las discontinuidades y la excavación, producirá una deformación en la masa rocosa; durante el desarrollo de esta excavación, será necesario aplicar un sostenimiento, con la finalidad de contrarrestar el nuevo estado de esfuerzos, evitando el desprendimiento de fragmentos de roca alrededor de la excavación generados por los empujes actuantes en el revestimiento final diseñado.

5.8.2 Generalidades del Proyecto

El proyecto del Sistema de Transporte Masivo Caracas-Guarenas-Guatire, unirá la urbanización La Urbina con las ciudades de Guarenas y Guatire. El tramo a construir entre la Urbanización La Urbina y la ciudad de Guarenas, corresponde a los tramos 1, 2 y 3 y se articula en un sector de montaña de topografía bastante abrupta y en ocasiones de difícil acceso

Estos tramo tiene una longitud de 17.922,06 kilómetros divididos en tres (3) tramos de los cuales, el tramo 1 se desarrolla entre las progresivas 0+000 y 5+988,04, el tramo 2 entre las progresivas 5+988,04 y 13+134,19 y el tramo 3 entre las progresivas 13+134,19 y 17+922,06.

Como puntos de interés relacionados con la línea del Metro y de Oeste hacia el Este, se pueden citar las urbanizaciones La Urbina, Petare, Miranda y Caucagüita, las quebradas Turumo, Caucaguita e Izcaragua, la carretera vieja Caracas-Guarenas y la autopista Caracas-Barcelona.

El alineamiento prevé la construcción de seis (6) viaductos, cinco (5) túneles y con presencia de cortes eventuales, identificándose todos, desde el Oeste hacia el Este, de la siguiente manera:

- **TRAMO 1** [DESDE PROGRESIVA 0+000 HASTA 5+988,04]
 - a) **Túnel N°1** [Túnel Waraira-Repano] con una longitud de 5.532 metros (progresivas 0+000 y 5.532). Se compone de dos tramos, el primero de tipo minero (progresivas 0+000 y 1+200) y el restante mediante TBM (Túnel Boring Machine). Entre las progresivas 0+738 y 0+976 está ubicada la estación Waraira Repano.
 - b) Sector de corte con presencia de depósitos artificiales (rellenos y/o botes de tierra) entre las progresivas 5+532 y 5+725
 - c) Sector de viaducto entre las progresivas 5+725 y 5+772, cruzando la quebrada Turumo con presencia de depósitos aluviales.
 - d) Sector de corte entre las progresivas 5+772 y 5+937
 - e) Sector de viaducto entre las progresivas 5+937 y 5+970
 - f) Pequeño sector de corte entre las progresivas 5+970 y 5+988,04
- **TRAMO 2** [DESDE PROGRESIVA 5+988,04 HASTA 13+134,19]
 - a) **Túnel N°2** [Túnel La Encantada] con una longitud de 1328 metros (progresivas 5+988 y 7+316).

- b) Sector de corte entre las progresivas 7+316 y 7+355
- c) Sector de viaducto de 266 metros de longitud entre las progresivas 7+355 y 7+621 cruzando la carretera Caracas-Guarenas y la quebrada El Encantado en donde se detectan depósitos coluviales y aluviales y terminando al inicio de la estación Caucagüita con 240 metros de longitud.
- d) Desde la progresiva 7+621 hasta la progresiva 7+861, final de la estación Caucaguita.
- e) **Túnel N°3** [Túnel Caucaguita] con una longitud de 5.273 metros (progresivas 7+861 y 13+134,19).
- **TRAMO 3** [DESDE PROGRESIVA 13+134,19 HASTA 17+922,06]
 - a) Sector de corte entre las progresivas 13+134 y 13+190.
 - b) Sector de viaducto de 195 metros de longitud entre las progresivas 13+190 y 13+385.
 - c) Sector de corte entre las progresivas 13+385 y 13+450.
 - d) **Túnel N°4** [Túnel Izcaragua] con una longitud de 2.676 metros (progresivas 13+450 y 16+126).
 - e) Sector de corte entre las progresivas 16+126 y 16+191.
 - f) Sector de viaducto de 82 metros de longitud entre las progresivas 16+191 y 16+273.
 - g) Pequeño sector de corte de 20 metros entre las progresivas 16+273 y 16+293.
 - h) **Túnel N°5** [Túnel Mampote] con una longitud de 1.629 metros (progresivas 16+293 y 17+922,06).

El trazado propuesto se desarrolla sobre una topografía de montaña con laderas abruptas que conforman una serie de cuencas características de las unidades litológicas que conforman el área de estudio y sus alrededores y en donde sobresalen materiales de tipo esquistoso.

En términos generales, se puede señalar que el trazado del futuro Metro, se extenderá a través de las cuencas de manera general y local, las cuales presentan diversas laderas con una dinámica que se manifiesta a través de procesos geomorfológicos de magnitud y naturaleza bastante variada. Dentro de esta gama de procesos geomorfológicos se destacan aquellos clasificados como de movimientos de masa y algunos de movimientos de partículas o de erosión.

5.8.3 Geología Regional

La zona en estudio está ubicada en el Esquisto Las Mercedes, el presente mapa geológico muestra sus características.

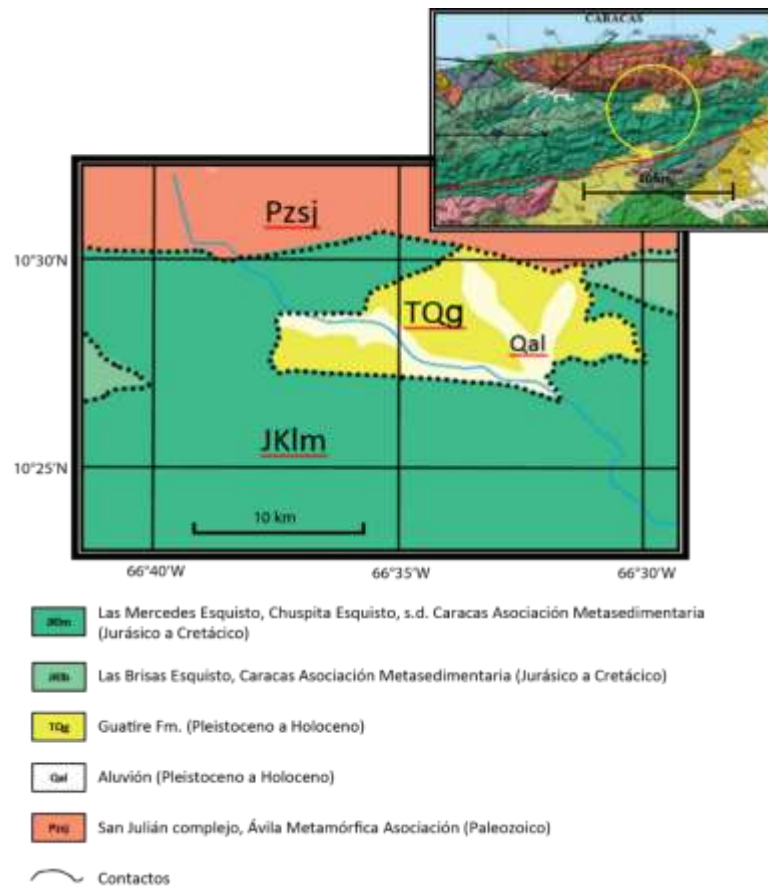


Figura. 5.147 Ubicación de la zona de estudio (mapa geológico de Cordillera de la Costa. Tomado y modificado de Urbani & Rodríguez 2004)

Esquisto Las Mercedes

Originalmente denominado Formación Las Mercedes, que diferentes autores definieron como:

- Esquisto calcáreo, con zonas grafitosas y micáceas, de un tinte rosado a gris, con zonas blancas cuando se trata de roca fresca, también incluyen una zona en capas delgadas de calizas oscuras y densas, interestratificadas con capas de esquistos micáceos y arcillosos, todo intensamente plegado, que se denominan Fase Los Colorados, **(Aguerrevere y Zuloaga, 1937)**

- Esquisto cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes, denominado "Caliza de Los Colorados" cuando alcanza gruesos espesores, **(Wehrmann. 1972)**.

Urbani et al. (1989) En la zona de La Sabana - Chirimena - Capaya, Distrito Federal y Miranda, registran cuatro unidades cartografiables, la primera y mayoritaria de esquisto grafitoso y mármol, de metaconglomerado cuarzo - feldespático - calcáreo, de metaconglomerado y metarenisca y de esquisto albítico – grafitoso; correspondiendo todas estas rocas a un metamorfismo de bajo grado en la facies de los esquistos verdes, zona de la clorita.

Aguerrevere & Zuloaga (1937) introducen el nombre de *Esquistos de Las Mercedes* para designar una extensa unidad en la región de Caracas y al año siguiente, lo elevan a rango formacional **(Aguerrevere & Zuloaga, 1938)**. Posteriormente, **Dengo (1950)** y demás tesis doctorales de la Universidad de Princeton, aceptan esta unidad y la cartografían como una amplia franja al sur de Caracas, pero continuando al este hasta Cabo Codera y hacia el oeste más allá de Tinaquillo.

Básicamente la litología consiste en un esquisto de grano de fino a medio con buena foliación de edad relativa Mesozoica, datadas mediante fósiles; el color característico es gris pardusco debido al alto contenido de grafito, la mineralogía consiste aproximadamente de (40%) de cuarzo en cristales dispuestos pseudoparalelos con las micas, un (20%) de muscovita lepidoblásticas en bandas, (23%) de calcita en cristales con maclas polisintéticas, (5%) de grafito y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y ocasionalmente plagioclasa sódica. El mármol intercalado con el esquisto se presenta en capas delgadas usualmente de centimétricas a decimétricas, son de color gris azulado, cuya mineralogía es casi en su totalidad calcita, escasa dolomita y cantidades accesorias de cuarzo, muscovita, grafito, pirita y óxidos de hierro, que al meteorizar, infunde una coloración rosada a rojo ladrillo a la roca, **(González de Juana et al, 1980, p 317)**.

Azuarde (2005), más tarde en la autopista entre Guatire y Caucagua cuantificó las proporciones del Esquisto de Las Mercedes dando como resultado que éste está constituido por 40% de filita/esquisto grafitoso, 35% de metarenisca y 25% de mármol Durante el proceso de

meteorización, la filita negra cambia a colores blanquecinos y las vetas blancas pasan a colores pardos, interpretándose que con el avance del frente de meteorización, la roca sufre una pérdida total o parcial del grafito que incide en el cambio de color y de conductividad, mientras que el avance de la coloración parda se debe al depósito de micropartículas de Goethita transportadas en soluciones coloidales que permean la veta a través de las superficies intergranulares y los defectos estructurales de la Calcita, donde la Goethita proviene mayormente de la oxidación de la Pirita y otros minerales primarios de la roca caja. **(De Abrisqueta, A. et al, 2011)**

La ubicación geográfica del Esquisto Las Mercedes abarca toda la extensión y los flancos del macizo central de la Cordillera de la Costa, entre Carenero, estado Miranda, hasta el estado Cojedes, donde la localidad tipo se ubica en la antigua Hacienda Las Mercedes al Este de Caracas, estado Miranda, hoy urbanizaciones Las Mercedes y Valle Arriba, pero, debido a la consecuente desaparición de los afloramientos de la localidad-tipo producto del crecimiento del urbanismo se propone como sección de referencia a la carretera Petare - Santa Lucía, donde está expuesta una sección casi continua hasta su transición con el Esquisto de Chuspita, **(Wehrmann. 1972)**. No obstante, los cambios ocurridos en estas carreteras en las últimas tres décadas, como el incremento del urbanismo informal, la meteorización y el tráfico pesado, hacen que en la práctica sean inutilizables como sitios de referencia, proponiéndose como una nueva localidad de referencia la quebrada Canoa al sur de Caracas, ya que es aquella que muestra mayor continuidad de afloramientos muy frescos, **(Urbani F. et al, 2012)**.

Muy poco se ha escrito sobre el ambiente en el cual se depositó el Esquisto las Mercedes; no obstante, **Oxburgh (1965)**, sugiere dos fuentes principales de sedimento: una meridional, suplidora de cuarzo puro, y una occidental para el material cuarzo-feldespático más joven (Complejo de El Tinaco), presentando un esquema transgresivo hacia el Sur, sobre una plataforma somera, en la cual se depositaron lutitas negras, con facies oriental más arenosa; mientras tanto, **Talukdar y Loureiro (1982)**, sugieren un ambiente euxínico en una cuenca externa a un arco volcánico.

5.8.3.1 Estratigrafía

Desde el punto de vista estratigráfico la región de Caracas y áreas adyacentes, definida como Gran Caracas, está caracterizada por una secuencia de rocas meta-sedimentarias (metamorfismo regional bajo perteneciente a la facies de los esquistos verdes) de edad Jurásico-Cretáceo perteneciente al Grupo Caracas que reposan en discordancia sobre un complejo ígneo- metamórfico del Paleozoico Inferior. En un comienzo la sedimentación de estas rocas es típica de plataforma, lenta y progresivamente más profunda. Al final de esta primera fase se producen eventos volcánicos que señalan el inicio de la facies Eugeosinclinal del Grupo Post-Caracas mediante el cual se produce una sedimentación en ambiente de surco, de aguas profundas y rápidas, por efectos de corrientes de turbidez, y con abundantes aportes de materiales volcánicos.

5.8.3.2 Geología Estructural

De la misma forma, en el área de Caracas, y a escala regional se reconocen tres estructuras principales de tipo anticlinal: el anticlinorio de El Ávila, con rumbo Este-Oeste y los anticlinales de El Junquito y Baruta con rumbo aproximado N70°E, separados por el sinclinal de El Cementerio. El Macizo de El Ávila, clasificado como una cuña empotrada, está definido por fallas longitudinales normales y con movimientos esencialmente epirogenético por efecto del empuje de un magma profundo.

Se reconocen tres tipos de fallas:

- a) Fallas **oblicuas** con rumbos N50°-80°E (fallas de gravedad y corrimientos).
- b) Fallas **longitudinales** con rumbo Este-Oeste (fallas de gravedad con movimiento posterior a lo largo del rumbo, representadas por el sistema de fallas de El Ávila).
- c) Fallas **transversales** con rumbo N60°W (fallas de rasgadura con movimientos verticales).

Además, el tramo en estudio se caracteriza por la presencia de una serie de accidentes estructurales que han moldeado este importante sector de manera compleja dificultando a veces su interpretación desde el punto de vista geológico-geomorfológico. Por lo tanto se ha

estimado conveniente enmarcar la investigación, previamente dentro de la geología del Área Metropolitana de Caracas, para luego enfocarnos en la geología local que caracteriza el sector de estudio.

5.8.3.3 Geología Estructural Local

En el área de estudio destaca la traza más oriental del sinclinal de El Cementerio que cruza primeramente los sedimentos cuaternarios depositados en la Urbanización La Urbina, para luego recorrer en sentido Oeste-Este la totalidad de la urbanización Miranda. Es de hacer notar que el trazado del Metro cruza en varias ocasiones el mencionado sinclinal.

Además, se extiende también una porción del sistema de fallas de El Ávila, cuyo eje principal se ubica muy cerca y al norte del trazado, y la falla de Caucagüita que se origina desde el mismo eje principal de la falla de El Ávila y a la altura de la urbanización Miranda.

A continuación se hace una descripción de lo más relevante desde el punto de vista de la geología estructural.

- **Sistema de fallas de El Ávila**, es la estructura de mayor jerarquía presente en el área que confina el homónimo macizo montañoso desarrollándose en ambos flancos y en el pie de sus laderas. Obviamente en el área de estudio, se está considerando la traza principal ubicada al Sur de la serranía extendiéndose en líneas generales con rumbo Este - Oeste y al Norte del trazado, con distancias aproximadas de setecientos (700) a mil (1.000) metros hasta la progresiva 6+500, para luego alejarse significativamente del trazado.

Sin embargo es muy importante señalar que, por tratarse de un significativo sistema de fallas, se han producido efectos secundarios asociados que han provocado lineamientos estructurales de importancia que están afectando directa o indirectamente el trazado y que pueden identificarse como fallas secundarias, diaclasas maestras, diaclasas continuas locales.

- **Falla de Caucagüita**. Se le asignó este nombre para diferenciarla de otros lineamientos estructurales de igual importancia, y señalados en los planos, por el hecho de que su traza se desarrolla sobre una falla inferida mencionada a nivel de geología regional. Ella tiene

origen al Norte de la Urbanización Miranda a la altura de la progresiva 5+000 y, desviándose con un ángulo cercano a los 15° con respecto a la falla de El Ávila, se va extendiendo hacia al Sureste pasando al Norte de la urbanización Caucagüita para luego cruzar el trazado del Metro a la altura de la progresiva 9+400 y seguir con dirección Sureste.

A la altura de la progresiva 12+000, y al Sur del helipuerto Ávila, la traza de la falla, pasando al Sur del Club Izcaragua, vuelve a acercarse al trazado del Metro cruzándolo nuevamente a la altura de la progresiva 16+250 para luego seguir paralelamente y levemente al Norte hasta el final de la línea en la progresiva 18+000 y posiblemente más allá.

- **Fallas transversales.** Adicionalmente se reportan otras fallas de importancia, con rumbos generalizados Noroeste-Sureste que cortan el trazado en sentido sub-ortogonal, como por ejemplo:
 - a) La falla que cruza la estación Waraira Repano a la altura de la progresiva 0+956, para luego alejarse progresivamente del trazado y hacia el Sureste.
 - b) Progresiva 5+675, en combinación con otro accidente estructural, al Este y muy cerca de la urbanización Miranda y sobre el curso del río Guarenas.
 - c) Progresiva 6+345
 - d) Progresiva 7+000 como un ramal de la falla de Caucagüita.
 - e) Progresiva 7+800 a la altura de la estación Caucagüita.
 - f) Progresiva 10+350 paralela con la falla de Caucagüita.
 - g) Progresiva 13+200 a la altura del Club Izcaragua.

Se reportan también otras de alcance menor, como por ejemplo:





- h) Progresiva 15+850
 - i) Progresiva 17+100
 - j) Progresiva 17+350
 - k) Progresiva 17+750
- **Fallas oblicuas.** También se reportan trazas de cierta importancia asociadas con estas discontinuidades que, a nivel de la obra, pueden representar puntos de mayor o menor fragilidad estructural.

-
- Progresiva 4+080
 - Progresiva 4+485
 - Progresiva 5+245
 - Progresiva 5+680
 - Progresiva 6+370
 - Progresiva 8+880
 - Progresiva 9+230
 - Progresiva 9+310
 - Progresiva 10+660
 - Progresiva 10+850
 - Progresiva 11+590
 - Progresiva 11+850
 - Progresiva 12+460
 - Progresiva 13+250
 - Progresiva 13+370
 - Progresiva 14+260
 - Progresiva 14+540
 - Progresiva 15+610
 - Progresiva 16+600
 - Progresiva 16+900
 - Progresiva 17+655
 - Progresiva 17+850

La importancia de las mencionadas fallas, o accidentes estructurales mayores, reside en el hecho de que son orígenes de otros lineamientos estructurales secundarios detectados con la ayuda de la interpretación de fotografías aéreas, de misiones con años de confección y diferentes escalas, y a veces con controles de campo. Mediante esta técnica se ha logrado ampliar favorablemente el escenario estructural, muy útil desde el punto de vista preventivo debido a las intervenciones que, por efecto de la obra, obligatoriamente se producirán a lo largo de todo el trazado.

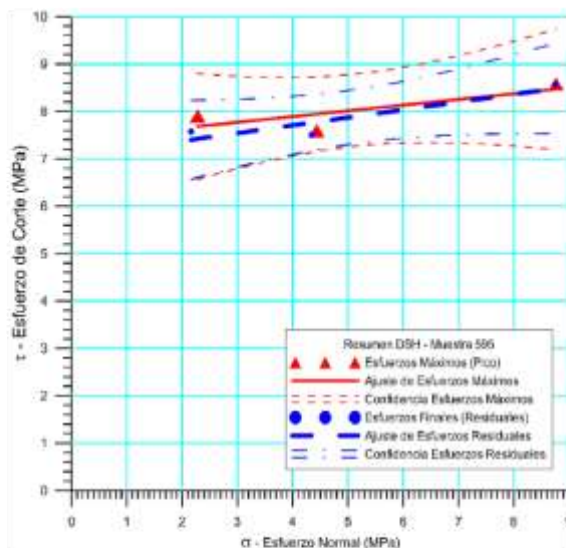
5.8.4 Perforación BH-10

5.8.4.1 *Espécimen 182-DSH*

 RIF: J-00161691-6  RIF: J-294781135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-2000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 182	

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.28209	7.91015	2.16300	7.57400
2	4.43611	7.60319	4.34533	7.50712
3	8.76569	8.58017	8.74667	8.56867



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.12095 \cdot \sigma + 7.41$	$\tau = 0.16412 \cdot \sigma + 7.05$
Cohesión (c) (MPa)	7.41	7.05
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	6.70	9.32
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (m_x)	5.1613	5.085
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	8.03117	7.88326
Suma de los residuos cuadrados	0.180192	0.10103
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.319022	0.60588
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.639049	0.857083

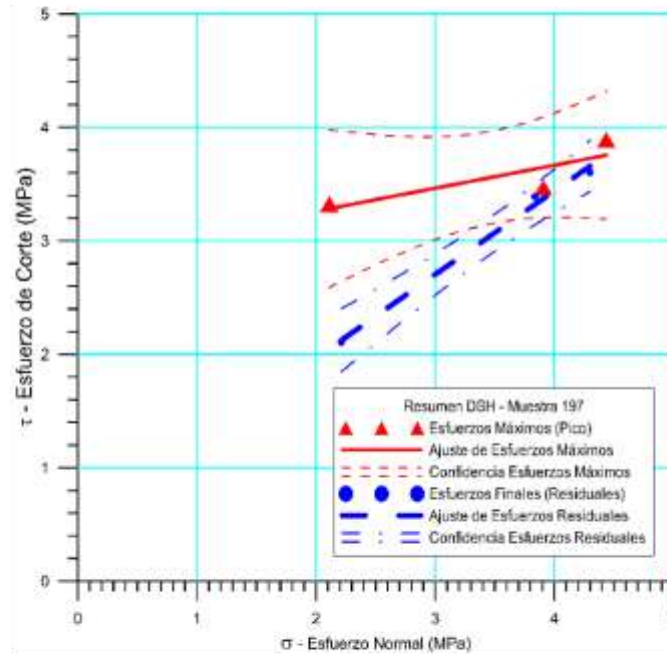
Figura 5.148 *Espécimen 182-DSH* _ Perforación BH-10 – STMCGG

5.8.4.2 *Espécimen 197-DSH*

 <p>ODEBRECHT RIF: J-00363691-6 PERFORACIONES TECNODRILL C.A. RIF: J-29478135-7</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 30-09-2013	Página 5 de 7	
			Espécimen: 197	

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.11220	3.32444	2.21156	2.10781
2	4.43445	3.89107	4.29801	3.60340
3	3.90635	3.47010	3.83639	3.38965



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.20240 * s + 2.86$	$t = 0.73572 * s + 0.50$
Cohesión (c) (MPa)	2.86	0.50
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	11.44	36.34
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	3.4843	3.4487
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.5619	3.0336
Suma de los residuos cuadrados	0.0518	0.0083
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.1214	1.3002
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.7011	0.9937

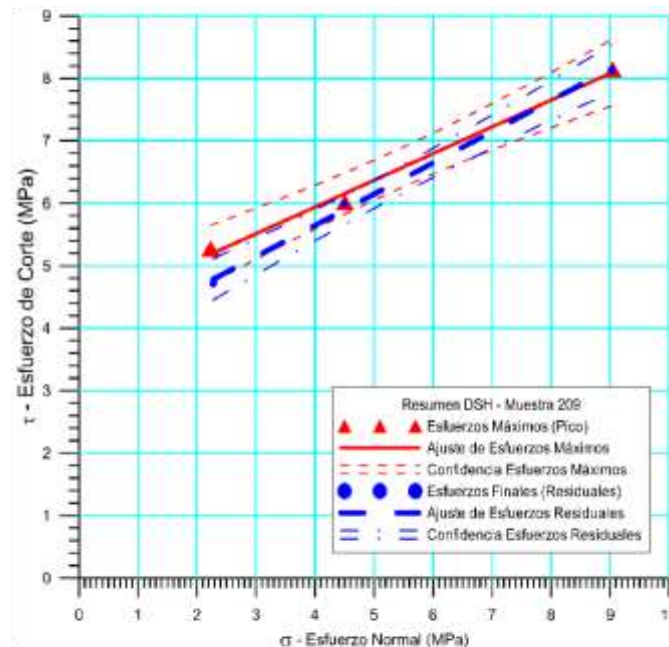
Figura 5.149 Espécimen 197-DSH _ Perforación BH-10 – STMCGG

5.8.4.3 *Espécimen 209-DSH*

 <p>ODEBRECHT RIF: J-00363691-6 PERFORACIONES TECNODRILL S.A. RIF: J-29478135-7</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO</p>			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p>SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)</p>			
<p>Cálculo: M. CASTILLEJO</p>	<p>Revisión:</p>	<p>Fecha: 30-09-2013</p>	<p>Página 5 de 7 Espécimen: 209</p>	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.23123	5.27781	2.27377	4.71409
2	4.50685	6.01445	4.49323	5.99400
3	9.04063	8.14438	9.03412	8.13238



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.42790 * s + 4.23$	$t = 0.50050 * s + 3.64$
Cohesión (c) (MPa)	4.23	3.64
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	23.17	26.59
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.2596	5.2670
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	6.4789	6.2802
Suma de los residuos cuadrados	0.0315	0.0159
Regresión Suma de los residuos cuadrados	4.4007	5.9492
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9929	0.9973

Figura 5.150 *Espécimen 209-DSH* _ Perforación BH-10 – STMCGG

5.8.4.4 Envolvente de Falla BH-10

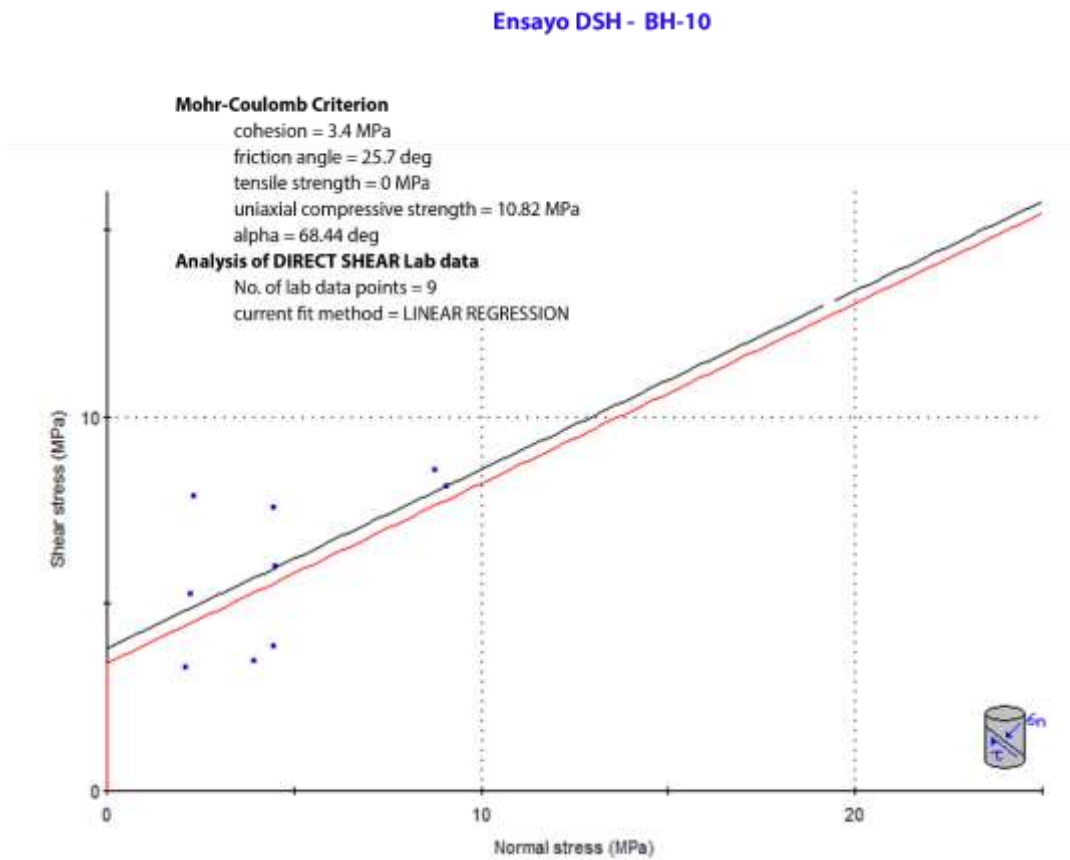





Figura 5.151 Envolvente de Falla Criterio de Mohr-Coulomb en Ensayos de Corte Perforación BH-10 STMCGG

En la Figura 5.151, se muestran los valores arrojados por el ensayo de corte directo (DSH), los cuales son: cohesión 3.24 MPa, y ángulo de fricción 25.7°, valores que dependen directamente del esfuerzo normal y las propiedades resistentes de los planos de debilidad. Estos son los resultados de cohesión y ángulo de fricción de las continuidades, muy diferentes a los valores arrojados por el modelo geomecánico por el criterio Hoek & Brown a partir de las compresiones en la roca intacta.

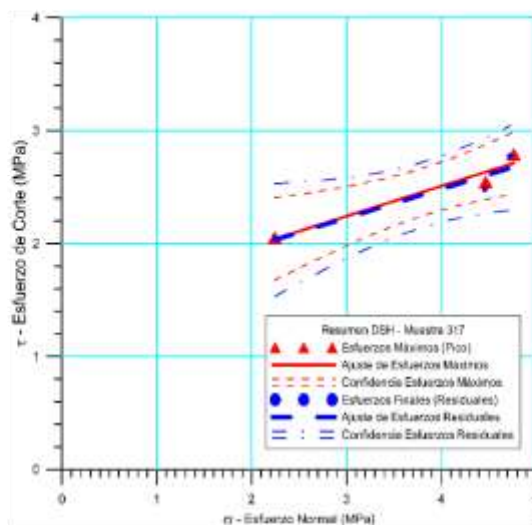
5.8.5 Perforación BH-11

5.8.5.1 *Espécimen 317-DSH*

 <p>RIF: J-00363691-6</p>  <p>RIF: J-29478135-7</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO</p> <p>SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)</p>			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p>Cálculo: M. CASTILLEJO</p>	<p>Revisión:</p>	<p>Fecha: 30-09-2013</p>	<p>Página 5 de 6</p> <p>Espécimen: 317</p>

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.24411	2.05159	2.24504	2.04495
2	4.46925	2.54581	4.45930	2.47963
3	4.76378	2.78996	4.72748	2.77554



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.26628 * s + 1.44$	$t = 0.25639 * s + 1.46$
Cohesión (c) (MPa)	1.44	1.46
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	14.91	14.38
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	3.8257	3.8106
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.4625	2.4334
Suma de los residuos cuadrados	0.0139	0.0261
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.2691	0.2440
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9509	0.9035

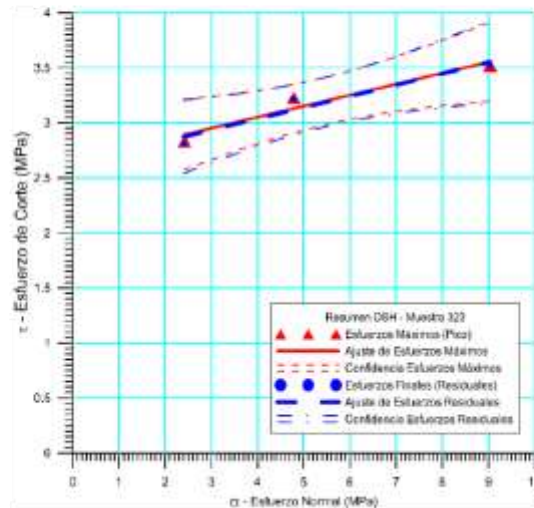
Figura 5.152 Espécimen 317-DSH _ Perforación BH-11 – STMCGG

5.8.5.2 *Espécimen 323-DSH*

 <p>ODEBRECHT RIF: J-00363691-6 PERFORACIONES TECNODRILL C.A. RIF: J-29478135-7</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO</p>			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p>SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)</p>			
<p>Cálculo: M. CASTILLEJO</p>	<p>Revisión:</p>	<p>Fecha: 30-09-2013</p>	<p>Página 5 de 6 Espécimen: 323</p>	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.24411	2.05159	2.24504	2.04495
2	4.46925	2.54581	4.45930	2.47963
3	4.76378	2.78996	4.72748	2.77554







VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.26628 * s + 1.44$	$t = 0.25639 * s + 1.46$
Cohesión (c) (MPa)	1.44	1.46
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	14.91	14.38
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	3.8257	3.8106
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.4625	2.4334
Suma de los residuos cuadrados	0.0139	0.0261
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.2691	0.2440
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9509	0.9035

Figura 5.153 Espécimen 323-DSH _ Perforación BH-11 – STMCGG

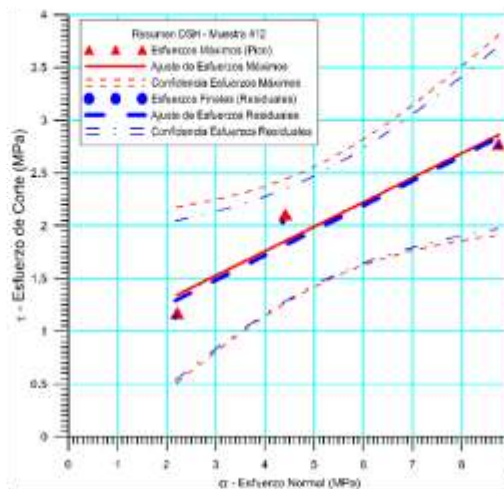
5.8.6 Perforación BH-17

5.8.6.1 Espécimen 412-DSH

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO		  RIF: G-20000662-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)		
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 412

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.21434	1.17511	2.17616	1.13498
2	4.41903	2.10941	4.36177	2.03490
3	8.75196	2.77427	8.74242	2.75708



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.23194 * s + 0.83$	$t = 0.23526 * s + 0.78$
Cohesión (c) (MPa)	0.83	0.78
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	13.06	13.24
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.1284	5.0935
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.0196	1.9757
Suma de los residuos cuadrados	0.1005	0.0833
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1.1903	1.2376
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9222	0.9369

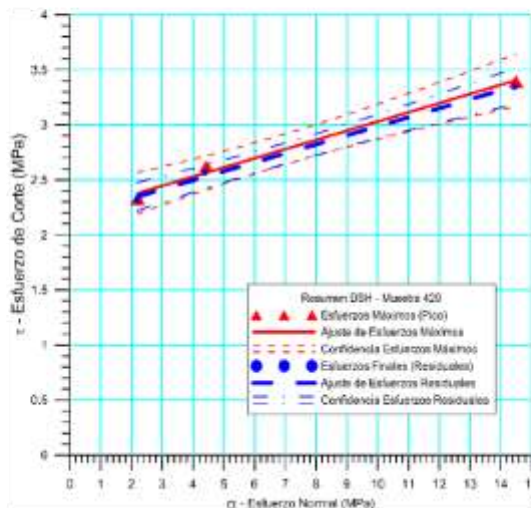
Figura 5.154 Espécimen 412-DSH _ Perforación BH-17 – STMCGG

5.8.6.2 *Espécimen 429-DSH*

 <p>ODEBRECHT RIF: J-00363691-6 PERFORACIONES TECNODRILL C.A. RIF: J-29478135-7</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO</p>			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p>SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)</p>			
<p>Cálculo: M. CASTILLEJO</p>	<p>Revisión:</p>	<p>Fecha: 30-09-2013</p>	<p>Página 5 de 6 Espécimen: 429</p>	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.20394	2.33050	2.18505	2.31348
2	4.43614	2.62464	4.38905	2.56808
3	14.49551	3.39402	14.44773	3.34295



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.08345 * s + 2.20$	$t = 0.08182 * s + 2.17$
Cohesión (c) (MPa)	2.20	2.17
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	4.77	4.68
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	7.0452	7.0073
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.7831	2.7415
Suma de los residuos cuadrados	0.0060	0.0028
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.5972	0.5722
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9901	0.9951

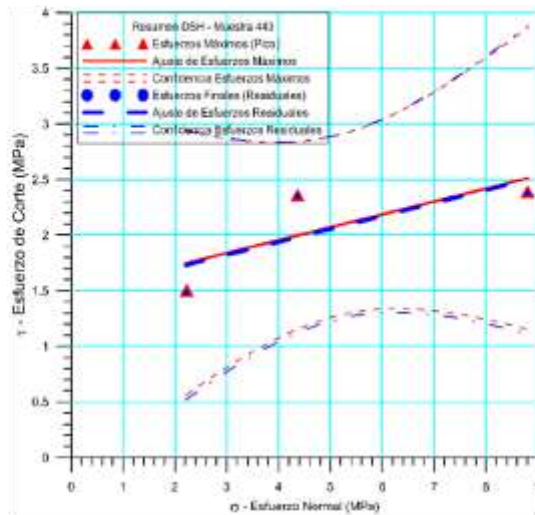
Figura 5.155 Espécimen 429-DSH _ Perforación BH-17 – STMCGG

5.8.6.3 Espécimen 443-DSH

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO		  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)		
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Especimen: 443

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Especimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.22990	1.50449	2.21098	1.48173
2	4.36513	2.35943	4.37462	2.35373
3	8.80533	2.39340	8.79647	2.37647





Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.11585 * s + 1.49$	$t = 0.11656 * s + 1.47$
Cohesión (c) (MPa)	1.49	1.47
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	6.61	6.65
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.1335	5.1274
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.0858	2.0706
Suma de los residuos cuadrados	0.2054	0.2143
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.3020	0.3061
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.5953	0.5882

Figura 5.156 Espécimen 443-DSH _ Perforación BH-17 – STMCGG

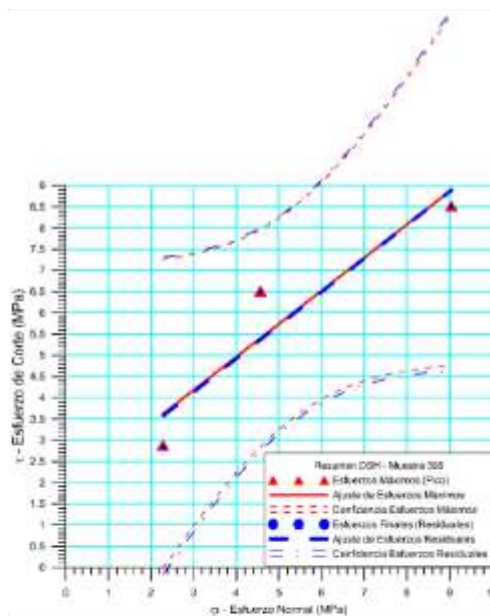
5.8.7 Perforación BH-40

5.8.7.1 *Espécimen 395-DSH*

 <p>ODEBRECHT RIF: J-00363691-6 PERFORACIONES TECNODRELL S.A. RIF: J-29478135-7</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO		 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMC GG)		
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 30-09-2013	Página 5 de 6 Espécimen: 395

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,27833	2,88262	2,29735	2,82275
2	4,56629	6,51426	4,54521	6,49316
3	9,04125	8,51832	9,04095	8,50960



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	1,84	1,78
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	37,96	38,20
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,2953	5,2945
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5,9717	5,9418
Suma de los residuos cuadrados	1,9170	2,0249
Regresión Suma de los residuos cuadrados	14,4051	14,6011
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,8826	0,8782

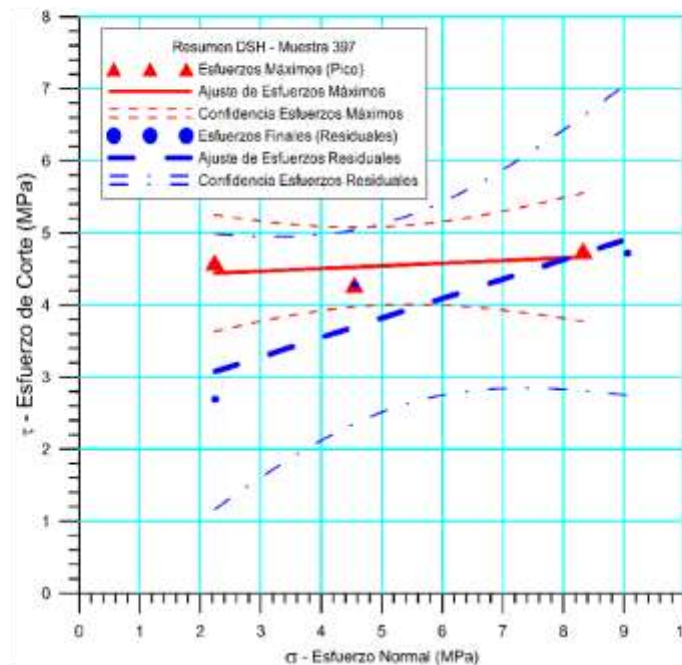
Figura 5.157 Espécimen 395-DSH _ Perforación BH-40 – STMC GG

5.8.7.2 *Espécimen 397-DSH*

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 397	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,23926	4,59286	2,24794	2,69168
2	4,54491	4,28208	4,55896	4,28208
3	8,32681	4,75646	9,06323	4,71740



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	4,36	2,47
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	2,10	15,10
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,0370	5,2900
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4,5438	3,8971
Suma de los residuos cuadrados	0,0908	0,5260
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0,0253	1,7481
Coficiente de Determinación (R^2)	0,2177	0,7687

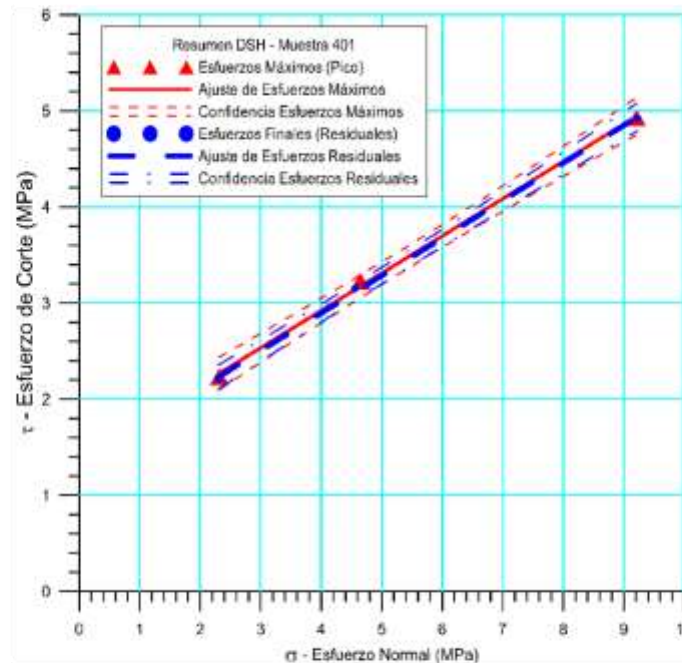
Figura 5.158 Espécimen 397-DSH _ Perforación BH-40 – STMCGG

5.8.7.3 Espécimen 401-DSH

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 401	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,31468	2,23399	2,29844	2,20472
2	4,64905	3,22578	4,55662	3,15124
3	9,21036	4,92666	9,21884	4,92198



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	1,37	1,33
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	21,21	21,34
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,3914	5,3580
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3,4621	3,4260
Suma de los residuos cuadrados	0,0041	0,0023
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3,7049	3,8027
Coficiente de Determinación (R^2)	0,9989	0,9994

Figura 5.159 Espécimen 401-DSH _ Perforación BH-40 – STMCGG

5.8.7.4 *Envolvente falla*

El estudio del ensayo de corte se concentra en las discontinuidades, logrando tener así una visión completa de la matriz rocosa, ya que en este caso no solamente se compone de roca intacta sino de múltiples discontinuidades. (Figura 5.158)

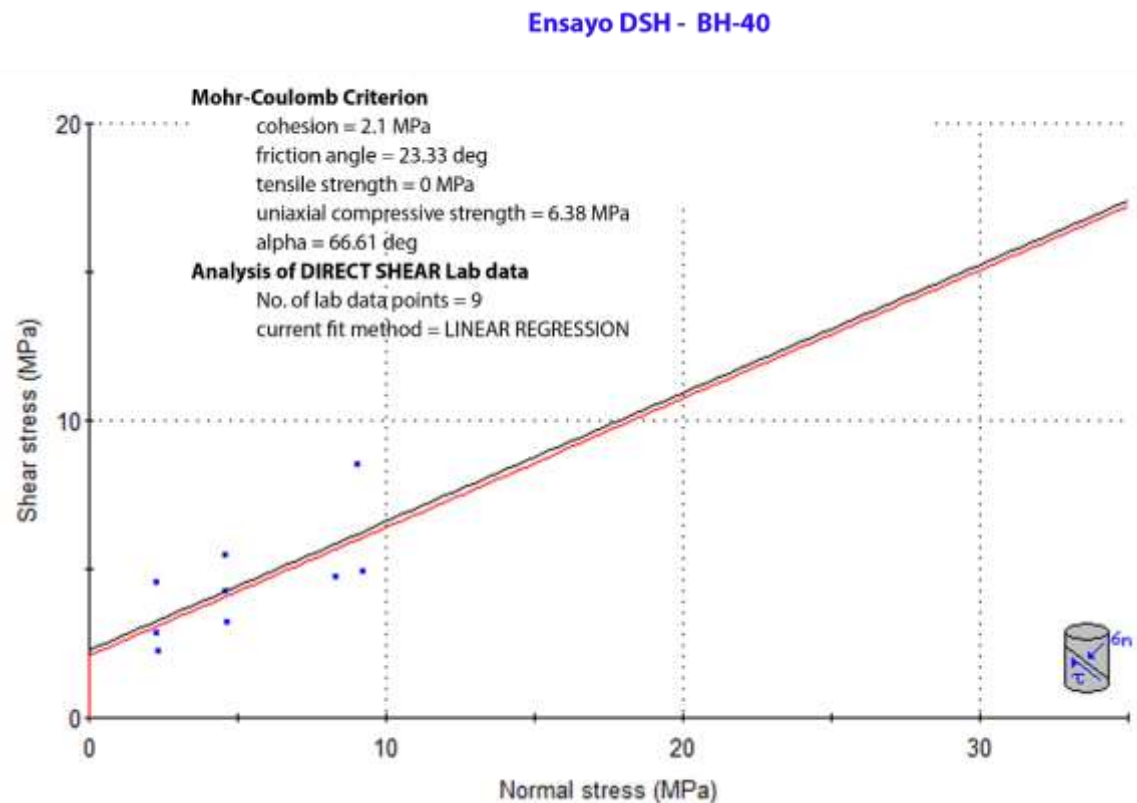


Figura 5.160 Envolverte de Falla Criterio de Mohr-Coulomb en Ensayos de Corte Perforación BH-40 STMCGG

Los valores arrojados por este ensayo son: cohesión 2.1MPa, y ángulo de fricción 23.33deg, valores que dependen directamente del esfuerzo normal y las propiedades resistentes de los planos de debilidad; estos son los resultados de cohesión y ángulo de fricción de las continuidades, muy diferentes a los valores arrojados por el modelo geomecánico por el criterio Hoek & Brown a partir de las compresiones en la roca intacta.



Tabla 5.38 Resultados de Ensayo Corte Directo BH-40

ENSAYO CORTE DIRECTO (DSH)				
Perforación	# Muestra	Profundidad (m)	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción
BH-40	397	(224 - 229m) 136cm	4,36	2,10°
BH-40	395	(226 - 229m) 88cm	1,84	37,96°
BH-40	401	(229 - 232m) 87cm	1,37	21,21°
Promedio			2.52	20.42°
Desviación Estándar			1,31	14,65

En la perforación BH-40 se encuentran valores de cohesión altos como es el caso de la muestra 397-DSH la cual tiene un valor de 4,36 MPa y fue tomada a una profundidad de 224 m, (Tabla 5.38), en la misma tabla también se pueden observar una desigualdad en los valores de ángulos de fricción encontrados en las muestras estudiadas. Esto último se puede asociar a la anisotropía existente en el macizo rocoso, las discontinuidades y la rugosidad de las muestras. El valor promedio de la cohesión en esta perforación es de **2.52MPa**, mientras que el ángulo de fricción promedio es **20.42°**. Cabe destacar que estos valores son obtenidos mediante la ejecución del ensayo directamente sobre los planos de discontinuidad de la roca, y dependen directamente de la rugosidad de los mismos.

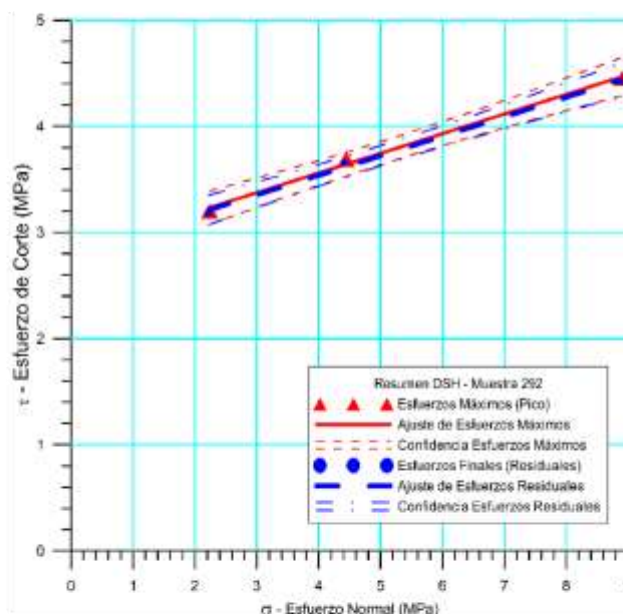
5.8.8 Perforación BH-51

5.8.8.1 Espécimen 292-DSH

 <p>ODEBRECHT RIF: J-00363691-6 PERFORACIONES TECNODRELL S.A. RIF: J-29478135-7</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO		 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)		
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 30-09-2013	Página 5 de 6 Espécimen: 292

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,23709	3,20124	2,22186	3,18297
2	4,44298	3,69040	4,41241	3,65674
3	8,90809	4,45322	8,88260	4,42261



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	2,82	2,80
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	10,49	10,42
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,1961	5,1723
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3,7816	3,7541
Suma de los residuos cuadrados	0,0036	0,0028
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0,7926	0,7798
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,9954	0,9964

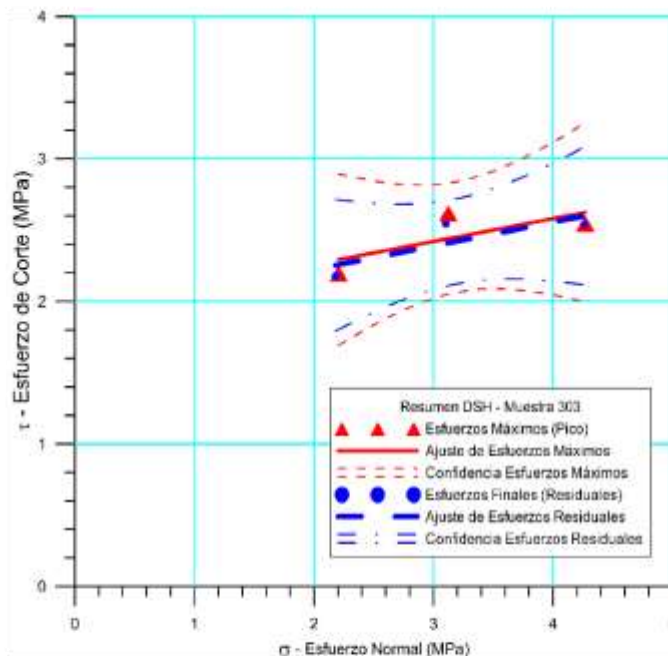
Figura 5.161 Espécimen 292-DSH _ Perforación BH-51 – STMCGG

5.8.8.2 *Espécimen 303-DSH*

 <p>ODEBRECHT RIF: J-00363691-6 PERFORACIONES TECNODRILL CA RIF: J-29478135-7</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO</p>			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p>SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)</p>			
<p>Cálculo: M. CASTILLEJO</p>	<p>Revisión:</p>	<p>Fecha: 30-09-2013</p>	<p>Página 5 de 6 Espécimen: 303</p>	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,20635	2,19486	2,18199	2,17780
2	4,27010	2,54566	4,25956	2,53933
3	3,12319	2,61720	3,10332	2,54266



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	1,94	1,89
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	9,11	9,46
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	3,1999	3,1816
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2,4526	2,4199
Suma de los residuos cuadrados	0,0472	0,0278
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0,0550	0,0602
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,5386	0,6842

Figura 5.162 Espécimen 303-DSH _ Perforación BH-51 – STMCGG

5.8.8.3 Envolvente de falla BH-51

Tabla 5.39 Resultados de Ensayo Corte Directo BH-51

ENSAYO CORTE DIRECTO (DSH)				
Perforación	# Muestra	Profundidad (m)	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción
BH-51	292	(114 - 117m) 22cm	2,82	10,49°
BH-51	303	(99 - 102m) 166cm	1,94	9,11°
Promedio			2.38	9.8°
Desviación Estándar			0.44	0

El valor promedio de la cohesión es **2.38MPa**, mientras que el ángulo de fricción promedio es **9.8°**, pudiéndose interpretar que se está en presencia de una roca competente, ya que los valores de cohesión son regularmente altos. Cabe destacar que estos valores son obtenidos mediante la ejecución del ensayo directamente sobre los planos de discontinuidad de la roca, y dependen directamente de la rugosidad de estos planos, donde a mayor rugosidad mayor es su resistencia al corte; teniendo a su vez la presencia de irregularidades las cuales dificultan el movimiento durante los procesos de desplazamiento por corte.

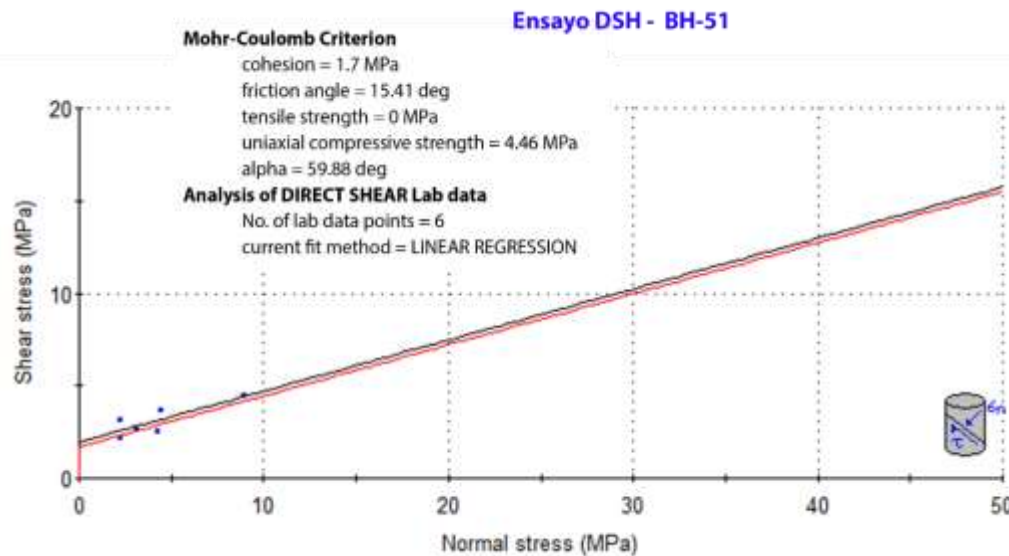






Figura 5.163 Envolvente de Falla Criterio de Mohr-Coulomb en Ensayos de Corte Perforación BH-51 STMCGG

En la Figura 5.163 se muestran los resultados arrojados por el ensayo de corte directo (DSH), teniendo una cohesión de 1.7MPa, y ángulo de fricción 15.41deg, valores que dependen directamente del esfuerzo normal y las propiedades resistentes de los planos de debilidad.

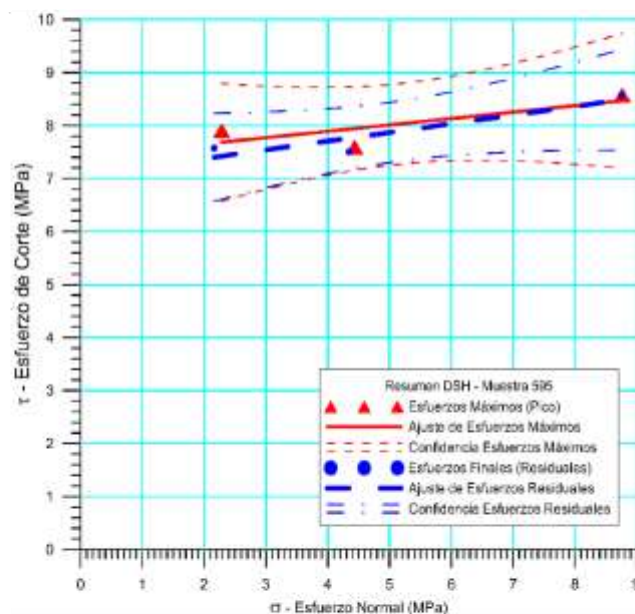
5.8.9 Perforación BH-70

5.8.9.1 *Espécimen 335-DSH*

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO		  RIF: G-2000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS - GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)		
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 335

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,19906	2,90380	2,18025	2,81688
2	4,40273	4,27204	4,36774	4,24283
3	7,51667	5,54832	7,52279	5,53693



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	1,93	1,84
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	26,18	26,66
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	4,7062	4,6903
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4,2414	4,1989
Suma de los residuos cuadrados	0,0490	0,0643
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3,4492	3,6379
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,9860	0,9826

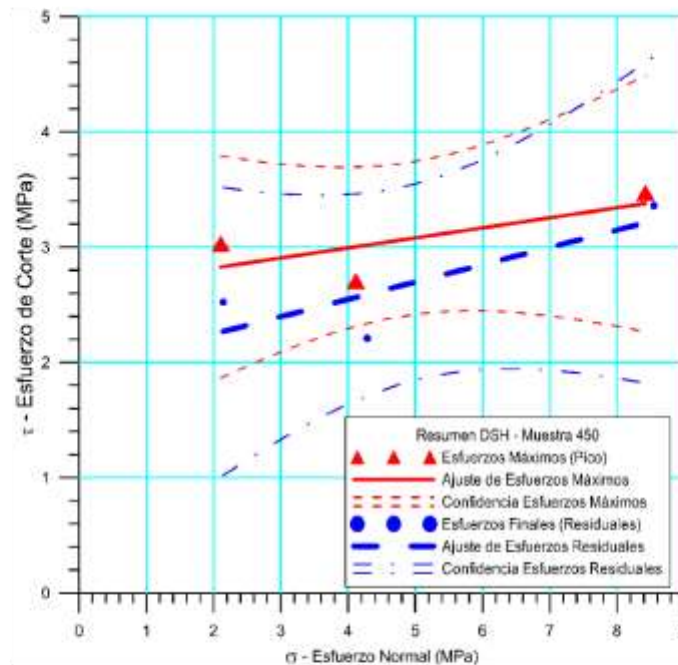
Figura 5.164 Espécimen 335-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG

5.8.9.2 *Espécimen 450-DSH*

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 450	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,10747	3,02972	2,14372	2,52168
2	4,11433	2,70701	4,28804	2,20874
3	8,42252	3,47203	8,54879	3,35806



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	2,64	1,95
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	4,98	8,55
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	4,8814	4,9935
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3,0696	2,6962
Suma de los residuos cuadrados	0,1370	0,2262
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0,1580	0,4800
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,5356	0,6797

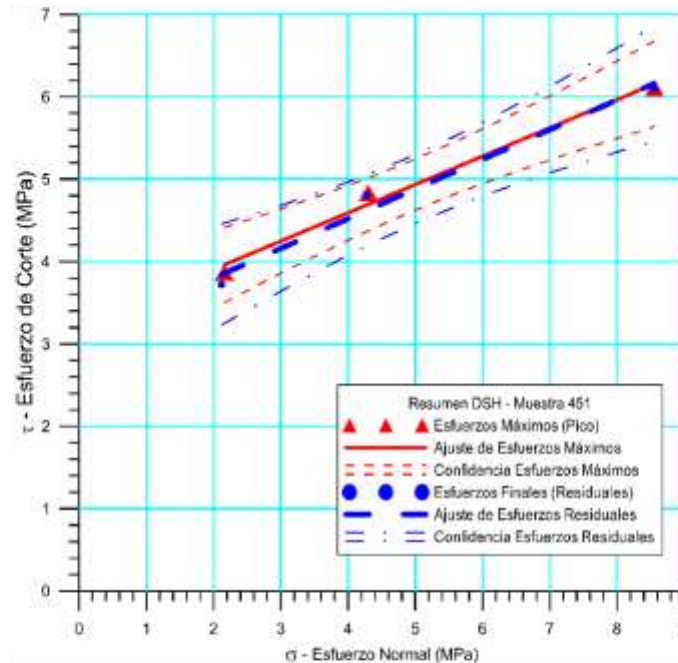
Figura 5.165 Espécimen 450-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG

5.8.9.3 *Espécimen 451-DSH*

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 451	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,16319	3,86818	2,12048	3,71903
2	4,30037	4,83479	4,27880	4,80886
3	8,55698	6,11129	8,55184	6,09842



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	3,22	3,08
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	18,96	19,82
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,0068	4,9837
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4,9381	4,8754
Suma de los residuos cuadrados	0,0302	0,0546
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2,5015	2,7828
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,9881	0,9808

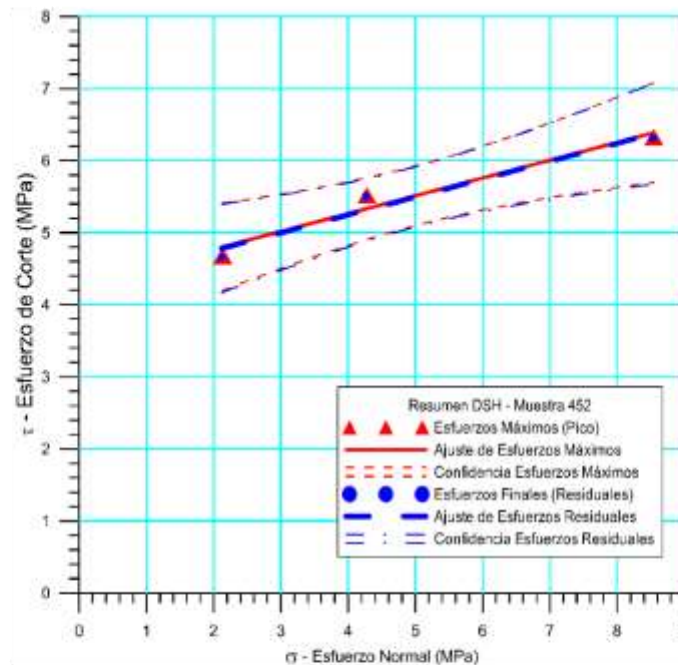
Figura 5.166 Espécimen 451-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG

5.8.9.4 *Espécimen 452-DSH*

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 452	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,13421	4,68066	2,11914	4,65653
2	4,27853	5,51917	4,26332	5,50089
3	8,54538	6,32624	8,53195	6,30935



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	4,28	4,26
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	13,88	13,93
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	4,9860	4,9715
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5,5087	5,4889
Suma de los residuos cuadrados	0,0534	0,0547
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1,3007	1,3114
Coficiente de Determinación (R^2)	0,9606	0,9599

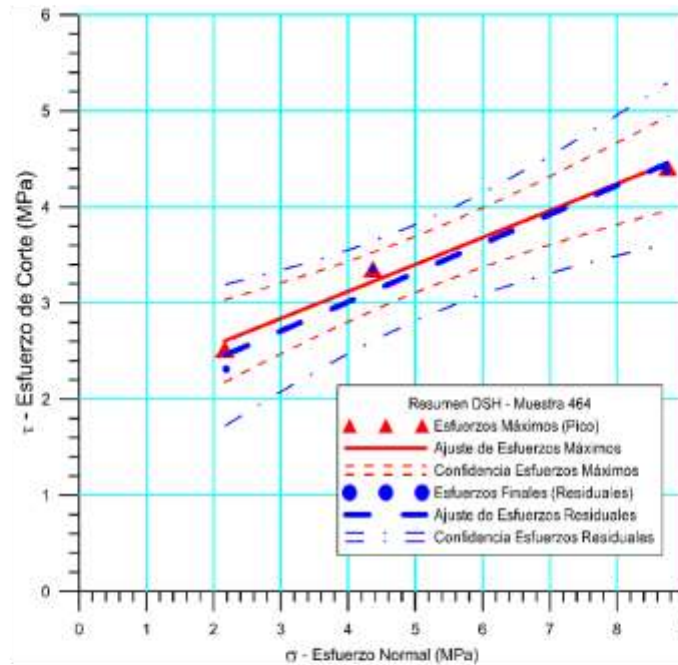
Figura 5.167 Espécimen 452-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG

5.8.9.5 *Espécimen 464-DSH*

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen:	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,16647	2,51888	2,18856	2,31351
2	4,36951	3,35466	4,36951	3,34800
3	8,75376	4,40956	8,73882	4,37360







Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	2,00	1,80
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	15,67	16,86
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,0966	5,0990
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3,4277	3,3450
Suma de los residuos cuadrados	0,0266	0,0781
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1,7687	2,0439
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,9852	0,9632

Figura 5.168 Espécimen 464-DSH _ Perforación BH-70 – STMCGG

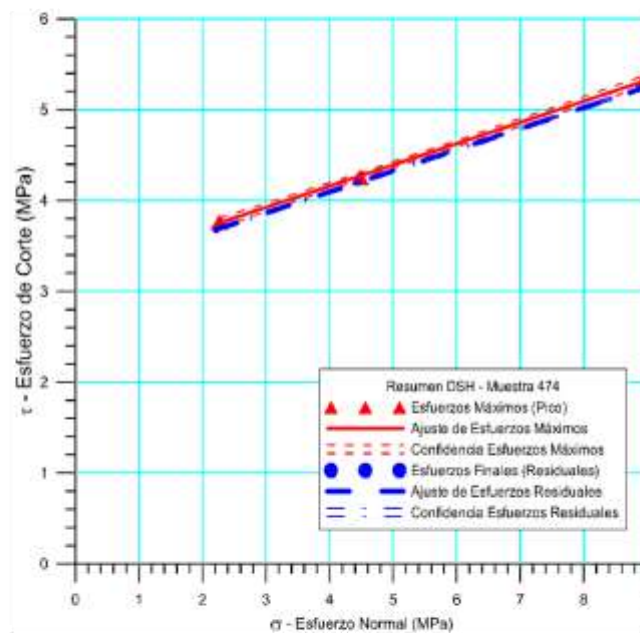
5.8.10 Perforación BH-80

5.8.10.1 Espécimen 474-DSH

 <p>RIF: J-00363691-6</p>  <p>RIF: J-29478135-7</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO		  <p>RIF: G-20000062-7</p>
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)		
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 30-09-2013	Página 5 de 6 Espécimen:474

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,26810	3,76359	2,21667	3,67775
2	4,48138	4,25428	4,43334	4,19836
3	8,93908	5,31662	8,91700	5,23261



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	3,22	3,17
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	13,15	13,05
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,2295	5,1890
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4,4448	4,3696
Suma de los residuos cuadrados	0,0004	0,0000
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1,2600	1,2527
Coefficiente de Determinación (R ²)	0,9997	1,0000

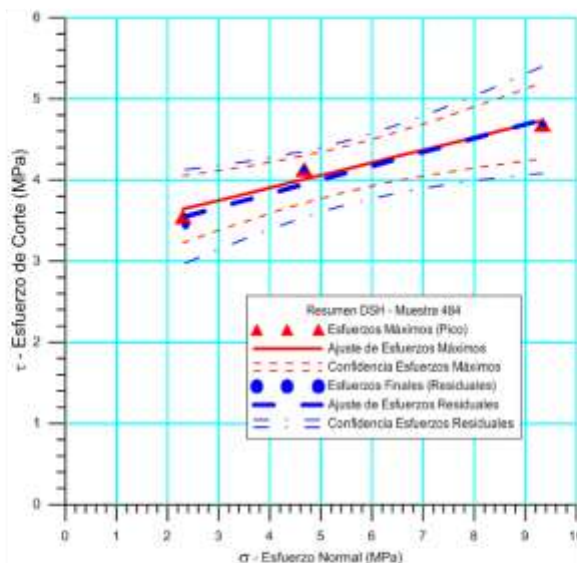
Figura 5.169 Espécimen 474-DSH _ Perforación BH-80 – STMCGG

5.8.10.2 Espécimen 484-DSH

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO		  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)		
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 484

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,30118	3,55527	2,34830	3,43270
2	4,67889	4,13521	4,67908	4,12474
3	9,33080	4,68850	9,33002	4,68279



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	3,28	3,15
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	8,83	9,68
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,4370	5,4525
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4,1263	4,0801
Suma de los residuos cuadrados	0,0249	0,0485
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0,6173	0,7358
Coficiente de Determinación (R^2)	0,9612	0,9381

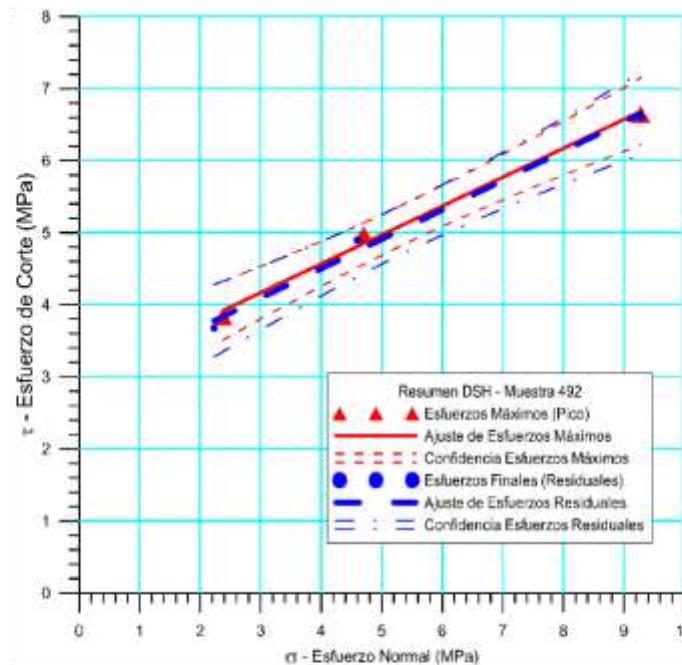
Figura 5.170 Espécimen 484-DSH _ Perforación BH-80 – STMCGG

5.8.10.3 Espécimen 492-DSH

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 492	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,37088	3,83434	2,22993	3,67646
2	4,69948	4,97402	4,59781	4,89697
3	9,27956	6,64147	9,28263	6,60446



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	2,97	2,87
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	21,82	22,20
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,4500	5,3701
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5,1499	5,0593
Suma de los residuos cuadrados	0,0241	0,0363
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3,9623	4,2898
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,9940	0,9916

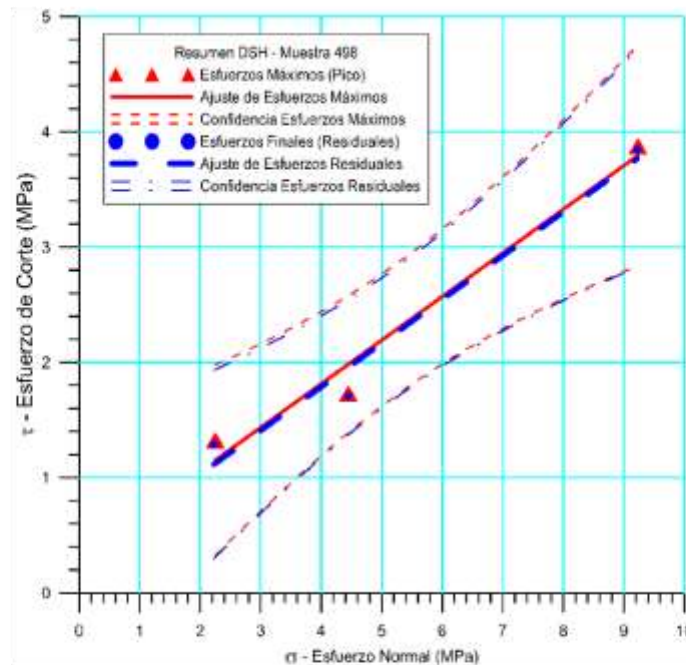
Figura 5.171 Espécimen 492-DSH _ Perforación BH-80 – STMCGG

5.8.10.4 Espécimen 498-DSH

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 498	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,24952	1,32594	2,22679	1,28717
2	4,44791	1,72996	4,44485	1,70605
3	9,23517	3,87564	9,21921	3,84639





Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	0,30	0,27
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	20,73	20,76
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,3109	5,2970
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2,3105	2,2799
Suma de los residuos cuadrados	0,1012	0,0985
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3,6549	3,6702
Coficiente de Determinación (R^2)	0,9731	0,9739

Figura 5.172 Espécimen 498-DSH _ Perforación BH-80 – STMCGG

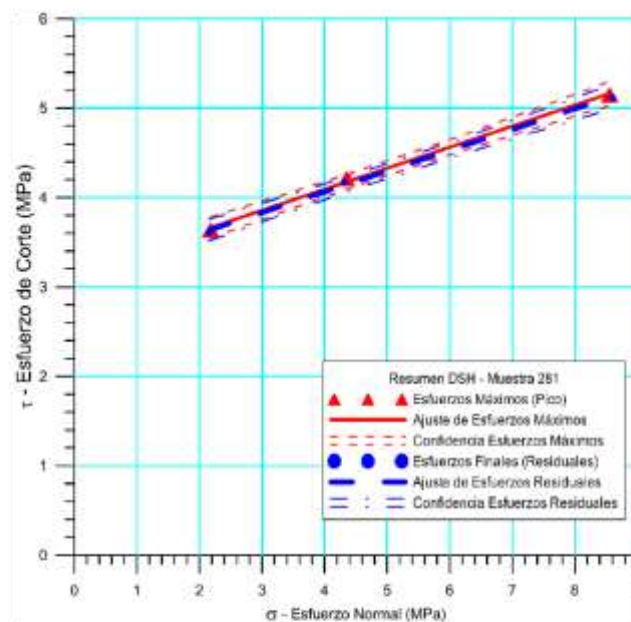
5.8.11 Perforación BH-210

5.8.11.1 Espécimen 281-DSH

 <p>ODEBRECHT RIF: J-00363691-6 PERFORACIONES TECNODRELL S.A. RIF: J-29478135-7</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 281	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,18125	3,63995	2,15006	3,60870
2	4,35220	4,21082	4,31569	4,17324
3	8,55609	5,15103	8,60053	5,11848







Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	3,15	3,13
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	13,24	13,07
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5,0298	5,0221
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4,3339	4,3001
Suma de los residuos cuadrados	0,0020	0,0021
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1,1624	1,1617
Coefficiente de Determinación (R ²)	0,9982	0,9982

Figura 5.173 Espécimen 281-DSH _ Perforación BH-210 – STMCGG

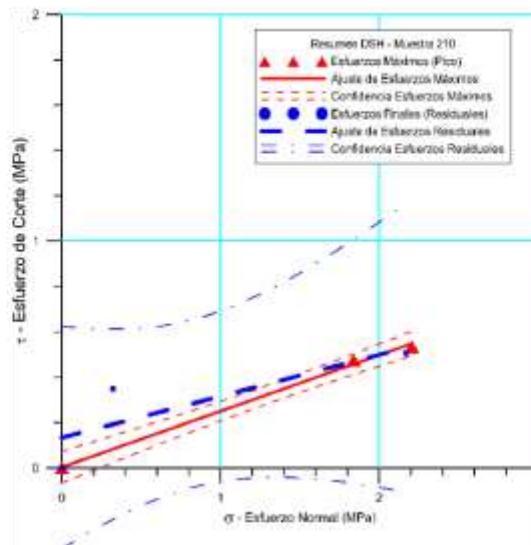
5.8.12 Perforación BH-240

5.8.12.1 Espécimen 210-DSH

 <p>RIF: J-00363691-6</p>  <p>RIF: J-29478135-7</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO</p>			  <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p>SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)</p>			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
C. OLIVEROS	M. CASTILLEJO	30-09-2013	Espécimen: 210	

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.20650	0.53393	2.16908	0.50625
2	1.83847	0.47453	0.32215	0.34825
3	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.24718 * s + 0.00$	$t = 0.18274 * s + 0.13$
Cohesión (c) (MPa)	0.00	0.13
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	13.88	10.36
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.3483	0.8304
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.3362	0.2848
Suma de los residuos cuadrados	0.0005	0.0427
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.1708	0.0915
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9970	0.6819

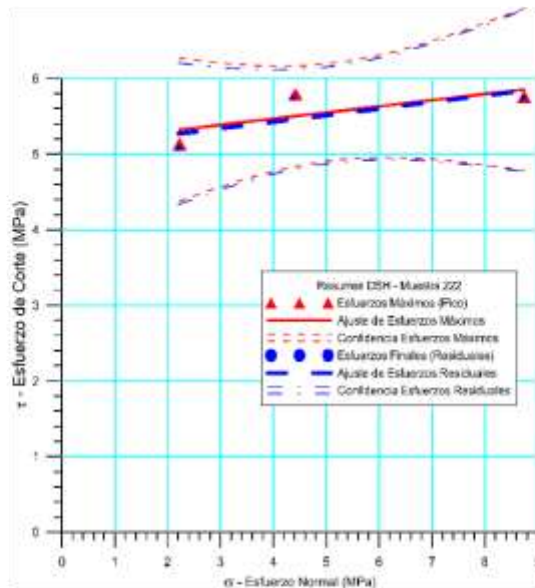
Figura 5.174 Espécimen 210-DSH _ Perforación BH-240 – STMCGG

5.8.12.2 Espécimen 222-DSH

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
C. OLIVEROS	M. CASTILLEJO	30-09-2013	Espécimen: 222	

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.22606	5.13222	2.20808	5.07794
2	4.41627	5.79086	4.37211	5.74356
3	8.74196	5.75866	8.72397	5.74235



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.08163 * s + 5.14$	$t = 0.08724 * s + 5.08$
Cohesión (c) (MPa)	5.14	5.08
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	4.67	4.99
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.1281	5.1014
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.5606	5.5213
Suma de los residuos cuadrados	0.1292	0.1272
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.1465	0.1676
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.5314	0.5685

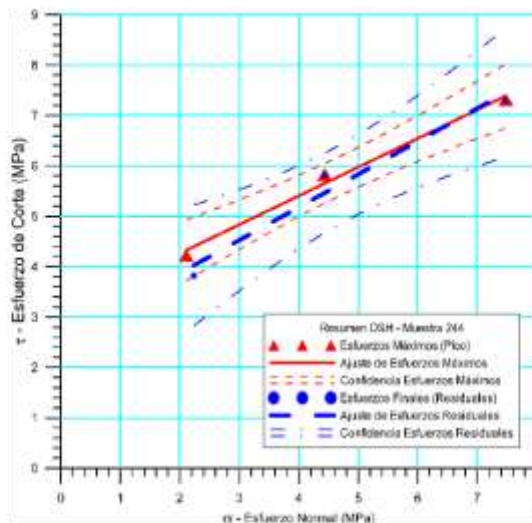
Figura 5.175 Espécimen 222-DSH _ Perforación BH-240 – STMCGG

5.8.12.3 Espécimen 244-DSH

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo: C. OLIVEROS	Revisión: M.CASTILLEJO	Fecha: 30-09-2013	Página 5 de 6	
			Espécimen: 244	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.10952	4.22486	2.23610	3.81884
2	4.43529	5.83036	4.42599	5.81365
3	7.48093	7.31127	7.48093	7.30574







Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.57015 * s + 3.12$	$t = 0.65363 * s + 2.56$
Cohesión (c) (MPa)	3.12	2.56
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	29.69	33.17
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	4.6752	4.7143
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.7888	5.6461
Suma de los residuos cuadrados	0.0480	0.1919
Regresión Suma de los residuos cuadrados	4.7176	5.9295
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9899	0.9687

Figura 5.176 Espécimen 244-DSH _ Perforación BH-240 – STMCGG

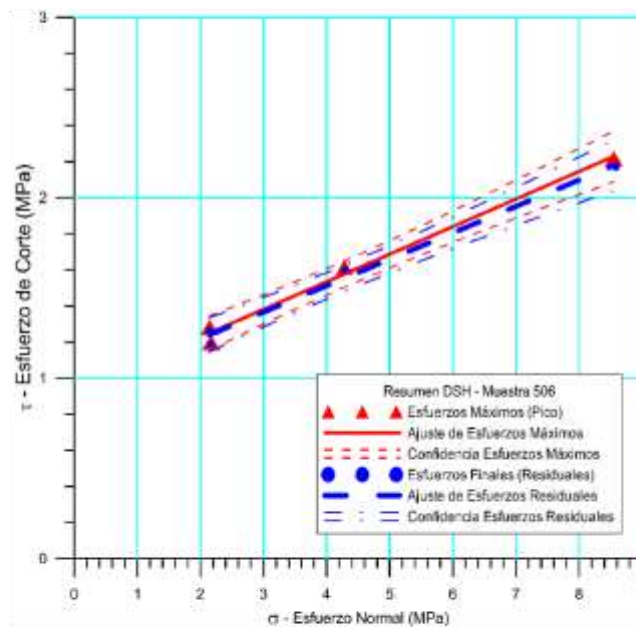
5.8.13 Perforación BH-250

5.8.13.1 Espécimen 506-DSH

 RIF: J-00363691-6  RIF: J-29478135-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6	
C. OLIVEROS	M. CASTILLEJO	30-09-2013	Espécimen: 506	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2,16645	1,19740	2,15598	1,18798
2	2,14552	1,28226	2,14028	1,26340
3	4,28245	1,61414	4,29103	1,59968





Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta		
Cohesión (c) (MPa)	0,86	0,85
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	9,97	9,89
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2,8648	2,8624
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1,3646	1,3504
Suma de los residuos cuadrados	0,0039	0,0031
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0,0931	0,0930
Coefficiente de Determinación (R^2)	0,9596	0,9682

Figura 5.177 Espécimen 506-DSH _ Perforación BH-250 – STMCGG

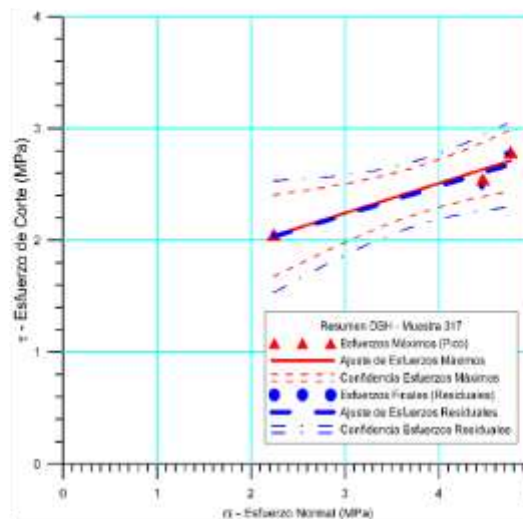
5.8.14 Perforación BH-60

5.8.14.1 Espécimen 317-DSH

 RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 317

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.24411	2.05159	2.24504	2.04495
2	4.46925	2.54581	4.45930	2.47963
3	4.76378	2.78996	4.72748	2.77554



VARIABLE	Resultados de las curvas de ajuste	
	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.26628 * s + 1.44$	$t = 0.25639 * s + 1.46$
Cohesión (c) (MPa)	1.44	1.46
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	14.91	14.38
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	3.8257	3.8106
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.4625	2.4334
Suma de los residuos cuadrados	0.0139	0.0261
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.2691	0.2440
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9509	0.9035

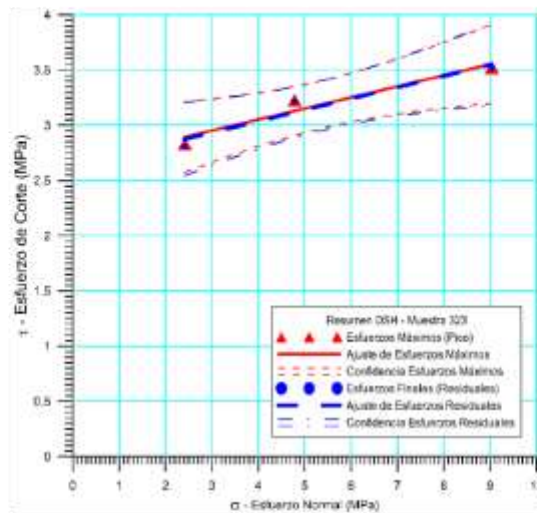
Figura 5.178 Espécimen 317-DSH _ Perforación BH-60 – STMCGG

5.8.14.1 Espécimen 323-DSH

 RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS - GUATIRE (STMCGG)			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 323

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.24411	2.05159	2.24504	2.04495
2	4.46925	2.54581	4.45930	2.47963
3	4.76378	2.78996	4.72748	2.77554



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = 0.26628 * s + 1.44$	$t = 0.25639 * s + 1.46$
Cohesión (c) (MPa)	1.44	1.46
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	14.91	14.38
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	3.8257	3.8106
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.4625	2.4334
Suma de los residuos cuadrados	0.0139	0.0261
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.2691	0.2440
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9509	0.9035

Figura 5.179 Espécimen 323-DSH _ Perforación BH-60 – STMCGG

Tabla 5.40 Resultados de Ensayo Corte Directo BH-60

ENSAYO CORTE DIRECTO (DSH)				
Perforación	# Muestra	Profundidad (m)	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción
BH-60	317	(214 - 217m)	1,44	14,91°
BH-60	323	(169 - 172m) 131cm	1,44	14,91°
Promedio			1.44	14.91°
Desviación Estándar			0	0

Los valores que se obtienen en el ensayo de corte directo dependen directamente de la rugosidad que existe en los planos de discontinuidades. En el caso de la perforación BH-60 el valor promedio de la cohesión es **1.44 MPa**, mientras que el ángulo de fricción promedio es **14.91°**. Cabe destacar que los valores adquiridos a partir de los dos únicos ensayos de corte directo realizados a las muestras de esta perforación dieron un resultado parecido, a pesar de que fueron tomadas a profundidades diferentes; estos valores son obtenidos mediante la ejecución del ensayo directamente sobre los planos de discontinuidad de la roca, y dependen directamente de la rugosidad de estos planos, donde a mayor rugosidad mayor es su resistencia al corte.

El estudio del ensayo de corte se concentra en las discontinuidades, logrando tener así una visión completa de la matriz rocosa, ya que en este caso no solamente se compone de roca intacta sino de múltiples discontinuidades. (Figura 5.178)

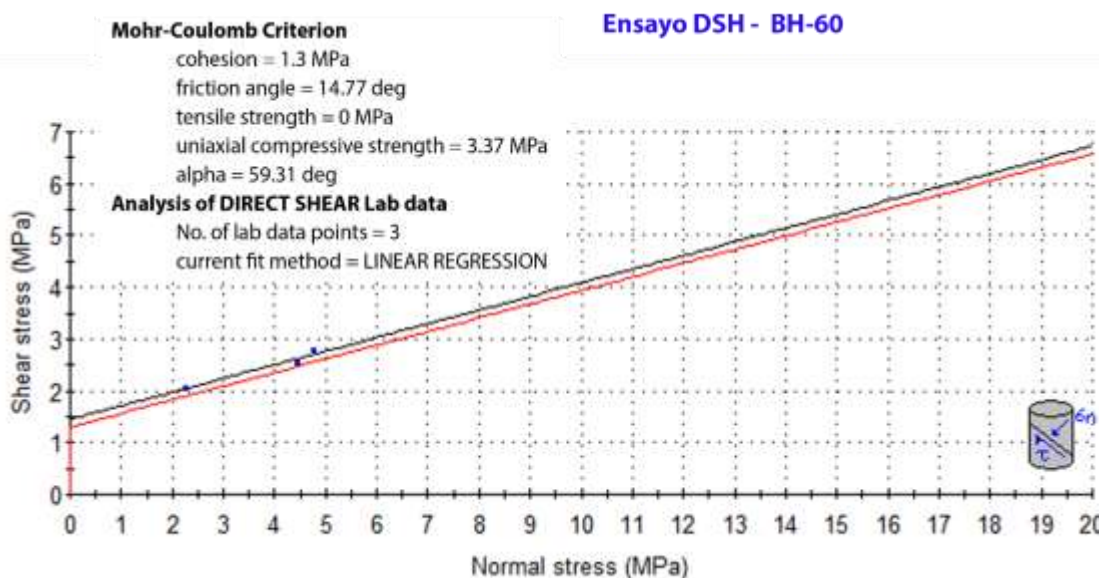


Figura 5.180 Envolvente de Falla Criterio de Mohr-Coulomb en Ensayos de Corte Perforación BH-40 STMCGG

En Figura 5.180 se muestran los valores arrojados por el ensayo DSH, los cuales son: cohesión 1.3MPa, y ángulo de fricción 14.78deg, valores que dependen directamente del esfuerzo normal y las propiedades resistentes de los planos de debilidad.

5.9 Viaducto Mampote - Sistema de Transporte Masivo Caracas-Guarenas-Guatire

Este Caso de Estudio pertenece a la “Caracterización Geológica y Geotécnica de Patios y Talleres – Mampote – Izcaragua – Montaña (Fase 2) del STMCGG.

5.9.1 Litotipos Presentes (F y L SERVICIOS, C.A., 2015)

En la zona de estudio se pudo determinar la presencia de cuatro litotipos de roca, pertenecientes a la formación Las Mercedes, del Grupo Caracas, que son:

- **Unidad Augenneiss-Gneiss cuarzo-feldespático calcáreo micáceo:** roca de textura muy característica por la presencia relevante y contrastante de clastos de gran tamaño, entre 0.5 cm y 4.0 cm de ancho, de cuarzo y feldespato, en contraste con una débil lineación preferencial que corresponde con la orientación de micas, cloritas y moscovitas y fragmentos de rocas foliadas, muy deformadas, principalmente. Ello promueve una textura masiva en muchos intervalos, con presencia de muy poca esquistosidad.

Sus colores frescos característicos son: pardos claros, blancos, y grises claros verdosos.

Sus colores de meteorización son pardos rojizos, relacionado con óxidos de hierros, y blancos opacos, producto de la alteración de los feldespatos, las micas (moscovita y clorita) y carbonatos.

Es muy común la presencia de cavidades de varios centímetros de ancho y profundidad, formadas por erosión carstica, disolución del carbonato de calcio por agua subterránea ligeramente acida. Además dichas cavidades presentan cristales de calcita recristalizada, con exfoliación romboédrica característica.

- **Unidad de Esquistos:** está unidad la integran un grupo de litotipos de textura y comportamiento geomecánico similar.
 - **Esquisto calcáreo (grafitoso):** rocas con una esquistosidad marcada, característica, muy comúnmente asociadas a paquetes de filitas, grafitosas por su origen sedimentario común.

- **Esquisto cuarzo micáceo (calcareo):** Rocas de textura más masiva que en los esquistos calcáreos, con colores que varían entre ocre-pardo claro y gris claro. La presencia de calcita no es uniforme.
- **Cuarzo-esquisto:** roca de color pardo-ocre claro, muy masiva, sólo con algo de fracturamiento en intervalos con aumento en la concentración de feldespatos alterados o micas cloritas-moscovitas. Roca muy resistente y abrasiva.
- **Unidad de Filita grafitosa y Brechas:** asociada a los litotipos con el comportamiento mecánico más desfavorable entre los registros estudiados para trabajos de soporte y estabilidad, materiales con resistencias internas muy bajas, poca cohesión y fricción interna.

Estas filitas presentan una textura, estructura interna, en láminas muy delgadas, fácilmente exfoliables, lineación, asociada a las propiedades del grafito. El fuerte plegamiento en general, evidencia la gran deformación acumulada. Su coloración es gris oscuro a negra, con lineaciones blancas por vetas de calcita y cuarzo.

En general, las rocas del área, en el registro de subsuelo, están poco afectadas por meteorización química, restringiéndose la descomposición a los topes de roca y a intervalos fracturados en subsuelo por donde deben circular el agua subterránea. Los perfiles de suelo residual son delgados.

Los ensayos corresponden a las siguientes perforaciones realizadas en el sitio:





Tabla 5.41 Ubicación de las perforaciones realizadas

Perforación	Coordenada		Cota	Longitud (m)	Diámetro	Nivel Freatico	Ejecución
	Norte	Este					
P-6	1,159,427.00	755,722.02	445.81	19.60	HQ	No se reporta	11/2015
PM-7	1,159,410.65	755,763.49	467.10	35.50	HQ-NX	No se reporta	11/2015
P-8	1,159,429.86	755,742.72	450.09	27.25	HQ-NX	No se reporta	11/2015
PM-9	1,159,396.22	755,728.38	442.52	40.00	HQ	No se reporta	11/2015
PM-10	1,159,414.46	755,655.13	461.51	30.00	HQ	No se reporta	11/2015
P-12	1,159,409.70	755,743.82	453.65	25.30	HQ	No se reporta	11/2015
P-13	1,159,411.17	755,726.82	440.21	37.00	HQ	No se reporta	11/2015
P-14	1,159,411.17	755,726.82	440.21	37.00	HQ	No se reporta	11/2015
P-15	1,159,397.98	755,672.95	449.00	26.30	HQ	No se reporta	11/2015

Tabla 5.42 Ubicación de los ensayos de corte realizados

Perforación	Ubicación-Perforación-Caja-Muestra	Ensayo	N° Lab	Profundidad	Descripción del tipo de toca de acuredo a la planilla de perforación
PM-07	MAM-PM07-C07-M-2200	DSH	2007-2	22.50	Filita grafitosa con delgadas vetas de calcita, gris oscuro; Foliación inclinada entre 0° y 45°. Manchas de óxido-Fe por intervalos. RMbs – Mala – RQD:30
PM-09	MAM-PM09-C05-M1070	DSH	2010	10.70	Esquisto calcareo grafitoso, muy plegado lo que le da una textura al masiva al macizo, con vetas de cuarzo y calcita. RMbs – Media – RQD:60
PM-10	MAM-PM10-C10-M2900	DSH	2023	29.00	Cuarzo-Esquisto, muy masivo sólo con algo de fracturamiento en zonas de concentración de feldespatos alterados o micas-clorita, Muy resistente. RFmfs - Muy Buena – RQD:60
P-08	MAM-P08-C02-M0800-	DSH	2035	8.00	Augengneiss-Gneiss cuarzo-feldespático calcareo micaceo, resistente, con vetas de cuarzo, muy plegado. RMds - Muy buena – RQD:70
P-08	MAM-P08-C08-M2355-	DSH	2040-1	23.55	Augengneiss-Gneiss cuarzo-feldespático calcareo micaceo, cavidades por disolución de carbonato-Ca, y alteración de micas a arcillas. Foliación 60 - 70°, con fracturamiento es sub-paralelo a ésta. Pardo claro a blanco. RFmfs – Media – RQD: 65
P-12	MAM-P12-C03-M1190	DSH	2045	11.90	Filita grafitosa calcárea con vetas de cuarzo, meteorizada, blanda, muy fracturada – brechoide. RMbmf - Muy mala – RQD:0
P-14	MAM-P14-C5-M1350	DSH	2058	13.50	Augengneiss-Gneiss cuarzo-feldespático calcareo micaceo, muy resistente, poco fracturado, color blanco a blanco grisáceo. Se estima % Qz > 90 por intervalos. Presencia clastos de Qz hasta 2,5 cm con bordes redondeados. Presencia de Calcita recristalizada en cavidades. – RFmfs – RQD:95

5.9.2 Análisis estadístico de las especies mineralógicas presentes en las petrografías

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Análisis de Estadístico de Especies presentes en las Petrografías			  RIF: G-20000062-7
	Sistema de Transporte Masivo Caracas – Guarenas – Guatire Viaducto Mampote			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 1 de 2
	R. ALEZONES	M. CASTILLEJO	24/07/2016	Espécimen: TODOS

Espécimen	Cuarzo	Calcita	Clorita	Muscovita	Grafito	Opacos	Feldespatos	Epidoto	Total
2003-1	57.58	0.00	33.33	0.00	9.09	0.00	0.00	0.00	100
2009-3	26.00	23.00	33.00	0.00	6.00	8.00	0.00	4.00	100
2015-1	43.33	5.00	30.00	16.67	0.00	0.00	5.00	0.00	100
2018-2	35.00	2.00	19.00	3.00	0.00	1.00	40.00	0.00	100
2021-2	32.00	11.00	14.00	3.00	0.00	6.00	34.00	0.00	100
2022-5	48.00	3.00	7.00	3.00	0.00	1.00	38.00	0.00	100
2024-4	50.00	0.00	13.00	20.00	0.00	1.00	16.00	0.00	100
2026-3	57.00	0.00	13.00	0.00	0.00	1.00	29.00	0.00	100
2029-2	33.00	37.00	13.00	0.00	0.00	5.00	12.00	0.00	100
2030-3	39.00	21.00	21.00	4.00	6.00	6.00	3.00	0.00	100
2032-1	49.00	8.00	17.00	2.00	0.00	0.00	24.00	0.00	101
2033-4	46.91	11.11	22.22	2.47	16.05	1.23	0.00	0.00	100
2034-4	54.29	5.71	0.00	18.57	0.00	4.29	17.14	0.00	100
2040-4	56.06	4.55	16.67	9.09	0.00	3.03	10.61	0.00	100
2044-2	4.23	1.41	53.52	0.00	8.45	9.86	2.82	19.72	100
2054-3	39.00	11.00	10.00	8.00	0.00	1.00	31.00	0.00	100
2054-4	39.00	12.00	17.00	3.00	0.00	1.00	28.00	0.00	100
2055-3	39.68	20.63	4.76	6.35	0.00	0.00	29.00	0.00	100
2059-3	42.00	10.00	6.00	17.00	0.00	1.00	24.00	0.00	100
2060-2	36.00	6.00	11.00	17.00	0.00	0.00	30.00	0.00	100
2063-1	21.05	5.26	31.58	15.79	0.00	0.00	26.32	0.00	100
2064-3	45.00	7.00	0.00	31.00	4.00	2.00	11.00	0.00	100
2067-3	33.00	25.00	11.00	8.00	0.00	0.00	23.00	0.00	100
Máximo	57.58	37.00	53.52	31.00	16.05	9.86	40.00	19.72	
4 cuartil	48.50	11.56	21.61	16.23	2.00	3.66	29.00	0.00	
Mediana	39.68	7.00	14.00	4.00	0.00	1.00	23.00	0.00	
1 cuartil	34.00	3.77	10.50	2.23	0.00	0.00	7.80	0.00	
Mínimo	4.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Figura 5.181 Análisis mineralógico de las muestras ensayadas

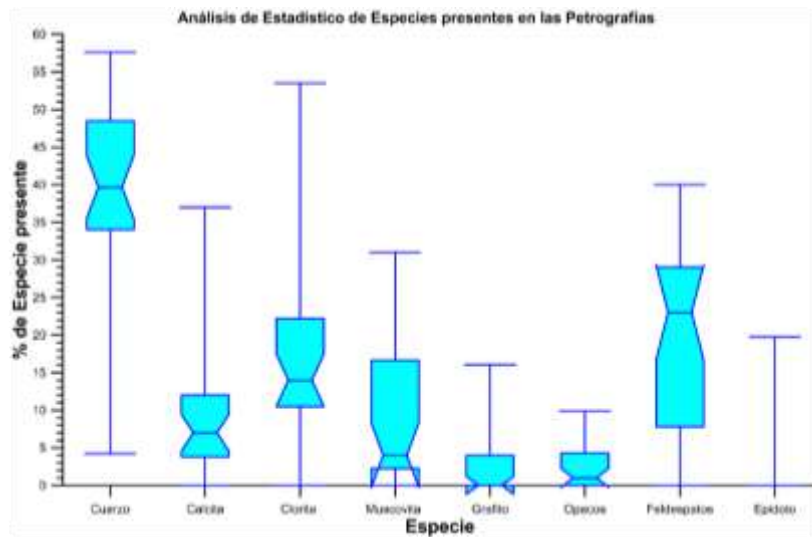






Figura 5.182 Análisis estadístico de especies minerales presentes en las rocas obtenidas por petrografías

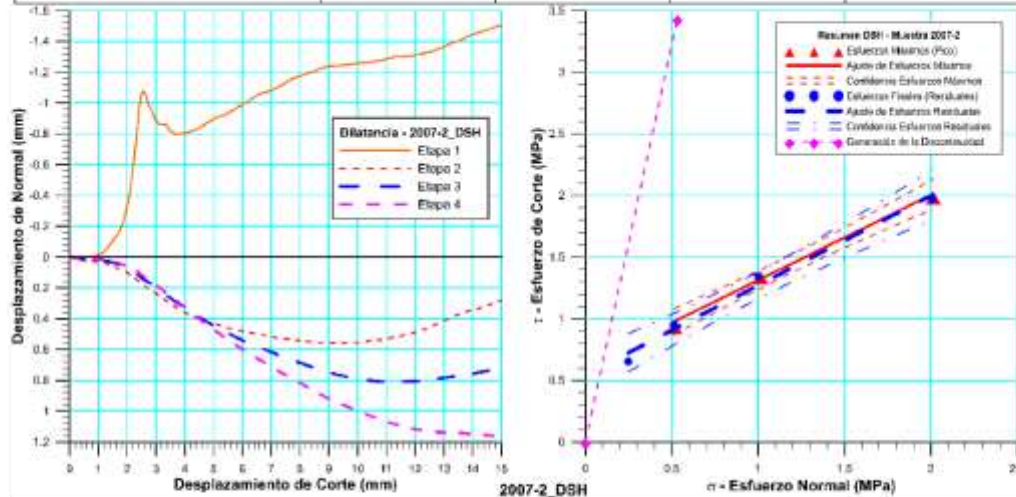
5.9.3 Ensayos de Corte

5.9.3.1 2007-2-DSH

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	Sistema de Transporte Masivo Caracas – Guarenas – Guatire Viaducto Mampote			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		09-03-2016	Espécimen: 2007-2_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.27697	1.38024	0.24944	0.65080
2	0.51442	0.95381	0.51104	0.95022
3	1.01384	1.35282	1.00161	1.33812
4	2.01412	1.99970	2.00789	1.96725



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(34.61) * s + 0.62$	$t = \tan(33.88) * s + 0.63$
Cohesión (c) (MPa)	0.62	0.63
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	34.61	33.88
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.18	1.17
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.44	1.42
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.56	0.52
Coficiente de Determinación (R ²)	1.00	1.00

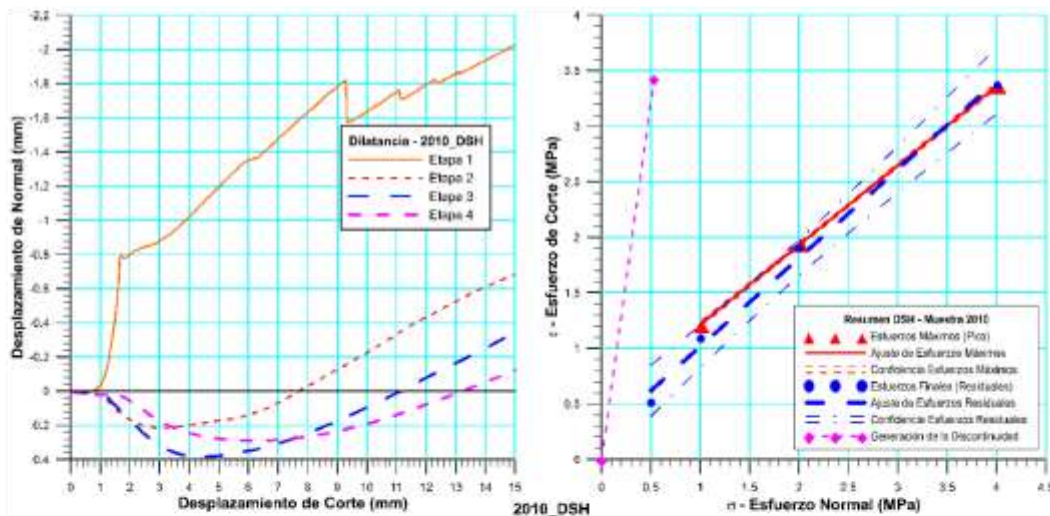
Figura 5.183 Espécimen 2007-2-DSH _ Perforación PM-07– STMCGG (FASE II)

5.9.3.2 2010-DSH

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	Sistema de Transporte Masivo Caracas – Guarenas – Guatire Viaducto Mampote			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		09-03-2016	Espécimen: 2010_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.53191	2.98309	0.50159	0.50999
2	1.00268	0.00000	1.00754	1.08866
3	2.01748	1.95123	1.99733	1.90501
4	4.02127	3.37424	4.00807	3.36631



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(46.69) * s + -0.71$	$t = \tan(37.03) * s + 0.36$
Cohesión (c) (MPa)	-0.71	0.36
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	46.69	37.03
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.35	2.34
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.78	2.12
Suma de los residuos cuadrados	0.43	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	5.31	2.66
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.93	1.00

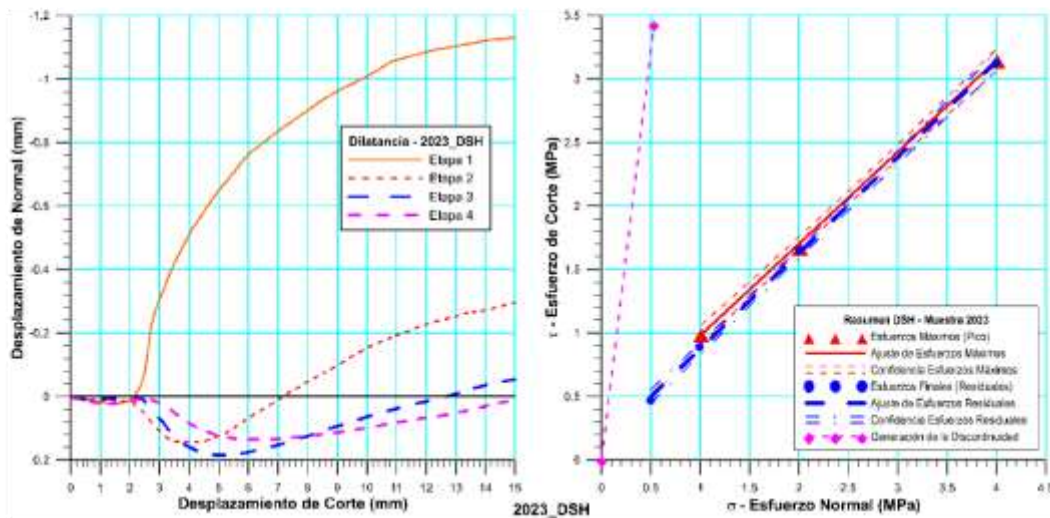
Figura 5.184 Espécimen 2010-DSH_ Perforación PM-10–STMCGG (FASE II)

5.9.3.3 2023-DSH

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	Sistema de Transporte Masivo Caracas – Guarenas – Guatire Viaducto Mampote			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		09-03-2016	Espécimen: 2023_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.52096	1.34480	0.49638	0.46799
2	1.01112	1.00250	0.99281	0.88939
3	2.01006	1.68583	2.00215	1.64878
4	4.00804	3.16112	3.99835	3.12570



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(35.86) * s + 0.26$	$t = \tan(36.63) * s + 0.15$
Cohesión (c) (MPa)	0.26	0.15
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	35.86	36.63
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.34	2.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.95	1.89
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.43	2.59
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

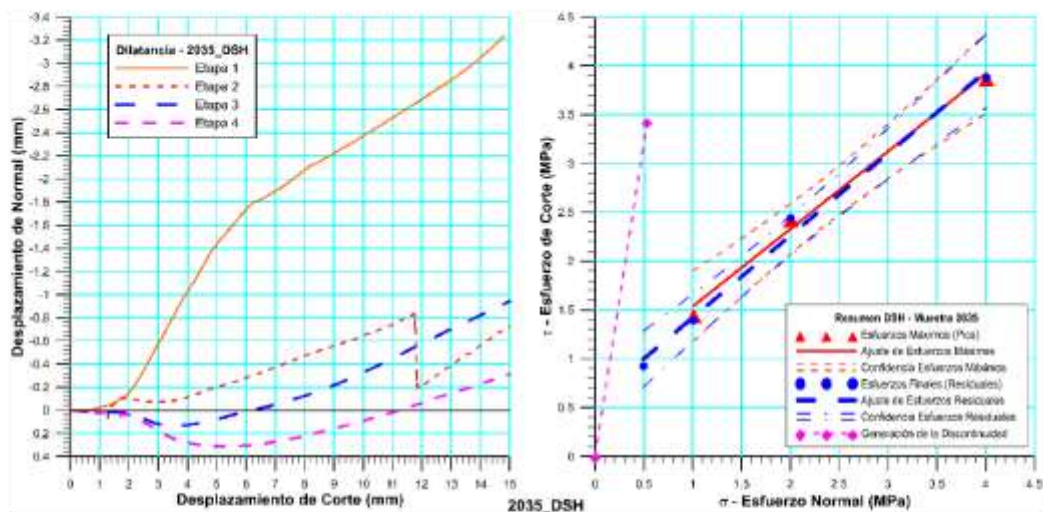
Figura 5.185 Espécimen 2023-DSH _ Perforación PM-10– STMCGG (FASE II)

5.9.3.4 2035- DSH

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	Sistema de Transporte Masivo Caracas – Guarenas – Guatire Viaducto Mampote			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		09-03-2016	Especimen: 2035_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Especimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.51057	1.48350	0.49482	0.92223
2	1.00963	1.46816	1.00362	1.39247
3	2.00740	2.44608	2.00279	2.44054
4	4.00686	3.88762	4.01015	3.87912



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(38.48) * s + 0.74$	$t = \tan(39.05) * s + 0.67$
Cohesión (c) (MPa)	0.74	0.67
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	38.48	39.05
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.34	2.34
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.60	2.57
Suma de los residuos cuadrados	0.02	0.03
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.94	3.09
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.99

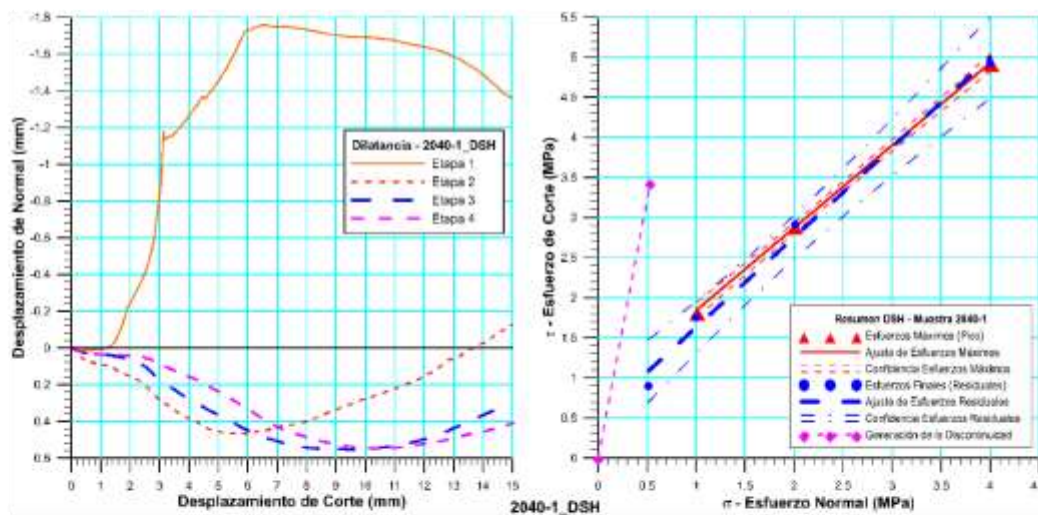
Figura 5.186 Especimen 2035-DSH _ Perforación P-08– STMCGG (FASE II)

5.9.3.5 2040-1-DSH

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	Sistema de Transporte Masivo Caracas – Guarenas – Guatire Viaducto Mampote			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		09-03-2016	Especimen: 2040-1_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Especimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.52916	3.85493	0.51280	0.89405
2	1.01133	1.83332	1.00073	1.75451
3	2.01055	2.90955	2.01051	2.90948
4	4.01432	4.93386	4.00188	4.91892



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(45.83) * s + 0.81$	$t = \tan(46.34) * s + 0.74$
Cohesión (c) (MPa)	0.81	0.74
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	45.83	46.34
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.35	2.34
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.23	3.19
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	4.96	5.12
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00

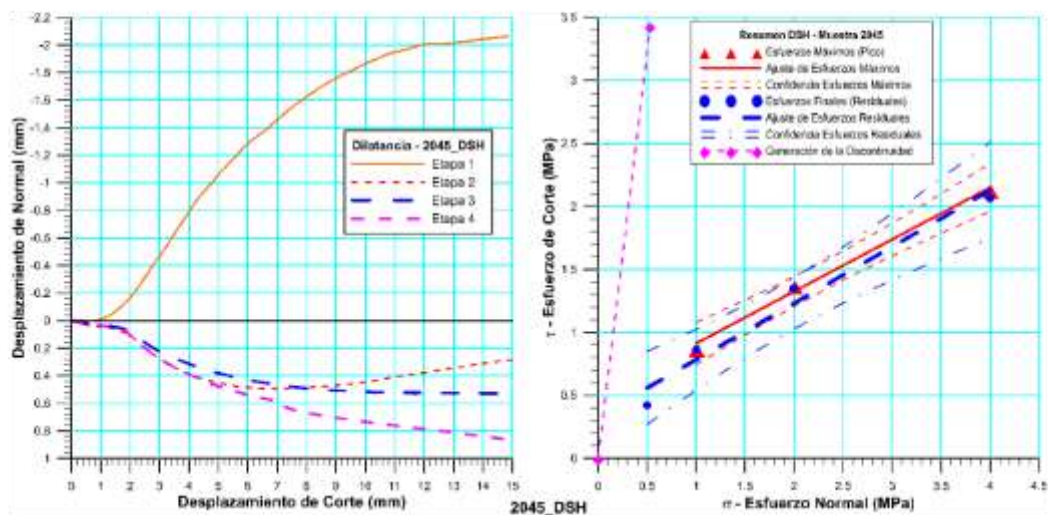
Figura 5.187 Especimen 2040-1-DSH _ Perforación P-08– STMCGG (FASE II)

5.9.3.6 2045- DSH

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	Sistema de Transporte Masivo Caracas – Guarenas – Guatire Viaducto Mampote			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		09-03-2016	Especimen: 2045_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados





Datos del Especimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.51239	0.82947	0.49986	0.42191
2	1.00675	0.88034	1.00245	0.86169
3	2.00935	1.37962	1.99672	1.35171
4	4.00792	2.13593	3.99852	2.06392



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	$t = \tan(22.43) * s + 0.50$	$t = \tan(21.54) * s + 0.51$
Ecuación de la recta	0.50	0.51
Cohesión (c) (MPa)	22.43	21.54
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	4	4
Número de puntos	2.34	2.33
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.47	1.43
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.00	0.01
Suma de los residuos cuadrados	0.80	0.73
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.99	0.99
Coefficiente de Determinación (R^2)	$t = \tan(22.43) * s + 0.50$	$t = \tan(21.54) * s + 0.51$

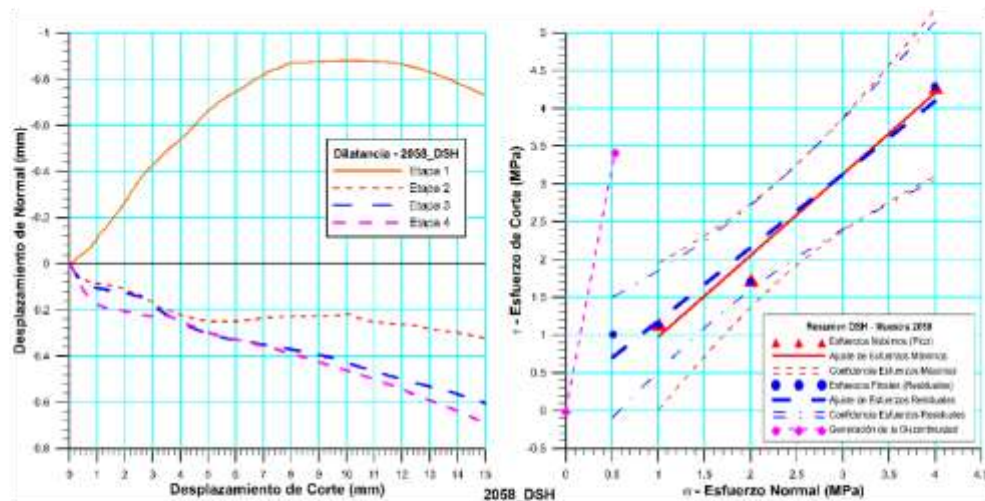
Figura 5.188 Especimen 2045-DSH _ Perforación P-12– STMCGG (FASE II)

5.9.3.7 2058-DSH

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)		  RIF: G-20000062-7	
	Sistema de Transporte Masivo Caracas – Guarenas – Guatire Viaducto Mampote			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		09-03-2016	Espécimen: 2045_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados




Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.50822	1.48996	0.50931	1.00721
2	1.00722	1.17981	1.00437	1.13375
3	2.00852	1.76414	1.99480	1.70495
4	4.00558	4.31125	3.99490	4.28991



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(47.13) * s + -0.10$	$t = \tan(47.46) * s + -0.16$
Cohesión (c) (MPa)	-0.10	-0.16
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	47.13	47.46
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	2.34	2.33
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.42	2.38
Suma de los residuos cuadrados	0.14	0.14
Regresión Suma de los residuos cuadrados	5.41	5.51
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.98	0.97





Figura 5.189 Espécimen 2058-DSH _ Perforación P-14– STMCGG (FASE II)

5.9.4 Análisis de resultados - Corte Directo

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6		LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL				 RIF: G-20000062-7	
SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS – GUATIRE VIADUCTO MAMPOTE							
Cálculo:		Revisión:		Fecha:		Página 1 de 5	
M. CASTILLEJO				01-02-2017		MAMPOTE	
DATOS GENERALES							
Proyecto	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS – GUATIRE VIADUCTO MAMPOTE			Especímenes del análisis			
Origen del Espécimen	Suministrado por el cliente			Perforaciones			
Clasificación Geológica del Espécimen	Augengneiss-Gneiss cuarzo-feldespático calcáreo micáceo, textura muy masiva, muy dura, poco fracturado, discontinuidades principales en fracturas entre 30 y 45°, rugosas, limpias. Muy resistente.			Formación Geológica		Las Mercedes	
Tipo de Roca	Dura			Número de puntos en el análisis		28 Puntos	
Nota:							

Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_n	τ	σ_s	τ	σ_{max}	σ_{min}	σ_{min}	σ_{min}
1	2007-2	1	0.27697	1.38024	0.24944	0.65080	-1.10327	1.65721	-0.40136	0.90024
2	2007-2	2	0.51442	0.95381	0.51104	0.95022	-0.43940	1.46823	-0.43918	1.46126
3	2007-2	3	1.01384	1.35282	1.00161	1.33812	-0.33897	2.36666	-0.33652	2.33973
4	2007-2	4	2.01412	1.99970	2.00789	1.96725	0.01442	4.01382	0.04064	3.97514
5	2010	1	0.53191	2.98309	0.50159	0.50999	-2.45118	3.51500	-0.00841	1.01158
6	2010	2	1.01464	1.22127	1.00754	1.08866	-0.20663	2.23591	-0.08112	2.09619
7	2010	3	2.01748	1.95123	1.99733	1.90501	0.06625	3.96872	0.09232	3.90234
8	2010	4	4.02127	3.37424	4.00807	3.36631	0.64703	7.39551	0.64176	7.37439
9	2023	1	0.52096	1.34480	0.49638	0.46799	-0.82384	1.86577	0.02839	0.96436
10	2023	2	1.01112	1.00250	0.99281	0.88939	0.00862	2.01362	0.10342	1.88221
11	2023	3	2.01006	1.68583	2.00215	1.64878	0.32424	3.69589	0.35337	3.65093
12	2023	4	4.00804	3.16112	3.99835	3.12570	0.84693	7.16916	0.87265	7.12406
13	2035	1	0.51057	1.48350	0.49482	0.92223	-0.97292	1.99407	-0.42741	1.41705
14	2035	2	1.00963	1.46816	1.00362	1.39247	-0.45854	2.47779	-0.38885	2.39609
15	2035	3	2.00740	2.44608	2.00279	2.44054	-0.43868	4.45348	-0.43775	4.44334
16	2035	4	4.00686	3.88762	4.01015	3.87912	0.11924	7.89448	0.13104	7.88927
17	2040-1	1	0.52916	3.85493	0.51280	0.89405	-3.32577	4.38409	-0.38126	1.40685
18	2040-1	2	1.01133	1.83332	1.00073	1.75451	-0.82199	2.84465	-0.75378	2.75524
19	2040-1	3	2.01055	2.90955	2.01051	2.90948	-0.89899	4.92010	-0.89897	4.91999
20	2040-1	4	4.01432	4.93386	4.00188	4.91892	-0.91954	8.94818	-0.91703	8.92080
21	2045	1	0.51239	0.82947	0.49986	0.42191	-0.31708	1.34186	0.07795	0.92178
22	2045	2	1.00675	0.88034	1.00245	0.86169	0.12641	1.88708	0.14076	1.86414
23	2045	3	2.00935	1.37962	1.99672	1.35171	0.62973	3.38896	0.64500	3.34843
24	2045	4	4.00792	2.13593	3.99852	2.06392	1.87199	6.14385	1.93460	6.06244
25	2058	1	0.50822	1.48996	0.50931	1.00721	-0.98174	1.99818	-0.49790	1.51652
26	2058	2	1.00722	1.17981	1.00437	1.13375	-0.17260	2.18703	-0.12938	2.13812
27	2058	3	2.00852	1.76414	1.99480	1.70495	0.24437	3.77266	0.28985	3.69975
28	2058	4	4.00558	4.31125	3.99490	4.28991	-0.30568	8.31683	-0.29501	8.28480

Figura 5.190 Resultados de los Ensayos de Corte – Viaducto de Mampote para el realizar el análisis por envolvente de falla

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS – GUATIRE VIADUCTO MAMPOTE			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 2 de 5 MAMPOTE	

Esfuerzos Máximos o Picos (Mohr-Coulomb) - Global

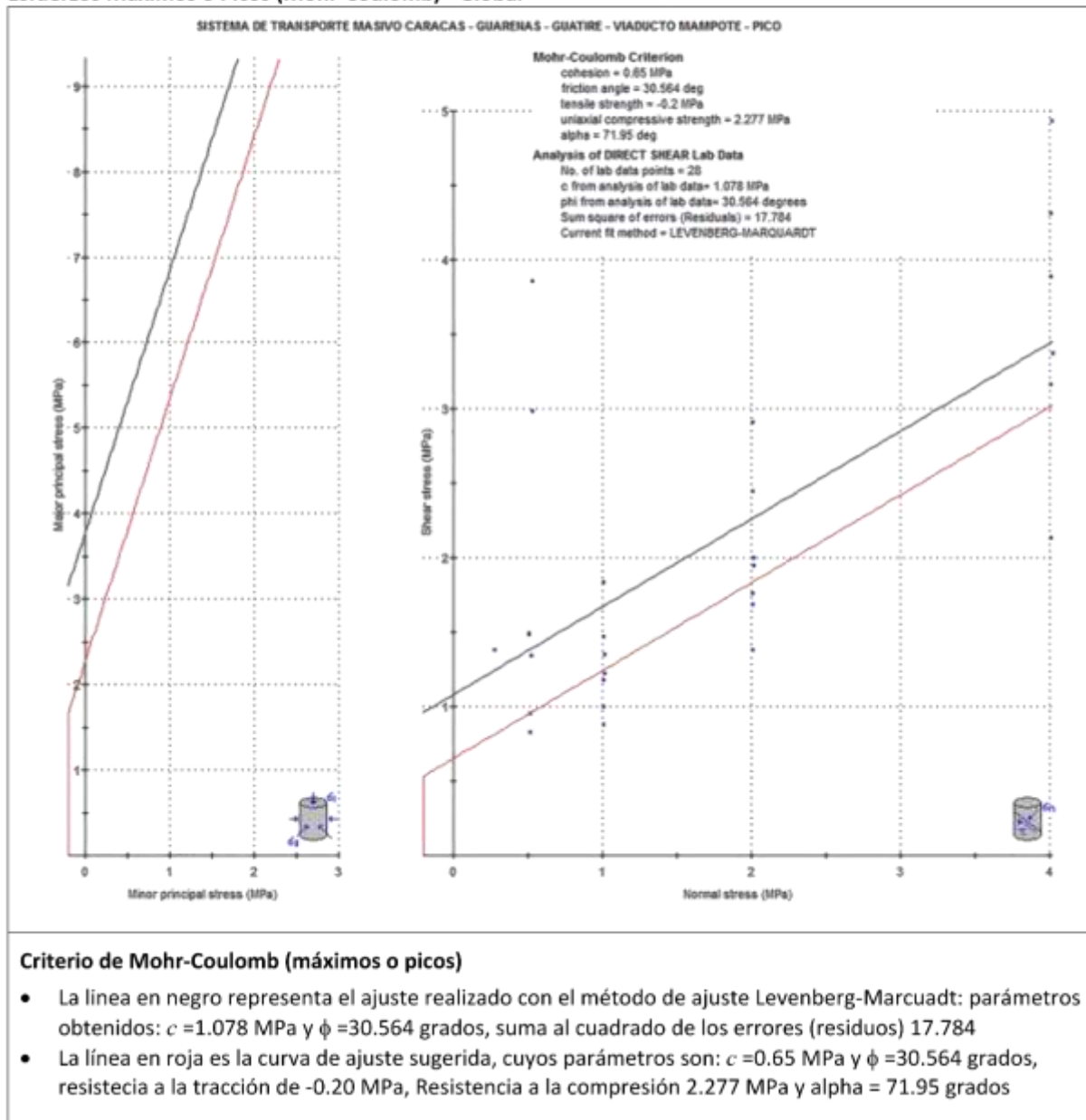






Figura 5.191 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico – Viaducto de Mampote, por el Criterio de Falla de Mohr-Coulomb

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS – GUATIRE VIADUCTO MAMPOTE			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 3 de 5 MAMPOTE	

Esfuerzos Máximos o Picos (Barton-Bandis) - Global

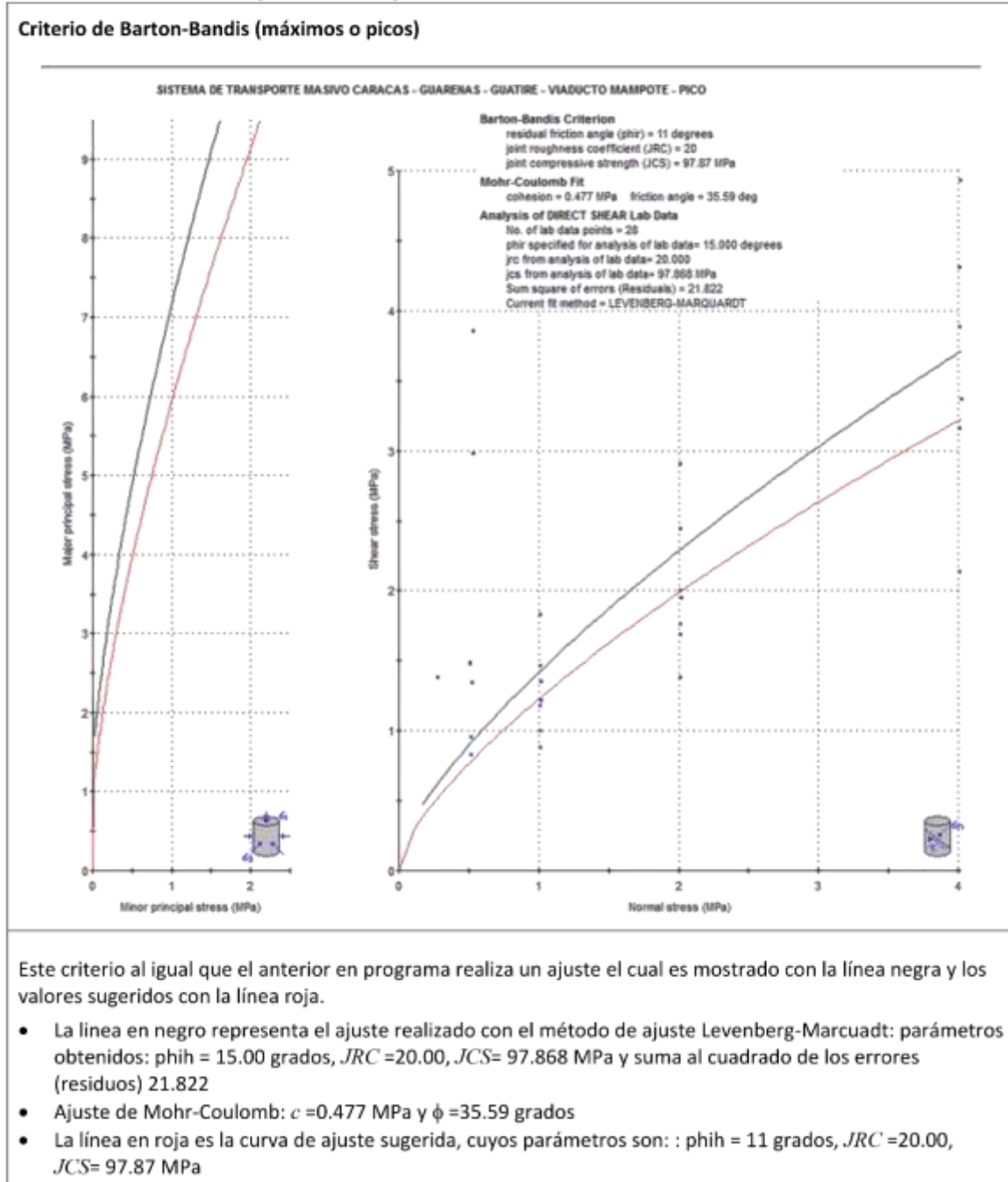




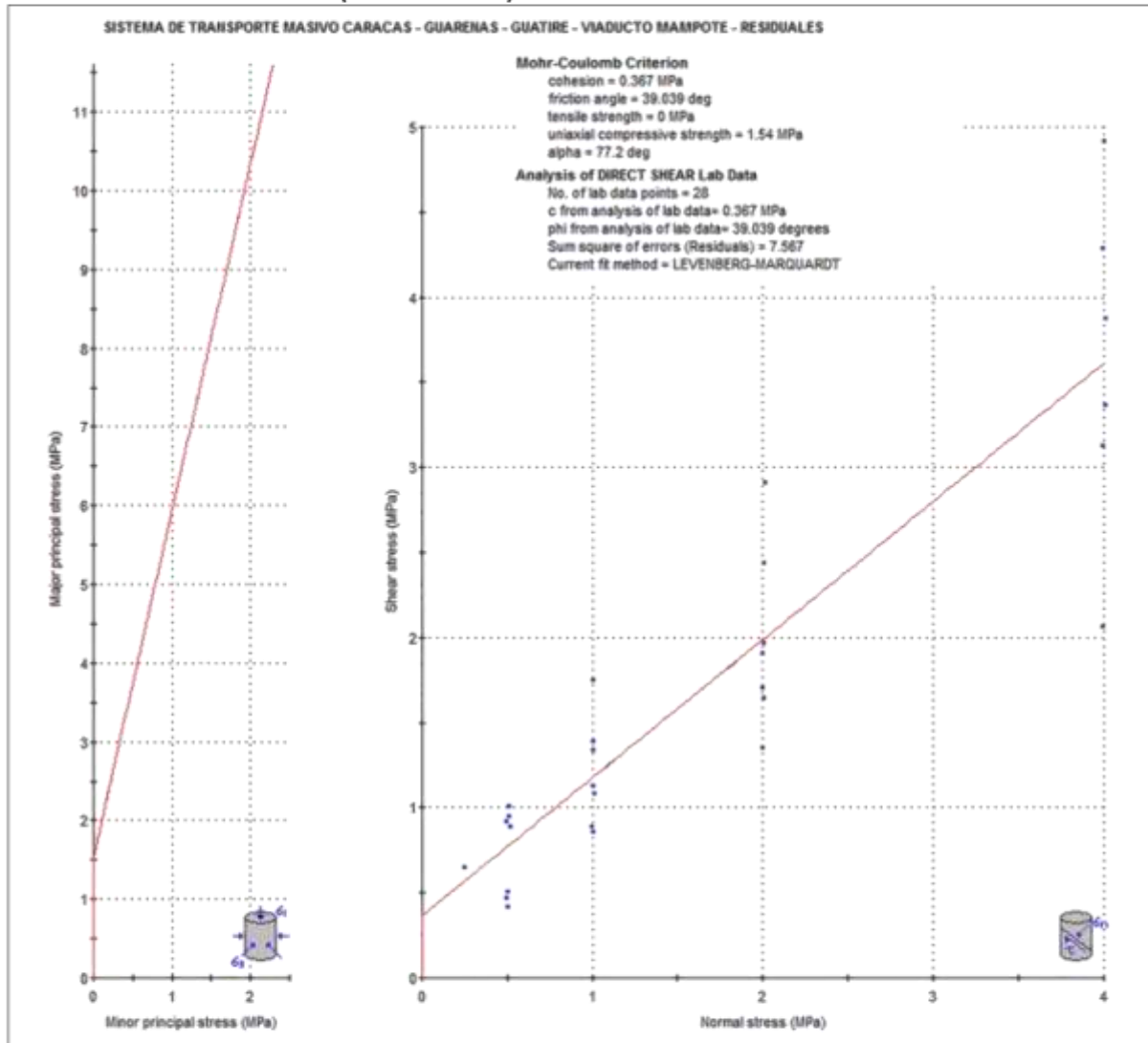


Figura 5.192 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Pico – Viaducto de Mampote, por el Criterio de Falla de Barton-Bandis

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS – GUATIRE VIADUCTO MAMPOTE			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 4 de 5 MAMPOTE	





Esfuerzos Mínimos o residuales (Mohr-Coulomb) - Global



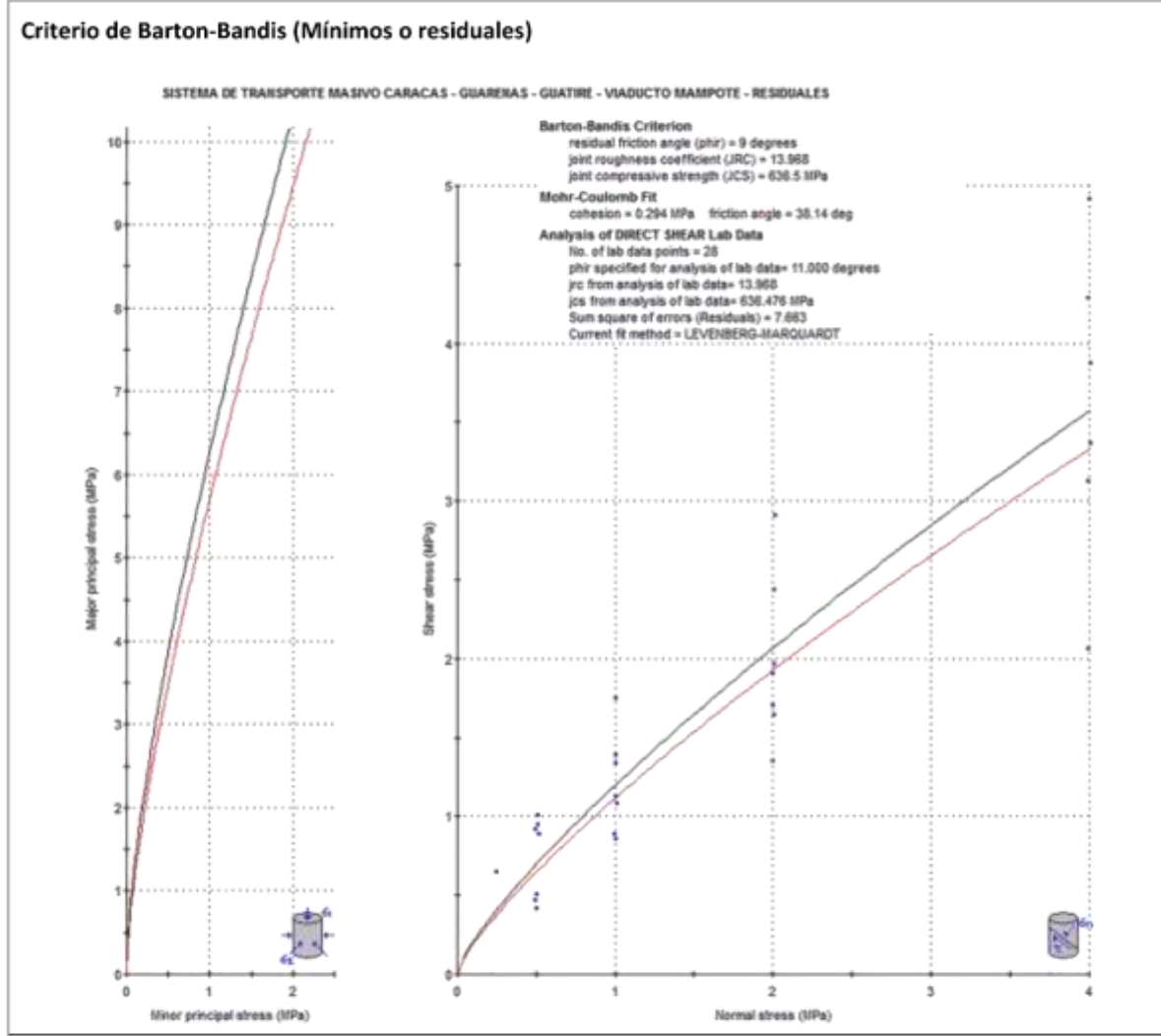
Criterio de Mohr-Coulomb (Mínimos o residuales)

- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marquadt: parámetros obtenidos: $c = 0.367$ MPa y $\phi = 39.039$ grados, suma al cuadrado de los errores (residuos) 7.567
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $c = 0.367$ MPa y $\phi = 39.039$ grados, resistencia a la tracción de 0.00 MPa, Resistencia a la compresión 1.54 MPa y $\alpha = 77.2$ grados

Figura 5.193 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales – Viaducto de Mampote, por el Criterio de Falla de Mohr-Coulomb

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO CARACAS – GUARENAS – GUATIRE VIADUCTO MAMPOTE			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 5 de 5 MAMPOTE	

Esfuerzos Mínimos o residuales (Barton-Bandis) - Global



Este criterio al igual que el anterior en programa realiza un ajuste el cual es mostrado con la línea negra y los valores sugeridos con la línea roja.

- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marquadt: parámetros obtenidos: $\phi_{ir} = 11$ grados, $JRC = 13.968$, $JCS = 636.476$ MPa y suma cuadrado de los errores (residuos) = 7.663
- Ajuste de Mohr-Coulomb: $c = 0.294$ MPa y $\phi = 38.14$ grados
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $\phi_{ir} = 9$ grados, $JRC = 13.968$, $JCS = 636.5$ MPa

Figura 5.194 Análisis por envolvente de falla de los Ensayos de Corte Residuales – Viaducto de Mampote, por el Criterio de Falla de Barton-Bandis

5.10 Sistema de Transporte Metro Los Teques – Patios y Talleres

Los reportes que se presentan a continuación corresponden a los ensayos realizados sobre muestras provenientes de donde se encuentran los Patios y Talleres del Sistema Metro Los Teques, pertenecientes al Esquisto Las Brietas del Grupo Caracas.

No se dispone de una geología detallada del sitio de emplazamiento de Patios y Talleres del Sistema Metro Los Teques, pero se ha considerado que los datos aportados por los ensayos son de gran utilidad para ser considerados en la etapa de anteproyecto de futuras obras que se realicen en tal formación.

Tabla 5.43 Ubicación de las muestras por perforación y coordenadas

N° Lab	Norte	Este	Perforación	Profundidad (m)	Formación
548-DSH	1146278	716013	S1	13.00-14.50	Esquisto Las Brietas – Grupo Caracas
556-DSH	1146278	716013	S1	13.00-14.50	
560-DSH	1146282	715986	S2	22.50-24.00	
571-2-DSH	1146166	715850	S7	17.00-18.50	
571-4-DSH	1146166	715850	S7	17.00-18.50	
577-DSH	1146097	715871	S8	40.00-41.00	
587-DSH	1145893	715517	S14	16.00-17.50	
589-DSH	1145893	715517	S14	19.00-20.00	
589-DSH	1145893	715517	S14	19.00-20.00	
593-DSH	1145867	715507	S15	24.50-26.00	
592-DSH	1145867	715507	S15	23.00-24.50	
595-DSH	1145808	715518	S16	17.00-18.50	

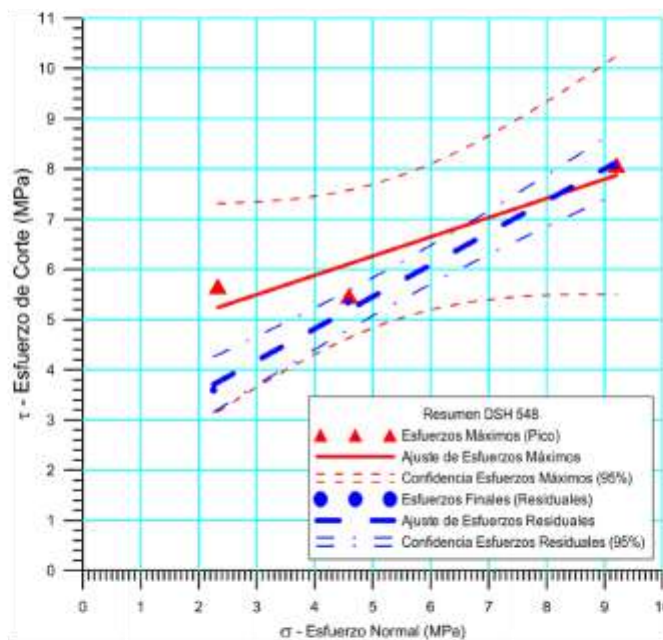
5.10.1 Especímenes ensayados

5.10.1.1 *Especímen 548-DSH*

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Especímen: 548

Cuadro Resumen de los Resultados


Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.32999	5.66472	2.2587	3.59438
2	4.59197	5.47117	4.57827	5.35299
3	9.2032	8.08168	9.16296	8.04949



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.3832075779 * \sigma + 4.35$	$\tau = 0.6372616396 * \sigma + 2.27$
Cohesión (c) (MPa)	4.35	2.27
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	20.97	32.51
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.37505	5.33331
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	6.40586	5.66562
Suma de los residuos cuadrados	0.627606	0.044131
Regresión Suma de los residuos cuadrados	3.6037	10.0265
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.851676	0.995618

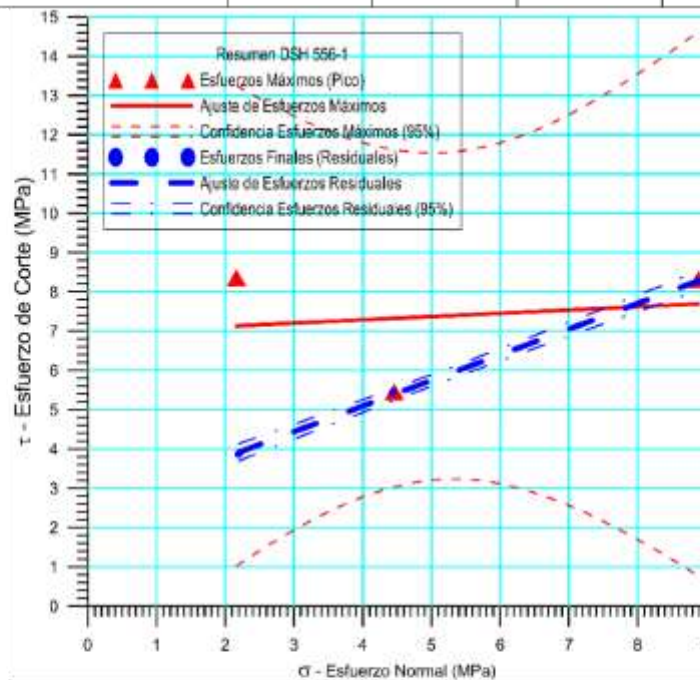
Figura 5.195 Especímen 548-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.2 Espécimen 556-DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 556

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.16336	8.36509	2.19502	3.87128
2	4.45794	5.46439	4.43857	5.44744
3	8.88707	8.33317	8.91740	8.28421



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.0833 * \sigma + 6.96$	$\tau = 0.65317 * \sigma + 2.48$
Cohesión (c) (MPa)	6.96	2.48
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	4.76	33.15
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.38637	5.18366
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	6.40586	5.86764
Suma de los residuos cuadrados	0.627606	0.00687086
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.161958	9.99496
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.0291905	0.999313

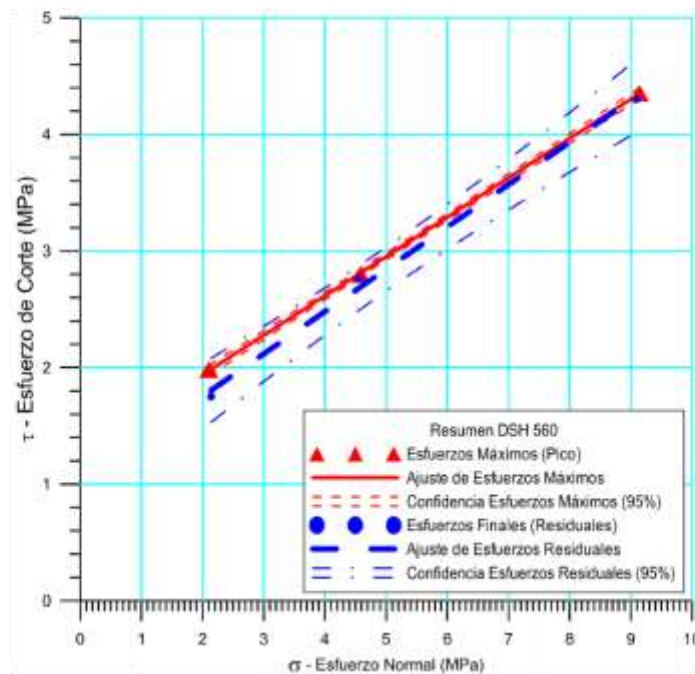
Figura 5.196 Espécimen 556-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.3 Espécimen 560-DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-2000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 560

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.10025	1.98265	2.13895	1.75073
2	4.58198	2.79827	4.55153	2.76451
3	9.13883	4.35447	9.09661	4.30165



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.33753 \cdot \sigma + 1.27$	$\tau = 0.36295 \cdot \sigma + 1.03$
Cohesión (c) (MPa)	1.27	1.03
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	18.65	19.95
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.27369	5.26236
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	3.04513	2.93896
Suma de los residuos cuadrados	0.000276519	0.0107979
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.9039	3.28845
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.999905	0.996727

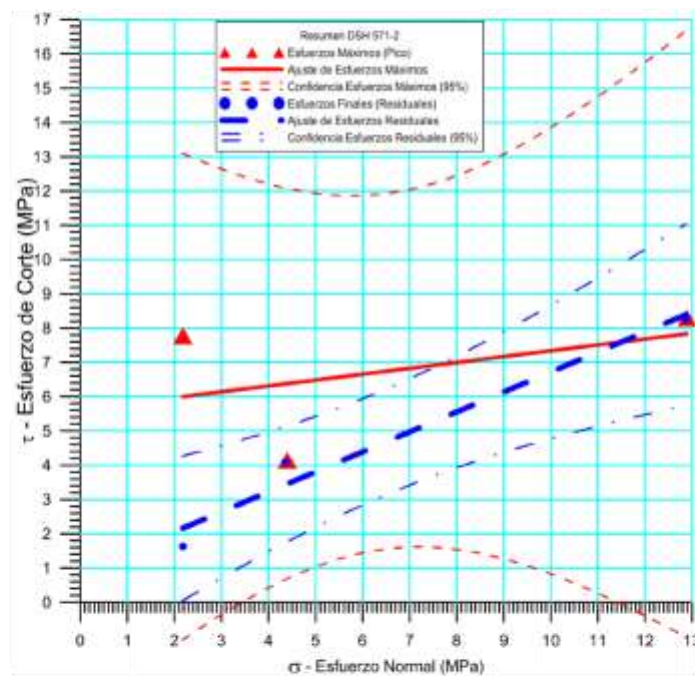
Figura 5.197 Espécimen 560-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.4 Espécimen 571-2_DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-2000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 571-2

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.18021	7.77628	2.18021	1.63267
2	4.39881	4.14403	4.35578	4.09664
3	12.89300	8.29878	12.86859	8.25845



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.17114 * \sigma + 5.63$	$\tau = 0.58298 * \sigma + 0.891$
Cohesión (c) (MPa)	5.63	0.89
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	9.71	30.24
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	6.49067	6.46819
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	6.7397	4.66259
Suma de los residuos cuadrados	8.36993	0.742313
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1.8728	21.6886
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.182842	0.966907

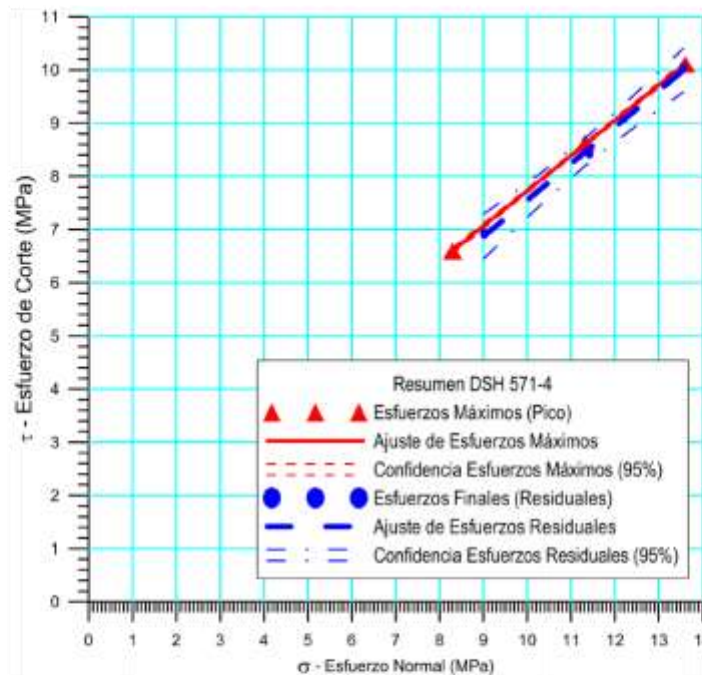
Figura 5.198 Espécimen 571-2-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.5 Espécimen 571-4_DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-2000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 571-4

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	8.2982	13.5930	9.0158	6.9344
2	11.3233	8.6227	11.4210	8.4079
3	13.6044	10.1073	13.5562	10.0555



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.66276 \cdot \sigma + 1.10$	$\tau = 0.68582 \cdot \sigma + 0.69$
Cohesión (c) (MPa)	1.10	0.69
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	33.55	34.44
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	11.0753	11.331
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	8.44101	8.46594
Suma de los residuos cuadrados	0.00045397	0.0215413
Regresión Suma de los residuos cuadrados	6.22426	4.85396
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.999927	0.995582

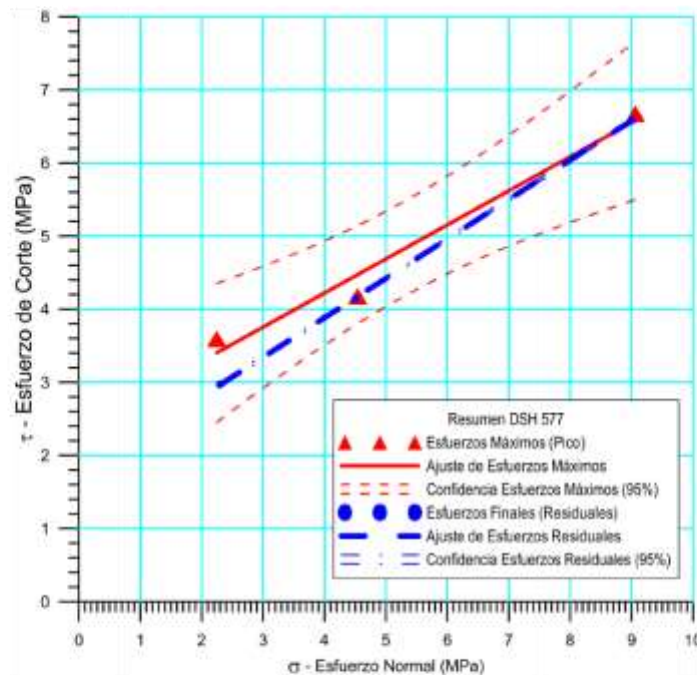
Figura 5.199 Espécimen 571-4-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.6 Espécimen 577-DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-2000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 577

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.18021	7.77628	2.18021	1.63267
2	4.39881	4.14403	4.35578	4.09664
3	12.89300	8.29878	12.86859	8.25845



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.46600 \sigma + 2.36$	$\tau = 0.53920 \sigma + 1.723$
Cohesión (c) (MPa)	2.36	1.73
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	24.29	28.33
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.2819	5.26771
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	4.81927	4.56732
Suma de los residuos cuadrados	0.131051	0.000108702
Regresión Suma de los residuos cuadrados	5.22367	6.79491
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.975526	0.999984

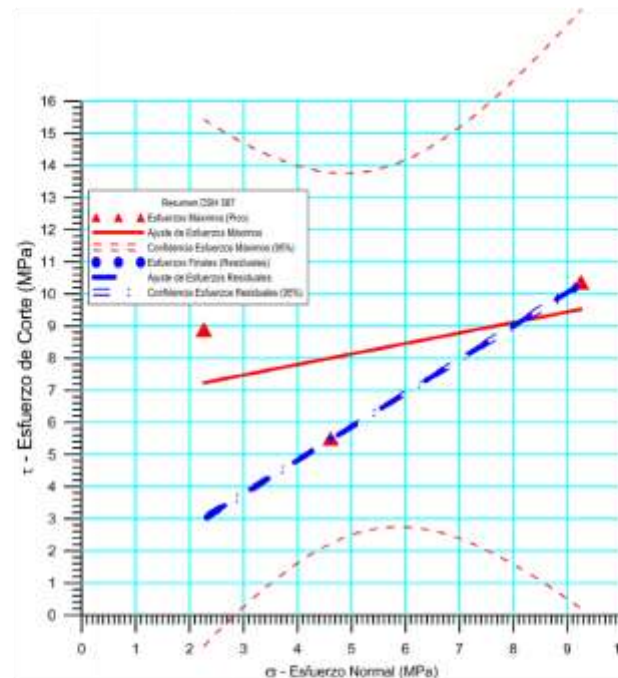
Figura 5.200 Espécimen 577-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.7 Espécimen 587-DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-2000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 587

Cuadro Resumen de los Resultados


Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.26624	8.89270	2.32406	3.04729
2	4.61635	5.50162	4.61671	5.49772
3	9.25309	10.36363	9.15838	10.19874



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.32769 * \sigma + 6.49$	$\tau = 1.04481 * \sigma + 0.64$
Cohesión (c) (MPa)	6.49	0.64
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	18.14	46.26
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.37856	5.36638
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	8.25265	6.24792
Suma de los residuos cuadrados	9.71951	0.00169962
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.71456	26.4141
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.218316	0.999936

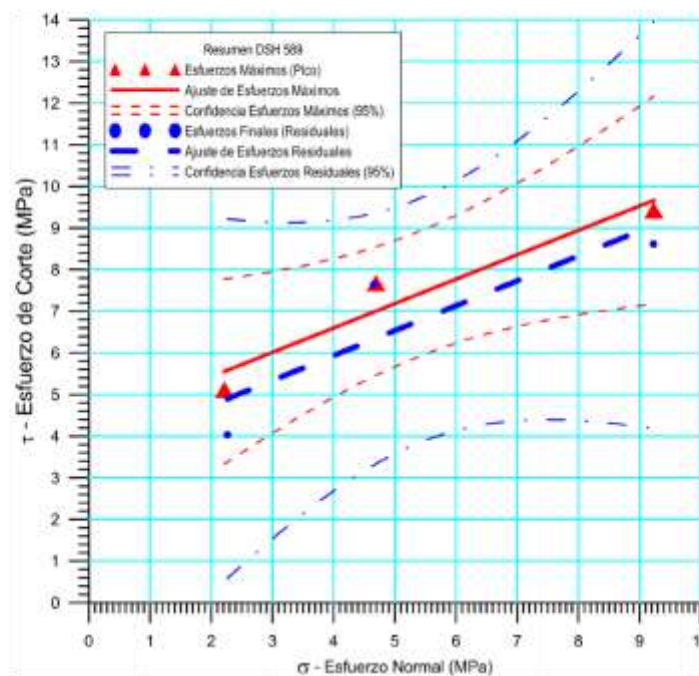
Figura 5.201 Espécimen 587-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.8 Espécimen 589-DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 589

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.21450	5.11618	2.26211	4.03406
2	4.69203	7.67884	4.65760	7.64516
3	9.23387	9.42727	9.23061	8.61354



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.58591 * \sigma + 4.26$	$\tau = 0.59820 * \sigma + 3.54$
Cohesión (c) (MPa)	4.26	3.54
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	30.34	30.89
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.38013	5.38344
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	7.40743	6.76425
Suma de los residuos cuadrados	0.702256	2.67868
Regresión Suma de los residuos cuadrados	8.70099	8.97114
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.925318	0.770067

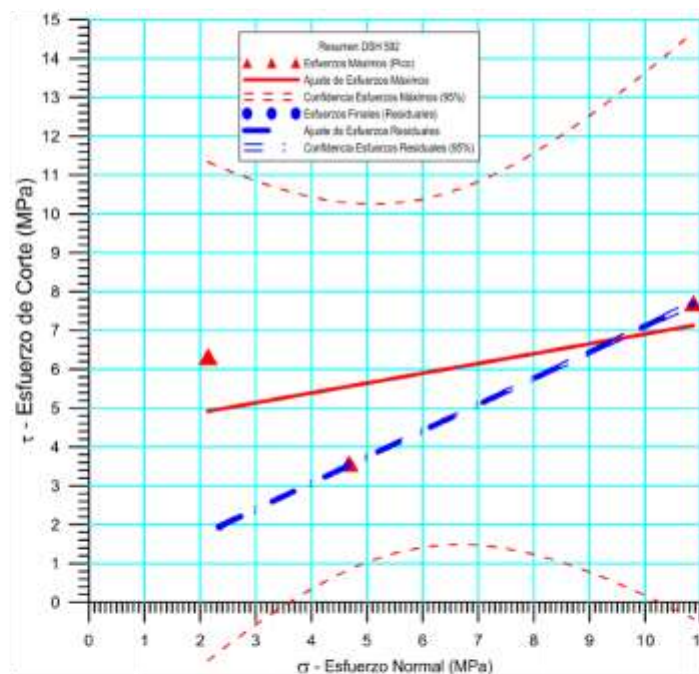
Figura 5.202 Espécimen 589-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.9 Espécimen 592-DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-20000652-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 592

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.14196	6.32752	2.34946	1.94183
2	4.67929	3.57670	4.65529	3.53021
3	10.86914	7.70415	10.85006	7.67975



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.25292 * \sigma + 4.38$	$\tau = 0.67393 * \sigma + 0.37$
Cohesión (c) (MPa)	4.38	0.37
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	14.19	33.98
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.8968	5.9516
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.86946	4.38393
Suma de los residuos cuadrados	6.25428	0.000635782
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.57837	17.5545
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.291914	0.999964

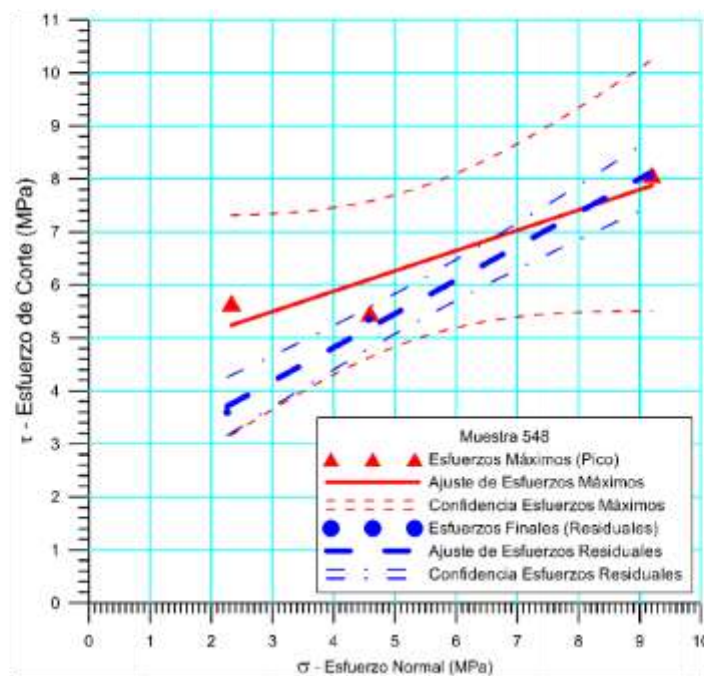
Figura 5.203 Espécimen 592-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.10 Espécimen 593-DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-2000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 593

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.14196	6.32752	2.34946	1.94183
2	4.67929	3.57670	4.65529	3.53021
3	10.86914	7.70415	10.85006	7.67975



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.47096 \cdot \sigma + 3.42$	$\tau = 0.67928 \cdot \sigma + 1.83$
Cohesión (c) (MPa)	3.42	1.84
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	25.22	34.19
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.07016	5.01898
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	5.81197	5.24306
Suma de los residuos cuadrados	0.539517	0.00489359
Regresión Suma de los residuos cuadrados	4.8012	10.0902
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.89898	0.999515

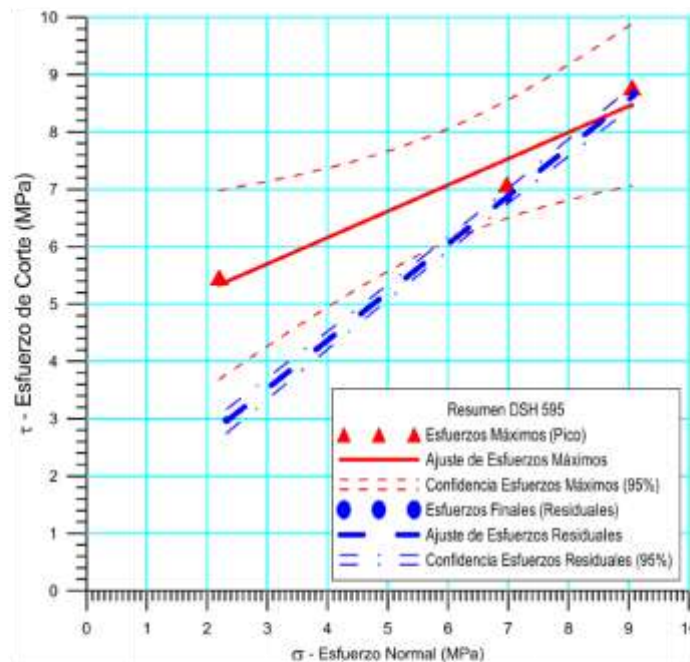
Figura 5.204 Espécimen 593-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.1.11 Espécimen 595-DSH

F y L SERVICIOS, C.A. RIF: J-30246927-9	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO - ESTÁTICO			 RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		30-09-2013	Espécimen: 595

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.20166	5.46614	2.32387	2.97337
2	6.97715	7.08764	7.00049	6.83095
3	9.05854	8.78128	9.08621	8.67738



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.45850 \cdot \sigma + 4.32$	$\tau = 0.84036 \cdot \sigma + 1.00$
Cohesión (c) (MPa)	4.32	1.00
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	24.63	40.04
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	6.07912	6.13686
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	7.11169	6.16057
Suma de los residuos cuadrados	0.299541	0.00482528
Regresión Suma de los residuos cuadrados	5.1964	16.9372
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.945498	0.999715

Figura 5.205 Espécimen 595-DSH _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

5.10.2 Envolventes de Falla


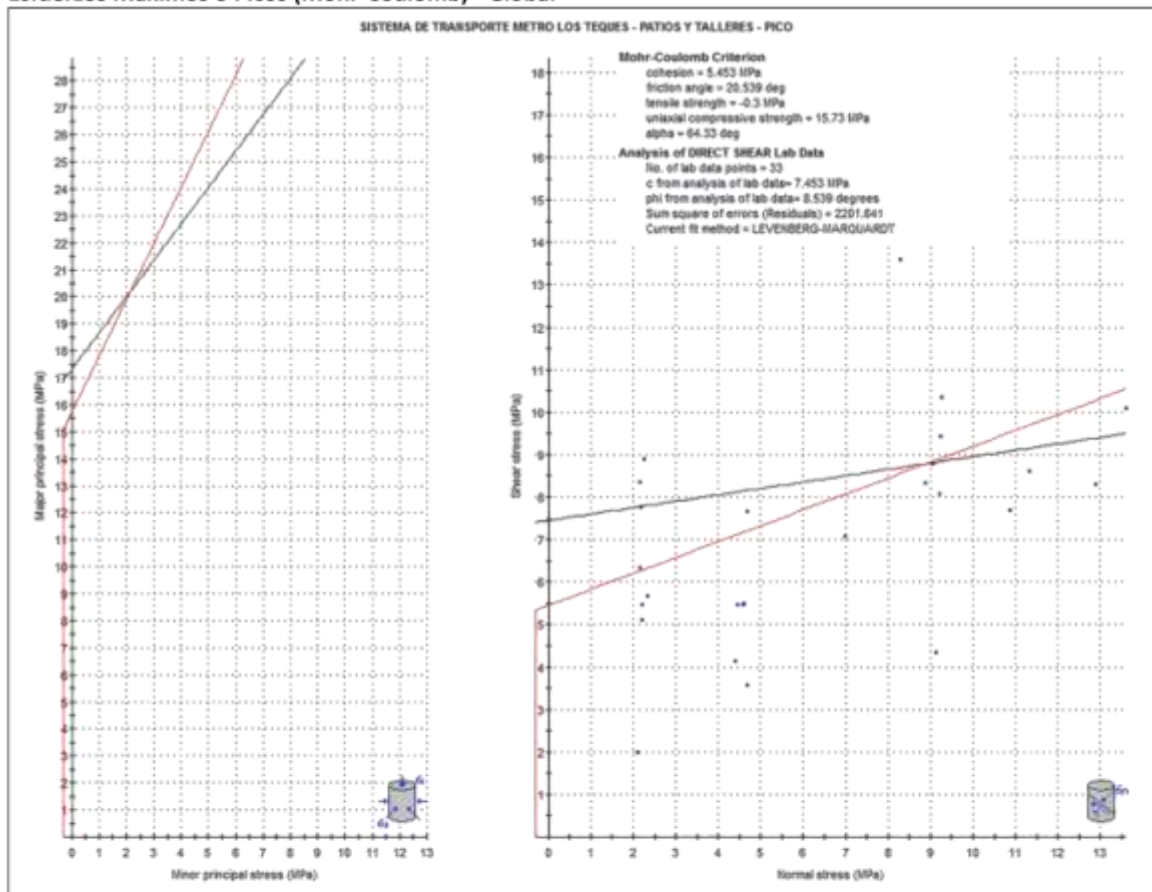
 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL			  RIF: G-20000062-7						
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES									
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 1 de 5							
M. CASTILLEJO		01-02-2017	METRO LOS TEQUES							
DATOS GENERALES										
Proyecto	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES		Especímenes del análisis	548/556/560/571-2/ 571-1/577/587/589/ 593/592/595						
Origen del Espécimen	Suministrado por el cliente		Perforaciones	51/52/57/58/ 514/515/516						
Clasificación Geológica del Espécimen	ESQUISTOS		Formación Geológica	Las Brisas						
Tipo de Roca	Dura		Número de puntos en el análisis	28 Puntos						
Nota:										
Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_n	τ	σ_n	τ	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}
1	548	1	2.3299	5.66472	2.2587	3.59438	-3.33482	7.99462	-1.33568	5.85308
2	548	2	4.59197	5.47117	4.57827	5.35299	-0.8792	10.06314	-0.77472	9.93126
3	548	3	9.2032	8.08168	9.16296	8.04949	1.12152	17.28488	1.11347	17.21245
4	556	1	2.16336	8.36509	2.19502	3.87128	-6.20173	10.52845	-1.67626	6.0663
5	556	2	4.45794	5.46439	4.43857	5.44744	-1.00645	9.92233	-1.00887	9.88601
6	556	3	8.88707	8.33317	8.91740	8.28421	0.55390	17.22024	0.63319	17.20161
7	560	1	2.10025	1.98265	2.13895	1.75073	0.11760	4.08290	0.38822	3.88968
8	560	2	4.58198	52.79827	4.55153	2.76451	-48.21629	57.38025	1.78702	7.31604
9	560	3	9.13883	4.35447	9.09661	4.30165	4.78436	13.49330	4.79496	13.39826
10	571-2	1	2.18021	7.77628	2.18021	1.63267	-5.59607	9.95649	0.54754	3.81288
11	571-2	2	4.39881	4.14403	4.35578	4.09664	0.25478	8.54284	0.25914	8.45242
12	571-2	3	12.89300	8.29878	12.86859	8.25845	4.59422	21.19178	4.61014	21.12704
13	571-4	1	8.29820	13.59300	9.01580	6.93440	-5.29480	21.89120	2.08140	15.95020
14	571-4	2	11.32330	8.62270	11.42100	8.40790	2.70060	19.94600	3.01310	19.82890
15	571-4	3	13.60440	10.10730	13.55620	10.05550	3.49710	23.71170	3.50070	23.61170
16	577	1	2.18021	7.77628	2.18021	1.63267	-5.59607	9.95649	0.54754	3.81288
17	577	2	4.39881	4.14403	4.35578	4.09664	0.25478	8.54284	0.25914	8.45242
18	577	3	12.89300	8.29878	12.86859	8.25845	4.59422	21.19178	4.61014	21.12704
19	587	1	2.26624	8.89270	2.32406	3.04729	-6.62646	11.15894	-0.72323	5.37135
20	587	2	4.61635	5.50162	4.61671	5.49772	-0.88527	10.11797	-0.88101	10.11443
21	587	3	9.25309	10.36363	9.15838	10.19874	-1.11054	19.61672	-1.04036	19.35712
22	589	1	2.21450	5.11618	2.62110	4.03406	-2.90168	7.33068	-1.41296	6.65516
23	589	2	4.69203	7.67884	4.65760	7.64516	-2.98681	12.37087	-2.98756	12.30276
24	589	3	9.23387	9.42727	9.23061	8.61354	-0.19340	18.66114	0.61707	17.84415
25	592	1	2.14196	6.32752	2.34946	1.94183	-4.18556	8.46948	0.40763	4.29129
26	592	2	4.67929	3.57670	4.65529	3.53021	1.10259	8.25599	1.12508	8.18550
27	592	3	10.86914	7.70415	10.85006	7.67975	3.16499	18.57329	3.17031	18.52981
28	593	1	2.14196	6.32752	2.34946	1.94183	-4.18556	8.46948	0.40763	4.29129
29	593	2	4.67929	3.5767	4.65529	3.53021	1.10259	8.25599	1.12508	8.1855

Figura 5.206 Resultados de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL			 RIF: G-2000062-7						
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES									
Cálculo: M. CASTILLO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 2 de 5 METRO LOS TEQUES							
Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_c	τ	σ_n	τ	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}
30	593	3	10.86914	7.70415	10.85006	7.67975	3.16499	18.57329	3.17031	18.52981
31	595	1	2.20166	5.46614	2.32387	2.97337	-3.26448	7.6678	-0.6495	5.29724
32	595	2	6.97715	7.08764	7.00049	6.83095	-0.11049	14.06479	0.16954	13.83144
33	595	3	9.05854	8.78128	9.08621	8.67738	0.27726	17.83982	0.40883	17.76359





Esfuerzos Máximos o Picos (Mohr-Coulomb) - Global



Criterio de Mohr-Coulomb (máximos o picos)

- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marcuadt: parámetros obtenidos: $c = 7.453$ MPa y $\phi = 8.539$ grados, suma al cuadrado de los errores (residuos) 2201.641
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $c = 5.453$ MPa y $\phi = 20.539$ grados, resistencia a la tracción de -0.30 MPa, Resistencia a la compresión 15.73 MPa y $\alpha = 64.33$ grados

Figura 5.207 Envolvente de Mohr-Coulomb para Esfuerzos Pico de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL		  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES		
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 3 de 5 METRO LOS TEQUES

Esfuerzos Máximos o Picos (Barton-Bandis) - Global

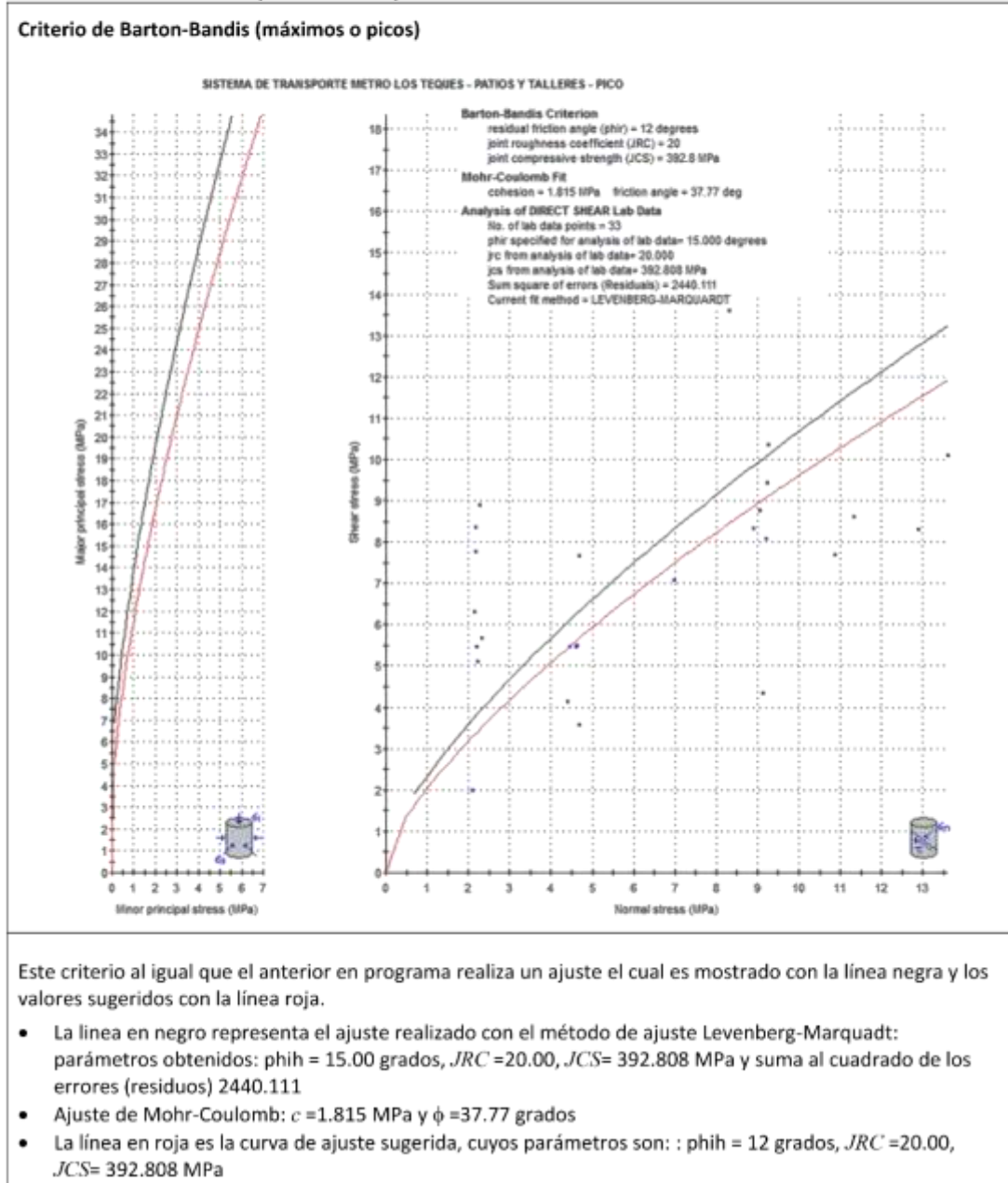






Figura 5.208 Envoltente de Barton-Bandis para Esfuerzos Pico de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL		  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES		
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 4 de 5 METRO LOS TEQUES

Esfuerzos Mínimos o residuales (Mohr-Coulomb) - Global

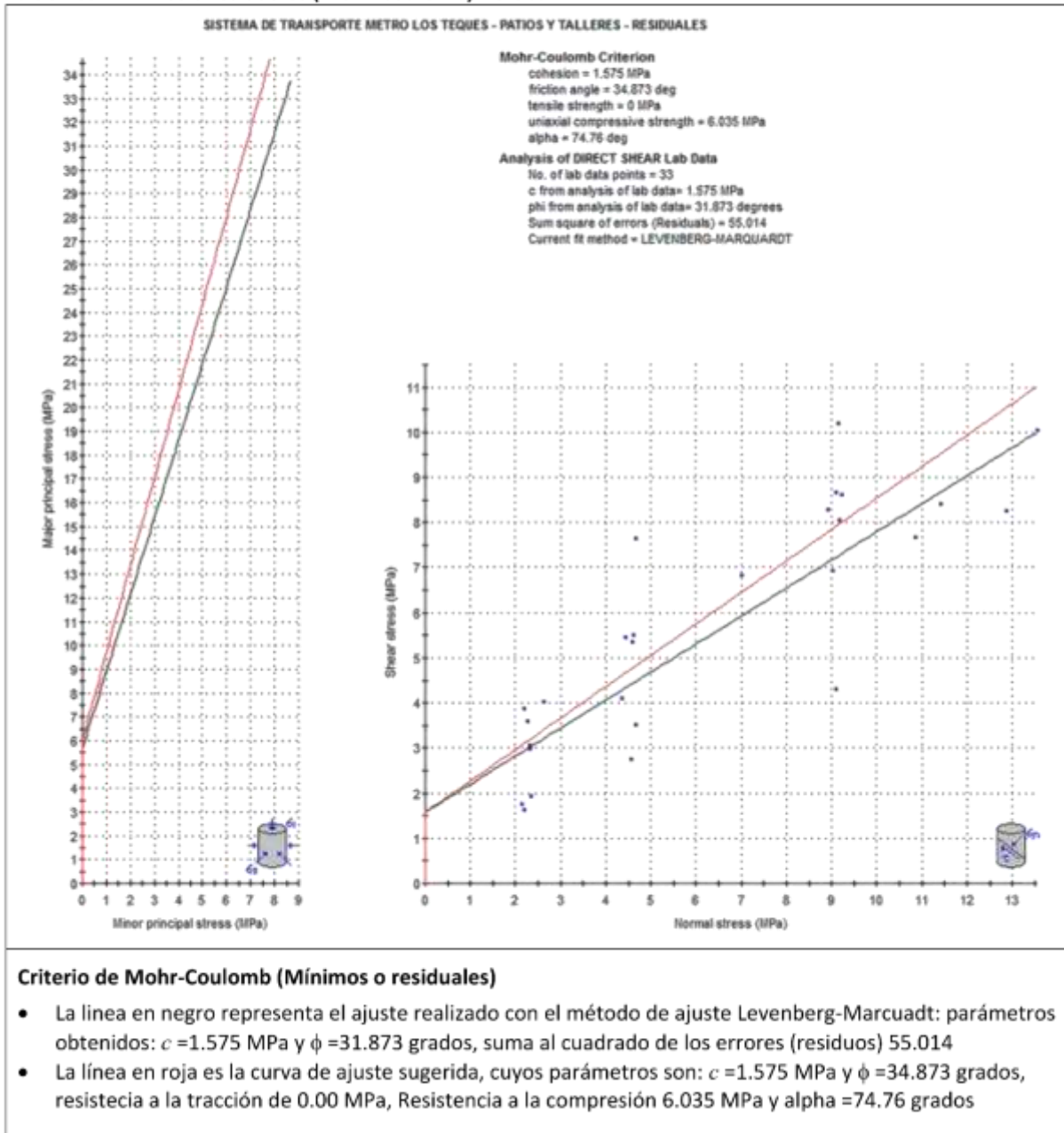


Figura 5.209 Envolvente de Mohr-Coulomb para Esfuerzos Residuales de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

 RIF: J- 30246927-9  RIF: J-00363691-6	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CNL			  RIF: G-20000062-7
	SISTEMA DE TRANSPORTE METRO LOS TEQUES PATIOS Y TALLERES			
Cálculo: M. CASTILLEJO	Revisión:	Fecha: 01-02-2017	Página 5 de 5 METRO LOS TEQUES	

Esfuerzos Mínimos o residuales (Barton-Bandis) - Global

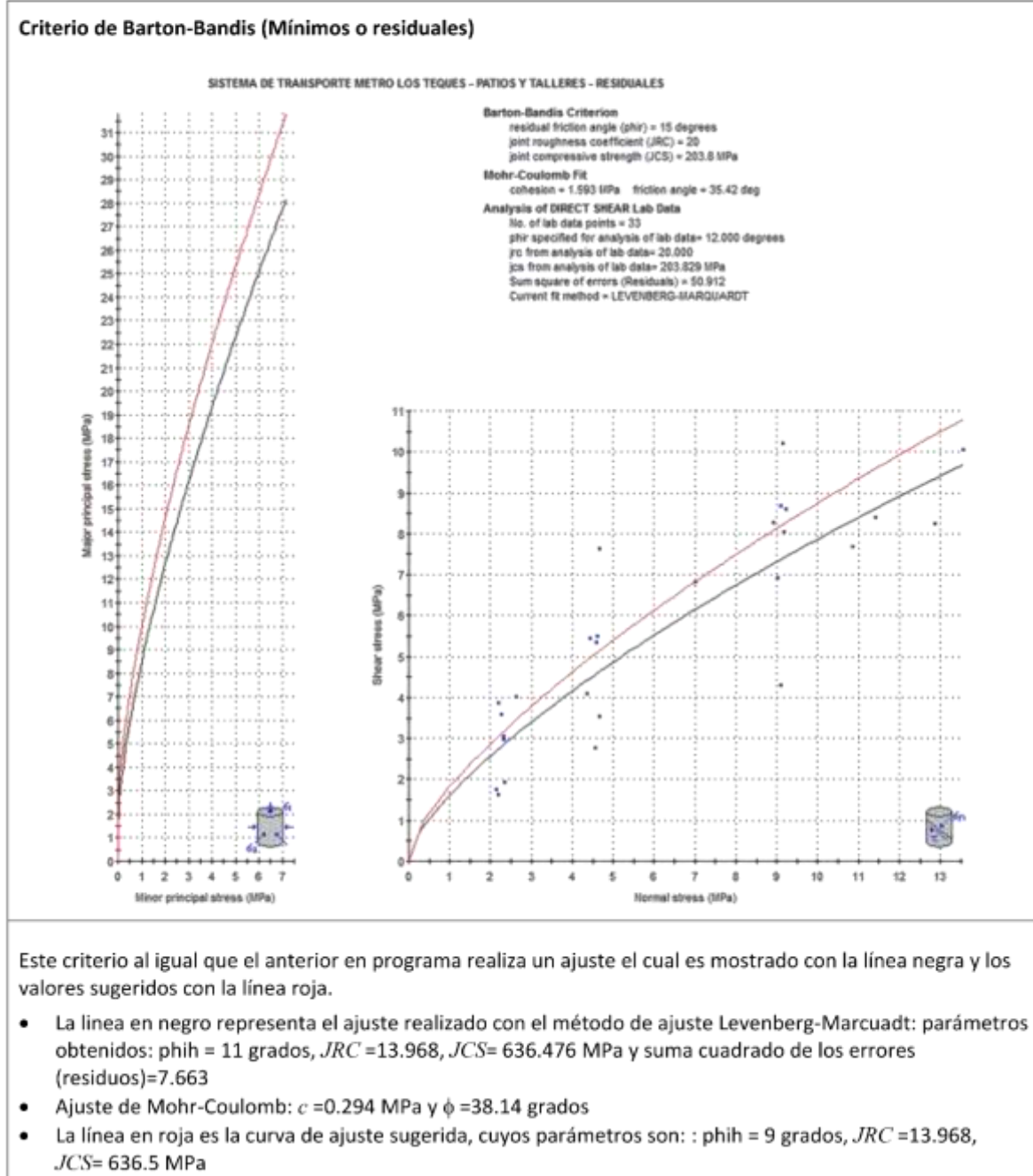


Figura 5.210 Envoltorio de Barton-Bandis para Esfuerzos Residuales de los Ensayos de Corte _ Patios y Talleres – Sistema Metro Los Teques

La mina se encuentra emplazada en la formación El Callao, en el estado Bolívar.

La unidad consiste casi en su totalidad de metalavas de composición basáltica (Menéndez, 1972); comúnmente exhiben estructuras en almohadillas hasta de 2 m de diámetro, que presentan amígdalas principalmente de cuarzo que se concentran en el tope de los flujos, además de fracturas radiales rellenas de epidoto y cuarzo; algunas coladas presentan estructura columnar. Las lavas almohadilladas son afaníticas y alternan con coladas no almohadilladas, de grano más grueso y textura subofítica. Brechas de flujo de hasta 40 cm de espesor alternan con las coladas de lava. En la parte superior contiene jaspe y metaftanitas ferruginosas y manganesíferas. La unidad ha sido afectada por metamorfismo regional de bajo grado, facies del esquisto verde, que localmente, en las zonas de contacto con masas graníticas, pasa a facies de la anfibolita. Las lavas y rocas básicas intrusivas asociadas cambian gradualmente a color más oscuro al aproximarse a las masas graníticas del Complejo de Supamo, cambio que es paralelo a un cambio en la mineralogía metamórfica y en la textura. (Korol, 1965) describió originalmente la unidad como constituida de lavas espilíticas. Menéndez (1994) ilustró la tendencia de cristalización magmática de las rocas volcánicas de las unidades del Grupo Carichapo, donde indicó que las lavas de El Callao son esencialmente toleítas normales con tendencia a toleítas ferruginosas.

5.11.1.1 Extensión geográfica

La formación aflora en escala kilométrica en el estado Bolívar, al Oeste y sudeste de la Pastora en una franja de hasta 3 kilómetros de ancho, al sur y sudeste de El Callao; al Noreste y Noroeste de la región de Guasipati; al noroeste de El Dorado en la Región Yuruán-Ave Chica.

5.11.1.2 Contactos

Según Korol (1965), la unidad suprayace en contacto concordante a la Formación Yuruari e infrayace a la Formación Caballape; las tres unidades integran el Grupo Pastora. (Menéndez, 1968) señala que el contacto inferior de la unidad es siempre concordante con las rocas graníticas del Complejo de Supamo, que la intrusionan. Según la redefinición propuesta por Menéndez (1994), la unidad suprayace a la Formación Florinda, ubicada en la base del Grupo

Carichapo. El contacto superior es transicional con la Formación Cicapra, y donde ésta ausente, es concordante con la Formación Yuruari.

5.11.1.3 Edad

Menéndez (1968) señaló la edad de aproximadamente 2000 m.a. del Complejo de Supamo, intrusivo en la formación. (Menéndez, 1994) determinó edades U-Pb en circones del Complejo de Supamo, dentro de un intervalo de 2050 a 2200 m.a. (PRECAMBRICO).

5.11.2 Caracterización Geomecánica

(Márquez O. A., 2002) realizó la “Caracterización Geomecánica para Diseño de Sostenimiento en Minería Subterránea. Un Caso de Aplicación: Nivel 6, Mina Colombia, El Callao, Estado Bolívar”, en cuyo estudio se hace una revisión de la metodología clásica para el diseño de cámaras y pilares, utilizando como caso de aplicación el nivel 6 de la mina Colombia, El Callao, estado Bolívar; con la finalidad de establecer un diseño seguro de los mismos. En la Figura 5.209 se muestra la distribución de las distintas estaciones donde se realizaron las mediciones y toma de datos geológicos, así como la ubicación de las perforaciones que proporcionaron las muestras para su análisis en laboratorio.

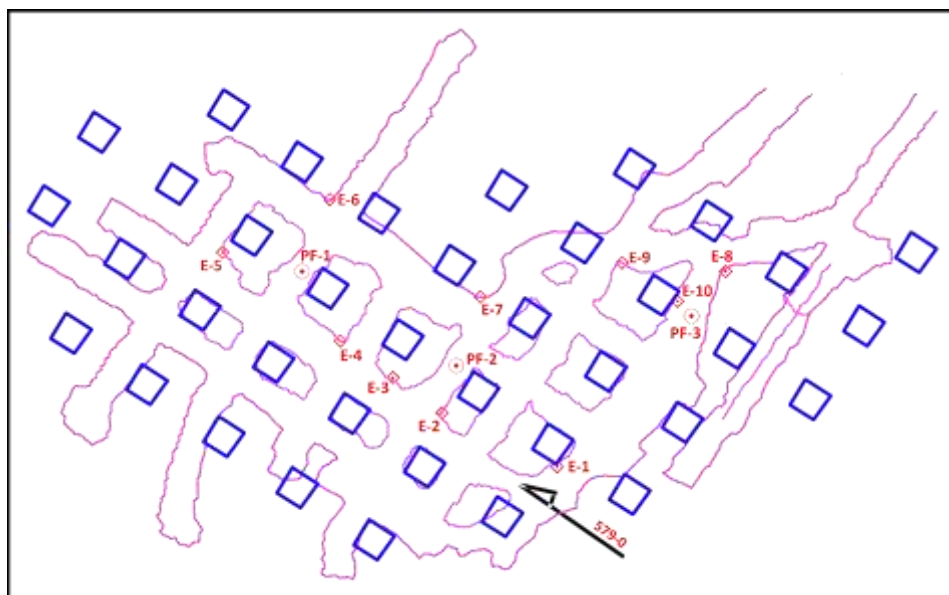


Figura 5.212 Nivel 6, Mina Colombia [modificado de (Márquez O. A., 2002)]

Para esto, se establecieron las características del macizo rocoso presente en la zona, a través de un levantamiento geológico y un programa de perforación que sirvió para la recuperación de muestras.

La exploración del macizo rocoso se hizo a través de un conjunto de tres perforaciones verticales de diez (10) metros de longitud cada uno, para un total de 30 metros lineales de perforación.

Las perforaciones se hicieron a máquina por rotación con toma de núcleos en recorridos de 1,00 y 1,50 metros, utilizando una broca de diamante de diámetro BX. En la Tabla 5.44, se presenta los valores del RQD y calidad de la roca.

Tabla 5.44 Valores de RQD, calidad de la roca y Clasificación de Bieniawski [modificado de (Márquez O. A., 2002)]

Perforación	Muestra	Profundidad	RQD	% de Recuperación	Calidad de la Roca	RMR	Calidad	Clase
P-1	R-1	1.00	0.00	60	Muy Mala	48	Aceptable	III
	R-2	2.00	53.00	100	Regular	58	Aceptable	III
	R-3	3.00	91.50	100	Excelente	65	Buena	II
	R-4	4.50	91.00	100	Excelente	65	Buena	II
	R-5	6.00	96.33	100	Excelente	65	Buena	II
	R-6	7.50	74.33	100	Regular	58	Aceptable	III
	R-7	8.75	56.80	100	Regular	58	Aceptable	III
	R-8	10.00	71.76	100	Regular	58	Aceptable	III
P-2	R-1	1.00	27.00	65	Mala	55	Aceptable	III
	R-2	2.00	23.50	100	Muy Mala	50	Aceptable	III
	R-3	3.00	86.50	100	Buena	64	Buena	II
	R-4	4.00	82.00	100	Buena	64	Buena	II
	R-5	5.00	42.00	100	Mala	55	Aceptable	III
	R-6	6.00	15.00	100	Muy Mala	50	Aceptable	III
	R-7	7.50	53.20	100	Regular	60	Aceptable	III
	R-8	8.50	50.50	100	Regular	60	Aceptable	II
	R-9	9.50	76.50	100	Buena	64	Buena	II
	R-10	10.00	46.00	100	Mala	55	Aceptable	III
P-3	R-1	1.50	51.10	66.66	Regular	55	Aceptable	III
	R-2	2.50	99.00	100	Excelente	62	Buena	II
	R-3	3.50	100.00	100	Excelente	62	Buena	II
	R-4	4.50	92.50	100	Excelente	62	Buena	II
	R-5	5.50	85.00	100	Buena	59	Aceptable	III
	R-6	6.50	94.00	100	Excelente	62	Buena	II
	R-7	7.50	100.00	100	Excelente	62	Buena	II
	R-8	8.50	100.00	100	Excelente	62	Buena	II
	R-9	9.50	73.00	100	Regular	55	Aceptable	III
	R-10	10.00	100.00	100	Excelente	62	Buena	II

Como puede observarse, el tipo de roca es sana, lo cual se corrobora con los porcentajes de RQD y la clasificación de Bieniawski.

Tabla 5.45 Resultados de ensayos de laboratorio (Márquez O. A., 2002)

Perforación	Profundidad (m)	Litología	Resistencia a la Compresión Uniaxial kg/cm ²	Densidad Ton/m ³
P-1	1.70	Diorita Porfídica	670.71	3.06
P-1	1.80	Diorita Porfídica	745.39	3.04
P-1	3.98	Diorita Porfídica	721.79	3.01
P-1	4.10	Diorita Porfídica	709.72	3.03
P-1	5.28	Diorita Porfídica	728.18	3.04
P-2	0.23	Monzodiorita	793.97	2.94
P-2	1.77	Monzodiorita	721.79	2.95
P-2	2.51	Monzodiorita	707.35	2.95
P-3	2.55	Diorita Porfídica	875.35	2.98
P-3	2.95	Diorita Porfídica	866.15	2.83

5.11.3 Ensayos de Corte

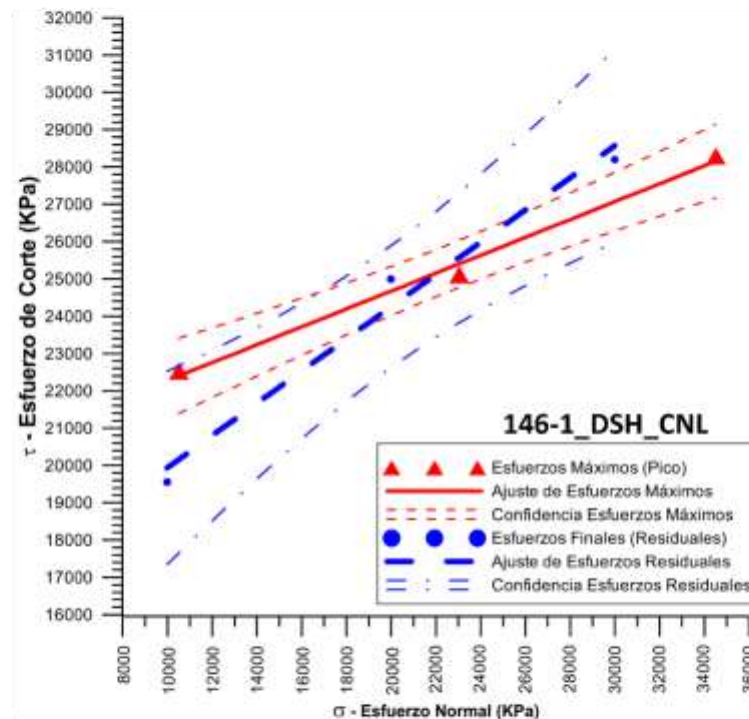
Tabla 5.46. Ensayos de corte realizados en muestras de la Mina Colombia

N° Lab	Perforación	Profundidad (m)	Tipo de Roca
146-1	-	383	Gabro (Diorita)
170	-	383	Gabro (Diorita)
171	-	383	Gabro (Diorita)
172	-	383	Gabro (Diorita)

5.11.3.1 *Espécimen 146-1*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (KPa)	τ (KPa)	σ_n (KPa)	τ (KPa)
1	10511.08	22536.93	9982.59	19560.16
2	23043.83	25116.55	19991.6	25000.55
3	34514.94	28304.09	29989.22	28200.09



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.2397300084 * \sigma + 19879.7281$	$\tau = 0.4318745493 * \sigma + 15621.37644$
Cohesión (c) (KPa)	19879.72	15621.37
Ángulo de Fricción, (grados)	13.73	24.74
Número de puntos	3	3
promedio Esfuerzo Normal	22690 MPa	19987.8 MPa
Promedio Esfuerzo de Corte	25319.2 MPa	24253.6 MPa
Suma de los residuos cuadrados	124044	833231
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1.65676E+007	3.73279E+007
Coficiente de Determinación (R2)	0.992568	0.978165

Figura 5.213 Espécimen 146-1-DSH_ Mina Colombia – El Callao



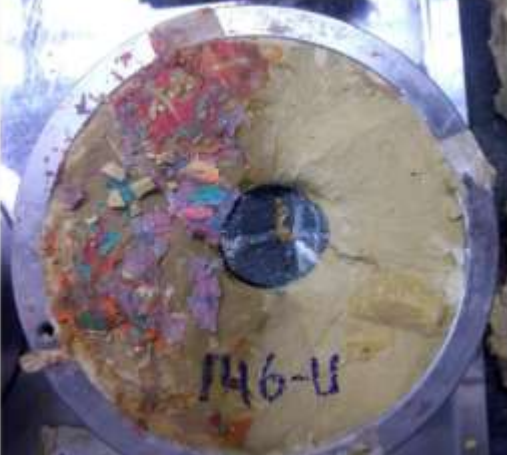
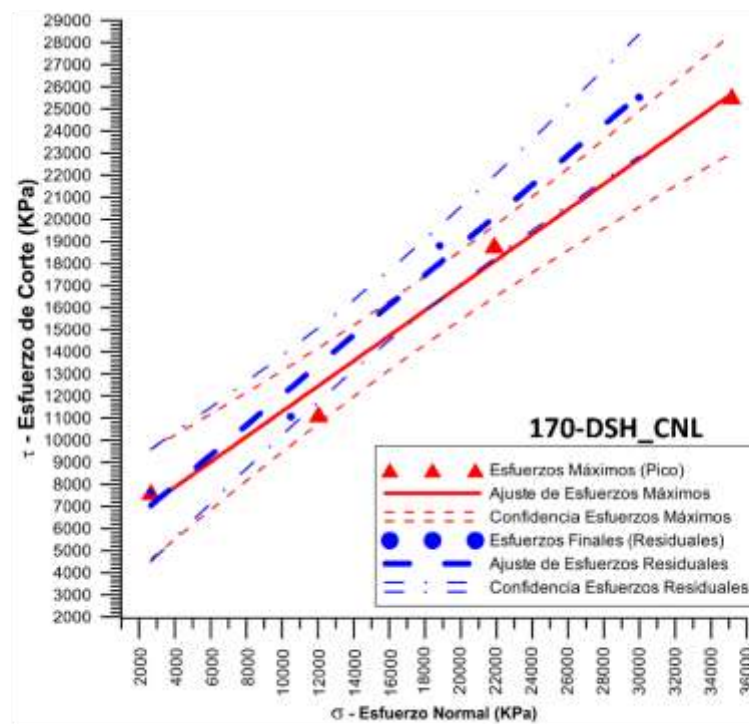
<p>OBSERVACIONES 146-1-DSH_CNL</p>	
<p>Ensayo realizado sobre el plano de discontinuidad. Variación de la carga normal sobre la misma muestra. La muestra no fallo por el plano preferencial de discontinuidad.</p>	<p>Transversal</p>
	
<p>FINAL - CAJA INFERIOR</p>	<p>FINAL - CAJA SUPERIOR</p>

Figura 5.214 Tipo de factura generada en el espécimen 146-1-DSH _ Mina Colombia – El Callao

5.11.3.2 Espécimen 170

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (KPa)	τ (KPa)	σ_n (KPa)	τ (KPa)
1	2662.89	7682.37	2655.49	7645.18
2	12047.37	11209.13	10484.04	11068.25
3	21874.51	18856.02	18814.55	18807.04
4	35157.13	25592.08	29981.06	25525.8



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.5718433483 * \sigma + 5578.617922$	$\tau = 0.6798066489 * \sigma + 5235.587507$
Cohesión (c) (KPa)	5578.61	5235.58
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	32.76	38.95
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal ($\bar{\sigma}_n$)	17935.5 MPa	15483.8 MPa
Promedio Esfuerzo de Corte ($\bar{\tau}$)	15834.9 MPa	15761.6 MPa
Suma de los residuos cuadrados	2.5209E+006	2.65946E+006
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1.8967E+008	1.89859E+008
Coefficiente de Determinación (R2)	0.986883	0.986186

Figura 5.215 Espécimen 170-DSH _ Mina Colombia – El Callao

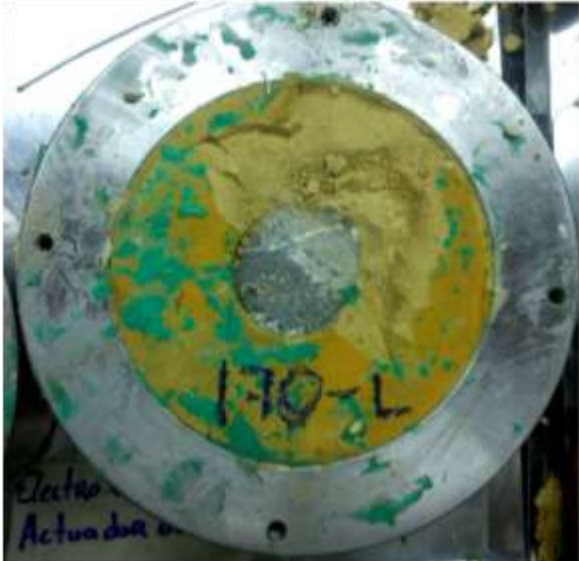
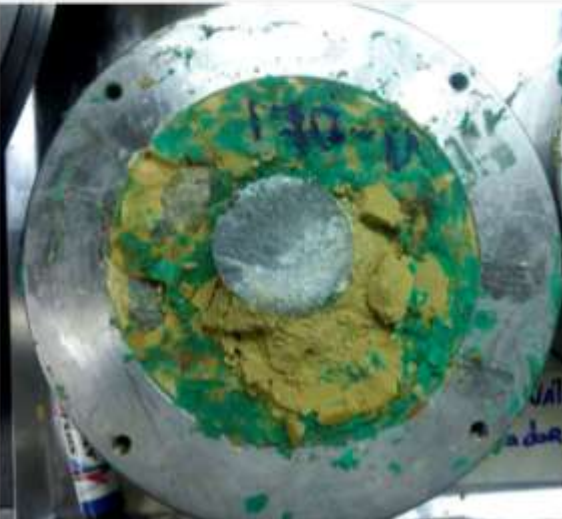
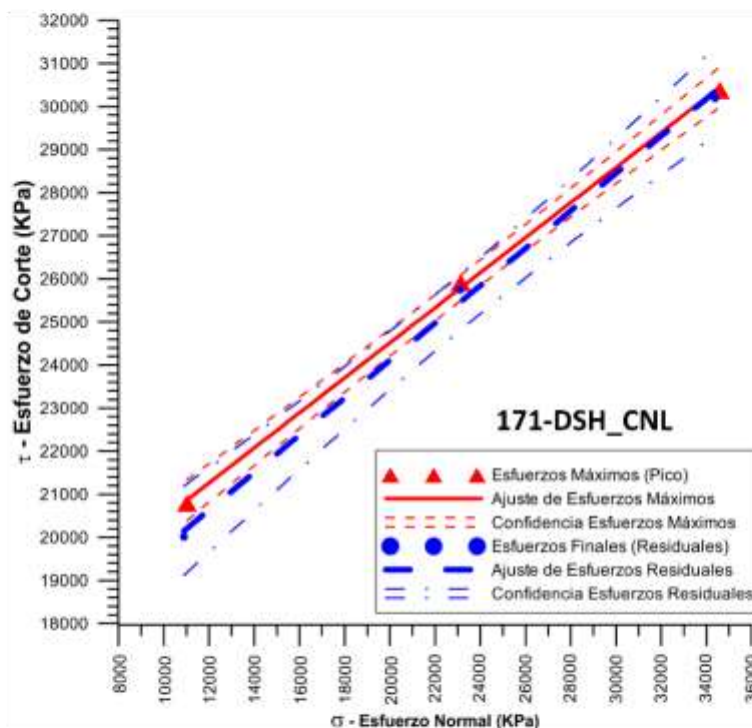
<p>OBSERVACIONES 170-DSH_CNL</p>	<p>Sin Foto Inicial</p>
<p>Ensayo realizado sobre el plano de discontinuidad.</p> <p>Variación de la carga normal sobre la misma muestra.</p> <p>La muestra no fallo por el plano preferencial de discontinuidad.</p>	
<p>INICIAL</p>	<p>INICIAL</p>
	
<p>FINAL – CAJA INFERIOR</p>	<p>FINAL – CAJA SUPERIOR</p>

Figura 5.216 Tipo de fractura generada en el espécimen 170-DSH _ Mina Colombia – El Callao

5.11.3.3 *Espécimen 171*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (KPa)	τ (KPa)	σ_n (KPa)	τ (KPa)
1	11024.2	20798.75	10892.79	20012
2	23130.62	25924.87	23100.86	25749.87
3	34588.37	30382.31	34383.74	30197.24



VARIABLE	Resultados de las curvas de ajuste	
	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.4068581275 * \sigma + 16379.06815$	$\tau = 0.4340782173 * \sigma + 15425.99148$
Cohesión (c) (KPa)	16379.06	15425.99
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	23.31	24.87
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal ($\bar{\sigma}_n$)	22914.4 MPa	22792.5 MPa
Promedio Esfuerzo de Corte ($\bar{\tau}$)	25702 MPa	25319.7 MPa
Suma de los residuos cuadrados	27312.5	131757
Regresión Suma de los residuos cuadrados	4.59695E+007	5.20154E+007
Coefficiente de Determinación (R2)	0.999406	0.997473

Figura 5.217 Espécimen 171-DSH _ Mina Colombia – El Callao




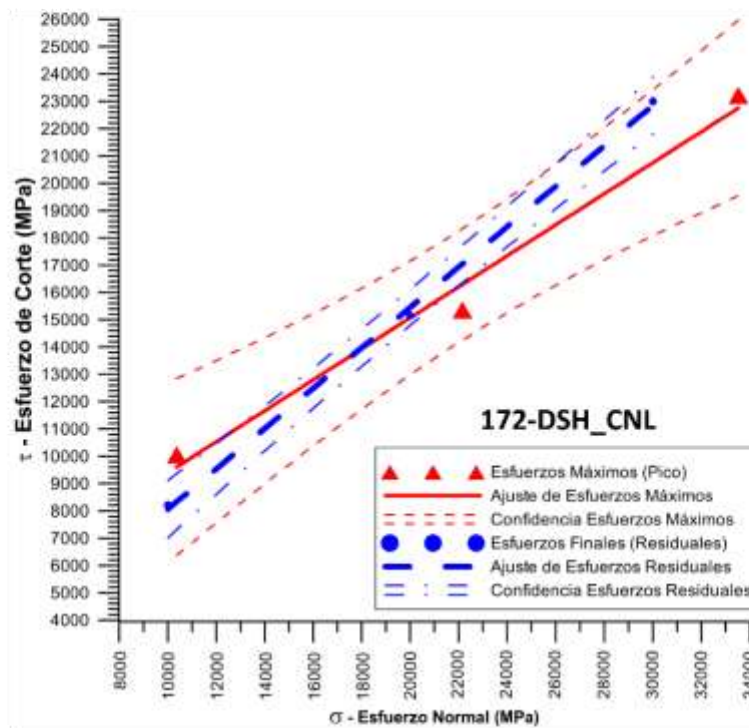
<p>OBSERVACIONES 171-DSH_CNL</p> <p>Ensayo realizado sobre el plano de discontinuidad.</p> <p>Variación de la carga normal sobre la misma muestra.</p> <p>La muestra no fallo por el plano preferencial de discontinuidad.</p>	 <p>Transversal</p>
 <p>FINAL – CAJA INFERIOR</p>	 <p>FINAL – CAJA SUPERIOR</p>

Figura 5.218 Tipo de factura generada en el espécimen 171-DSH _ Mina Colombia – El Callao

5.11.3.4 *Espécimen 172*

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (KPa)	τ (KPa)	σ_n (KPa)	τ (KPa)
1	10377.06	10062.62	10008.07	8210.15
2	22153.85	15362.52	20009.85	15154.88
3	33535.66	23228.14	30005.8	23000.69



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = 0.5678088695 * \sigma + 3713.365193$	$\tau = 0.7396065461 * \sigma + 657.2612546$
Cohesión (c) (KPa)	3713.36	657.26
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	32.53	42.37
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal ($\bar{\sigma}_n$)	22022.2 MPa	20007.9 MPa
Promedio Esfuerzo de Corte ($\bar{\tau}$)	16217.8 MPa	15455.2 MPa
Suma de los residuos cuadrados	1.29747E+006	136622
Regresión Suma de los residuos cuadrados	8.64651E+007	1.09379E+008
Coefficiente de Determinación (R ²)	0.985216	0.998752

Figura 5.219 Espécimen 172-DSH_ Mina Colombia – El Callao



Figura 5.220 Tipo de factura generada en el espécimen 172-DSH _ Mina Colombia – El Callao

Tabla 5.47. Resumen de los valores obtenidos de los ensayos de corte en la Mina Colombia

N° Lab	Cohesión (MPa)	Angulo de Fricción (°)
146	19,88	13.73
170	55,79	32.76
171	16,80	23.31
172	37,13	32.53

5.11.4 Conclusiones sobre los ensayos de corte de la Mina Colombia – El Callao

De los ensayos de corte realizados sobre muestras de roca intaca provenientes de la Mina Colombia, se puede concluir:

1. Estos ensayos sólo se realizaron con tres (3) puntos por ensayo, y a partir de estos ensayos con los que se realizaron en el proyecto del Sistema de Transporte Masivo Caracas-Guaremas-Guatire, se concluyó, que es necesario la realización de cuatro (4) puntos por muestra. El primer punto para la generación de la discontinuidad y los otros tres (3) para la determinación de los parámetros de resistencia al corte.
2. En rocas con resistencias a la compresión muy altas, la generación de la discontinuidad no es muy recomendable.
3. Deben realizarse los ensayos sobre discontinuidades naturales
4. Cuando se realicen ensayos sobre muestras cilíndricas y estas deben colocarse como cilindros rectos verticales, nunca como cilindros horizontales, debido al poco soporte de la muestra con el encapsulamiento
5. De los resultados obtenidos para estas rocas, presentan elevados valores de cohesión, esto es debido al tipo de roca (ígneas) y al tamaño de los granos de los minerales presente.

5.12 Puente Nigale

La geología de este lago, es muy variada y una de las formaciones presentes es la Formación Onia que presenta un conjunto de sedimentos jóvenes cuyos elementos montañosos son parte de los sistemas orogénicos continentales aun no totalmente estabilizados.

En función de ello; para el diseño del segundo puente sobre el Lago de Maracaibo se realizó un estudio geológico-geomecánico de los núcleos de roca obtenidos en las perforaciones con alineamientos E-W ubicado entre las poblaciones Santa Cruz de Mara y Punta de Palmas en la Cuenca del Lago de Maracaibo.

Se sometió a la evaluación y caracterización de las propiedades geomecánicas presentes; con el fin de aportar información geotécnica de la zona, así como las recomendaciones pertinentes para el diseño de las fundaciones de la estructura a proyectar, contribuyendo al fortalecimiento de dicho proyecto y a su construcción, el cual ofrecerá beneficios a la población.

Este Caso de Estudio fue desarrollado por las TSU Eddit Noraima García Pernía y Elvi Doraly García Pernía, bajo la tutoría de autor del presente trabajo.

5.12.1 Ubicación

Este Caso de estudio se encuentra ubicado en la parte Noroccidental del Estado Zulia. Limita al Norte, con el Municipio Páez; al Sur, con los Municipios Jesús Enrique Losada y Maracaibo; al Este, con el Lago de Maracaibo y el Municipio Almirante Padilla; y al Oeste, con la República de Colombia. El Municipio Mara tiene una superficie de 3.588 km², por lo que ocupa el 6,58% de la superficie total del estado Zulia. Su capital es la ciudad de San Rafael de El Moján. La capital del Municipio (El Moján), se encuentra ubicada a 51 km. aproximadamente de la ciudad de Maracaibo (Figura 5.218).



Figura 5.221. Mapa de la Zona de Estudio

5.12.2 Objetivo General

El objetivo de este Caso de Estudios, fue determinar las características geológicas-geomecánicas del tope de roca, Formación Onia, al noroeste en Santa Cruz de Mara de la Cuenca del Lago de Maracaibo, para la construcción de las fundaciones del II puente sobre el Lago de Maracaibo, estado Zulia.

5.12.3 Geología Regional

La Cuenca de Maracaibo está ubicada al noroeste de Venezuela, está limitada al sureste por el piedemonte Andino, al noreste por la zona occidental de la Sierra de Trujillo y al noroeste por la Sierra de Perijá, posee una extensión de aproximada de 50.000 km², con una cobertura sedimentaria de 10 km de espesor, la cual está compuesta por rocas que van desde el Cretácico hasta el reciente y descansa sobre un basamento metasedimentario.

5.12.3.1 Formación Onia

Localidad tipo: Hedberg y Sass nombraron a la formación, según unos afloramientos en el río Onia, un tributario del río Escalante, en el Estado Mérida. Sin embargo, no publicaron la

descripción. (Manger, 1938) describió una sección supuestamente equivalente, en el pozo la Rita, 2 km al este del pueblo de la Rita, distrito Bolívar, Estado Zulia. Esta sección fue posteriormente recomendada como sección tipo, por (Young, 1960).

Descripción litológica: En la sección del pozo La Rita, (Gonzalez de Juana, 1980), la Formación Onia consiste en la base al tope de 1.65 m en areniscas y limolitas abigarradas, gris verdoso, de grano grueso a fino, arcillosas, micáceas y friables, localmente con capas calcáreas amarillas, delgadas. Esta sección se correlaciona con la Capa de Onia, por su contenido de minerales pesados metamórficos. 2.30 m de areniscas micáceas friables, de color gris verdoso claro, de grano fino a grueso y angulosos. En éstas, se hallan fragmentos de madera silicificada. Estas areniscas están intercaladas con areniscas pardo-amarillas y limolitas gris claro, las cuales (Manger, 1938) consideró como pertenecientes a la formación El Milagro (Plesistoceno) (Ministerio de Energía y Minas, 1997).

5.12.4 Geología Local

La litología que se describe son el resultado de las siete (7) perforaciones de los núcleos de roca sedimentaria del área de estudio de la zona norte del Lago de Maracaibo, distribuidas a la largo del alineamiento E-W (Figura 5.219), pertenecientes a la Formaciones Onia. A continuación se describen en orden estratigráfico las perforaciones según sus similitudes litológicas:



Figura 5.222. Mapa de la Ubicación de las perforaciones

5.12.4.1 Perforación P-1 y P-2:

La perforación P-1 alcanzó la profundidad de 48 m bajo el lecho marino, de base a tope se caracteriza por intercalaciones de lutita con limolita y escasos lentes de 50 mm de limolita de color gris oscuro. A 32,00 m, suprayacente se encuentra un estrato de lutita gris oscuro de 4 m de espesor. La perforación P-2 de 32 m de profundidad se caracteriza desde su base y hasta 31.50 m por la presencia de lutitas de color gris oscuro con niveles de limolita. Después entre 31,50 m y 30,50 m lutitas con niveles de arenisca. Lateralmente, ambas perforaciones presentan continuidad entre las profundidades 48 y 32 m, el contacto es de tipo transicional con las intercalaciones de lutita con limolita y lentes de limolita de color gris oscuro y presencia de niveles de arenisca. El espesor aproximado del estrato de lutita es de un cm, los estratos están dispuestos de forma horizontal y la mineralogía presente identificada a través de DRX es illita (mica), kaolinita (arcilla) y cuarzo (Qz). Los espesores totales de la roca sedimentaria son de 27,70 m en la perforación P-1 y 11,50 m hacia la perforación P-2, en los intervalos de 20,30 m hasta 48,0 m en P-1 y de 20,50 m hasta 32,00 m en P-2. En el tope y hasta el lecho marino, se presenta una capa/estrato de suelo con espesores de 20,30 m en la P-1 y de 20,50 m en P-2.

5.12.4.2 Perforación P-3 y P-4:

La perforaciones P-3 alcanzo una profundidad de 54 m bajo el lecho marino de base a tope se caracteriza por lutita de color gris oscuro con intercalaciones de limolita de color gris claro, marrón y marrón rojizo y presencia de mica, con una variación vertical entre la lutita y limolita de un espesor aproximado de 50 mm. La perforación P-4 alcanzo la profundidad de 61,20 m se caracteriza desde base y hasta 47,20 m por la presencia de lutita de color gris oscuro y trazas de limolitas de color gris claro en poca proporción de 61,20 m hasta 52.20 m, luego continua intercalaciones de lutita de color gris claro y limolita de color marrón rojizo con un espesor aproximado de 50 mm que llega hasta los 47,20 m. La mineralogía presente a través de DRX es illita (mica), kaolinita (arcilla) y cuarzo (Qz), los espesores totales en la P-3 es de 23,40 m y la P-4 de 14 m de profundidad de roca sedimentaria. En su tope se presenta el suelo con un espesor de 30,60 m en la P-3 y la P-4 en 47,20 m.

5.12.4.3 Perforación P-5:

En la perforación P-5 que alcanzo una profundidad 64 m bajo el lecho marino de base a tope se caracteriza por areniscas de color gris claro con intercalaciones de lutita de color gris oscuro con un espesor de un cm. La mineralogía presente a partir del análisis de DRX es illia (mica), kaolinita (arcilla) y Cuarzo (Qz). Presentando unas fallas normales inferidas, los cuales presenta un movimiento vertical por el cambio de litología presente en dicha perforación, su espesor total es de 7,40 m de profundidad de roca sedimentaria. En el tope se presenta el suelo con un espesor de 56,60 m de espesor.

5.12.4.4 Perforación P-6 y P-7:

La perforación P-6 alcanzo la profundidad de 63,40 m bajo el lecho marino, de base a tope se caracteriza por lutita de color gris oscuro con intercalaciones de limolita de color gris claro de 50 mm de espesor aproximado, presentando un contacto transcional entre la lutita y las intercalaciones de lutita y limolita. Y de la profundidad de 47,40 m, presenta niveles de arenisca de color amarillo oliva y marrón oliva con trazas de oxidación hasta la profundidad de 30,40 m. La perforación P-7 alcanzo la profundidad de 62 m, se caracteriza desde su base y hasta 55 m por la presencia de intercalaciones de lutita de color gris claro y limolita de color rojizo, la mineralogía presente en la dos perforaciones a través de DRX es ilita (mica), kaolinita (arcilla) y cuarzo (Qz). En dichas perforaciones se encuentran unas fallas normales inferidas ya que presentan un movimiento vertical por el cambio de litología que se presenta después de la perforación P-5 y que por lo cual nos permite inferir las fallas. En el tope y hasta el lecho marino se presenta una capa de suelo con espesor de 39,40 m en la P-6 y de 55 m en la P-7 (Figura 5.220).

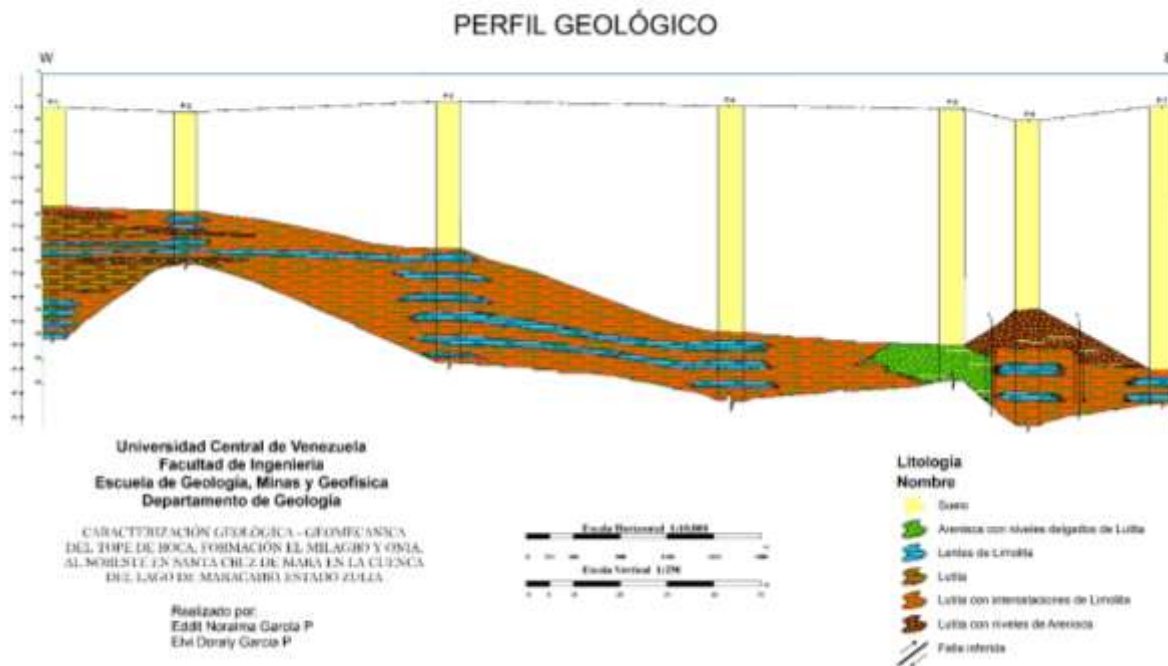


Figura 5.223. Perfil Geológico de las perforaciones donde se describen la litología presente en la Cuenca del Lago de Maracaibo.

5.12.4.5 Variación Lateral del Perfil Litoestratigráfico:

Los Ambientes Deltaicos presentan una gran variedad de facies. Esta variación responde a una serie de factores dichos factores se dan en amplio rango de una ambiente geográfico formándose en zonas de interacción de agua dulce, el régimen de sedimentación es frecuentemente alto originando un sustrato extremadamente débil y dando lugar a una importante variedad de procesos de remoción en masa por lo tanto estos depósitos muestran una gran diversidad de geometrías y características en una secuencia vertical.

La investigación con los datos litológicos de las perforaciones constituidos por los sedimentos de la Formación Onia presentan un ambiente sedimentario Fluvio-Deltaico (minideltas que desembocan en el lago) (Figura 5.221) y Lacustrino Marginal, asociado a un estado repetidamente sometido a meteorización durante el Cuaternario. En el margen Este de la Cuenca se encontró areniscas con lutita con intercalaciones de limolita y en el margen Oeste encontramos lutitas, limolitas y lutitas con niveles de arenisca, en general se aprecia

uniformidad en las muestras evaluadas, lo cual nos indica que las mismas son similares en mineralogía y génesis, todas estas características indican su origen sedimentario

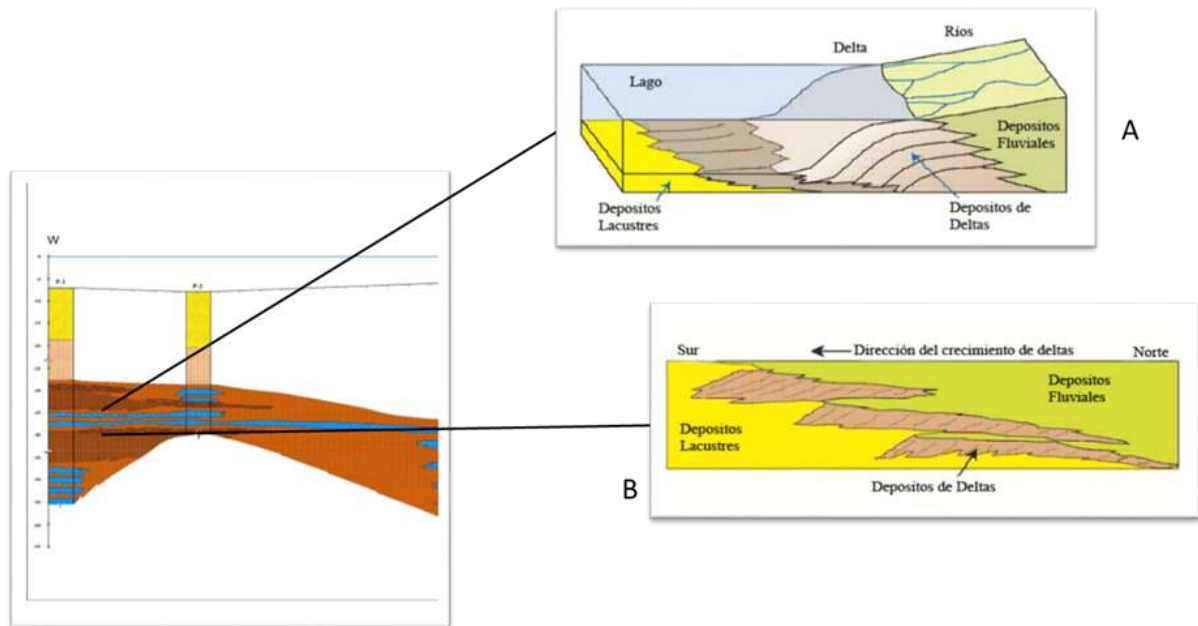


Figura 5.224. Perfil geológico de la cuenca del Lago de Maracaibo donde se puede observar los tipos de depósitos formados por río y lagos. A depósitos lacustres y de deltas. B dirección del crecimiento de deltas. Tomado: <http://danielmarin.naukas.com/files/2014/12/mars-rover-curiosity-Gupta-5-delta-cartoon-river-lake-pia19071-br2.jpg>. 02/02/2016

En el perfil se puede observar una variación lateral de cuatro secciones definidas por sus contactos litológicos, descrita a continuación de W-E.

De W-E comenzamos con la P-1 y P-2 observando una disminución de energía caracterizadas por las intercalaciones de lutita y limolita que se encuentran estratificadas en forma horizontal y se van acuñando en P-3 donde ya no aparece.

Seguidamente hacia las perforaciones P-3 y P-4 se observa un primer cambio lateral donde solo se describe la lutita con intercalaciones de limolita y los lentes de limolita y se encuentran estratificadas en forma horizontal. Cabe destacar, que estas perforaciones se encuentran en la parte central del perfil y coinciden con la zona central de la sección lacustrina, lo cual se evidencia en la granulometría más fina en todas las perforaciones.


Después esta la perforación P-5 donde se observa un cambio en la litología de la estratificación ya que se caracteriza por areniscas con intercalaciones de lutita allí se presenta un aumento de energía porque su grano aumenta.

Finalmente hacia el extremo este perfil, las perforaciones P-6 y P-7 presentan un significativo cambio lateral en su litología en ella se presenta lutita con intercalaciones de limolita y lentes de limolita con niveles de arenisca, esto nos evidencia un movimiento importante por unas fallas normales inferidas.

5.12.5 Ensayos Geomecánicos

5.12.5.1 Propiedades Índices

Tabla 5.48 Propiedades Índices

 RIF: G-20000062-7		LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS Ensayo de Absorción, Porosidad, PU (Húmedo y Seco) <i>Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación Onía al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.</i>			 RIF: G-20000062-7	
Código Proyecto:		Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 1 de 1	
		EDDIT & ELVI GARCIA P	Miguel Castillejo	22/06/2015	Espécimen: PU-AB-PO	
NORMAS-UTILIZADAS		ISRM Methods-for-Determining-Water-Content,-Porosity,-Density,-Absorption-(1979)				
ASTM						
DATOS-GENERALES						
Proyecto		Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación Onía al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
Espécimen:		1,2,3,4,5,6,7 PU-AB-PO				
Origen-del-Espécimen		Suministrado-por-el-cliente		Formación-Geológica	-Formación Onía	
Perforación:		P-1, P-2, P-3, P-4, P-5, P-6, P-7		Profundidad	-	
Número-de-Muestra	Perforación	Profundidad (m)	Absorción (%)	Porosidad (%)	P.U.-Húmedo γ_w (g/cm ³)	P.U.-Seco γ_d (g/cm ³)
1343	P-1	36,00 - 37,00	12,44	26,54	2,25	2,13
1352	P-2	30,50 - 31,50	11,23	25,30	2,57	2,00
1358	P-3	48,00 - 49,00	3,62	8,71	2,40	2,41
1365	P-4	49,20 - 50,20	14,79	34,47	2,41	2,33
1369	P-5	62,00 - 63,00	2,33	5,61	2,44	2,40
1382	P-6	60,40 - 61,40	2,47	5,93	2,44	2,40
1390	P-7	59,00 - 60,00	14,12	26,99	2,11	2,09

La tabla 5.48 presenta los resultados de las propiedades índices, la Absorción está en un rango de 2,33% a 14,7%, la porosidad esta entre 5,61% a 34,4% y la densidad entre 2,00 g/cm³ a 2.57 g/cm³.

5.12.5.2 Difracción de Rayos X

Tabla 5.49 Difracción de Rayos X



Perforación	Muestras	Profundidad (m)	DRX		
			Cuarzo (Qz)	Caolinita (Arcilla)	Ilita (Mica)
P1	1393	24,30 – 25,30	x	x	x
P2	1394	23,50 – 24,50	x	x	x
P3	1395	46,40 – 47,40	x	x	x
P4	1396	47,00 – 48,00	x	x	x
P5	1397	61,00 – 62,00	x	x	
P6	1398	39,40 – 40,40	x	x	x
P7	1399	56,00 – 57,00	x	x	

(x) Mineral presente

La Tabla 5.49 se presenta la composición mineralógica de los núcleos de rocas analizados, los cuales siguen una tendencia común en donde la totalidad de las muestras presentan minerales de arcilla (caolinita, ilita) y cuarzo. Se aprecia uniformidad en las muestras evaluadas, lo cual nos indica que las mismas son similares en mineralogía, características que nos indican claramente su origen sedimentario.

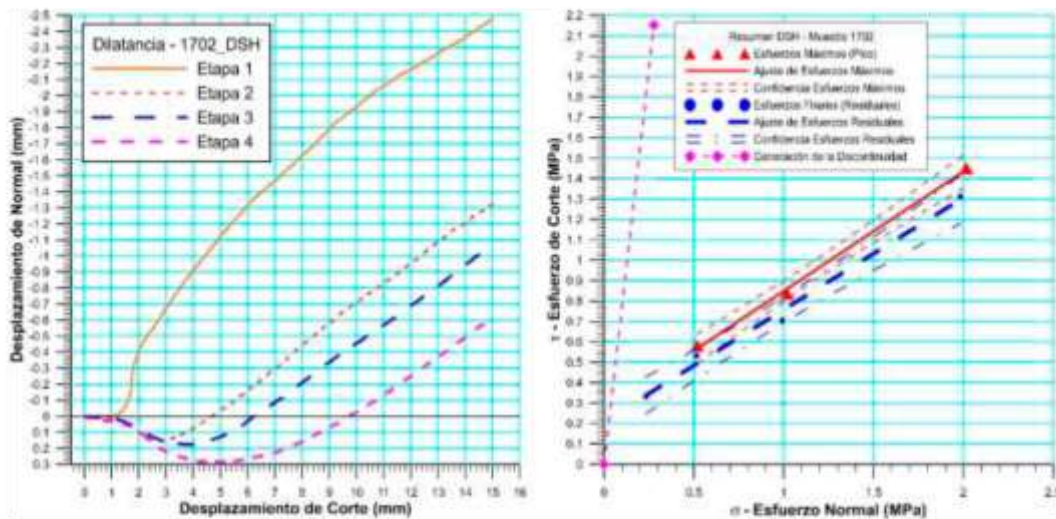
5.12.5.3 Ensayos de Corte Directo

5.12.5.3.1 Espécimen 1702-DSH – Perforación P-1- Profundidad 26.00-27.00 m

 <p>RIF: G-20000062-7</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 <p>RIF: G-20000052-7</p>	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo:	Revisión:	Fecha:		Página 6 de 7
	EDDIT & ELVI GARCIA P.	M. CASTILLEJO	26-06-2015		Espécimen: 1702

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27717	2.15270	0.23228	0.33179
2	0.51745	0.58114	0.51482	0.53166
3	1.01720	0.83682	0.99174	0.70494
4	2.01653	1.45127	1.98364	1.31197



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(30.34) * s + 0.26$	$t = \tan(28.73) * s + 0.21$
Cohesión (c) (MPa)	0.26	0.21
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	30.34	28.73
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.18	0.93
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.96	0.72
Suma de los residuos cuadrados	0.40	0.53
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.99
Varianza	0.03	0.05
Desviación estándar	0.17	0.21

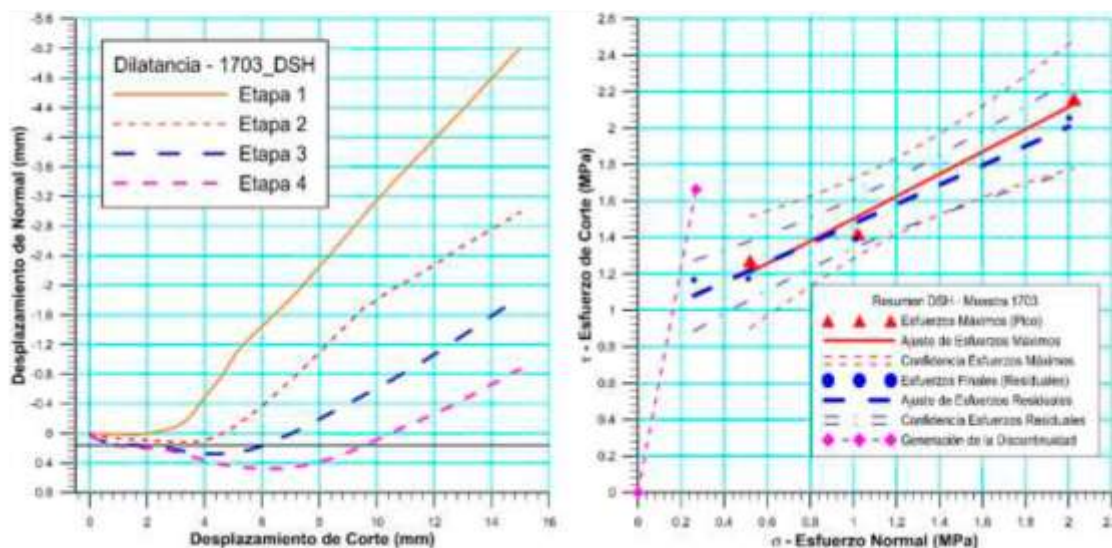
Figura 5.225 Espécimen 1702-DSH – Perforación P-1- Profundidad 26.00-27.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.2 Espécimen 1703-DSH – Perforación P-1- Profundidad 32.00-33.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1703

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26966	1.66397	0.25934	1.16634
2	0.52059	1.27079	0.51268	1.17366
3	1.02071	1.42075	1.01336	1.39109
4	2.02475	2.16141	2.00247	2.05390



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(31.51) * s + 0.89$	$t = \tan(28.05) * s + 0.94$
Cohesión (c) (MPa)	0.89	0.94
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	31.51	28.05
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.19	0.95
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.62	1.45
Suma de los residuos cuadrados	0.44	0.51
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.02
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.97	0.96
Varianza	0.12	0.10
Desviación estándar	0.34	0.31

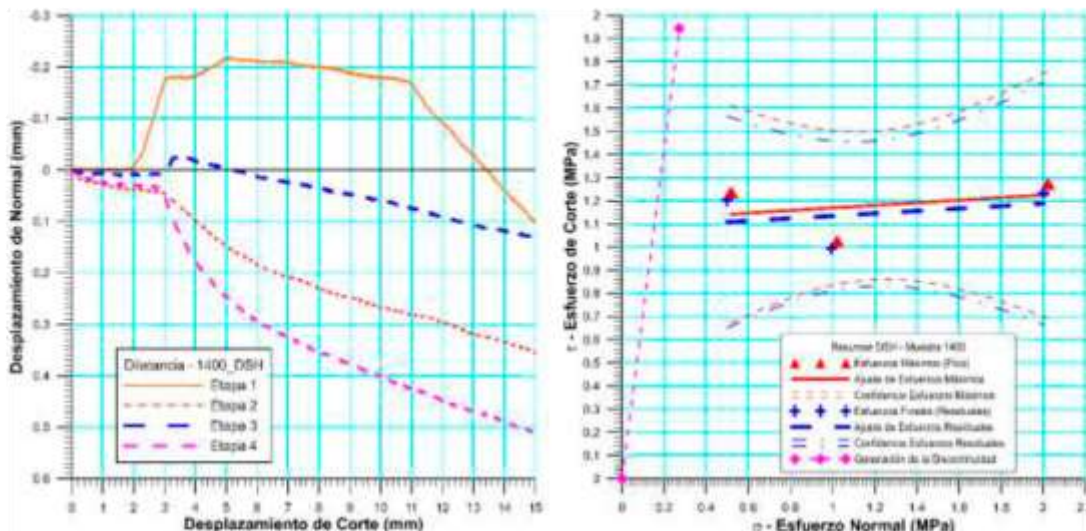
Figura 5.226 5.12.5.3.1 Espécimen 1703-DSH – Perforación P-1- Profundidad 32.00-33.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.3 Espécimen 1400-DSH – Perforación P-1- Profundidad 43.00-44.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCÍA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 20/05/2016		Página 6 de 7 Espécimen: 1400

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27291	1.94380	0.25605	1.41974
2	0.51812	1.23762	0.50026	1.20177
3	1.02119	1.02692	0.99456	0.99432
4	2.02249	1.27434	2.00096	1.23392



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(3.20) * s + 1.11$	$t = \tan(-4.03) * s + 1.28$
Cohesión (c) (MPa)	1.11	1.28
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	3.20	-4.03
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_s)	1.19	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.18	1.21
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.03	0.08
Coefficiente de Determinación (R ²)	0.10	0.10
Varianza	0.18	0.20
Desviación estándar	0.42	0.45
Varianza	Lineal	Lineal
Desviación estándar	$t = \tan(3.20) * s + 1.11$	$t = \tan(-4.03) * s + 1.28$

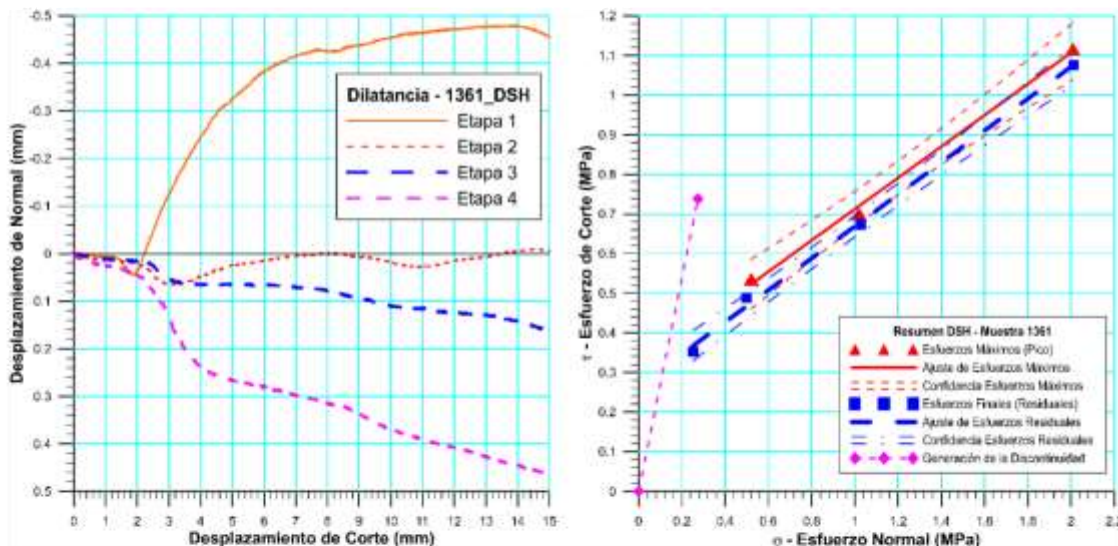
Figura 5.227 Espécimen 1400-DSH – Perforación P-1- Profundidad 43.00-44.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.4 Espécimen 1361 – Perforación P-3- Profundidad 51.00-52.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo:	Revisión:	Fecha:		Página 6 de 7
	EDDIT & ELVI GARCIA P.	M. CASTILLEJO	26-06-2015		Espécimen: 1361

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27413	0.73803	0.25216	0.35210
2	0.52035	0.53573	0.49805	0.48843
3	1.01912	0.70055	1.02746	0.67385
4	2.00874	1.11676	2.01119	1.07535



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(21.54) * s + 0.32$	$t = \tan(21.93) * s + 0.27$
Cohesión (c) (MPa)	0.32	0.27
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	21.54	21.93
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.18	0.95
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.78	0.65
Suma de los residuos cuadrados	0.18	0.30
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00
Varianza	0.02	0.02
Desviación estándar	0.15	0.14

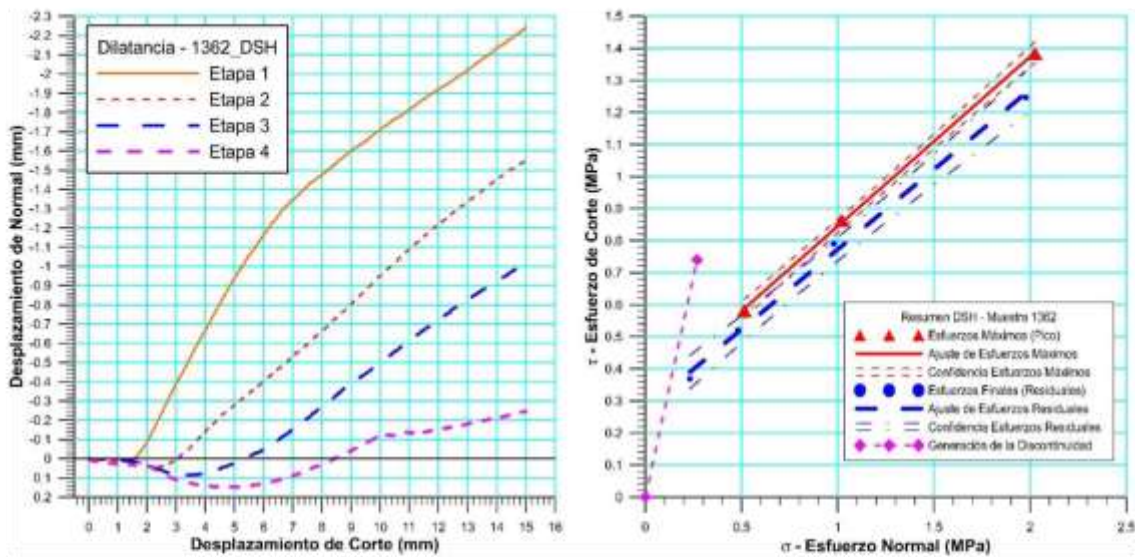
Figura 5.228 Espécimen 1361 – Perforación P-3- Profundidad 51.00-52.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.5 Espécimen 1362 – Perforación P-3- Profundidad 52.00-53.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1362

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27413	0.73803	0.25216	0.35210
2	0.52035	0.53573	0.49805	0.48843
3	1.01912	0.70055	1.02746	0.67385
4	2.00874	1.11676	2.01119	1.07535



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(27.89) * s + 0.32$	$t = \tan(26.49) * s + 0.27$
Cohesión (c) (MPa)	0.32	0.27
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	27.89	26.49
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.19	0.92
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.94	0.73
Suma de los residuos cuadrados	0.33	0.44
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00
Varianza	0.01	0.03
Desviación estándar	0.11	0.16

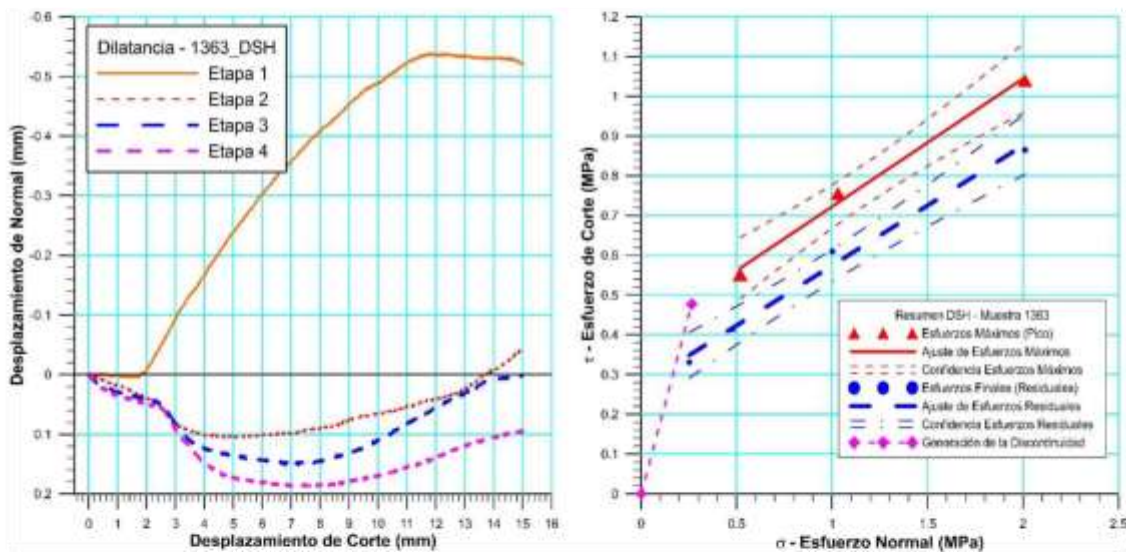
Figura 5.229 Espécimen 1362 – Perforación P-3- Profundidad 52.00-53.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.6 Espécimen 1363 – Perforación P-3- Profundidad 53.00-54.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1363

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26483	0.47715	0.25210	0.33071
2	0.51784	0.55178	0.47767	0.41438
3	1.03062	0.75579	1.00153	0.60946
4	2.00970	1.03916	2.00978	0.86444



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(17.84) * s + 0.40$	$t = \tan(16.79) * s + 0.27$
Cohesión (c) (MPa)	0.40	0.27
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	17.84	16.79
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.19	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.78	0.55
Suma de los residuos cuadrados	0.12	0.17
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.99
Varianza	0.03	0.03
Desviación estándar	0.17	0.17

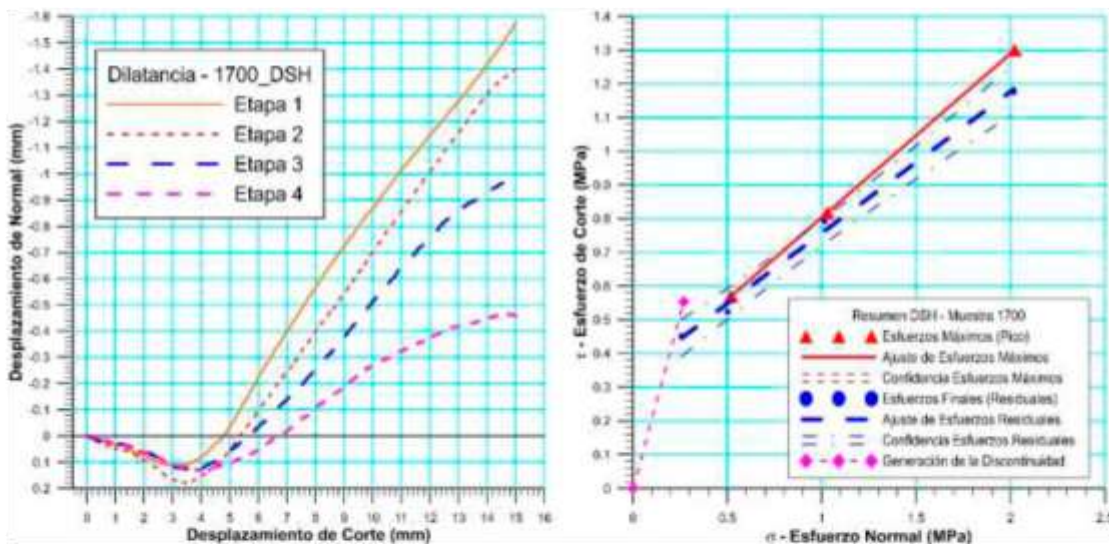
Figura 5.230 5.12.5.3.1 Espécimen 1363 – Perforación P-3- Profundidad 53.00-54.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.7 Espécimen 1700 – Perforación P-4- Profundidad 47.20-48.20 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1700

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26861	0.55355	0.25662	0.45161
2	0.51945	0.57036	0.50122	0.52320
3	1.02889	0.81757	1.01452	0.79209
4	2.02145	1.30075	2.01727	1.17568



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(25.94) \cdot s + 0.32$	$t = \tan(22.75) \cdot s + 0.34$
Cohesión (c) (MPa)	0.32	0.34
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	25.94	22.75
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.19	0.95
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.90	0.74
Suma de los residuos cuadrados	0.28	0.32
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00
Varianza	0.00	0.03
Desviación estándar	0.02	0.17

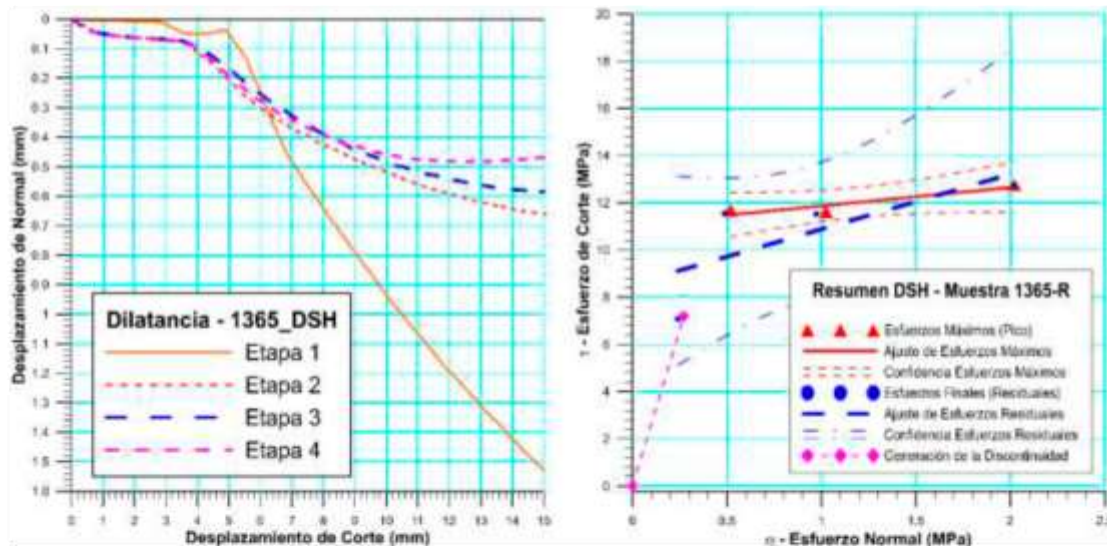
Figura 5.231 5.12.5.3.1 Espécimen 1700 – Perforación P-4- Profundidad 47.20-48.20 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.8 Espécimen 1365 – Perforación P-4- Profundidad 49.20-50.20 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.			
Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 20-05-2016	Página 6 de 7 Especimen: 1365	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27217	7.19605	0.23998	7.07781
2	0.51907	11.67854	0.48712	11.55775
3	1.02416	11.59713	0.97294	11.52284
4	2.01987	12.75681	2.02346	12.71721



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(35.59) * s + 0.31$	$t = \tan(35.21) * s + 0.29$
Cohesión (c) (MPa)	0.31	0.29
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	35.59	35.21
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.47	1.38
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.36	1.27
Suma de los residuos cuadrados	0.55	0.49
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.01
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.99
Varianza	0.00	0.06
Desviación estándar	0.03	0.23

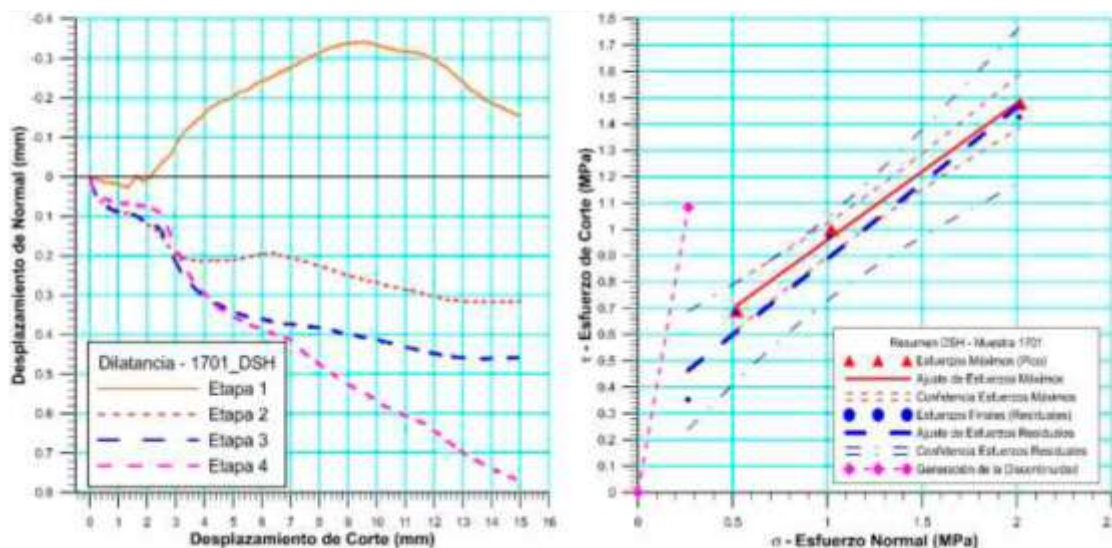
Figura 5.232 Espécimen 1365 – Perforación P-4- Profundidad 49.20-50.20 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.9 Espécimen 1701 – Perforación P-4- Profundidad 53.20-54.20 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1701

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26602	1.08350	0.26388	0.35262
2	0.51971	0.69142	0.51445	0.68526
3	1.01946	0.99689	1.00931	0.97066
4	2.01578	1.47837	2.01186	1.42616



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(27.47) * s + 0.44$	$t = \tan(29.94) * s + 0.31$
Cohesión (c) (MPa)	0.44	0.31
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	27.47	29.94
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.18	0.95
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.06	0.86
Suma de los residuos cuadrados	0.31	0.59
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.03
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.96
Varianza	0.03	0.11
Desviación estándar	0.18	0.34

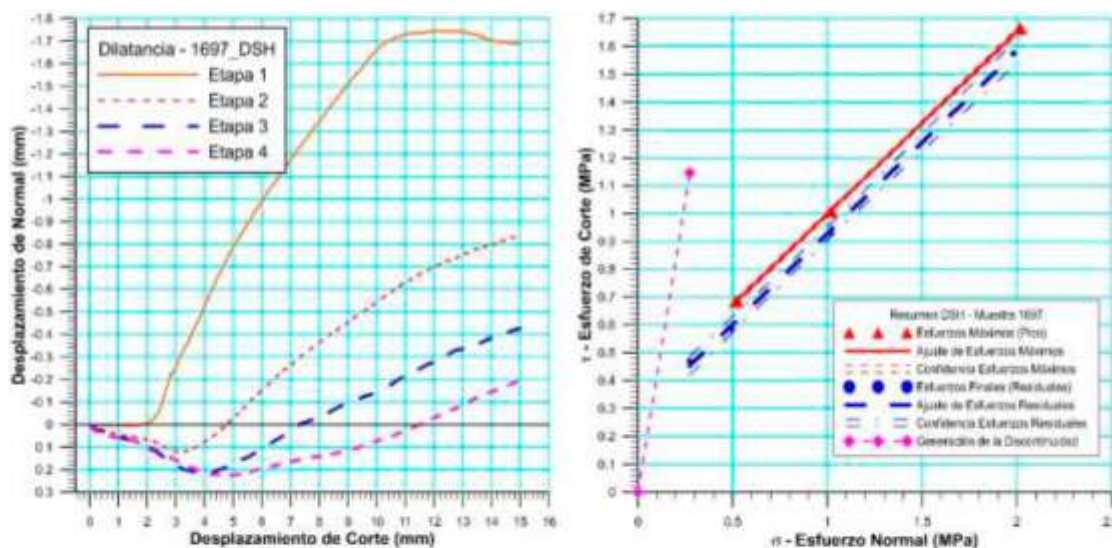
Figura 5.233 Espécimen 1701-DSH _ Perforación P-4- Profundidad 53.20-54.20 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.10 Espécimen 1697 – Perforación P-5- Profundidad 57.80-59.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1697

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27393	1.14553	0.27240	0.47034
2	0.51863	0.68588	0.49709	0.58481
3	1.01833	1.00751	1.01451	0.93234
4	2.01637	1.66463	1.98153	1.57448



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(33.19) \cdot s + 0.34$	$t = \tan(33.15) \cdot s + 0.28$
Cohesión (c) (MPa)	0.34	0.28
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	33.19	33.15
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.18	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.12	0.89
Suma de los residuos cuadrados	0.50	0.74
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	1.00
Varianza	0.00	0.02
Desviación estándar	0.06	0.13

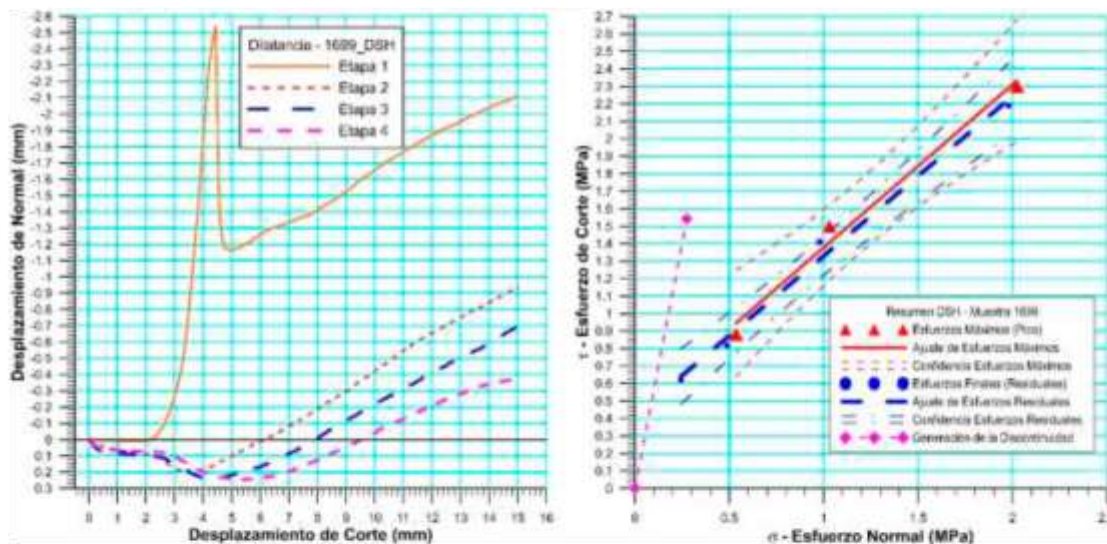
Figura 5.234 Espécimen 1697 – Perforación P-5- Profundidad 57.80-59.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.11 Espécimen 1699 – Perforación P-5- Profundidad 60.00-61.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1699

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27410	1.54169	0.24305	0.62141
2	0.53468	0.88206	0.48607	0.81738
3	1.02961	1.49881	0.97892	1.40933
4	2.02306	2.30149	1.97892	2.18933



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(43.01) \cdot s + 0.45$	$t = \tan(42.40) \cdot s + 0.42$
Cohesión (c) (MPa)	0.45	0.42
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	43.01	42.40
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.20	0.92
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.56	1.26
Suma de los residuos cuadrados	1.00	1.48
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.01
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.99
Varianza	0.12	0.08
Desviación estándar	0.34	0.28

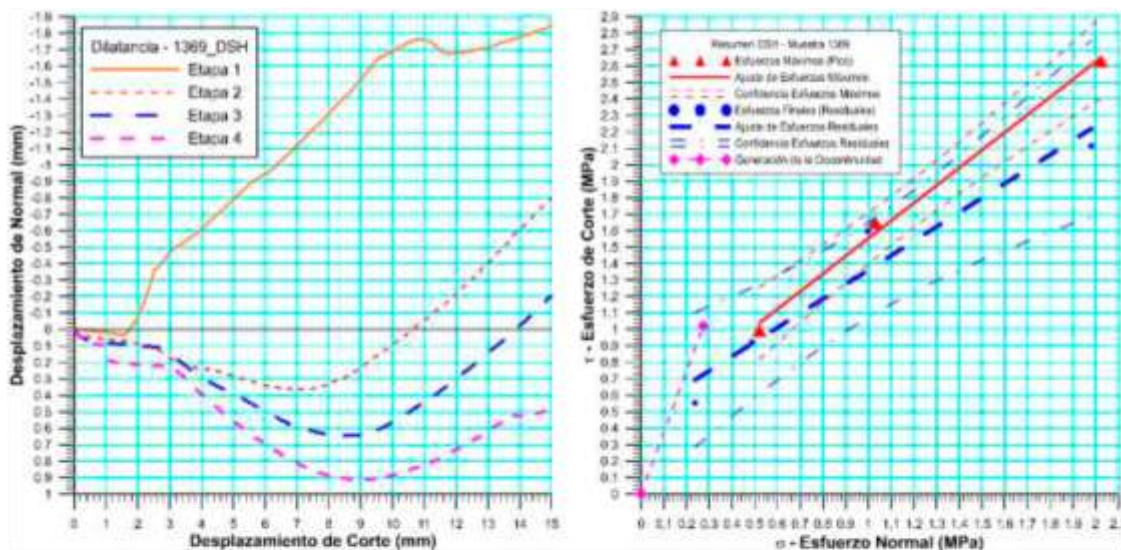
Figura 5.235 Espécimen 1699 – Perforación P-5- Profundidad 60.00-61.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.12 Espécimen 1369 – Perforación P-5- Profundidad 62.00-63.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 20-05-2016		Página 6 de 7 Espécimen: 1369

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27388	1.02107	0.23715	0.55295
2	0.51996	0.99360	0.48814	0.92138
3	1.02905	1.65082	0.99733	1.59587
4	2.02355	2.62909	1.98080	2.11535



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(43.01) * s + 0.45$	$t = \tan(42.40) * s + 0.42$
Cohesión (c) (MPa)	0.45	0.42
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	43.01	42.40
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.20	0.92
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.56	1.26
Suma de los residuos cuadrados	1.00	1.48
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.01
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.99
Varianza	0.12	0.08
Desviación estándar	0.34	0.28

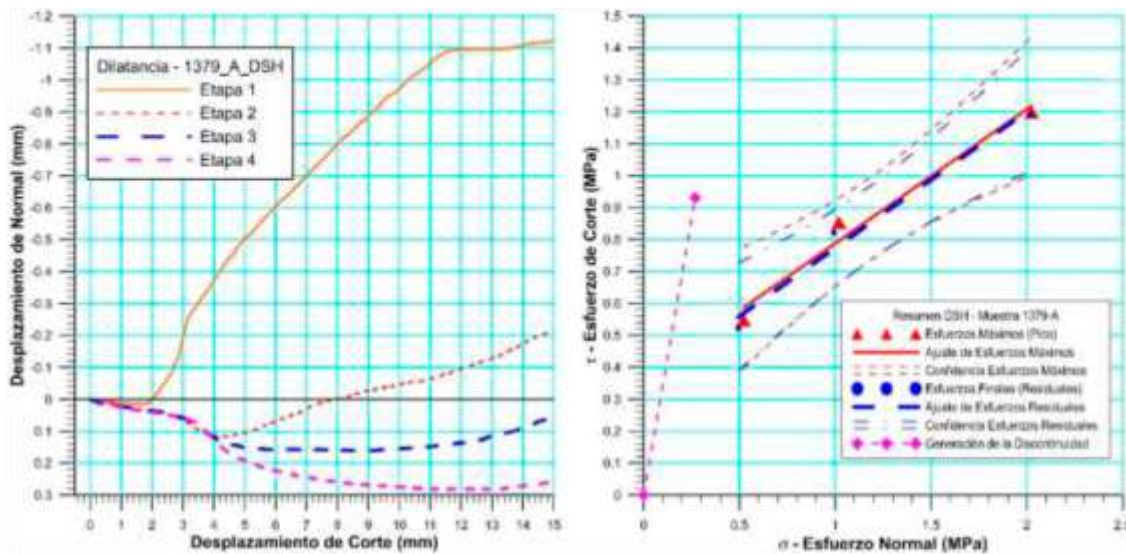
Figura 5.236 Espécimen 1369 – Perforación P-5- Profundidad 62.00-63.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.13 Espécimen 1397-A – Perforación P-6- Profundidad 52.40 - 53.40 m

 RIF: G-2000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-2000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1379-A

Cuadro Resumen de los Resultados


Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27515	0.60591	0.27901	0.41891
2	0.54250	0.93089	0.51153	0.88440
3	1.03822	0.97718	1.00763	0.90308
4	1.53414	1.13542	1.51914	1.08925



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(22.81) * s + 0.37$	$t = \tan(24.63) * s + 0.30$
Cohesión (c) (MPa)	0.37	0.30
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	22.81	24.63
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.19	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.87	0.73
Suma de los residuos cuadrados	0.21	0.38
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.01
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.98	0.98
Varianza	0.07	0.06
Desviación estándar	0.27	0.25

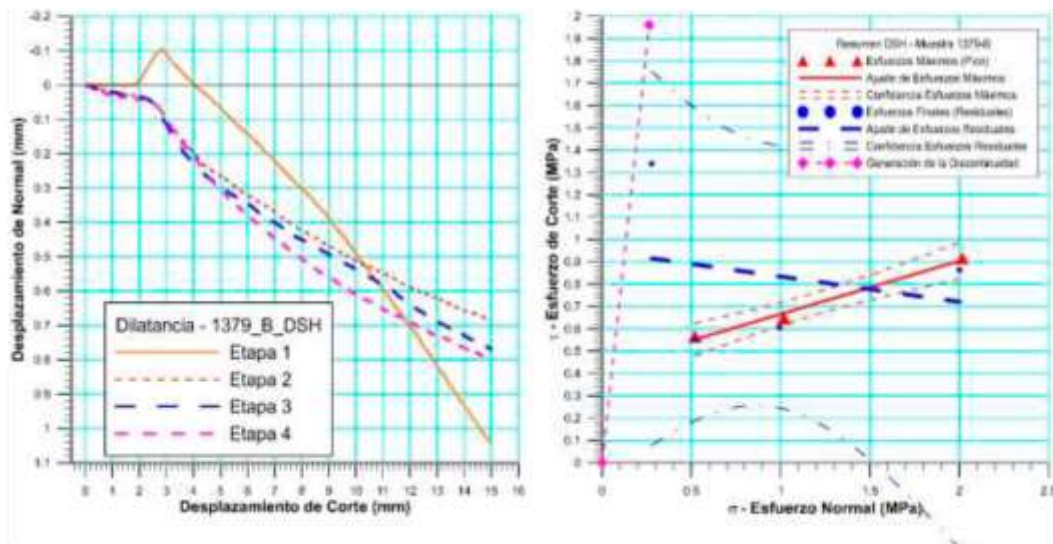
Figura 5.237 Espécimen 1397-A – Perforación P-6- Profundidad 52.40 - 53.40 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.14 Espécimen 1397-B – Perforación P-6- Profundidad 52.40 - 53.40 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1379-B

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26389	1.96089	0.27785	1.33915
2	0.52053	0.56688	0.52113	0.55085
3	1.01727	0.64785	0.99350	0.60502
4	2.01645	0.91546	2.00055	0.86356



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(13.39) * s + 0.43$	$t = \tan(-6.45) * s + 0.95$
Cohesión (c) (MPa)	0.43	0.95
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	13.39	-6.45
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.18	0.95
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.71	0.84
Suma de los residuos cuadrados	0.07	0.02
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.37
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	0.06
Varianza	0.03	0.43
Desviación estándar	0.17	0.65

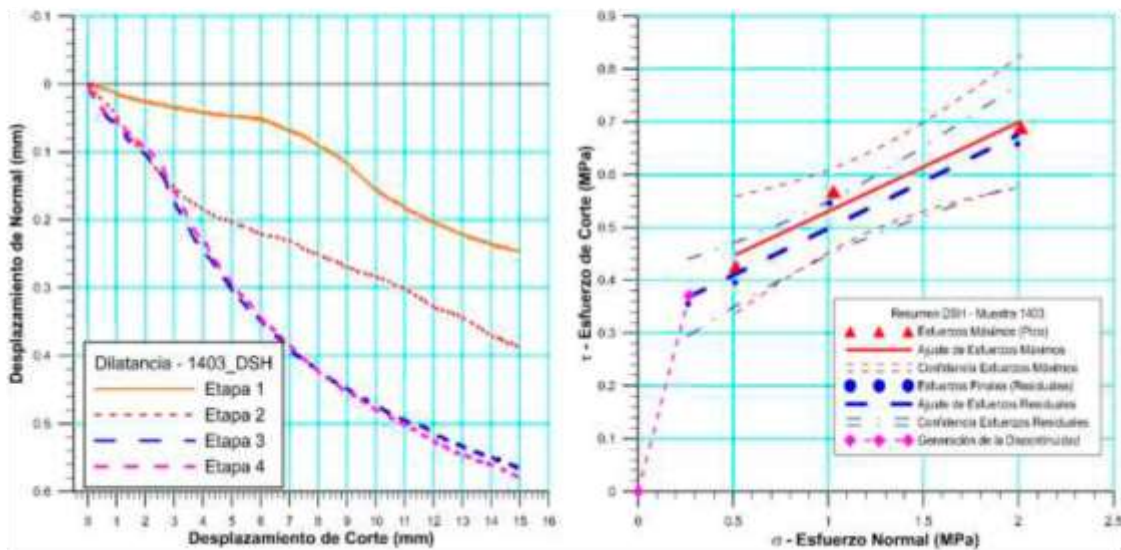
Figura 5.238 Espécimen 1397-B – Perforación P-6- Profundidad 52.40 - 53.40 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.15 Espécimen 1403 – Perforación P-6- Profundidad 54.40 - 55.40 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1403

Cuadro Resumen de los Resultados


Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.26850	0.37089	0.26189	0.35490
2	0.51450	0.42621	0.51033	0.39521
3	1.02673	0.56826	1.00726	0.54445
4	2.01294	0.68908	1.99438	0.65737



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(9.55) * s + 0.36$	$t = \tan(10.06) * s + 0.32$
Cohesión (c) (MPa)	0.36	0.32
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	9.55	10.06
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.18	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.56	0.49
Suma de los residuos cuadrados	0.03	0.06
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.95	0.95
Varianza	0.04	0.04
Desviación estándar	0.20	0.19

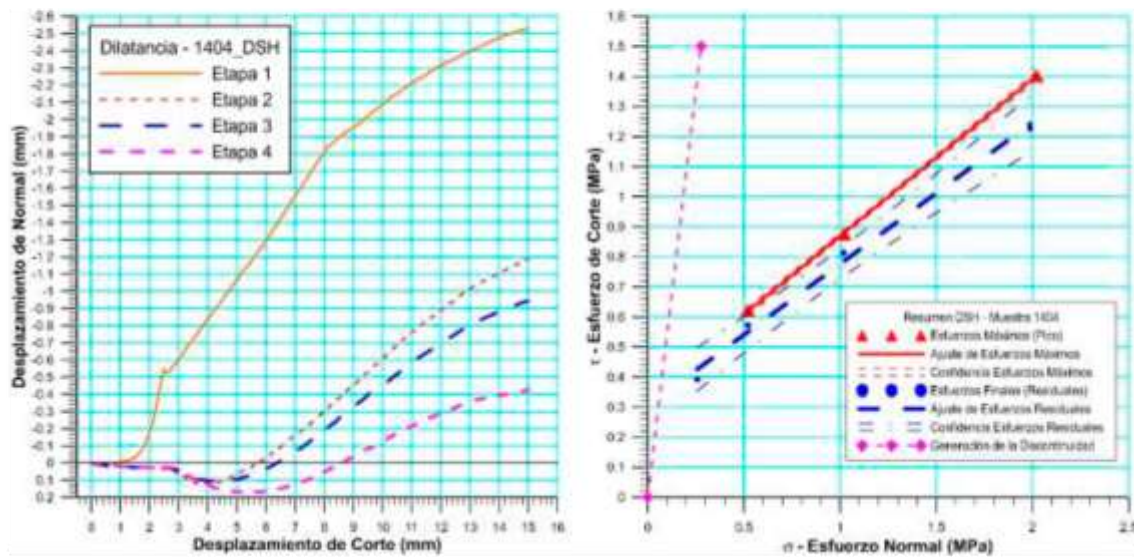
Figura 5.239 Espécimen 1403 – Perforación P-6- Profundidad 54.40 - 55.40 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.16 Espécimen 1404 – Perforación P-7- Profundidad 57.00-58.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1404

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27706	1.50063	0.25752	0.39204
2	0.51965	0.62093	0.52098	0.57183
3	1.02030	0.87636	1.01813	0.81289
4	2.02018	1.40306	1.98851	1.22663



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(27.57) * s + 0.35$	$t = \tan(25.24) * s + 0.30$
Cohesión (c) (MPa)	0.35	0.30
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	27.57	25.24
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.19	0.95
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.97	0.75
Suma de los residuos cuadrados	0.32	0.39
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.99
Varianza	0.00	0.04
Desviación estándar	0.07	0.19

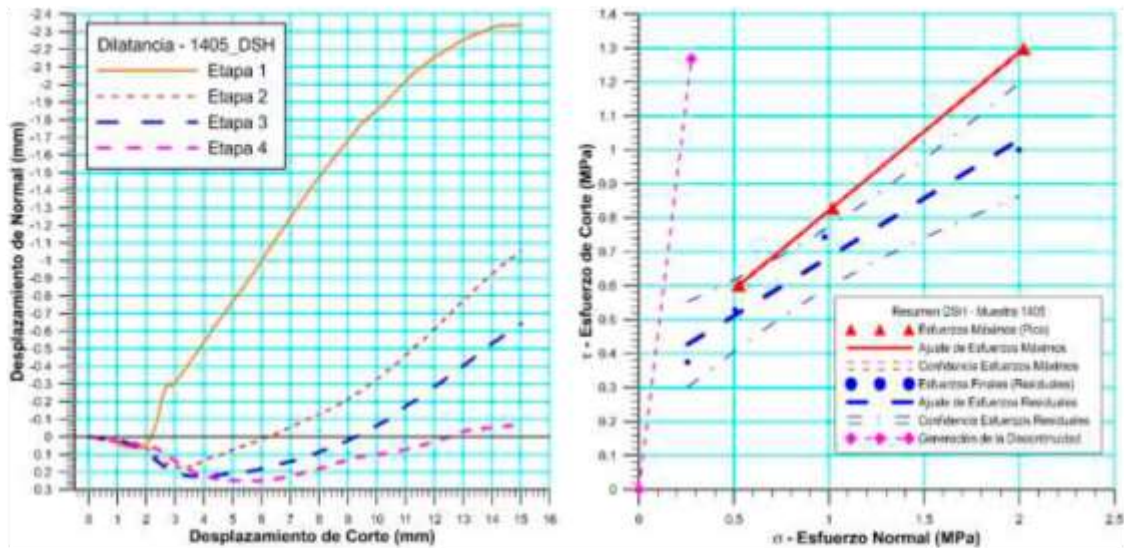
Figura 5.240 Espécimen 1404 – Perforación P-7- Profundidad 57.00-58.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.17 Espécimen 1405 – Perforación P-7- Profundidad 58.00-58.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1405

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27603	1.26787	0.25577	0.37509
2	0.52394	0.60197	0.50556	0.52867
3	1.01742	0.82853	0.97539	0.74296
4	2.02205	1.29743	1.99832	1.00012



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(24.92) * s + 0.36$	$t = \tan(19.08) * s + 0.34$
Cohesión (c) (MPa)	0.36	0.34
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	24.92	19.08
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.19	0.93
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	0.91	0.66
Suma de los residuos cuadrados	0.25	0.21
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.01
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.96
Varianza	0.00	0.06
Desviación estándar	0.05	0.25

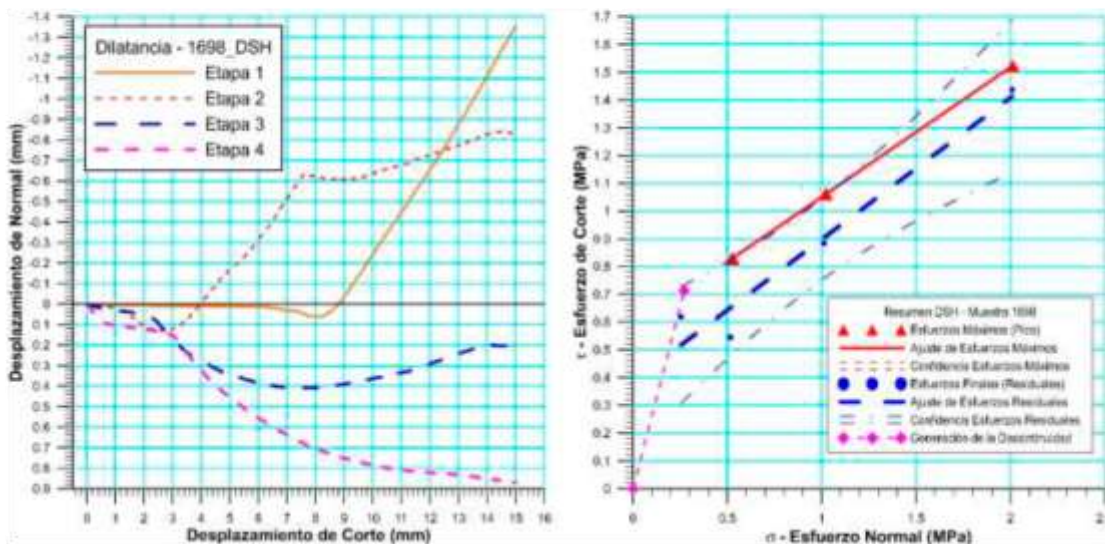
Figura 5.241 Espécimen 1405 – Perforación P-7- Profundidad 58.00-58.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.3.18 Espécimen 1698 – Perforación P-7- Profundidad 60.00-61.00 m

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación El Milagro y Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA P.	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 26-06-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1698

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27159	0.71314	0.25443	0.61947
2	0.52603	0.82883	0.51567	0.54508
3	1.02070	1.06127	1.01084	0.88378
4	2.01107	1.52270	2.00801	1.43724





Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(25.04) * s + 0.58$	$t = \tan(27.04) * s + 0.39$
Cohesión (c) (MPa)	0.58	0.39
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	25.04	27.04
Número de puntos	3	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.19	0.95
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.14	0.87
Suma de los residuos cuadrados	0.25	0.47
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.02
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.95
Varianza	0.00	0.11
Desviación estándar	0.03	0.33

Figura 5.242 Espécimen 1698 – Perforación P-7- Profundidad 60.00-61.00 m - Puente Nigale, Resumen del Ensayo

5.12.5.4 Envolvente de Falla de los Ensayos de Corte

Tabla 5.50 Resultados del Ensayo de Corte Directo

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 25/01/2017		Página 1 de 6


DATOS GENERALES			
Proyecto	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.	Especímenes del análisis	1400/1702/1703/1361/1362/1363/1365/1700/1701/1369/1697/1699/1397-A/1397-B/1403/1404/1405 1698
Origen del Espécimen	Suministrado por el cliente	Perforaciones	P-1/P-2/P-3/P-4/P-5/P-6/P-7
Clasificación Geológica del Espécimen	Lutitas (Areniscas)	Formación Geológica	Formación Onia
Tipo de Roca	Blanda	Número de puntos en el análisis	71 Puntos
Nota:	Todas las muestras corresponden al estrato de LUTITA con intercalaciones de LIMOLITA, que corresponde a la perforación P-1; P-2; P-3; P-4; P-7, las muestras de la perforación P-5, son ARENISCAS con intercalaciones de LUTITA y la perforación P-6 en sus primeros metros de profundidad son LUTITAS con niveles de ARENISCA y luego continua LUTITA con intercalaciones de LIMOLITA.		

Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_1	τ	σ_1	τ	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}
1	1400	1	0.27291	1.94380	0.25605	1.41974	-1.67090	2.21671	-1.16370	1.67579
2	1400	2	0.51812	1.23762	0.50026	1.20177	-0.71949	1.75574	-0.70152	1.70203
3	1400	3	1.02119	1.02692	0.99456	0.99432	-0.00573	2.04811	0.00024	1.98889
4	1400	4	2.02249	1.274334	2.00096	1.23392	0.74815	3.29683	0.76704	3.23488
5	1702	1	0.27717	2.15270	0.23228	0.33179	-1.87553	2.42987	0.09951	0.56407
6	1702	2	0.51745	0.58114	0.51482	0.53166	-0.06369	1.09859	-0.01683	1.04648
7	1702	3	1.01720	0.83682	0.99174	0.70494	0.18039	1.85402	0.28680	1.69668
8	1702	4	2.01653	1.45127	1.98364	1.31197	0.56527	3.46780	0.67167	3.29560
9	1703	1	0.26966	1.66397	0.25934	1.16634	-1.39431	1.93363	-0.90700	1.42568
10	1703	2	0.52059	1.27079	0.51268	1.17366	-0.75020	1.79138	-0.66098	1.68634
11	1703	3	1.02071	1.42075	1.01336	1.39109	-0.40004	2.44146	-0.37773	2.40445
12	1703	4	2.02475	2.16141	2.00247	2.05390	-0.03666	4.18616	-0.05143	4.05637
13	1361	1	2.00874	1.11676	2.01119	1.07535	0.89198	3.12550	0.93584	3.08654
14	1361	2	0.52035	0.53573	0.49805	0.48843	-0.01538	1.05608	0.00962	0.98648
15	1361	3	1.01912	0.70055	1.02746	0.67385	0.31857	1.71967	0.35361	1.70131
16	1361	4	2.00874	1.11676	2.01119	1.07535	0.89198	3.12550	0.93584	3.08654
17	1362	1	0.26884	0.73977	0.23133	0.36916	-0.47093	1.00861	-0.13783	0.60049
18	1362	2	0.51384	0.58159	0.48263	0.52015	-0.06775	1.09543	-0.03752	1.00278
19	1362	3	1.01957	0.86402	0.97849	0.79016	0.15555	1.88359	0.18833	1.76864
20	1363	1	0.26483	0.47715	0.25210	0.33071	-0.21232	0.74198	-0.07860	0.58281
21	1363	2	0.51784	0.55178	0.47767	0.41438	-0.03394	1.06963	0.06329	0.89205
22	1363	3	1.03062	0.75579	1.00153	0.60946	0.27483	1.78641	0.39207	1.61099
23	1363	4	2.00970	1.03916	2.00978	0.86444	0.97054	3.04886	1.14534	2.87421
24	1365	1	0.27217	7.19605	0.23998	7.07781	-6.92388	7.46822	-6.83722	7.31779
25	1365	2	0.51907	11.67854	0.48712	11.55775	-11.15947	12.19761	-11.07063	12.04486
26	1365	3	1.02416	11.59713	0.97294	11.52284	-10.57297	12.62130	-10.54990	12.49578
27	1365	4	2.01987	12.75681	2.02346	12.71721	-10.73693	14.77668	-10.69374	14.74067

Tabla 5.50 Resultados del Ensayo de Corte Directo (continuación)

 RIF: G-20000062-7		LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE						 RIF: G-20000062-7		
		Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.								
Cálculo:		Revisión:		Fecha:		Página 2 de 6				
EDDIT & ELVI GARCIA		M. CASTILLEJO		25/01/2017						
Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_n	τ	σ_n	τ	σ_{nmax}	σ_{nmin}	σ_{nmin}	σ_{nmin}
28	1700	1	0.26861	0.55355	0.25662	0.45161	-0.28494	0.82216	-0.19499	0.70822
29	1700	2	0.51945	0.57036	0.50122	0.52320	-0.05092	1.08981	-0.02198	1.02442
30	1700	3	1.02889	0.81757	1.01452	0.79209	0.21133	1.84646	0.22243	1.80661
31	1700	4	2.02145	1.30075	2.01727	1.17568	0.72070	3.32221	0.84159	3.19295
32	1701	1	0.26602	1.08350	0.26388	0.35262	-0.81748	1.34952	-0.08874	0.61650
33	1701	2	0.51971	0.69142	0.51445	0.68526	-0.17171	1.21113	-0.17082	1.19971
34	1701	3	1.01946	0.99689	1.00931	0.97066	0.02257	2.01635	0.03865	1.97997
35	1701	4	2.01578	1.47837	2.01186	1.42616	0.53742	3.49415	0.58570	3.43802
36	1369	1	0.27388	1.02107	0.23715	0.55295	-0.74718	1.29495	-0.31580	0.79009
37	1369	2	0.51996	0.99360	0.48814	0.92138	-0.47364	1.51356	-0.43324	1.40952
38	1369	3	1.02905	1.65082	0.99733	1.59587	-0.62177	2.67987	-0.59853	2.59320
39	1369	4	2.02355	2.62909	1.98080	2.11535	-0.60554	4.65265	-0.13455	4.09615
40	1697	1	0.27393	1.14553	0.27240	0.47034	-0.87160	1.41946	-0.19794	0.74274
41	1697	2	0.51863	0.68588	0.49709	0.5848	-0.16725	1.20451	-0.08772	1.08189
42	1697	3	1.01833	1.00751	1.01451	0.93234	0.01083	2.02584	0.08217	1.94685
43	1697	4	2.01637	1.66463	1.98153	1.57448	0.35174	3.68100	0.40705	3.55601
44	1699	1	0.27410	1.54169	0.24305	0.62141	-1.26760	1.81579	-0.37836	0.86445
45	1699	2	0.53468	0.88206	0.48607	0.81738	-0.34738	1.41674	-0.33131	1.30346
46	1699	3	1.02961	1.49881	0.97892	1.40933	-0.27843	4.32454	-0.210441	4.16825
47	1699	4	2.02306	2.30149	1.97892	2.18933	-0.27843	4.32454	-0.21041	4.16825
48	1397-A	1	0.26934	0.93161	0.25797	0.37342	-0.66227	1.20095	-0.11545	0.63138
49	1397-A	2	0.52162	0.54823	0.49470	0.52290	-0.02661	1.06986	-0.02820	1.01760
50	1397-A	3	1.01863	0.85409	0.99226	0.82238	0.16454	1.87272	0.16988	1.81463
51	1397-A	4	0.02412	1.19975	2.01784	1.19200	0.82437	3.22387	0.82584	3.20983
52	1397-B	1	0.26389	1.96089	0.27785	1.33915	-1.69700	2.22478	-1.06130	1.61700
53	1397-B	2	0.52053	0.56688	0.52113	0.55085	-0.04635	1.08740	-0.02971	1.07198
54	1397-B	3	1.01727	0.64785	0.99350	0.60502	0.36942	1.66511	0.38848	1.59851
55	1397-B	4	2.01645	0.91546	2.00055	0.86356	1.10100	2.93191	1.13698	2.86411
56	1403	1	0.26850	0.37089	0.26189	0.35490	-0.10239	0.63939	-0.09301	0.61679
57	1403	2	0.51450	0.42621	0.51033	0.39521	0.08830	0.94071	0.11512	0.90554
58	1403	3	1.02673	0.56826	1.00726	0.54445	0.45846	1.59499	0.46282	1.55171
59	1403	4	2.01294	0.68908	1.99438	0.65737	1.32385	2.70202	1.33702	2.65175
60	1404	1	0.27706	1.50063	0.25752	0.39204	-1.22357	1.77768	-0.13452	0.649560
61	1404	2	0.51965	0.62093	0.52098	0.57183	-0.101288	1.14057	-0.05085	1.09280
62	1400	3	1.02030	0.87636	1.01813	0.81289	0.14394	1.89667	0.20524	1.83102
63	1400	4	2.02018	1.40306	1.98851	1.22663	0.61712	3.42324	0.76189	3.21514
64	1405	1	0.27603	1.26787	0.25577	0.37509	-0.99184	1.54390	-0.11932	0.63086
65	1405	2	0.52394	0.60197	0.50556	0.52867	-0.07803	1.12592	-0.02311	1.03426

Tabla 5.50 Resultados del Ensayo de Corte Directo (continuación)

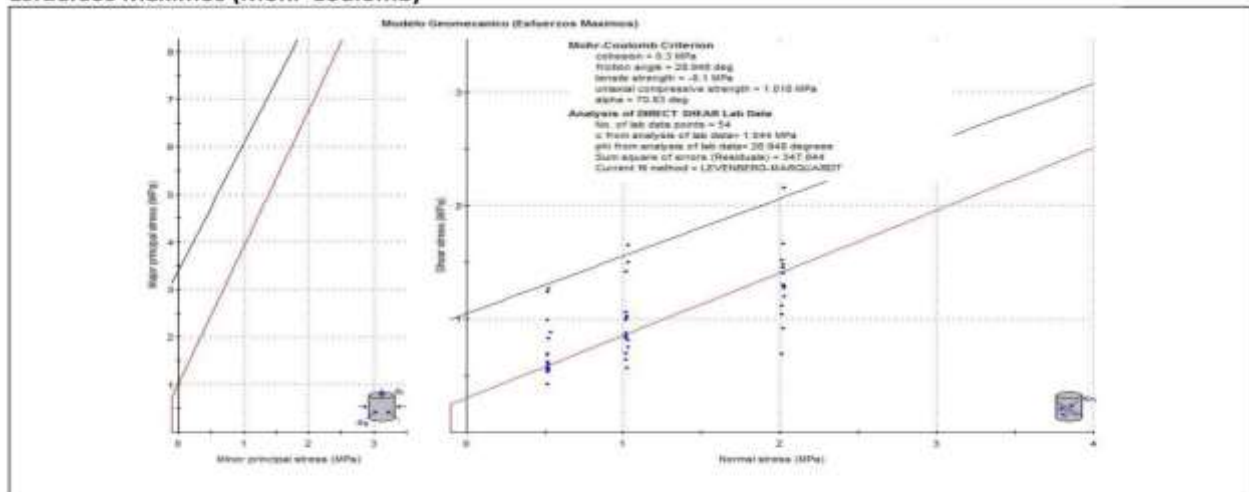
 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			 RIF: G-20000062-7	
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.				
	Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 25/01/2017		Página 3 de 6

Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_n	τ	σ_n	τ	σ_{max}	σ_{min}	σ_{min}	σ_{max}
66	1405	3	1.01742	0.82853	0.97539	0.74296	0.18889	1.84595	0.23243	1.71835
67	1405	4	2.02205	1.29743	1.99832	1.00012	0.72462	3.31948	0.99820	2.99844
68	1698	1	0.27159	0.71314	0.25443	0.61947	-0.44155	0.98474	-0.36504	0.87390
69	1698	2	0.52603	0.82883	0.51567	0.54508	-0.30280	1.35486	-0.02940	1.06075
70	1698	3	1.02070	1.06127	1.01084	0.88378	-0.04057	2.08197	0.12705	1.89462
71	1698	4	2.01107	1.52270	2.00801	1.43724	0.48836	3.53377	0.57077	3.44525

Procedimiento

- Para realizar el análisis se procedió a dividir la población de los ensayos en dos partes, los esfuerzos picos o máximos y los esfuerzos residuales, analizándolos de manera independiente.
- Los análisis se realizaron por los criterios de Mohr-Coulomb y Barton-Bandis.
 - Mohr-Coulomb**, determina los parámetros de cohesión c y ángulo de fricción ϕ
 - Barton-Bandis**, determina los parámetros de JRC y JCS de la discontinuidad a partir de los resultados de corte directo.
- Se elaborarán las envolventes de falla a partir de los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio y se establecerán los parámetros mencionados anteriormente de acuerdo al criterio a emplear.
- Se empleará el programa RocData V4.0


Esfuerzos Máximos (Mohr-Coulomb)



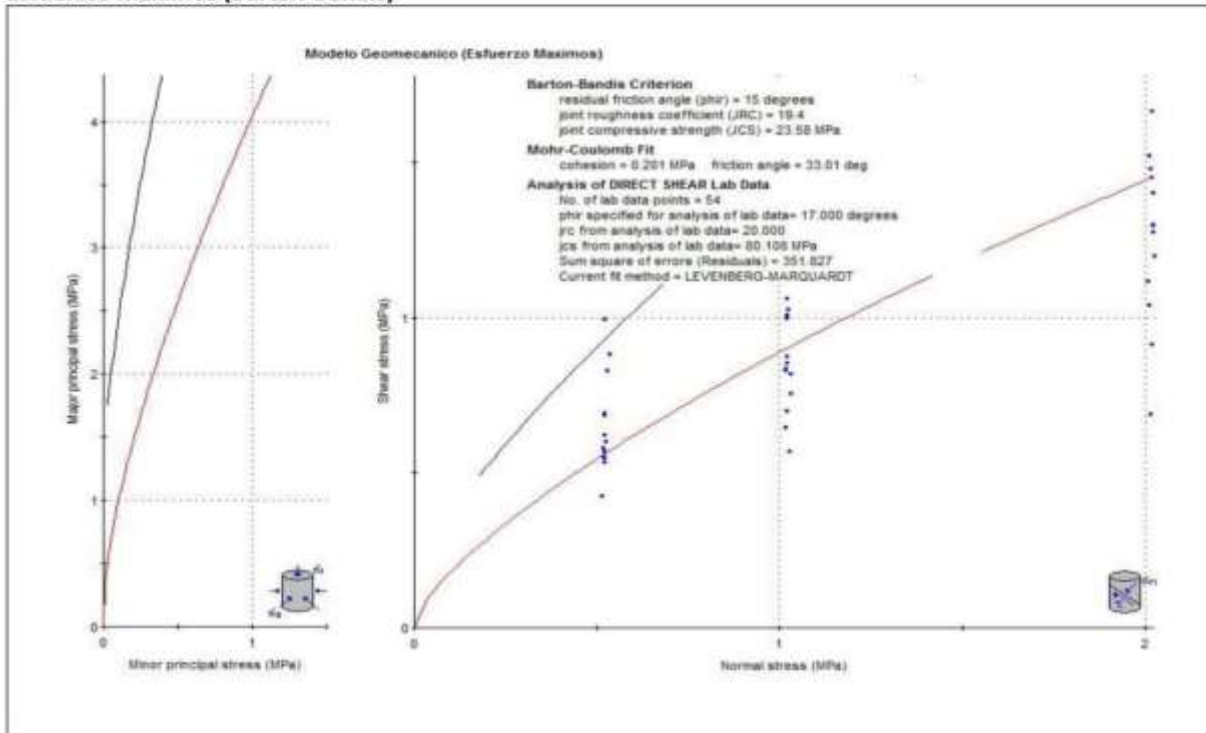
Criterio de Mohr-Coulomb (máximos)

- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marquadt: parámetros obtenidos: $c = 1,044$ MPa y $\phi = 26,948$ grados, suma de los errores (residuos) 347,844
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $c = 0,3$ MPa y $\phi = 28,948$ grados, resistencia a la tracción de -0.1 MPa, Resistencia a la compresión $1,018$ MPa y $\alpha = 70,83$ grados

Figura 5.243 Modelo Geomecánico utilizando el Criterio de Mohr-Coulomb para Esfuerzos de Corte Pico

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			 RIF: G-20000062-7
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.			
Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 25/01/2017	Página 4 de 6	



Esfuerzos Máximos (Barton-Bandis)



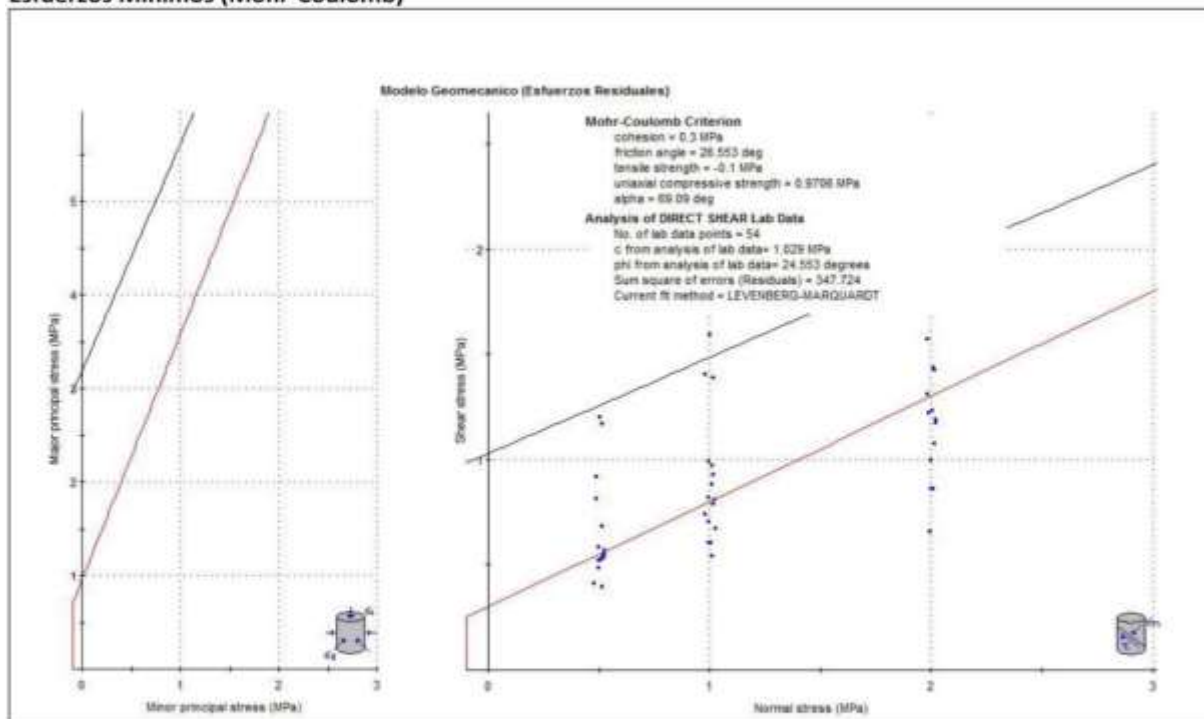
Este criterio al igual que el anterior en programa realiza un ajuste el cual es mostrado con la línea negra y los valores sugeridos con la línea roja.

- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marquadt; parámetros obtenidos: $\phi_{hr} = 17,00$ grados, $JRC = 20,00$, $JCS = 80,1$ MPa y suma de los errores (residuos) 351.8
- Ajuste de Mohr-Coulomb: $c = 0.20$ MPa y $\phi = 33,01$ grados
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $\phi_{hr} = 15$ grados, $JRC = 19,4$, $JCS = 23,6$ MPa

Figura 5.244 Modelo Geomecánico utilizando el Criterio de Barton-Bandis para Esfuerzos de Corte Pico

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			 RIF: G-20000062-7
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.			
Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 25/01/2017	Página 5 de 6	



Esfuerzos Mínimos (Mohr-Coulomb)



Criterio de Mohr-Coulomb (Mínimos)

- La línea en negro representa el ajuste realizado con el método de ajuste Levenberg-Marcuadt: parámetros obtenidos: $c = 1,0$ MPa y $\phi = 24,6$ grados, suma de los errores (residuos) 347,7
- La línea en roja es la curva de ajuste sugerida, cuyos parámetros son: $c = 0,3$ MPa y $\phi = 26,6$ grados, resistencia a la tracción de $-0,1$ MPa, Resistencia a la compresión $0,9$ MPa y $\alpha = 69,09$ grados

Figura 5.245 Modelo Geomecánico utilizando el Criterio de Mohr-Coulomb para Esfuerzos de Corte Residuales

 RIF: G-20000062-7	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE			 RIF: G-20000062-7
	Caracterización Geológica Geomecánica del tope de roca Formación Onia al noroeste en Santa Cruz de Mara en la cuenca del Lago de Maracaibo Estado Zulia.			
Cálculo: EDDIT & ELVI GARCIA	Revisión: M. CASTILLEJO	Fecha: 25/01/2017	Página 6 de 6	

Esfuerzos Mínimos (Barton-Bandis)

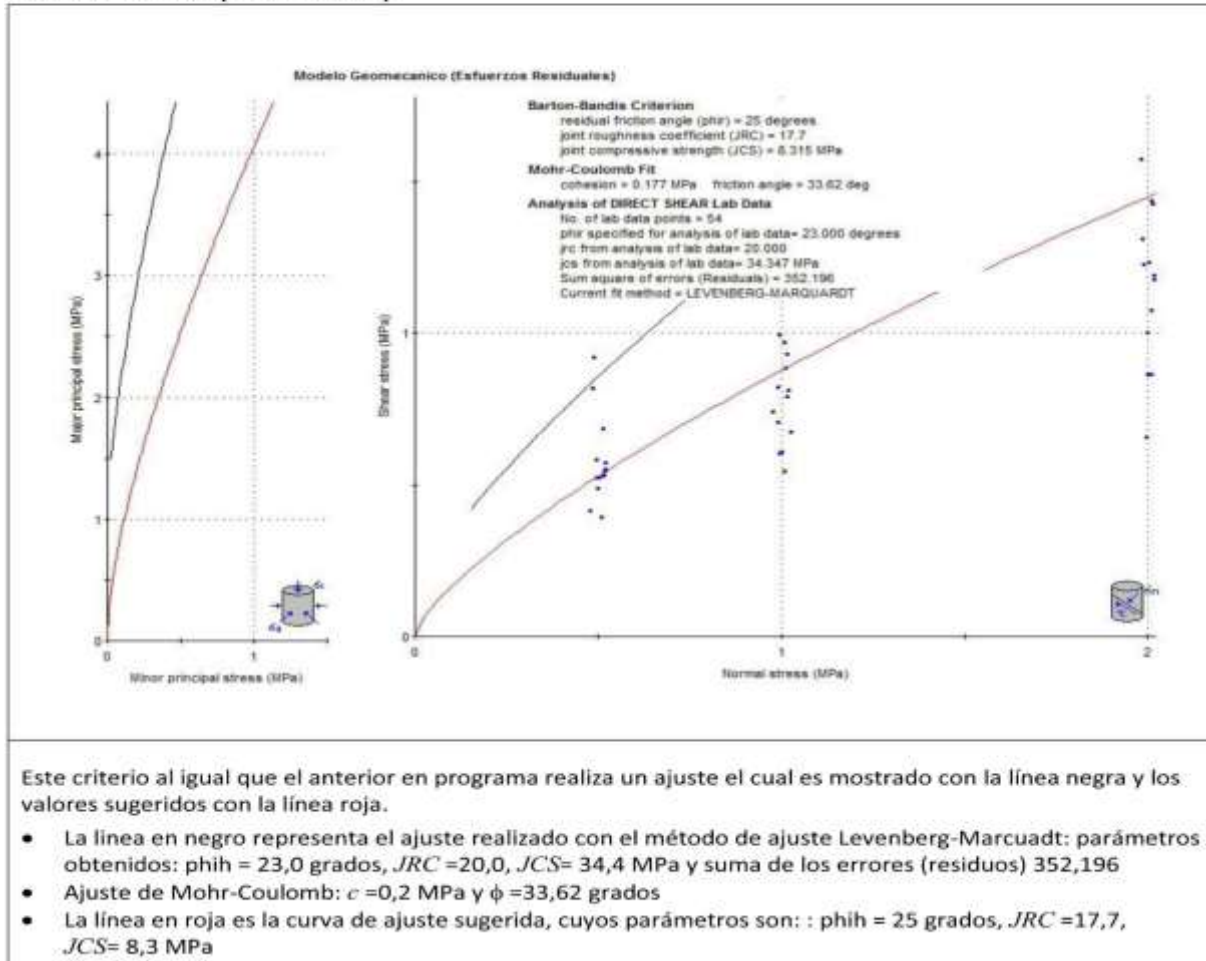


Figura 5.246 Modelo Geomecánico utilizando el Criterio de Barton-Bandis para Esfuerzos de Corte Residuales

5.12.6 CONCLUSIONES



1. En la zona de estudio la litología (lutita, limolita y arenisca), color (gris claro, gris oscuro, marrón, marrón rojizo), textura (masiva, laminadas, onduladas) y mineralogía (caolinita, illita y cuarzo), etc. son constantes a todo lo largo del tramo.
2. En la descripción litológica se reportan lutitas y limolitas de grano fino a muy fino estas rocas están asociadas a un ambiente de baja energía.

3. La resistencia de las rocas obedece principalmente a la litología, como es el caso de la lutita que da como resultado una resistencia baja.
4. Las muestras que presentan mayor contenido de cuarzo son aquellas que presentan mayor módulo de elasticidad y mayor deformación es decir que son más resistentes debido a su litología.

5.13 Zonificación a Suceptabilidad de Movimientos de Masa en la Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi

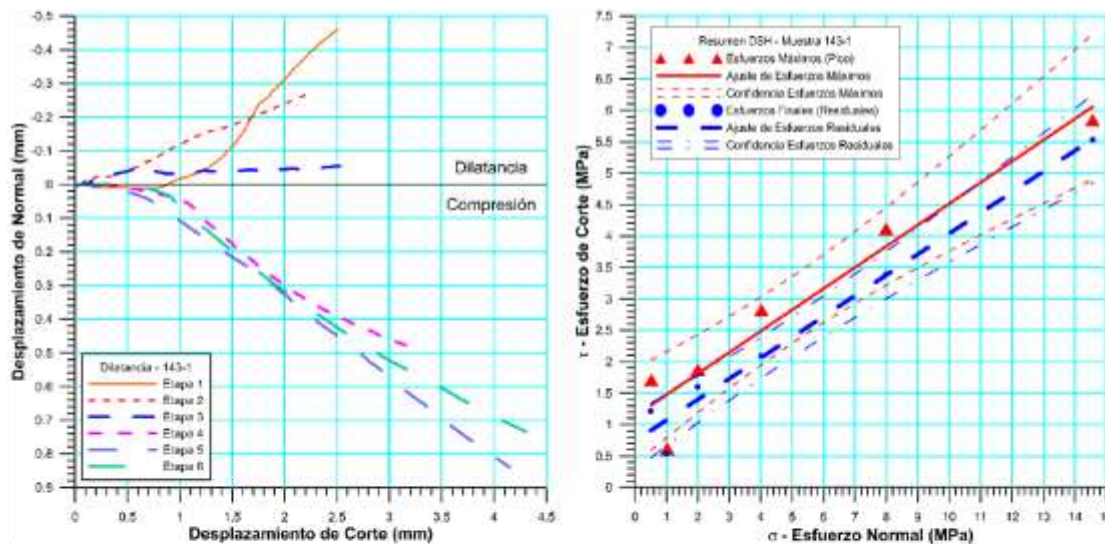
Estos ensayos reportados aquí corresponden a la “Zonificación a Suceptabilidad De Movimientos de Masa en la Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi”, Las muestras con las que se realizaron Iso ensayos corresponden muestras de mano tomadas en la Quebrada La Culebra.

5.13.1 Espécimen 143-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi

 INGEOMIN <small>Instituto Nacional de Geología y Minería</small> RIF: J-30681665-8	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO CARGA NORMAL CONSTANTE – CONSTANT NORMAL LOAD (CNL)			 RIF: G-20000062-7
	ZONIFICACIÓN A SUCEPTABILIDAD DE MOVIMIENTOS DE MASA EN LA QUEBRADA LA CULEBRA, MUNICIPIO GUANTA, ESTADO ANZOATEGÜI			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 8 de 9
	M. CASTILLEJO		19-03-2013	Espécimen: 143-1

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.51886	1.70996	0.50142	1.21243
2	1.02462	0.61800	0.99848	0.53944
3	1.99697	1.87232	1.99261	1.59998
4	4.02010	2.82026	4.01138	2.08705
5	7.99224	4.11648	7.99660	3.39112
6	14.55869	5.84740	14.56741	5.53054



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(18.67) * s + 1.14$	$t = \tan(18.26) * s + 0.74$
Cohesión (c) [MPa]	1.14	0.74
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	18.67	18.26
Número de puntos	6	6
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	5.02	5.01
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	2.83	2.39
Suma de los residuos cuadrados	1.14	0.42
Regresión Suma de los residuos cuadrados	16.69	15.98
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.94	0.97

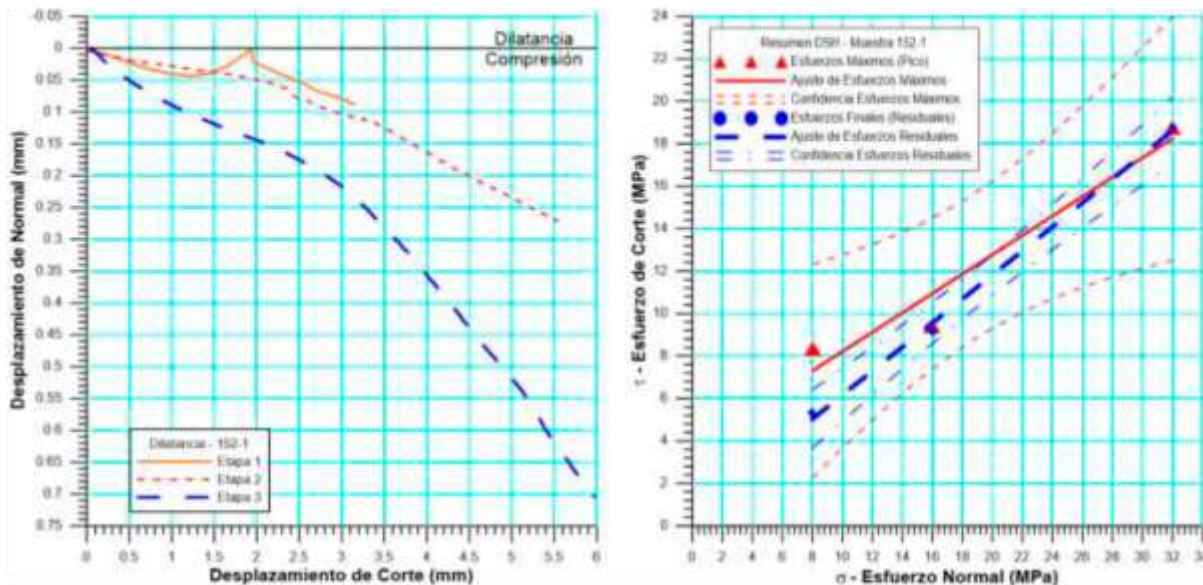
Figura 5.247 Espécimen 143-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi

5.13.2 Espécimen 152-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi

 <p>INGEOMIN RIF: J-30681665-8</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO CARGA NORMAL CONSTANTE – CONSTANT NORMAL LOAD (CNL)</p>			 <p>RIF: G-20000052-7</p>
	<p>ZONIFICACIÓN A SUCEPTABILIDAD DE MOVIMIENTOS DE MASA EN LA QUEBRADA LA CULEBRA, MUNICIPIO GUANTA, ESTADO ANZOATEGÜI</p>			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		19-03-2013	Espécimen: 152-1

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	8.00643	8.33043	7.99209	5.31136
2	15.98870	9.40464	15.99443	9.13633
3	32.00940	18.76087	32.00367	18.75054



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(24.51) * s + 3.65$	$t = \tan(29.49) * s + 0.51$
Cohesión (c) (MPa)	3.65	0.51
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	24.51	29.49
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	18.67	18.66
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	12.17	11.07
Suma de los residuos cuadrados	3.68	0.27
Regresión Suma de los residuos cuadrados	62.14	95.62
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.94	1.00

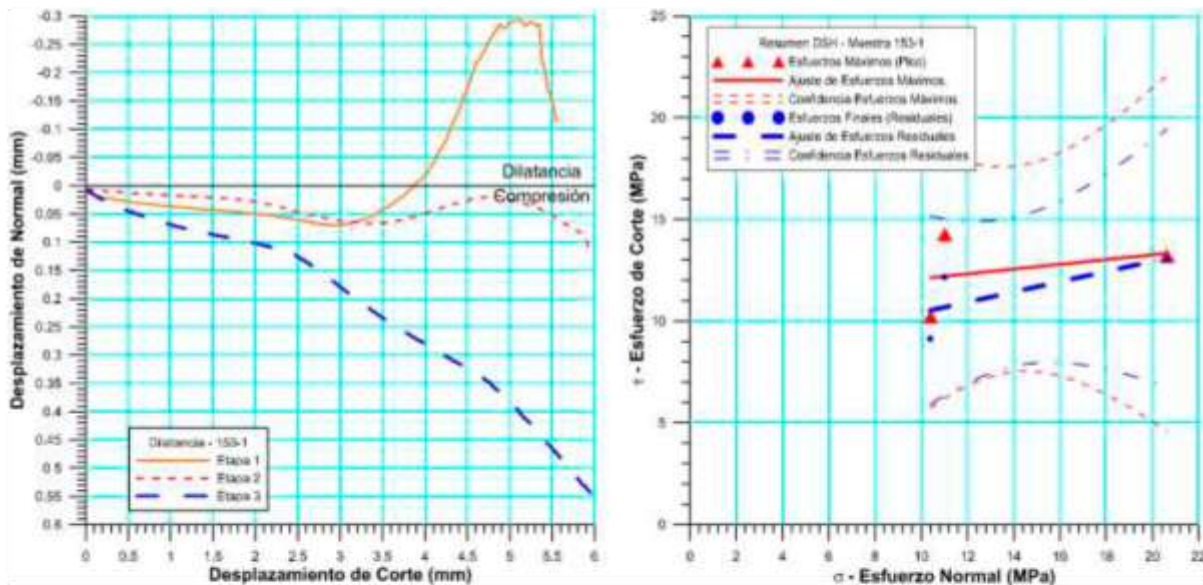
Figura 5.248 Espécimen 152-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi

5.13.3 Espécimen 153-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi

 <p>INGEOMIN INSTITUTO VENEZOLANO DE GEOTECNIA Y MINERIA RIF: J-30681665-8</p>	<p>LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO CARGA NORMAL CONSTANTE – CONSTANT NORMAL LOAD (CNL)</p>			 <p>RIF: G-20000062-7</p>
	<p>ZONIFICACIÓN A SUCEPTABILIDAD DE MOVIMIENTOS DE MASA EN LA QUEBRADA LA CULEBRA, MUNICIPIO GUANTA, ESTADO ANZOATEGÜI</p>			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		19-03-2013	Espécimen: 153-1




Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	11.02174	14.25935	11.00445	12.16888
2	10.40601	10.20359	10.38897	9.13128
3	20.63003	13.20749	20.62575	13.00953



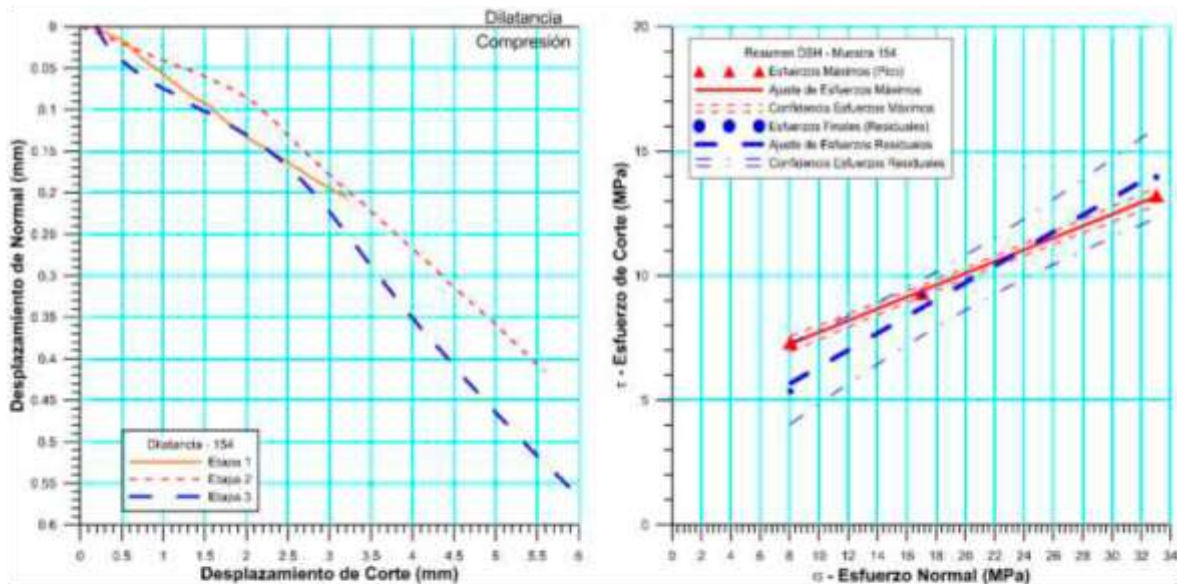
Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(6.68) * s + 10.91$	$t = \tan(14.10) * s + 7.92$
Cohesión (c) (MPa)	10.91	7.92
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	6.68	14.10
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	14.02	14.01
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	12.56	11.44
Suma de los residuos cuadrados	7.96	4.17
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.90	4.16
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.10	0.50

Figura 5.249 Espécimen 153-1 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi

 <p>INGEOMIN RIF: J-30681665-8</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO CARGA NORMAL CONSTANTE – CONSTANT NORMAL LOAD (CNL)			  <p>RIF: G-20000062-7</p>
	ZONIFICACIÓN A SUCEPTABILIDAD DE MOVIMIENTOS DE MASA EN LA QUEBRADA LA CULEBRA, MUNICIPIO GUANTA, ESTADO ANZOATEGÜI			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 5 de 6
	M. CASTILLEJO		19-03-2013	Espécimen: 154

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	8.07863	7.32452	8.07227	5.35973
2	17.03671	9.29230	17.03035	9.20636
3	33.02227	13.21330	33.01271	13.94811



Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(13.34) * s + 5.35$	$t = \tan(18.71) * s + 2.94$
Cohesión (c) (MPa)	5.35	2.94
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	13.34	18.71
Número de puntos	3	3
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	19.38	19.37
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	9.94	9.50
Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.38
Regresión Suma de los residuos cuadrados	17.96	36.64
Coefficiente de Determinación (R^2)	1.00	0.99

Figura 5.250 Espécimen 154 – Muestra de Mano - Quebrada La Culebra, Municipio Guanta, Estado Anzoategüi

5.14 Mirador Monumento Manto de María, Divina Pastora – Barquisimeto

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a las limolitas donde se construyó el Mirador Monumento Manto de María, Divina Pastora en la Ciudad de Barquisimeto, Estado Anzóategüi.

Sólo se presentan los resultados obtenidos ya que no se tuvo acceso al informe geológico que sirvió de base la Construcción del Mirador Monumento Manto de María, Divina Pastora en la ciudad de Barquisimeto, Estado Lara.

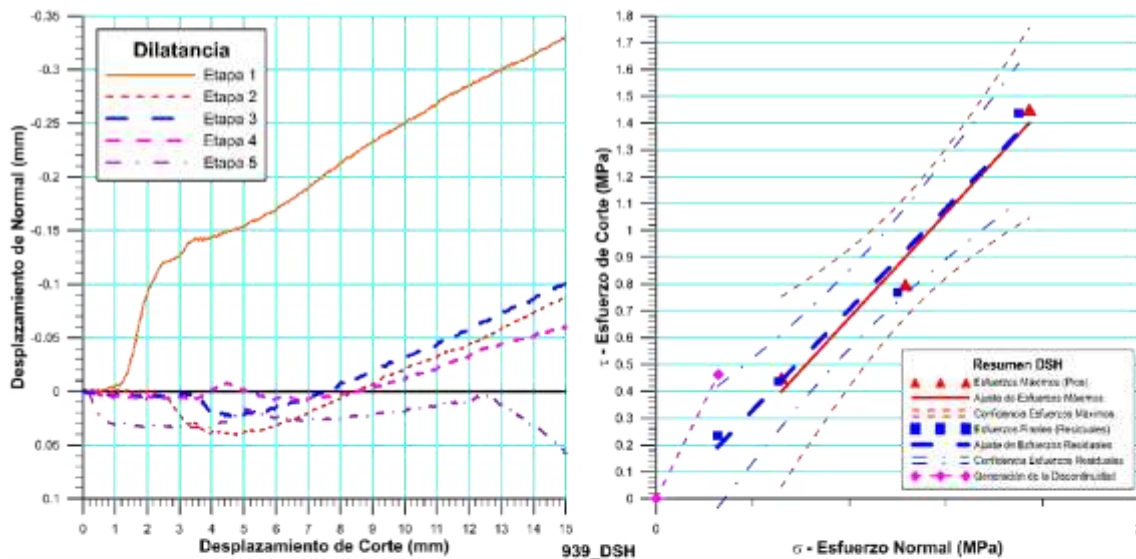
Estas muestras corresponden a muestras de mano del sitio.

5.14.1 Espécimen 0939 – Mirador Monumento Manto de María, Divina Pastora – Barquisimeto

	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO CARGA NORMAL CONSTANTE – CONSTANT NORMAL LOAD (CNL)			
	MIRADOR MONUMENTO MANTO DE MARIA, DIVINA PASTORA			
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 8
	M. CASTILLEJO	09/2016	30-09-2014	Espécimen: 939

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.25713	0.46238	0.25325	0.23487
2	0.51806	0.45011	0.50479	0.43664
3	1.03181	0.79790	0.99929	0.76777
4	1.54491	1.45134	1.50061	1.43750
5	2.06022	2.09463	1.99662	1.93540





Resultados de las curvas de ajuste		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$t = \tan(47.39) * s + 0.00$	$t = \tan(43.09) * s + 0.00$
Cohesión (c) (MPa)	0.00	0.00
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	47.39	43.09
Número de puntos	5	5
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	1.29	1.05
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	1.05	0.96
Suma de los residuos cuadrados	0.10	0.03
Regresión Suma de los residuos cuadrados	1.92	1.99
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.95	0.99

Figura 5.251 Espécimen 0939 – Mirador Monumento Manto de María, Divina Pastora – Barquisimeto

5.15 - Talud Ferrominera – Ciudad Piar – Estado Bolívar

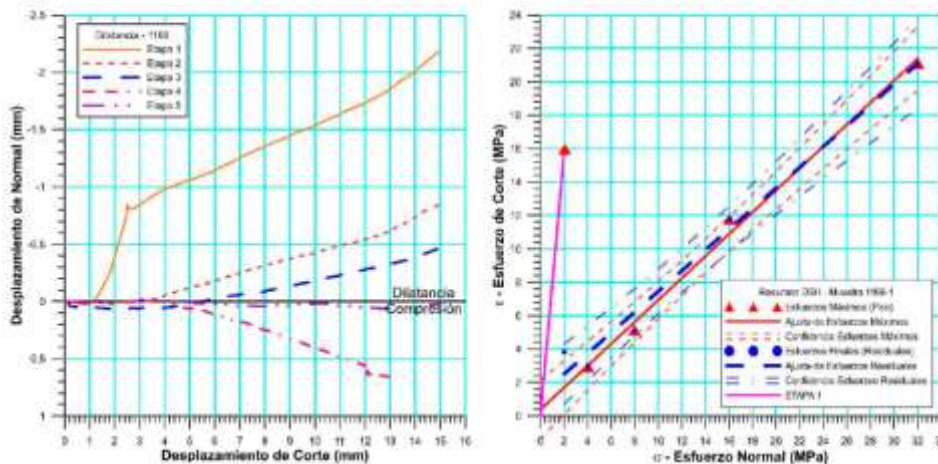
El presente reporte corresponde a una muestra de mano de Cuarcita Ferruginosa, del Complejo Imataca, tomada en los yacimientos de Ferrominera del Orinoco.

No se disponen de mayores datos de la muestra ensayada.

 LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO CARGA NORMAL CONSTANTE – CONSTANT NORMAL LOAD (CNL)				
TALUDES FERROMINERA – CIUDAD PIAR – ESTADO BOLÍVAR		REP: G-2000002-7		
Código Proyecto:	Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 7 de 8
	M. CASTILLEJO		16-01-2015	Espécimen: 1166

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	2.04570	15.97693	2.02176	3.83117
2	4.02587	2.94923	4.02587	2.94923
3	7.99841	5.12390	7.99841	5.12390
4	16.03068	11.77203	16.03068	11.77203
5	32.02782	21.10569	32.02782	21.10569



Resultados de las curvas de ajuste (solo se realizará el ajuste para los puntos de 2 al 5 en los esfuerzos máximos)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = \tan(33.30) * \sigma + 0.372$	$\tau = \tan(31.78) * \sigma + 1.26$
Cohesión (c) (MPa)	0.372	1.26
Ángulo de Fricción (φ), (grados)	33.30	31.78
Número de puntos	4	5
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n)	15.02	12.42
Promedio Esfuerzo de Corte (τ)	10.24	8.96
Suma de los residuos cuadrados	1.11	3.91
Regresión Suma de los residuos cuadrados	198.634	228.66
Coefficiente de Determinación (R ²)	0.55	0.98

Figura 5.251 Espécimen 1166 – Talud – Cuarcita Ferruginosa, del Complejo Imataca, tomada en los yacimientos de Ferrominera del Orinoco

5.16 Caracterización la Fosa Norte – Guasare, Estado Zulia (Tomás Alejandro Sánchez Seijas, 2017)

La mina Paso Diablo se ubica en el Noroeste del estado Zulia, en esta se desarrolla una explotación de mineral combustible (carbón), este yacimiento de carbón está dispuesto en capas inclinadas en la cual se ejecuta una explotación minera a cielo abierto. En la actualidad se tiene proyectado el inicio de una excavación de una nueva fosa ubicada al Noreste de la mina, lo cual ocasionará grandes modificaciones al terreno.

La realización de una modificación de un terreno de este tipo, genera condiciones de desequilibrio en la zona y por lo tanto es necesario, para realizar esta excavación, un diseño de taludes, tanto operativo como de talud final, considerando las diferentes variables geomecánicas de tal manera que el terreno siempre este en equilibrio y de esta manera pueda ser ejecutada con seguridad.

5.16.1 Justificación de la investigación

La necesidad de un diseño de taludes es importante para Carbones del Zulia, debido a que la mina Paso Diablo si posee un anteproyecto de diseño para la fosa Noreste, realizado por (Golder Associates, 2008/12/29), que se basó en un estudio geomecánico preliminar que está elaborado en función de valores de carga puntual de las diferentes rocas del yacimiento que estaba en proyecto de explotación. En el mismo informe se recomendaba la realización de un estudio geomecánico que preciera los distintos parámetros geomecánicos con mucha más precisión y con métodos más sofisticados de estudio.

Esto es necesario para el diseño de taludes y proseguir en el avance de la mina, debido a que permitirá realizar la excavación de manera segura, con ayuda de las condiciones geomecánicas de la zona, a posterior servirá este de base para definir el diseño de la fosa y proseguir con el avance de la extracción de carbón, así mismo contribuirá a definir a detalle el modelo geomecánico de la zona Noreste. Conocer las propiedades de la roca permitirá tomar decisiones correctas sobre todos los aspectos relacionados con las labores de la mina y se podrá establecer la dirección en la que se realizará la explotación minera.

5.16.2 Ubicación geográfica general

El Yacimiento Carbonífero del Guasare, depositario de la Mina Paso Diablo, donde la Empresa Carbones del Zulia S.A., realiza sus operaciones mineras “se encuentra ubicado en las coordenadas 797.137 (este) y 1.220.566 (norte) referidas al sistema Universal Transversal Mercator (UTM).

Este se localiza en el estado Zulia, Municipio Mara, Parroquia Luis de Vicente específicamente en la parte sur (bloque Norte de Carichuano) de la mina Paso Diablo de CARBOZULIA. Geográficamente se localiza a unos 120 km al noroeste de la ciudad de Maracaibo en el pie de monte oriental de la Sierra de Perijá y al oeste del Sinclinal de Manuelote. La misma se encuentra enmarcada dentro de la cuenca del río Guasare. Dicha mina limita al Norte con el río Guasare y por el Sur con el Caño Norte, guasare.com. (2005-2006). Ver figura 1.



Figura 5.252. Ubicación geográfica de la empresa Carbozulia. Fuente: (Gerencia de Ingeniería de Mina, Carbones del Zulia S.A, 2014)

5.16.3 Geología

5.16.3.1 Geología Regional

Las unidades litológicas que constituyen la mina Paso Diablo y que se ubican en el sinclinal de Manuelote son las Formaciones Guasare, Paso Diablo, Marcelina y Misoa, en donde la Formación Marcelina contiene los carbones que son económicamente explotables.

Según el Léxico Estratigráfico (CIEN, 1997), la Formación Paso Diablo fue definida y descrita por Hedberg y Sass (1937), en la zona del Sinclinal de Manuelote, sin embargo, Sutton (1946), publicó en un trabajo en inglés que las areniscas superiores de la Formación Paso Diablo correspondían a la Formación Misoa por lo que separó la unidad, llamando la unidad inferior Marcelina, quedando las areniscas de Misoa, suprayacente. De acuerdo con el Código de Nomenclatura Estratigráfica (Amer. Comm. Strat. Nomencl., 1961, Art. 14-a) el procedimiento apropiado hubiera sido conservar el término Paso Diablo en un sentido restringido, i.e. excluyendo las areniscas de Misoa. Por no haberse aplicado este criterio, la Formación Marcelina es sinónima, en su mayor parte, de la Formación Paso Diablo.

La Formación Marcelina ha sido utilizada más ampliamente en diversos trabajos desde que fue definida por Sutton (1946), actualmente todos los trabajos realizados en la mina Paso Diablo utilizan esta definición; mientras que la Formación Paso Diablo solo se ha reconocido en el sinclinal de Manuelote, apareciendo aún además en los cuadros de correlación donde ambas formaciones se han mantenido vigentes.

5.16.3.1 Geología Local

Según Sutton (op. cit., 1947) éste describe la litología presente en la zona como una intercalación de areniscas, lutitas, lutitas arenosas y capas de carbón. El carbón es de tipo subbituminoso a bituminoso, y se presenta principalmente hacia la base de la formación, en capas de 2 hasta 10 m de espesor.

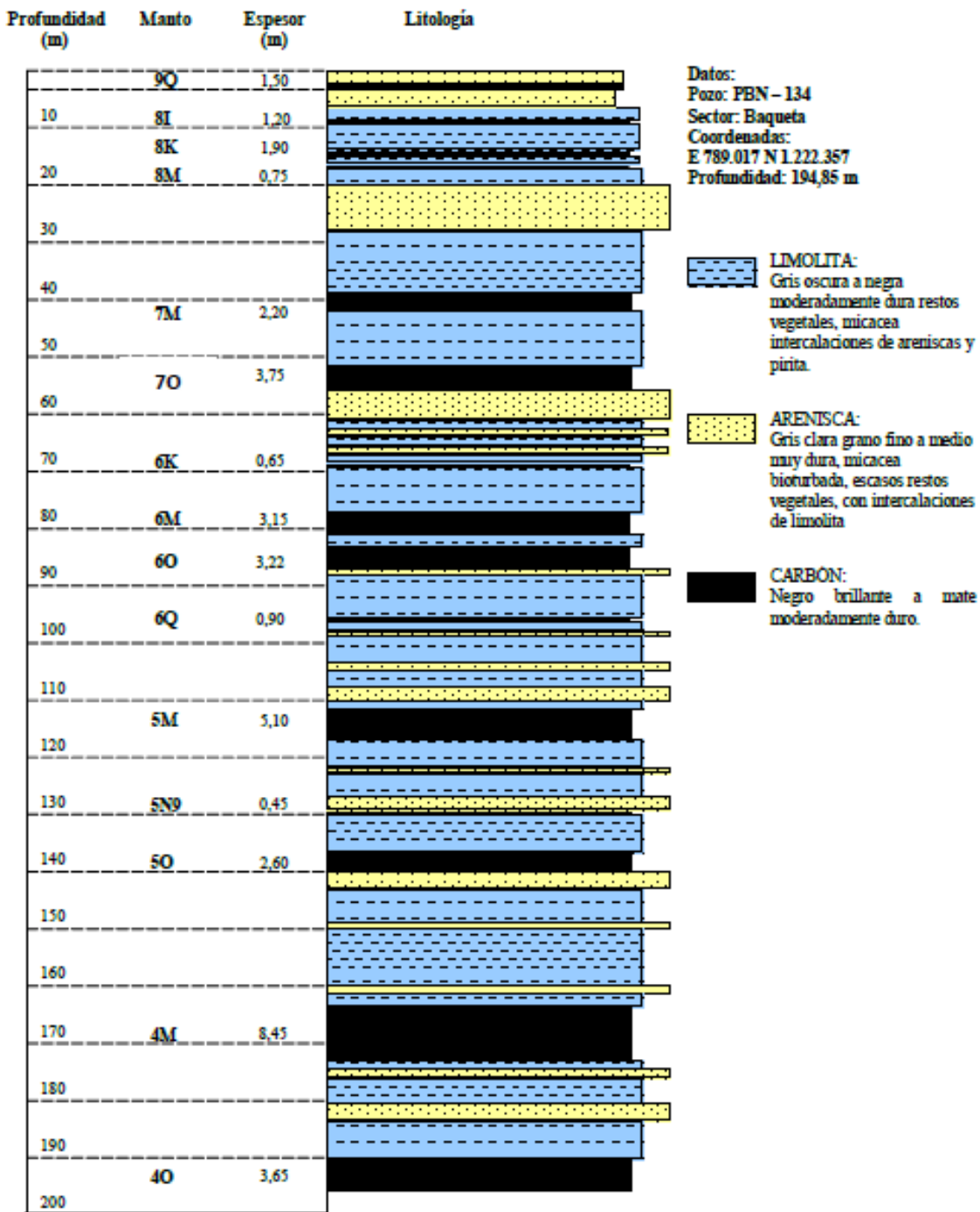


Figura 1.253 Secuencia estratigráfica presente en la Mina Paso Diablo. Fuente. (Superintendencia de Geología, 2014)

La zona de explotación actual correspondiente al área Noroeste, sector Transición. En el área futura a extraer se encuentra el grupo de los mantos del uno al nueve. Estos a su vez presentan variación por cada número dependiendo de la continuidad de las capas. La figura 5.253

muestra los espesores de mantos de carbón correspondiente al grupo de los superiores (cuyos extremos son el 4O y el 9K).

Los mantos inferiores, correspondientes al grupo que va del 3 al 1, no es contemplado dentro de la extracción, estos afloran hacia el Oeste del área de concesión.

A continuación, se muestra la columna estratigráfica del yacimiento explotado en la mina Paso Diablo. (Superintendencia de Geología, 2014)



5.16.4 Propiedades geomecánicas de los estratos

5.16.4.1 Ensayos de Corte Directo

Estos ensayos se realizaron agrupando las muestras según su litología. Posteriormente se analizaron por medio del programa ROCDATA mediante el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, donde los puntos en los gráficos son resultados en función del esfuerzo de corte y normal de cada etapa y las rectas representan la envolvente de falla del espécimen.

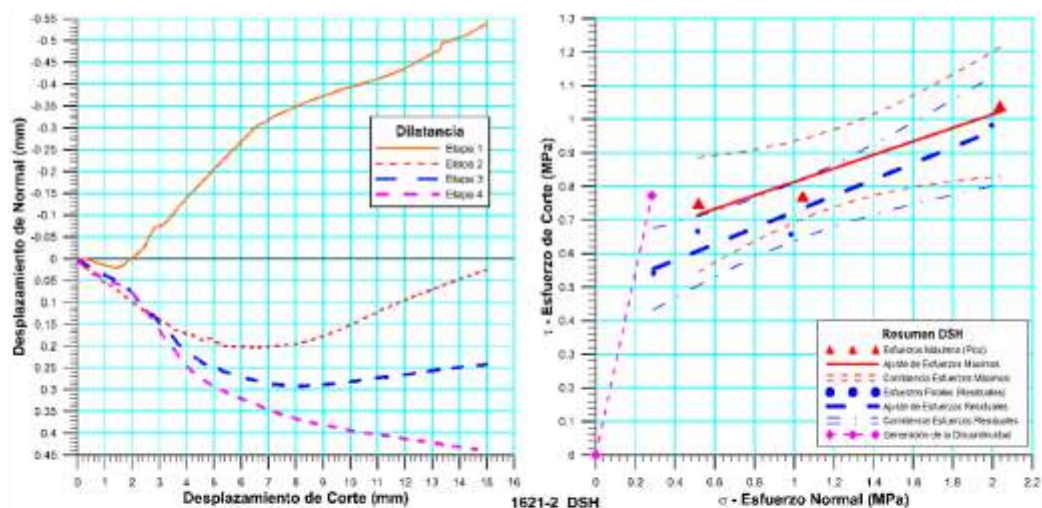
5.16.4.2 Limolitas

5.16.4.2.1 Espécimen 1621-2 – Limolitas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

 RIF: G-20009783-3	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7
	GUASARE – FOSA NORTE			
Cálculo: Tomás Sánchez	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 12-08-2015	Página 6 de 7 Espécimen: 1621-2_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.28324	0.77202	0.29108	0.54110
2	0.51746	0.75041	0.51289	0.66601
3	1.04431	0.77076	0.98430	0.65776
4	2.03717	1.04037	1.99559	0.98211



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = \tan(11.38) * \sigma + 0.61$	$\tau = \tan(13.51) * \sigma + 0.48$
Cohesión (c) (MPa)	0.61	0.48
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	11.38	13.51
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n) - (MPa)	1.20	0.95
Promedio Esfuerzo de Corte (τ) - (MPa)	0.83	0.71
Suma de los residuos cuadrados	0.01	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.05	0.10
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.84	0.93

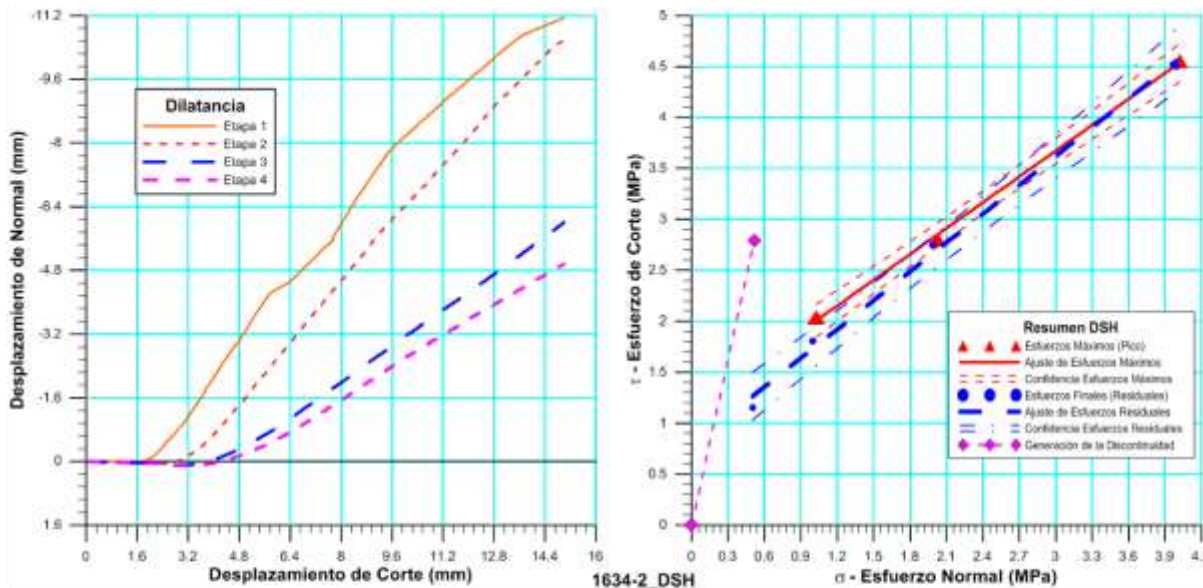
Figura 5.254. Espécimen 1621-2 – Limolitas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

5.16.4.2.2 Espécimen 1634-2 – Limolitas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

 RIF: G-20009783-3	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7
	GUASARE – FOSA NORTE			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7	
Tomás Sánchez	Miguel Castillejo	12-08-2015	Espécimen:1634-2_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados




Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.51510	2.79333	0.50319	1.14977
2	1.02832	2.03990	1.00058	1.80625
3	2.02428	2.79861	1.98381	2.75106
4	4.02053	4.55212	3.99060	4.50502



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = \tan(40.20) * \sigma + 1.14$	$\tau = \tan(43.33) * \sigma + 0.79$
Cohesión (c) (MPa)	1.14	0.79
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	40.20	43.33
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n) - (MPa)	2.36	1.87
Promedio Esfuerzo de Corte (τ) - (MPa)	3.05	2.55
Suma de los residuos cuadrados	0.73	0.03
Regresión Suma de los residuos cuadrados	2.68	6.35
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.79	1.00

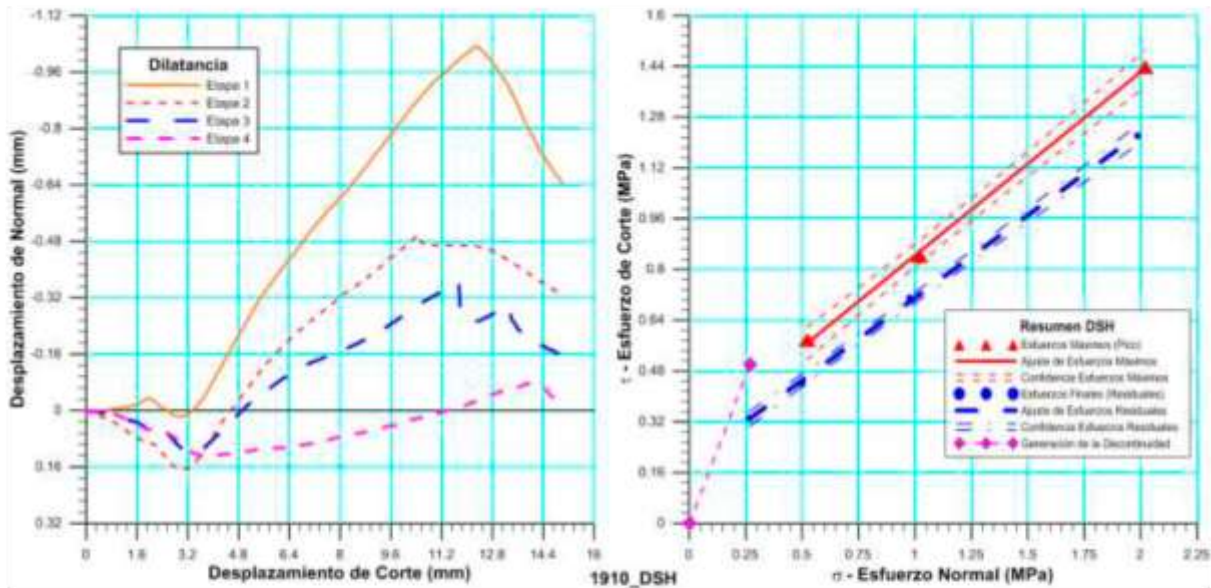
Figura 5.255. Espécimen 1634-2 – Limolitas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

5.16.4.2.1 Espécimen 1910 – Limolitas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

 RIF: G-20009783-3	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			  RIF: G-20000062-7
	GUASARE – FOSA NORTE			
Cálculo: Tomás Sánchez	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 12-08-2015	Página 6 de 7 Espécimen: 1910_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27	0.50	0.27	0.33
2	0.52	0.58	0.50	0.44
3	1.02	0.84	0.98	0.71
4	2.02	1.44	1.99	1.22



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = \tan(30.03) \cdot \sigma + 0.27$	$\tau = \tan(27.49) \cdot \sigma + 0.19$
Cohesión (c) (MPa)	0.27	0.19
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	30.03	27.49
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n) - (MPa)	1.19	0.93
Promedio Esfuerzo de Corte (τ) - (MPa)	0.84	0.68
Suma de los residuos cuadrados	0.00	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.54	1.14
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.99	1.00

Figura 5.256. Espécimen 1910 – Limolitas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

Tabla 5.51 Resumen de resultados de los ensayos 1621-2 y 1634-2

Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_n	τ	σ_n	τ	σ_{3max}	σ_{1max}	σ_{3min}	σ_{1min}
1	1621-2	1	0.283239	0.772022	0.291082	0.541100	-0.488783	1.055261	-0.250018	0.832181
2	1621-2	2	0.517464	0.750411	0.512894	0.666013	-0.232947	1.267875	-0.153119	1.178907
3	1621-2	3	1.044308	0.770759	0.984300	0.657755	0.273549	1.815067	0.326545	1.642055
4	1621-2	4	2.037167	1.040370	1.995592	0.982108	0.996798	3.077537	1.013484	2.977701
5	1634-2	1	0.515104	2.793332	0.503194	1.149771	-2.278227	3.308436	-0.646578	1.652965
6	1634-2	2	1.028322	2.039904	1.000582	1.806251	-1.011582	3.068227	-0.805669	2.806833
7	1634-2	3	2.024276	2.798607	1.983813	2.751058	-0.774331	4.822883	-0.767245	4.734871
8	1634-2	4	4.020532	4.552124	3.990600	4.505022	-0.531592	8.572656	-0.514423	8.495622

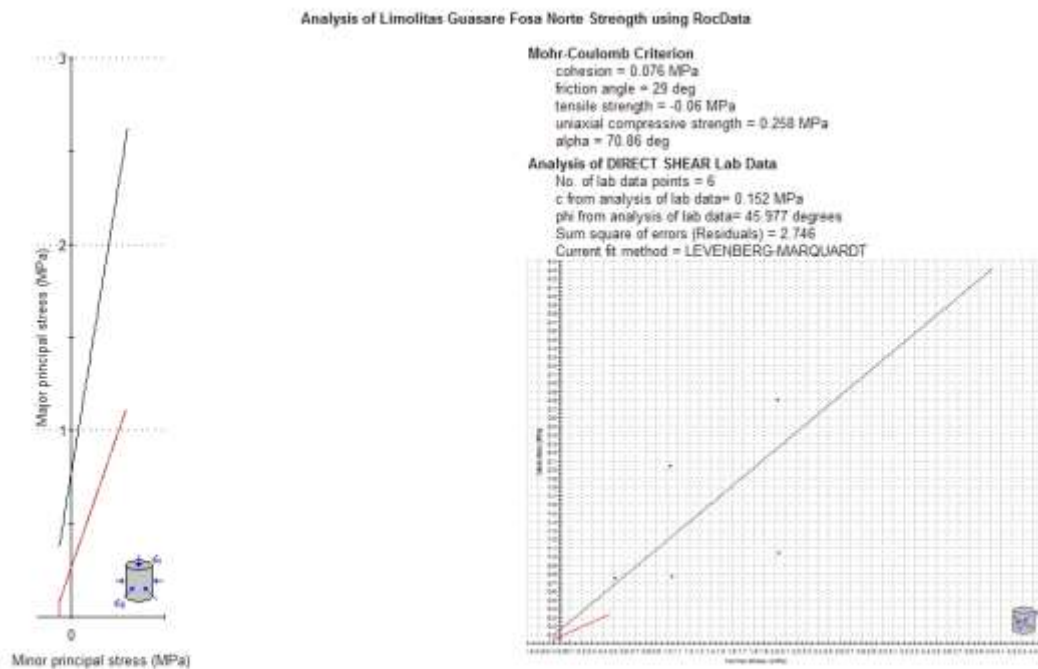


Figura 5.257 Envoltente de falla Limolitas Criterio de Mohr-Coulomb (valores pico)

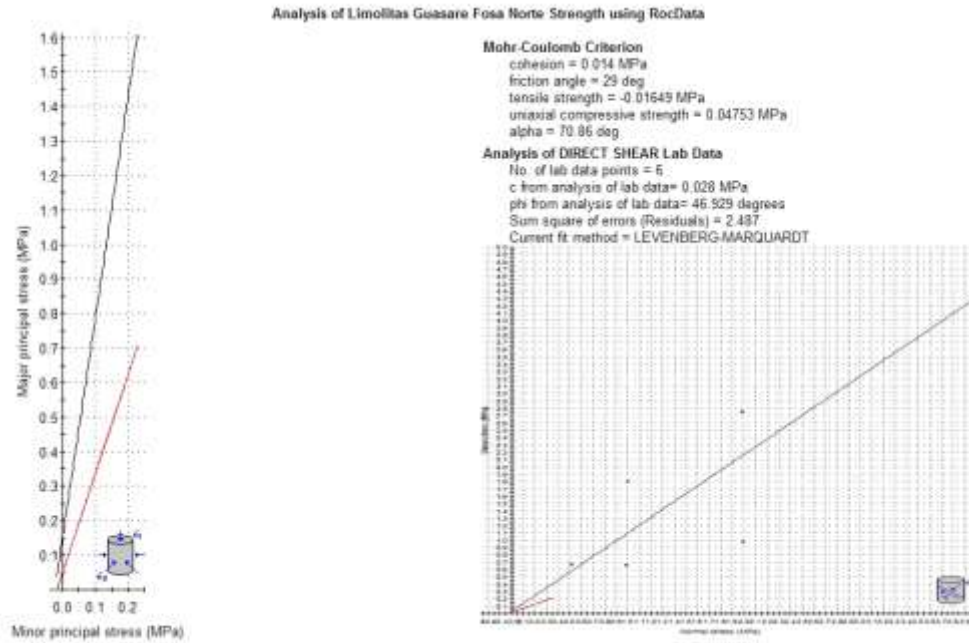




Figura 5.258 Envolvente de falla Limolitas Criterio de Mohr-Coulomb (valores residuales)

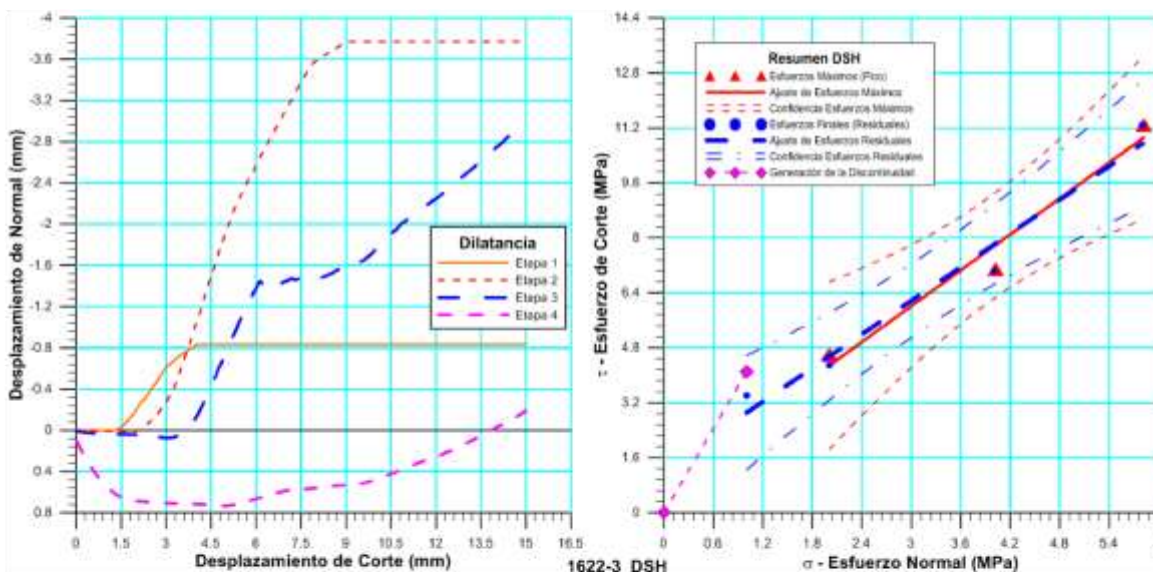
5.16.4.3 Areniscas

5.16.4.3.1 Espécimen 1622-3 – Areniscas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

 RIF: G-20009783-3	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7
	GUASARE – FOSA NORTE			
	Cálculo: Tomás Sánchez	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 12-08-2015		Página 6 de 7 Espécimen: 1622-3_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	1.00495	4.10609	1.00522	3.41645
2	2.00764	4.61234	2.01108	4.28908
3	4.01917	7.09393	4.00058	7.02948
4	5.81613	11.28200	5.80470	11.28200



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = \tan(60.13) * \sigma + 0.79$	$\tau = \tan(58.49) * \sigma + 1.28$
Cohesión (c) (MPa)	0.79	1.28
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	60.13	58.49
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n) - (MPa)	3.95	3.21
Promedio Esfuerzo de Corte (τ) - (MPa)	6.77	6.50
Suma de los residuos cuadrados	1.69	1.21
Regresión Suma de los residuos cuadrados	30.52	36.34
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.95	0.97

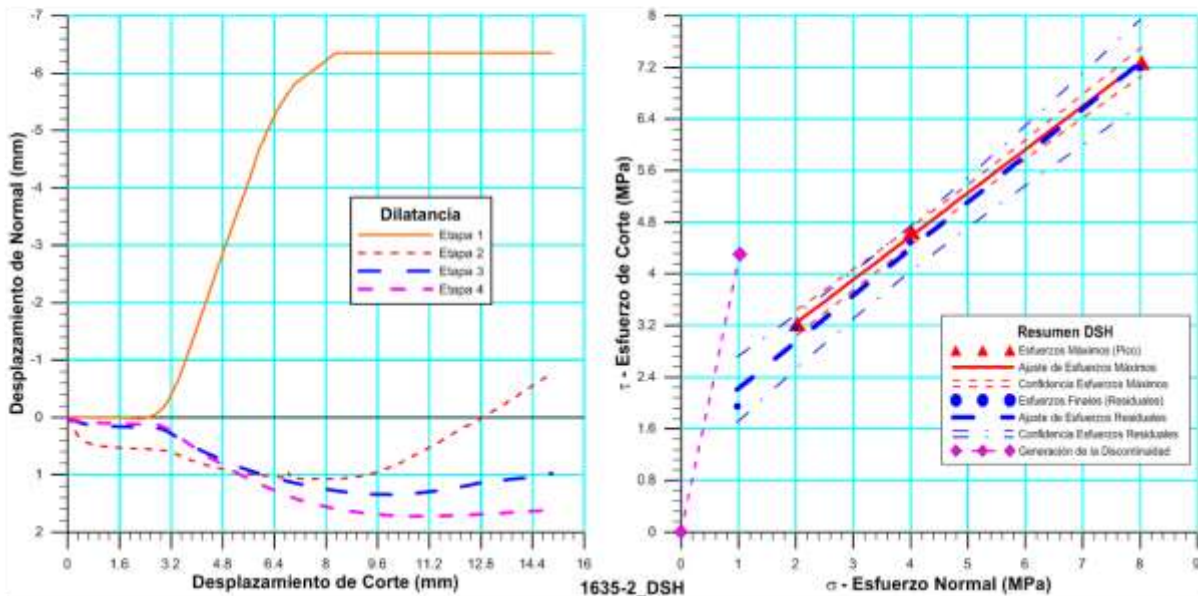
Figura 5.259. Espécimen 1622-3 – Areniscas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

5.16.4.3.1 Espécimen 1635-2 – Areniscas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

 <p>RIF: G-20009783-3</p>	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 <p>RIF: G-2000062-7</p>
	GUASARE – FOSA NORTE			
Cálculo: Tomás Sánchez	Revisión: Miguel Castillejo	Fecha: 12-08-2015	Página 6 de 7	
				Espécimen:1635-2_DSH

Cuadro Resumen de los Resultados



Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	1.02511	4.30087	0.97510	1.95332
2	2.02634	3.21385	1.99415	3.16977
3	4.02153	4.65566	3.98814	4.48435
4	8.01813	7.26456	7.99515	7.19688



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = \tan(33.93) * \sigma + 1.89$	$\tau = \tan(35.82) * \sigma + 1.50$
Cohesión (c) (MPa)	1.89	1.50
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	33.93	35.82
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n) - (MPa)	4.69	3.74
Promedio Esfuerzo de Corte (τ) - (MPa)	4.86	4.20
Suma de los residuos cuadrados	1.45	0.13
Regresión Suma de los residuos cuadrados	7.40	15.04
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.84	0.99

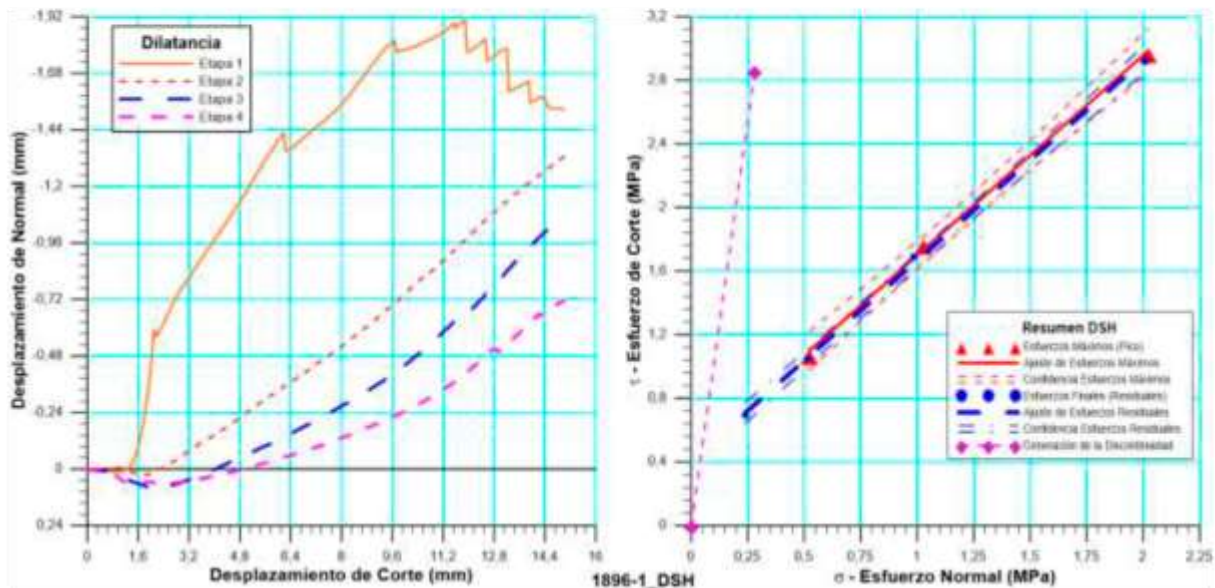
Figura 5.260 Espécimen 1635-2 – Areniscas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

5.16.4.3.1 Espécimen 1896 – Areniscas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

 RIF: G-20009783-3	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7
	GUASARE – FOSA NORTE			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7	
Tomás Sánchez	Miguel Castillejo	12-08-2015	Espécimen:1896-1_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.28	2.86	0.24	0.69
2	0.52	1.07	0.52	1.05
3	1.03	1.77	0.99	1.69
4	2.02	2.97	2.01	2.92



VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = \tan\{51.54\} * \sigma + 0.44$	$\tau = \tan\{51.56\} * \sigma + 0.41$
Cohesión (c) (MPa)	0.44	0.41
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	51.54	51.56
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n) - (MPa)	1.19	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ) - (MPa)	2.17	1.59
Suma de los residuos cuadrados	2.10	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.39	2.87
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.16	1.00

Figura 5.261 Espécimen 1896 – Areniscas – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

Tabla 5.52 Resumen de resultados del ensayo 1622-3 y 1635-2

Número	Muestra	Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)		Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
			σ_x	τ	σ_x	τ	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}
1	1622-3	1	1.004946	4.106094	1.005219	3.416451	-3.101148	5.111040	-2.411232	4.421670
2	1622-3	2	2.007636	4.612343	2.011079	4.289084	-2.604708	6.619979	-2.278005	6.300163
3	1622-3	3	4.019167	7.093934	4.000581	7.029476	-3.074768	11.113101	-3.028895	11.030057
4	1622-3	4	5.816131	11.282002	5.804705	11.282002	-5.465871	17.098133	-5.477297	17.086707
5	1635-2	1	1.025107	4.300868	0.975096	1.953323	-3.275761	5.325974	-0.978227	2.928419
6	1635-2	2	2.026336	3.213851	1.994150	3.169774	-1.187516	5.240187	-1.175624	5.163923
7	1635-2	3	4.021528	4.655657	3.988139	4.484353	-0.634129	8.677185	-0.496214	8.472492
8	1635-2	4	8.018126	7.264558	7.995151	7.196877	0.753567	15.282684	0.798274	15.192027

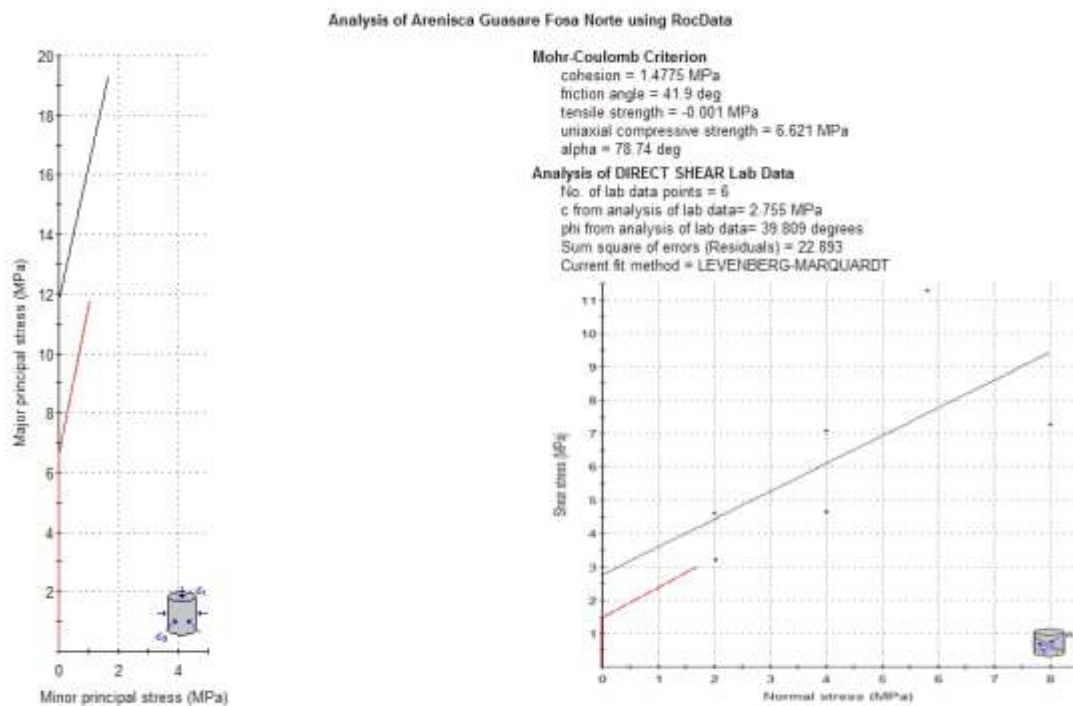


Figura 5.262 Envoltura de falla Areniscas Criterio de Mohr-Coulomb (valores pico)

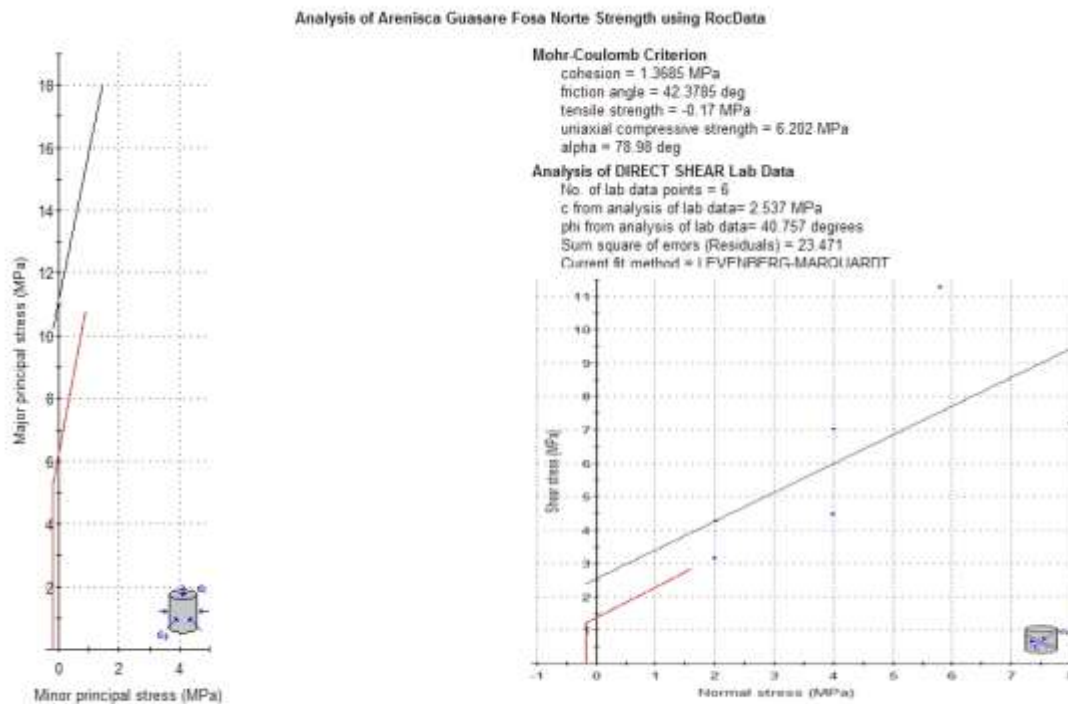



Figura 5.263 Envolvente de falla Areniscas Criterio de Mohr-Coulomb (valores residuales)

Los datos obtenidos fueron procesados mediante el criterio de Mohr-Coulomb, generando como resultado parámetros geomecánicos de cohesión entre 0,014 y 0,076 MPa y ángulo de fricción competentes, de 29º Limolitas, para Arenisca se obtuvieron parámetros de cohesión comprendidos entre 1,37 y 1,48 MPa y ángulo de fricción interna entre 41,90º y 42,38º, siendo las areniscas más competentes que las limolitas, observándose en el comportamiento de los parámetros cohesión y ángulo de fricción obtenidos del procesamiento de los datos de las muestras.

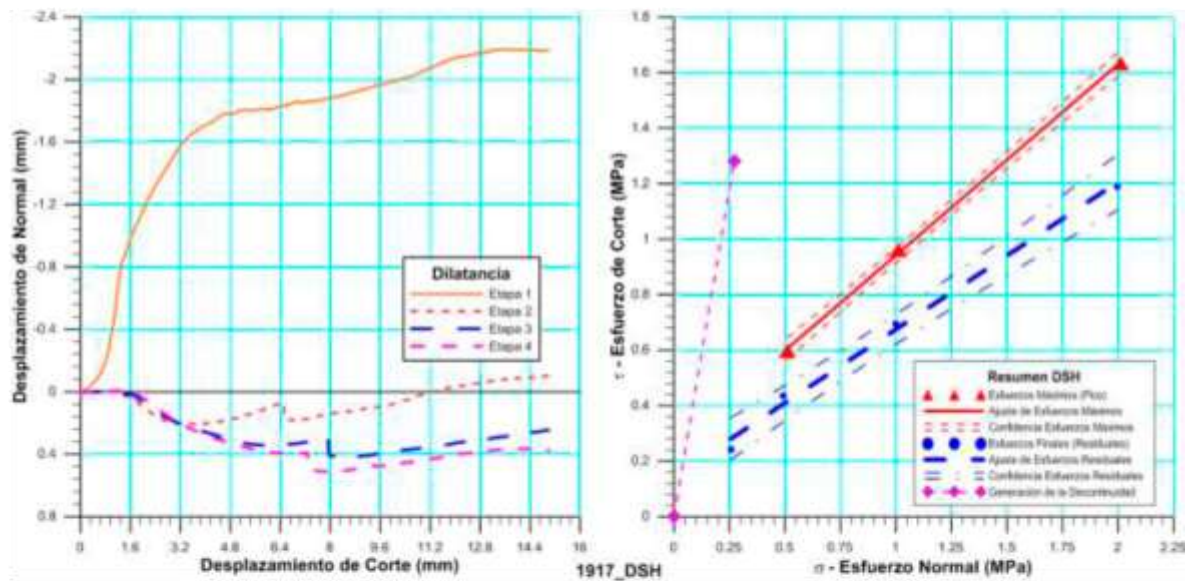
5.16.4.4 Carbones

5.16.4.4.1 Espécimen 1917 – Carbón – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

 RIF: G-20009783-3	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-20000062-7
	GUASARE – FOSA NORTE			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7	
Tomás Sánchez	Miguel Castillejo	12-08-2015	Espécimen:1917_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27	1.28	0.26	0.24
2	0.51	0.60	0.49	0.44
3	1.01	0.96	1.00	0.70
4	2.01	1.63	2.00	1.16




Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = \tan(34.53) \cdot \sigma + 0.25$	$\tau = \tan(27.91) \cdot \sigma + 0.14$
Cohesión (c) (MPa)	0.25	0.14
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	34.53	27.91
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n) - (MPa)	1.18	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ) - (MPa)	1.12	0.064
Suma de los residuos cuadrados	0.35	0.00
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.24	0.50
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.41	0.99

Figura 5.264. Espécimen 1917 – Carbón – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

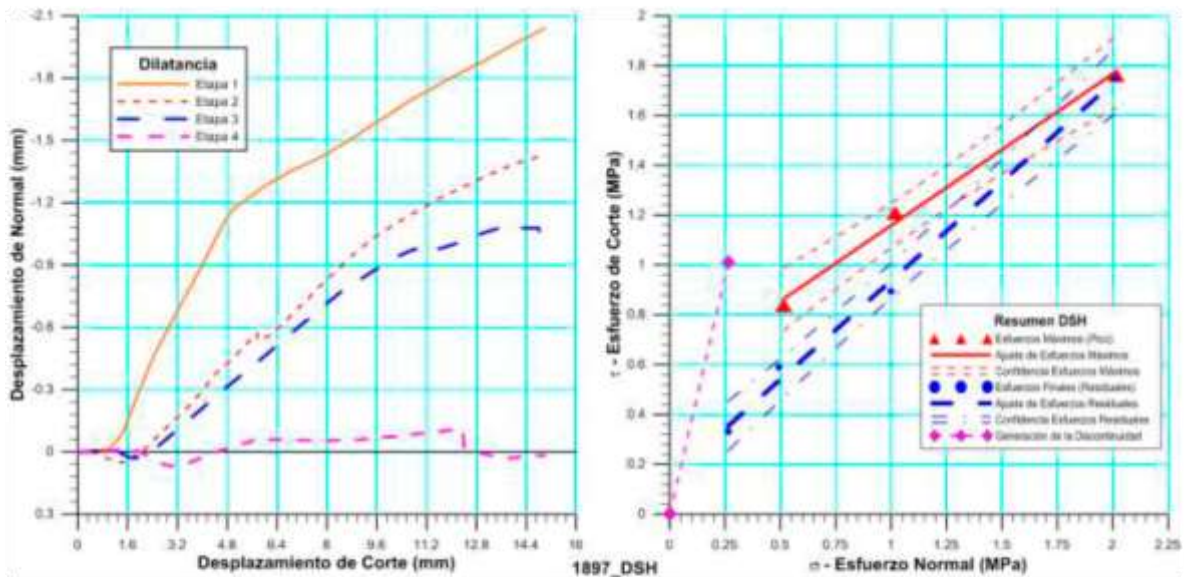
5.16.4.5 Arenisca-Limolita

5.16.4.5.1 Espécimen 1897 – Arenisca-Limolita – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

 RIF: G-20009783-3	LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS ENSAYO CORTE DIRECTO – ESTÁTICO (CNL)			 RIF: G-2000062-7
	GUASARE – FOSA NORTE			
Cálculo:	Revisión:	Fecha:	Página 6 de 7	
Tomás Sánchez	Miguel Castillejo	12-08-2015	Espécimen:1897_DSH	

Cuadro Resumen de los Resultados

Datos del Espécimen Punto	Máximo (Pico)		Mínimo (Residual)	
	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
1	0.27	1.01	0.26	0.33
2	0.51	0.84	0.49	0.59
3	1.02	1.21	1.00	0.90
4	2.01	1.76	2.01	1.75



Resultados de las curvas de ajuste del punto 2 al punto 4 (DISCONTINUIDAD)		
VARIABLE	Máximo (Pico)	Mínimo (Residual)
Tipo de ajuste	Lineal	Lineal
Ecuación de la recta	$\tau = \tan(31.30) \cdot \sigma + 0.55$	$\tau = \tan(38.42) \cdot \sigma + 0.14$
Cohesión (c) (MPa)	0.55	0.14
Ángulo de Fricción (ϕ), (grados)	31.30	38.42
Número de puntos	4	4
Promedio Esfuerzo Normal (σ_n) - (MPa)	1.18	0.94
Promedio Esfuerzo de Corte (τ) - (MPa)	1.20	0.89
Suma de los residuos cuadrados	0.05	0.01
Regresión Suma de los residuos cuadrados	0.44	1.14
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.91	1.00

Figura 5.265. Espécimen 1897 – Arenisca-Limolita – Fosa Norte – Guasare, estado Zulia

6 Conclusiones **Equation Section (Next)**

1. En el presente trabajo se realizan y reportan un conjunto de ensayos de Corte Directo, realizados en rocas de distintas zonas de Venezuela, correspondientes a diez y seis (16) Casos de Estudio, para un total de ciento setenta y una (171) muestras ensayadas, los cuales permiten generar una Base de Datos que incluye valores de referencia de los parámetros de resistencia al corte. Así mismo, también se reportan dos Casos de Estudio sobre muestras de cemento petrolero con propiedades térmicas, para su uso como cementante en pozos donde se tiene previsto utilizar el proceso de estimulación térmica para el recobro del petróleo, ubicados en la Faja Petrolífera del Orinoco. Esta es una aplicación práctica inmediata del trabajo realizado.
2. En lo referente al Estado del Arte para ensayos de corte en muestras de roca con discontinuidades, la norma aplicada es la ISRM y a partir del año 2014 se aplica la norma del ISRM modificada, que contempla los ensayos de Ensayo de Rigidez Normal (Constant Normal Stiffness, CNS).
3. En la metodología existente se presentan dos alternativas de ejecución del ensayo de corte, a) una muestra sometida a varias etapas simples; b) una muestra de roca sometida a un único ensayo, denominado multietapas.
4. Se realizó una revisión extensa de los conceptos de discontinuidades, así como su levantamiento en campo.
5. De los criterios de resistencia al corte en discontinuidades, se concluye que el uso del Criterio de Mohr-Coulomb, es el más apropiado, ya que los ensayos deben realizarse sobre discontinuidades abiertas. Por esta razón, las muestras no tienen ninguna resistencia a la tracción.
6. Siempre que se realice la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos, ya sea para corte o para otros ensayos, estos no deben evaluarse como un promedio de los valores máximos y mínimos. Debe realizarse siempre la envolvente de falla (Criterio de

- Mohr-Coulomb) ya que es la única manera de analizar y evaluar la globalidad de los ensayos.
7. Los Ensayos de Corte deben analizarse de manera independiente con el criterio de Mohr-Coulomb, y los Ensayos de Compresión Simple, Brasilerio y Triaxial deben analizarse de manera separada. Una vez que se analicen independientemente, se podrán obtener conclusiones y predicciones del comportamiento geomecánico del macizo rocoso, esto es debido porque en el ensayo de corte este se realiza sobre una discontinuidad en particular que se encuentra orientada con el plano de aplicación del esfuerzo de corte, y en el resto de los ensayos estas discontinuidades pueden tener cualquier disposición en la muestra, adicionalmente a esto el tipo de carga aplicada y las condiciones de borde particulares de cada ensayo.
 8. De acuerdo al grado de importancia de la obra, se deberán realizar un número suficiente de ensayos, que permitan la caracterización del macizo rocoso. En caso de que la obra abarque una extensión importante, debe sectorizarse el macizo rocoso. Es decir, en caso de una presa, por la orientación de los taludes al valle y por tipo de roca; en el caso de túneles por cambios de litologías presentes en las perforaciones exploratorias, a fin de garantizar los parámetros geomecánicos correctos para el análisis de las diferentes condiciones geométricas que se puedan presentar.
 9. **Un ensayo nunca debe ser reemplazado por una correlación: el ensayo es el comportamiento mas ajustado y realísta del comportamiento de la roca.**
 10. Cuando se realicen ensayos de corte sobre muestras de roca intacta, es decir, sin una discontinuidad presente, deben realizarse como mínimo cuatro (4) puntos dentro del ensayo, ya que **“el primero corresponde a la generación de la discontinuidad”** y el mismo no debe tomarse en cuenta en la interpretación del ensayo de corte, ya que conducirá a una interpretación errada de los resultados.
 11. Al analizar los parámetros de resistencia de las discontinuidades, se puede concluir:

-
- a. Cada tipo de roca ígnea, sedimentaria y metamórfica tiene un comportamiento particular que la caracteriza
 - b. En el caso de rocas sedimentarias, los planos de discontinuidad preferenciales serán los de la estratificación
 - c. En las rocas metamórficas los planos de discontinuidad preferenciales serán los que corresponden a la foliación
 - d. Las rocas ígneas no tendrán ningún plano preferencial. la discontinuidad se generará sobre planos de debilidad causados por su estructura cristalina, y se recomienda que los ensayos se realicen sobre muestras que presenten discontinuidades naturales, ya que se observó un comportamiento muy errático en los ensayos realizados sobre las muestras de El Callao, Mina Colombia
 - e. En el presente estudio no se realizaron ensayos sobre superficies de fallas geológicas
 - f. Los resultados obtenidos para cada Caso de Estudio no deben ser empleados sin criterio ingenieril. Debe verificarse las condiciones particulares de las rocas presentes y realizar ensayos de corte particulares, ya que cualquier otro enfoque puede llevar en el futuro a daños irreparables. Las propiedades de las rocas no pueden extrapolarse de un sitio a otro.
 - g. Del estudio realizado sobre las muestras del río Cuira, se observa que se realizaron ensayos sobre muestras con una superficie lisa generada por corte con sierra de diamante y otras con rugosidades naturales; de los ensayos realizados sobre caras lisas pero no pulidas se puede concluir que la cohesión en el ensayo es despreciable, siendo la resistencia al corte controlada por la carga normal, sin aportes por su rugosidad. De los ensayos realizados con caras rugosas, para que se produzca el corte en la discontinuidad, el esfuerzo al corte debe vencer primero la resistencia que opone al desplazamiento la discontinuidad. Cuanto más rugosa sea la discontinuidad, mayor será el esfuerzo necesario para que ocurra el

desplazamiento por corte. Esto va asociado a la dilatancia: mayor rugosidad mayor dilatancia y viceversa. En este caso del río Cuira, existe una falla geológica de importancia, cercana al cauce del río y los estribos de la presa. Además, las laderas del vaso son rocas distintas producto de la falla. También la presencia de la falla en sus cercanías genera un fracturamiento mayor, incrementado por la descompresión de roca, debido a las excavaciones.

- h. Del estudio de las arcillas duras de la cuenca del río Guarenas, puso observarse que en presencia de agua (Slake Durability – Método de la Jarra) las muestras se disgregan completamente hasta llegar a barro. Mientras se mantengan en condición seca se comportan como una roca blanda.
 - i. Es importante condicionar a priori el uso de la base de datos en lo referente a los resultados de los ensayos de corte para evaluar la estabilidad de taludes o las excavaciones subterráneas. Es decir, para la estabilidad de taludes se concluye que se debe emplear el Ensayo de Carga Normal (Constant Normal Load, CNL) y para excavaciones subterráneas, se debe emplear el ensayo de Rigidez Normal Constante (Constant Normal Stiffness, CNS).
 - j. El Ensayo de Ensayo de Carga Normal (Constant Normal Load, CNL), que consiste en la aplicación normal de una carga, que permite que exista un movimiento vertical considerable (dilatancia) en las caras de la superficie, sin que se destruya la rugosidad, el bloque puede remontar la rugosidad de la discontinuidad y deslizarse.
12. El Ensayo de Rigidez Normal (Constant Normal Stiffness, CNS), a diferencia del ensayo de Carga Normal Constante (CNL), la carga está impuesta por la rigidez de la roca. Es decir que para que el bloque pueda moverse, se debe pulir toda la rugosidad de la discontinuidad para que pueda salir del entorno de la excavación, ya que los bloques circundantes no tiene la posibilidad de moverse en las direcciones perpendiculares a las caras del bloque que va a caer. La única manera de que el bloque caiga sin que este se vea afectado por las rugosidades presentes en la discontinuidad, es que el bloque que controla toda la estabilidad de la excavación (bloque clave) se desprenda y como es el bloque que evita el

movimiento de los bloques circundantes, es importante realizar el estudio de las discontinuidades presentes en la excavación y anclarlo con medios mecánicos para garantizar la estabilidad global de toda la excavación. Se recomienda, en este caso, consultar (Goodman, *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*, 1976), Fuente especificada no válida., Fuente especificada no válida., entre otros. Como resultado de haberse realizado el conjunto de ensayos que permitieron crear una Base de Datos confiables, robustos y ahora con su publicación, se pone a disposición de los usuarios una herramienta que permite disponer de valores de referencia **antes de ejecutar trabajos futuros**.

13. Todos los ensayos de corte en roca realizados en el presente trabajo, se ejecutaron con la metodología de la misma muestra sometida al ensayo en varias etapas simples.
14. Todos los reportes de los ensayos realizados en cada una de las zonas en estudio se presentan como archivos PDF, en el CD Anexo. Esto permitirá la consulta de otros investigadores durante la aplicación práctica de los procedimientos.

7 Recomendaciones **Equation Section (Next)**

1. Se recomienda utilizar la Base de Datos, ahora disponible, para obtener parámetros de referencia **antes** de ejecutar futuros trabajos.
2. Como aplicación inmediata de este Trabajo, se recomienda utilizar los procedimientos presentados, en la evaluación continua de los cementos que serán empleados en los pozos con estimulación térmica de la Faja Petrolífera del Orinoco y de otros yacimientos.
3. Se recomienda, para la ejecución de futuros trabajos, evaluar la adherencia acero-cemento para su aplicación en revestidores en el área petrolera.
4. Como resultado de la evaluación del Estado del Arte y la comparación con la norma ASTM, se recomienda el uso de la norma ISRM 2014 para la realización de ensayos de corte en roca la cual abarca todos los casos (CNL) y (CNS).
5. Se recomienda realizar un estudio particular de los ensayos realizados de corte directo, para correlacionar el primer valor de corte (generación de la discontinuidad) con los resultados obtenidos en otros ensayos (Compresión Simple, Triaxial, Brasilerro).
6. Se recomienda que los ensayos de corte en rocas ígneas sean realizados sobre discontinuidades existentes, como es el caso de las rocas ígneas, ya que específicamente se observó un comportamiento muy errático en los ensayos realizados sobre las muestras de El Callao, Mina Colombia, Estado Bolívar.
7. Se recomienda la medición de la rugosidad presente en las discontinuidades, para luego concluir como afecta su amplitud en el desarrollo de la resistencia al corte.
8. Se recomienda realizar ensayos de corte sobre discontinuidades que tengan puentes de roca y comparar los resultados sobre la misma discontinuidad sin puentes de roca para concluir sobre como estos puentes de roca afectan los resultados del ensayo.
9. Se recomienda, seleccionar el método de ensayo pertinente de acuerdo a su aplicación (CNL o CNS).
10. Se recomienda realizar ensayos de corte directo en rocas con discontinuidades, aplicando durante el ensayo cargas cíclicas, que simulen el efecto sísmico.
11. Se recomienda, a futuro, realizar ensayos de corte directo en rocas incorporando agua en la superficie de corte, para determinar como afecta el agua los resultados del ensayo sobre caras lisas y rugosas.

12. Se recomienda realizar ensayos de corte directo con la modalidad de multietapa para la misma muestra, es decir, muestras suficientemente grandes, en las cuales en una sola etapa se apliquen las diferentes cargas del ensayo.
13. Se recomienda, si es posible, realizar el ensayo. **“Una correlación no sustituye al ensayo”**.

8 Bibliografía **Equation Section (Next)**

Alvarez A, J. R., & Mastrodoménico, P. M. (1984). *Plan de explotación de una arenera situada en río Tuy, sector Araguaita distrito Acevedo, Estado Miranda*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Alvarez R, M. A., & Rodríguez M, L. A. (2008). *Caracterización geomecánica para el proyecto del sistema subterráneo Metro de Caracas. Línea 5, tramo Zona Rental de la UCV-Bello Monte*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

American Society for Testing and Materials. (s.f.). Annual Book of ASTM Standards. En ASTM, *ASTM D2938. Standard test methods for unconfined compressive strength of intact rock core specimens* (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

American Society for Testing and Materials. (s.f.). ASTM D5607. Standard test methods for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens. En ASTM, *Annual Book of ASTM Standards* (Vol. 04.08). Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

Aranguren Otero, F. A., & Lacruz Paredes, K. D. (2016). *Caracterización mecánica de un sistema cementante alternativo aditivado con arcillas nacionales para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a inyección de vapor*. Tesis de grado - Tutor Académico: Prof. Miguel Castillejo. Cotutor: Prof. Richard Muñoz. Tutor Industrial: MSc. Vannesa Bastos, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Ingeniería de Petróleo, Caraccas.

Araujo G, j. M. (2005). *Estudio geológico para la ubicación de un relleno sanitario en Edo. Nueva Esparta (Isla de Margarita)*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

-
- Arias, F. G. (2004). *El Proyecto de Investigación. Introducción a la metodología científica* (4 ed.). Caracas, Venezuela: Episteme.
- ASTM. (1971). *ASTM (1971) Suggested Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials - ASTM Designation C496-71/1971*. ASTM (1971) Suggested : American Society Testing Materials.
- ASTM. (1986). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens - ASTM Designation C2938-86/1986*. American Society Testing Materials.
- ASTM. (2008). *ASTM – D5607 – 08 Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2012). *ASTM – D4554 – 12 Standard Test Method for In Situ Determination of Direct Shear Strength of Rock Discontinuities*. West Conshohocken: ASTM International.
- Ayala Carcedo, F. J., Andreu Posse, F. J., Fe Marques, M., Ferrer Gijon, m., De Simón Gil, A., Fernández Llana, I., . . . Cienfuegos Ruiz-Morote, F. J. (1987). *Manual de taludes*. Madrid: Instituto Geológico Minero de España.
- Balazs, V. (1998). Shear failure in rock using different constant normal load.
- Bandis, S. C. (1990). Mechanical properties of rock joints. *Proc. Int. Soc. Rock Mech. Symp.on Rock Joints*, (págs. 125-140). Loen, Noruega.
- Bandis, S. C. (1993). Engineering properties and characterization of rock discontinuities. En J. A. Hudson, & J. A. Hudson (Ed.), *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects* (págs. 155-183). Oxford: Pergamon Press.
- Bandis, S. C., Lumsden, A. C., & Barton, N. R. (1981). Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. *Int. J. Rock Mec. Min. Sci. & Geotechnical Abstr*, 18, 1-21.
- Barbieri M, J. L. (2003). *Evaluación de estabilidad a corto y largo plazo de taludes en desechos sólidos bajo distintas condiciones de cargas (caso talud dique sur) relleno sanitario La*

-
- Bonanza, estado Miranda*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Barrientos Gil, J. A. (2007). *Evaluación de vías y drenajes con fines de mejoramiento del rendimiento de operaciones mineras para las canteras de arcilla y caliza en Holcim (Venezuela) C.A. planta Cumarebo, estado Falcón*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7(4), 287–332.
- Barton, N. (1974). Rock slope performance as revealed by a physical joint model. *Proc. of 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech. Advances in rock mechanics, IIB*, págs. 765-773. Denver.
- Barton, N. (1975). Classification of rock masses to distinguish self supporting tunnels from those requiring support. *Proc. of Soc. of Min. Engrs Meeting*. Salt Lake City.
- Barton, N. (1980). Discussion - Shear Strength of Rock Joints, Quarried Rocks and Gravels. *Point of Contact. Euromech*, (pág. 133). Oxford.
- Barton, N. R. (1970). A low strength material for simulation of the mechanical properties of intact rock in rock mechanics models. *Proc. 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, (pág. 12). Belgrade.
- Barton, N. R. (1971). *A model study of the behaviour of steep excavated rock slopes*. London: Univ. of London.
- Barton, N. R. (1971). A relationship between joint roughness and joint shear strength. *Symposium Soc. Internat. Mécanique des Roches*, (pág. 22). Nancy.
- Barton, N. R. (1971). Estimation of in situ shear strength from back analysis of failed rock slopes. *Proc. of Symp. of Int. Soc. Rock Mech. Rock Fracture*, (pág. 14). Nancy.
- Barton, N. R. (1971). Progressive failure of excavated rock slopes. *13th US Symp. of Rock Mech. Stability of rock slopes*, (págs. 139-170). Illinois.
-

-
- Barton, N. R. (1972). A model study of air transport from underground openings situated below groundwater level. *Proc. of Symp. of Int. Soc. Rock Mech., Percolation through fissured rock*, (pág. 20). Stuttgart.
- Barton, N. R. (1972). A model study of rock joint deformation. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 9(5), 579-602.
- Barton, N. R. (1973). A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. (T. Press, Ed.) *Fjellsprengningsteknikk*,, 19.1-19.38.
- Barton, N. R. (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7, 287-332.
- Barton, N. R. (1973). Review of a new shear-strength criterio for rock joint. *Engineering Geology*, 7, 287-332.
- Barton, N. R. (1973). Review of New Sheaf Strength Criterion for Rock Joints. *Engineering Geology*, 7, 287-322.
- Barton, N. R. (1974). Estimating the shear strength of rock joints. *Proc. of 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech. Advances in rock mechanics, IIA*, págs. 219-220. Denver.
- Barton, N. R. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr*, 13(9), 255-279.
- Barton, N. R. (1980). Discussion of paper by J. Krahn and N.R. Morgestern "The ultimate frictional resistance of rock discontinuities". *Int. J. Rock Mech, Min. Sci. & Geomech. Abstr*, 16, 127-133 (1979). *Int. J. Rock Mech, Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 17, 75-78.
- Barton, N. R. (1981). Shear strength investigations for surface mining. Vancouver.
- Barton, N. R. (1981). Some size dependent properties of joint and faults. *Geophysical Research Letters*, 6(7), 667-670.

-
- Barton, N. R. (1984). Effects of Rock Mass Deformations on Tunnel Performance in Seismic regions. *Proc. Symp Adv. Tunnel. Technol. and Subsurf. Use. 4*, págs. 89-99. Caracas: Pergamon Press.
- Barton, N. R. (2000). *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock* (1 ed.). Taylor & Francis.
- Barton, N. R., & Bandis, S. (1982). Effects of block size on the shear behavior of jointed rock - keynote Lecture. *23rd US Symposium, Rock Mechanics, caverns and Pressure Shaft*, (págs. 739-760). Berkeley, California.
- Barton, N. R., & Bandis, S. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. En N. R. Barton, & O. Stephanson (Ed.), *Rock joints, proc. int. symp. on rock joints, Loen, Norway* (págs. 603-610). Rotterdam: Balkema.
- Barton, N. R., & Bandis, S. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. *Proceedings of the International Conference on Rock Joints*, (págs. 603-610). Leon, Norway. doi:10.1007/s41062-016-0011-1
- Barton, N. R., & Kjaernsli, B. (1981). Shear Strength of Rockfill. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, 107*(GT7), 873-891.
- Barton, N. R., & Lingle, R. (1982). Rock Mass Characterization methods for Nuclear Waste Repositories in Jointed Rock. *ISRM Symposium*, (pág. 16). Zurich.
- Barton, N. R., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics, 6*(4), 189-236.
- Barton, N., & Bandis, S. (1980). Some effects of scale on the shear strength of joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 17, 69-73.
- Barton, N., & Bandis, S. (1980). Technical note - Some effects of scale on the shear strength joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics, Abstr 17*, 69-73.
- Barton, N., & Bandis, S. (1982). Effects of block size on the shear behavior of jointed rock. *Proceedings of the 23rd US Symposium on Rock* (págs. 769-1760). Berkeley, California: Society Mining Engineering.

-
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*(10), 1-54.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189-236.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1977). Estimation of support requirements for underground excavations. *Proc. of 16th Symp. on Design Methods in Rock Mechanics*, (págs. 163-177). Minnesota.
- Barton, N., Løset, F., Lien, R., & Lunde, J. (1980). Application of the Q system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations. *Int. Conf. on Sub surface Space*, 2, págs. 553-561. Rockstore, Stockholm.
- Bastardo M, A. E. (2005). *Diseño de alternativas de plataformas para vías férreas del distrito ferrífero Piar CVG-Ferrominera Orinoco C.A., Ciudad Piar, estado Bolívar*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Belem, T., Mountaka, S., & Homand, F. (2004). Generalized directional peak shear stress criterion for dilatant rock joints. *57th Canadian Geotechnical Conference & 5th Joint CGS/IAH-CNC Conference*, (pág. 8). Quebec.
- Bermúdez A, N. R. (2016). *Propuesta para reducción de tamaño de minerales no metálicos: Caso Charnockita, Cerro La Danta*. Tesis de Grado - Tutora Prof. Katherine Silva - Cotutor Prof. Miguel Castillejo, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- Bernal G, O. F., & Cheick Abuchain, J. A. (2011). *Caracterización geológica geotécnica de muestras de roca, del tramo ferroviario La Encrucijada Cúa (estados Aragua y Miranda)*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

-
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. United States: John Wiley & Sons.
- Boada, A. V. (2008). *Análisis de esfuerzos del comportamiento del macizo rocoso debido a la excavación de los túneles del ferrocarril SanJuan-Los Flores, mediante el método de los elementos finitos en el municipio Juan Germán Roscio del estado Guárico*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Bong-Ki, S., Chung-In, L., Yeon-Jun, P., & Youn-Kyou, L. (2006). *Effect of Boundary Conditions on Shear Behaviour of Rock Joints around Tunnel*. Elsevier Science Limited.
- Brady, B. H., & Brown, E. T. (2005). *Rock Mechanics for underground mining* (3 ed.). Springer.
- Bravo S, J. A., & Villafañe P, D. M. (2016). *Caracterización mecánica de un sistema cementante convencional con sílice para la cementación de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco candidatos a inyección de vapor*. Tesis de grado - Tutor Académico: Prof. Miguel Castillejo. Cotutor: Prof. Richard Muñoz. Tutor Industrial: MSc. Vannesa Bastos, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Ingeniería de Petróleo, Caracas.
- Brown, E. T., Bray, J. W., Hoek, E., Cundall, P. A., Brady, B. G., Shin, G. H., & Goodman, R. E. (1987). *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*. Londres, Reino Unido: Imperial College of Science & Technology.
- Carreño O, J. C. (2008). *Diseño de escombreras de la mina de roca fosfática (concesión Riecito), municipio Jacura, estado Falcón*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Castillejo Cans, M. A. (1981). *Análisis geomecánico-numérico de los dos tuneles a ser construidos en el cerro La Planicie, Caracas, Distrito Federal*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

-
- Castillejo Cans, M. A. (1993). *Análisis Comparativo de los Métodos de Estabilidad de Taludes y su Control. Partel. - El Macizo Rocosó y sus características*. Trabajo de Ascenso a la Categoría de Prof. Agregado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología Minas y Geofísica - Departamento de Minas, Caracas.
- Castillejo Cans, M. A. (2003). *Apuntes Cálculos Geomineros*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Castillejo Cans, M. A. (2004). *Estabilidad de taludes en macizos de residuos sólidos urbanos*. Facultad de Ingeniería - Escuela de geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Castillejo Cans, M. A., & Torrealba, G. (1981). *Optimización de la geometría de una excavación a cielo abierto y procedimiento operacional*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad central de venezuela.
- Castillejo Cnas, M. A. (2000). *La geología, ciencia de la tierra*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Castro B, J. R. (1983). *Seguridad en ambientes mineros*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Chacón C, A. A., & Guevara B, W. J. (2008). *Caracterización geomecánica y modelado 3D de los macizos rocosos correspondientes al desarrollo de las obras subterráneas del sistema Caracas-Guarenas-Guatire*. Trabajo Especial de Grados - Tutor Académico Prof. Armando Díaz Quintero, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.

-
- Chern, J., Shiao, F., & Yu, C. (1998). An empirical safety criterion for tunnel construction. En *Proc. Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering* (págs. 222-227). Taipei: Balkema.
- Cienfuegos - Consultores y Gerencia de Proyectos, C.A. (2015). *Caracterización inicial / preliminar y respectiva evaluación de los materiales producto de las excavaciones del Túnel Baralt*. Privado - Prolongación de la Avenida Boyacá (Cota Mil) hasta el Distribuidor Macayapa y prolongación de Viaducto Tacagua, Caracas.
- Ciu, Y. (2012). *Direct shear failure of a synthetic rock containing discontinuous rock joint*. Master of Science in Geotechnical Engineering, University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta.
- Clerici, A. (1993). Indirect Determination of the Modulus of Deformation of Rock Masses - Case Histories. En L. Riberio e Sousa, & N. Grossman (Edits.), *Eurock 1993: safety and environmental issues in rock engineering: Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics* (págs. 509-517). Rotterdam: A.A. Balkema.
- Contreras Caicedo, R. D., & Marcano Herrera, J. M. (2015). *Estudio del Comportamiento Mecánico del Cemento Petrolero Clase H aditivado con Nanomateriales*. Tesis de Grado - Tutor: Prof. Miguel Castillejo, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería de Petróleo, Caracas.
- Contreras, C. E. (2002). *Determinación de la altura crítica y ángulo de inclinación máximo de taludes de basura (relleno sanitario La Bonanza) Charallave, estado Miranda*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Cortiula, B. (1983). *Estudio geológico de un area ubicada al sur de Panaquire y este del rio Cuira. Estado Miranda*. Tesis de Pregrado, UCV, Departamento de Geología, Caracas.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's soil mechanics* (7 ed.). New York, New York, USA: Spon Press.

-
- Cristescu, N. (1982). Rock dilatancy in uniaxial text. (Elsevier, Ed.) *Rock Mechanics*, 15, 133-144.
- D'Esciban Chiok, G. d., & Leal Sánchez, M. A. (1993). *Cálculo del factor de seguridad en taludes por el método de los elemntos finitos y su comparación con los métodos de equilibrio límite*. Ingeniería Civil. Caracas: Universidad Metropolitana.
- DGPR/SRT/BARPI, M. f. (04 de 2008). *Dam (failure) Design Insufficient Preliminary studies Geology Checks Acceptance. Burst of dam*. Obtenido de http://www.aria.development-durable.gouv.fr/ressources/29490_malpasset_ih_gb.pdf
- Diaz, C., & Ochoa, G. (2009). *Análisis y correlación entre el parámetro RQD y la permeabilidad Lugeón*. Facultad de Ingenieria - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Deparatamento de Geologia. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Dight, P. M., & Chiu, H. K. (1981). Prediction of shear behaviour of joints using profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 18, 369-386.
- Dong, J. J., & Pan, Y. W. (1996). A hierarchical model of rough rock joints based on micromechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 34, 111-123.
- Douglas, K. J. (2002). *The Shear Strength of Rock Masses*. Thesis Doctor of Philosophy, The University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering, Sydney, Australia.
- Duncan C, W. (1999). *Foundations on Rock* (2 ed.). New York, New York, United States of America: E & FN SPON.
- Edelbro, C. (2003). *Rock mass strength, a review*. Technical Report, Luleå, Department of Civil Engineering, Division of Rock Mechanics, Luleå University of Technology.

-
- Edelbro, C. (2004). *Evaluation of rock mass strength criteria*. Licenciante Thesis, Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering , Division of Rock Mechanics, Luleå.
- Espinoza Chavarría, D. A. (2005). *Análisis de subsidencia producida por la excavación de túneles de la línea 4 del Metro de Caracas, aplicando el método de los elementos finitos*. Tesis de Grado - Tutor Prof. Miguel Castillejo, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- F y L SERVICIOS, C.A. (2015). *2° Informe de evaluación de inventario y descripción de muestras de nucleoteca*. Informe inedito, Constructora Norberto Odebrecht, Caracas.
- Fairhurst, C. (1964). On the validity of the "Brazilian" test for brittle materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1, 535-546.
- Farfan P, M. A., & Marconi A, M. (2005). *Caracterización geomecánica para el proyecto del túnel del sistema subterráneo Metro de Caracas, Línea 5, Tramo Bello Monte-Chuao (UNEFA)*. Tesis de Grado - Tutor Académico Prof. Miguel Castillejo, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- Feder, G., & Arwanitakis, M. (1976). Zur Gebirgsmechanik ausbruchsnaher Bereiche tiefliegender Hohlrumbauten. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 121(4), págs. 103-117.
- Fishman, Y. A. (1990). Failure mechanism and shear strength of joint wall asperities. *Rock joints*, 627-631.
- García V, G. (2004). *Análisis de factibilidad de excavación mecánica como alternativa al método convencional, túnel Corral de Piedras de la línea de "Metro Las Adjuntas-Los Teques"*. Facultad de Ingeniería - Escuela de geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

GCTS - Geotechnical Consulting & Testing Systems . (2007). *CATS - Direct/Ring Shear Test Mode V1.85 - User's Guide and Reference*. Tempe, Arizona: GCTS - Geotechnical Consulting & Testing Systems .

GEOCIEKAWOSTKI - *Blog podrózniczo-geograficzny*. (20 de 12 de 2015). Obtenido de <http://geociekawostki.blogspot.com/2012/07/vajont-tragiczna-historia-najwyzszej.html>

GEOLAB CONSULTORES C.A. (2013). *Informe 1202-8-REV1, Estabilidad de Taludes del Terraplén sobre las Quebradas Macayapa y Tacagua y Especificaciones para la Selección y Colocación de Materiales*. Informe Técnico, Caracas.

Gerencia de Ingeniería de Mina, Carbones del Zulia S.A. (2014).

Golder Associates. (2008/12/29). *Paso Diablo El Planeta Pit*. Informe Interno N° 03-1413-419, Burnaby, British Columbia, Canada.

González de Vallejo, L. &. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2010). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Perarson & Prentice Hall.

Goodman, R. E. (1976). *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*. New York: West Publishing Company.

Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2 ed.). John Wiley & Sons.

Graça, J. G. (1985). *Heterogeneidade e Efeito de Escala - Reflexos na Segurança de Obras em Maciços Rochosos*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Grasselli, G. (2001). *Shear strength of rock joints based on quantified surface description*. Lausanne, Switzerland: Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL).

Green, S. J., & Perkins, R. D. (1968 (published 1972)). Uniaxial Compression test at strain rates from 10^{-4} sec on three geologic materials. *10th Symposium on Rock Mechanics*, (págs. 35-54). Austin, Texas.

- Guasch, F., Rodríguez, F., Luz, V. I., Morales, C. S., Riró, C., Viete, H., . . . Amaris, E. (2011). Diagnóstico situacional con fines de gestión de riesgo en las ciudades de Guarenas y Guatire, estado Miranda, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 25(2), 33-48.
- Guedez H, O. J., & Bustamente T, P. J. (1982). *Degradación de los diferentes tipos de costras existentes de los cerros Bolívar y Altamira. Estado Bolívar*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Guedez Vargas, C. J., & Omaña Colmenares, P. P. (2012). *Caracterización geológica geotécnica y elaboración de mapa zonificación geotécnica y riesgo geológico en sectores de San Agustín del Sur, de la ciudad de Caracas, Distrito Capital*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Haberfield, C. M., & Johnston, I. W. (1994). A mechanistically-based model for rough rock joint. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 31, 279-292.
- Hardin, E. L., Barton, N., Lingle, R., P, B. M., & Voegele, M. D. (1981). *heated flatjack test series to measure the thermomechanical and transport properties of in situ rock masses*. Columbus, OH: Office of Nuclear Waste Isolation.
- Hecht Méndez, J. (2005). *Caracterización Geofísica mediante estudios de ruido sísmico ambiental y gravimétricos del municipio Zamora (Guatire), estado Miranda*. Tesis de Grado - Tutor Michael Schmitz, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofisca, Caracas.
- Hencher, S. R. (1983). *South Bay Close. Landslide Studies 1982*. Hing Kong: Geotechnical Control Office.
- Hencher, S. R. (1985). Limitations on stereographic projections for rock slope stability analysis. *Hong Kong Engineers*, 13(7), 37-41.

-
- Hencher, S. R. (1987). The implications of joints and structures for slope stability. En M. G. Anderson, & K. S. Richards, *Slope Sttability* (págs. 145-186). Chichester: Wiley.
- Hencher, S. R. (1995). Interpretation of direct shear test rock joints. (Daemen, & Schultz, Edits.) *Rock Mechanics*, 99-106.
- Hencher, S. R., & Richards, L. .. (02 de 1982). Hencher, S.R. and Richards, L.R. (1982). The Basic Frictional Resistance of Sheeting Joints in Hong Kong Granite. *Hong Kong Engineer*, 21-25.
- Hencher, S. R., & Richards, L. R. (march de 1989). Laboratory direct shear testing rock discontinuities. *Ground Engineering*, 24-31.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación*. México, DF, México: Mc Graw Hill - Editorial Interamericana, S.A.
- Herrera, J. (1999). *Análisis comparativo de soluciones geotécnicas en estabilización de taludes en el área Metropolitana de Caracas*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Deparatmento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Hobbs, D. W. (1964). The strength and stress-strain characteristics of coal in triaxial compression. *Journal Geology*, 72(2), 214-231.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. Disponible on-line en: http://www.rocscience.com/education/hoek_s_corner.
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering* (3 ed.). Londres, Reino Unido: Institute of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186.
- Hoek, E., & D, M. C. (2014). Fracture initiation and propagation in intact rock e A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1-14.

-
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 203–215.
- Hoek, E., & Marinos, P. (2006). *A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion*.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. *5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference* (págs. 267-27). NARMS-TAC.
- Hopkins, D. L. (2000). The implication of joint deformation in analyzing the properties and behavior of fractured rock masses, underground excavations, and faults. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 37, 175-202.
- Huang, S. L., Oelfke, S. M., & Speck, R. C. (1992). Applicability of fractal characterization and modeling to rock joint profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 29, 89-98.
- Huang, T. H., & Doong, Y. S. (1990). Anisotropic shear strength of rock joints. *Rock joints*, 211-218.
- Huang, X., Haimson, B. C., Qui, X., & Plesha, M. E. (1993). An investigation of the mechanics of rock joints - Part I. Laboratory investigation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 30, 257-269.
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997). *Engineering rock mechanics - An introduction to the principles* (Vol. 1). Pergamon.
- Hurtado de Barrera, J. (2008). *Como formular objetivos de Investigación*. Caracas: Quiron.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM). (1981). Commission on classification of rocks and rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min., Abstr.*, 18, 85-110.
- International Society for Rock Mechanics. (1974). Suggested method for laboratory determination of direct shear strength.

-
- International Society for Rock Mechanics. (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring*. (E. T. Brown, Ed.) Oxford, Reino Unido: Pergamon Press.
- International Society for Rock Mechanics. (2013). *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014 (Orange book)*. (R. Ulusay, Ed.) New York: Springer-Verlag Wien.
- Iriza, J. J., & Sánchez, M. (1984). *Diseño geotécnico del túnel del tramo La Paz-Silencio del metro de Caracas, utilizando el método de las líneas características derivadas de un análisis por elementos finitos. Distrito Federal*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- ISRM. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 15, 319-368.
- ISRM. (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. (J. A. Hudson, & R. Ulusay, Edits.) Ankara, Turkey: International Society Rock Mechanics (ISRM).
- J, J. S., Enbaya, M., & Whyatt, J. k. (1995). The study of fracture of brittle rock under pure shear loading. *Fractured and Jointed Rock Masses*, 457-463.
- Jaeger, J. C., & Cook, N. G. (1969). *Fundamentals of rock mechanics*. London: Methuen & Co. Ltd.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics* (4 ed.). Oxford, Reino Unido: Blackwell Publishers.
- Jennings, J. N. (1971). An introduction to systematic geomorphology. *Karst*, 7, 252.
- JGS. (2008). *Method for direct shear test on a rock discontinuity*. Tokio: Japanese Geotechnical Society (JGS).
- Jing, L., Nordlund, E., & Stephansson, O. (1992). An experimental study on the anisotropy and stress-dependency of the strength and deformability of rock joints. *International*

-
- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 29, 542-565.
- Johnston, I. W., & Lam, T. S. (1989). Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints - Analysis. *Journal of geotechnical engineering*, 115, 711-727.
- Kemthong, R. (2006). *Determination of Rock Joint Shear Strength based on Rock Physical Properties*. Thesis for Degree of Master, Suranaree University of Technology.
- Kimura, T., Ikusada, K., & Esaki, T. (1993). Surface roughness and shear behavior of rock joints. En Ribeiro, Sousa, & Grossmann (Ed.), *Eurock'93* (págs. 583-590). Rotterdam: Balkema.
- Kliche C, A. (1999). *Rock Slope Stability*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- Ladanyi, B., & Archambault, G. (1970). Simulation of Shear Behavior a Jointed Rock Mass. *Proc. 11th Symposium on Rock Mechanics* (págs. 105-125). New York: AIME.
- Lajtai, E. Z. (1969). Shear strength of weakness planes in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Abstracts*, 6, 499-515.
- Lajtai, E. Z. (1969). Strength of discontinuous rocks in direct shear. *Geotechnique*, 19, 218-233.
- Lara M, J. R. (1982). *Estudio geoestadístico de los depósitos de arcillas pertenecientes a cementos CARIBE C.A., Cumarebo Estado Falcón*. Facultad de Ingeniería - Escuela de geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- López R, G., & Quintana B, C. B. (1992). *Plan de explotación del yacimiento de Caliza Paso del Medio, Municipio San Sebastian, Estado Aragua*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Losada S, O. L. (2014). *Caracterización Mecánica de Lechada de Cemento para pozos petroleros en Cemento Portland Tipo I*. Tesis de Grado - Tutor Prof. Mifuel Castillejo, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Petróleo, Caracas.

-
- Maksimovic, M. (1992). New description for shear strength for rock joint. *Rock mechanics and rock engineering*, 25, 275-284.
- Maksimovic, M. (1996). The shear strength components of a rough rock joint. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 33, 769-783.
- Manuel Rico, V. J. (2016). *Análisis geomecánico y estabilidad de los estribos en la presa sobre El Río Cuira del Sistema Tuy IV, en el Sector El Dinero, Municipio Acevedo, Estado Miranda*. Tesis de Grado - Tutor Prof. Miguel Castillejo, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- Marchán Marchán, D. A., & Katuska, A. M. (2015). *Modelado Geológico y geomecánica de las perforaciones ubicadas entre la Urbina y la urbanización Miranda, para la excavación de los túneles de Metro Caracas-Guarenas-Guatire, Estado Miranda*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamentos de Geología y Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Márquez, O. A. (1993). *Geología y geotecnia de una zona comprendida entre el Km 4 y el Km 16 de la carretera Panamericana. Municipio Los Salias Estado Miranda*. Facultad de Ingeniería - Escuela de geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Márquez, O. A. (2002). *Caracterización Geomecánica para Diseño de Sostenimiento en Minería Subterránea. Un caso de Aplicación: Nivel 6, Mina Colombia, El Callao, Estado Bolívar*. Caracas.
- Martinez, W., & Zurbarán, L. (2007). *Geología y geomecánica del macizo rocoso San Juan de los Morros-Los Flores, para la construcción del tunel San Juan. Sistema ferroviario San Juan de los Morros-San Fernando de Apure (tramo D-1) estado Guárico*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
-

-
- Méndez, J., & Scherer, W. (1997). Características sedimentarias del Cuaternario en Venezuela. Unidades sedimentarias y su relación con las glaciaciones e interglaciaciones. *Mem. del VIII Cong. Geol. Venezolano. II*, págs. 107-112. S.Venezolana de Geología.
- Mendoza, V. S. (2005). *Geología de Venezuela* (Vols. II, Rocas Sedimentarias). Ciudad Bolívar, Bolívar, Venezuela: Universidad de Oriente.
- Miranda, G. d. (07 de 09 de 2016). *Sistema de Información Geográfica de Miranda, V5.0*. Recuperado el 07 de 09 de 2016, de <http://sistemas.miranda.gob.ve/sigmiranda/socioeconomico.html#>
- Miró S, C. J., & Viete K, H. A. (2009). *Estudio neotectónico de la Cuenca Guarenas-Guatire*. Tesis de Grado - Tutor: Franck A Audemard , Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- Mourad N, S. (2010). *Estudio de susceptibilidad ante los procesos de movimientos en masa, en la zona de Puerto La Cruz-Guanta, de los municipios Sotillo y Guanta, al noreste del estado Anzoátegui*. Facultad de Ingeniería - Escuela de geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Muñoz Rivas, E. J. (1993). *Geología y geotecnia del topo de Itagua y sus alrededores, Distrito Federal*. Facultad de Ingeniería - Escuela de geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Muralha, J. (2007, 9-13 July). Stress Paths In Laboratory Rock Joint Shear Tests. En S. Ribeiro, C. Olalla, & N. Grossmann (Ed.), *11th ISRM Congress The second century of rock mechanics, Lisbon, Portugal. 1*, págs. 431-434. London: Taylor & Francis.
- Muralha, J. (2012, 28-30 May). Rock Joint Shear Tests. Methods, Results And Relevance For Design. *ISRM International Symposium - EUROCK 2012* (pág. 14). Stockholm, Sweden: International Society for Rock Mechanics.
- Muralha, J., Graselli, G., Tatone, B., Blümel, M., Chryssanthakis, P., & Yujing, J. (30 de 11 de 2013). ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of

- Rock Joints: Revised Version. *Journal Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 291-302.
- Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B., Blümel, M., Chyssanthakis, P., & Yujing, J. (2015). ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of rock Joints: Revised Version (Orange book). En I. S. (ISRM), & R. Ulusay (Ed.), *The ISRM Suggested Method for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014* (pág. 293). Heidelberg: Springer-Verlag Wien.
- Nicklas, M. (1953). Las formaciones terciarias en la Cuenca de Guarenas-Guatire. *Memoria de la SWociedad de Ciencias Naturales La Salle*, 13(36), 369-376.
- Noek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition*.
- Nuñez G, L. A. (1992). *Factibilidad técnico-económica de emplear un método de excavacion mecanizado para la construccion del tunel del sector La Bandera de la linea 3 del Metro de Caracas, Distrito Federal*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas Y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Nuñez L, O. G. (1982). *Geología sedimentaria de una zona ubicada al sur de la Sierra San Luis Distrito Bolivar-Estado Falcón*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Ochoa G, K., & Reyes O, R. E. (2011). *Propuesta de los parámetros para el diseño de estabilidad de taludes y de los depósitos finales en minería Loma de Níquel, C.A. Municipio Guaicaipuro, Estado Miranda*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Oliveros Alcalá, C. E., & Oliveros Alcalá, C. E. (2014). *Carcaterización Geomecánica y análisis de los estados de esfuerzo, el sector Hlipuerto Ávila-Estación PDV-Cercado (Cordillera de La Costa) para la excavación de los túneles del Metro Caracas-Guarenas, Estado Miranda*. Tesis de Grado - Tutor Académico: Prof. Miguel Castillejo & Prof Rutman Hurtado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería - Escuela de geología, Minas y Geofísica, Caracas.

-
- Olsson, R., & Barton, N. (2001). An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 38, 317–329.
- Oyanguren, P. R., & Monge, L. A. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e Ingeniería de taludes* (Vol. 1). Madrid, España: Universidad Politecnica de Madrid.
- Pacheco Seijas, E. (1982). *Obtención de concentrados de columbita-tantalita, zircón e ilmenita a partir de aluviones del caño Aguamena en la región de Boquerón, estado Bolívar*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Pacher, F. (August de 2010). Gebirgs- und Ausbaukennlinien. *Geomechanics and Tunnelling*, 4, págs. 402-408.
- Papaliangas, T. T., Lummsden, A. C., & Hencher, S. R. (1996). Prediction of in situ shear strength of rock joints. En Barla (Ed.), *Eurock'96* (págs. 143-149). Balkema: Rotterdam.
- Parry, R. H. (1978). A Study Of Pile Capacity For The Heather Platform. *SPE European Petroleum Conference, 24-27 October* (pág. 8). London, United Kingdom: Society of Petroleum Engineers. doi:<http://dx.doi.org/10.2118/8083-MS>
- Parry, R. H. (2000). Shear strength of geomaterials - A brief historical perspective. En I. S. Mechanics (Ed.), *ISRM International Symposium, 19-24 November* (pág. 26). Melbourne, Australia: International Society for Rock Mechanics.
- Patton, F. D. (1966). Multiple Modes of Shear Failure In Rock. *1 Congress of Rock Mechanics* (págs. 509-513). International Society for Rock Mechanics.
- PDVSA. (2011). *Código Geológico de Venezuela*. Recuperado el 7 de 9 de 2016, de Formación Guatire: <http://www.pdvs.com/lexico/g45w.htm>
- Perez D'Gregorio, A. (1986). *Estudio geológico de la cuenca del rio Cuira, Estado Miranda*. Tesis de Pregrado, UCV, Departamento de Geología, Caracas.

-
- Perras, M. A., & Diederichs, M. S. (30 de 1 de 2014). A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing . *Geotech Geol Eng.* doi:10.1007/s10706-014-9732-0
- Picard, X. (1976). Geología de la cuenca Guarenas-Guatire. Sedimentación continental intracordillerana, Venezuela. En M. d. Hidrocarburos (Ed.), *Segundo Congreso Latinoamericano de Geología 1. 2*, págs. 965-984. Caracas, Venezuela, Nov. 11-16, 1973: Boletín de Geología Publicación Especial, (7).
- Piteo C, J. D., & Vitola A, P. C. (2010). *Variación del diaclasamiento y su influencia en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del túnel Caucaguita de la línea Metro Caracas-Guarenas-Guatire*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Polland, D. D., & Aydin, A. (1988). Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1181-1204.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Londres, Reino Unido: Chapman & Hall, LTD.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall.
- Qui, X., Plesha, M. E., Huang, X., & Haimson, B. C. (1993). An investigation of the mechanics of rock joints - Part II. Analytical investigation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 30, 271.
- Ramirez G, N. C., & D'Escriban, E. G. (2000). *Influencia de la geología de la zona de "La Bonanza" formación Las Mercedes en la permeabilidad de suelos y rocas con los lixiviados del relleno sanitario*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid.
- Reverón Hernández, D. E. (2013). *Dimensionamiento de cámaras y pilares en minería subterránea basado en la caracterización geomecánica del macizo rocoso de la mina*

Colombia, El Callao, estado Bolívar. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Rocha, M., & Francis, F. (1977). Determination of permeability in anisotropic rock masses from integral samples. *Rock Mechanics*, 9, 67-94.

Rocscience. (27 de 12 de 2015). *Program Unwedge*. Obtenido de <https://www.rocscience.com/rocscience/products/unwedge>

Rocscience. (s.f.). DIPS V5.0 & V6.0. *Graphical and statistical analysis of orientation data*.

Saeb, S. (1990). A variance on the Ladanyi and Archambault's shear strength criterion. *Rocks joints*, 701-705.

Savilahti, T., Nordlund, E., & Stephansson, O. (1990). Shear box testing and modeling of joint bridge. *Pro. Int. Symp. On Rock Joints*, (págs. 295-300). Leon, Norway.

Silva M, J. F. (2009). *Análisis de las causas de los procesos de flujos superficiales de detritos ocurridos durante las lluvias de noviembre de 2008 en el sureste de Caracas: sector Los Campitos, Santa Fé, Valle Alto, Parque Humboldt y Terrezas del Club Hípico*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Sinde V, R., & Torres C, C. A. (2008). *Caracterización geológica-geotécnica en el "Proyecto integral autopista de Los Llanos Centrales" progresiva 0+000 km al 32+100 km, Edo. Cojedes*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamentode Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

SNMPE. (2004). *Manual de Geomecánica Aplicada a la Prevención de accidentes por Caída de Rocas en Minería Subterránea*. Lima, Perú: Sociedad Nacional de Minería, Petroleo y Energía (SNMPE).

Solórzano M, N. E., & Zurita P, P. G. (2010). *Estudio geológico-geotécnico de los taludes de la Urb. La Quinta Los Teques, municipio Guaicaipuro, Edo. Miranda*. Facultad de Ingeniería

- Escuela de geología, Minas y Geofísica, Departamento de Geología. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Superintendencia de Geología. (2014). *Superintendencia de Geología*. Carbones del Zulia S.A.
- Tamayo, & Tamayo, M. (2003). *El Proceso de la Investigación Científica*. México, DF, México: Editorial Limusa, S.A.
- Urbani, F. (2008). Revisión de la nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas del norte de Venezuela. *Bol. Acad. Cienc. Fís., Matem. y Nat.*, 68(3), 27-43.
- Urbani, F., & Rodríguez, A. (2004). *Atlas geológico de la Cordillera de la Costa*. Ediciones Fundación Geos y FUNVISIS.
- Urbani, F., Chirinos, A., & Marquina, M. (Junio de 1990). Geología del área de Guatopo-El Guapo. Estado Miranda y Guárico. Parte 1: Grupo de Villa de Cura. *Revista de Facultad de Ingeniería*, 5(1), 78-96.
- Urbani, F., Chirinos, A., & Marquina, M. (Julio de 1991). Geología del área de Guatopo - El Guapo, Estados Miranda y Guárico. Parte 2: Formación Las Hermanas y Complejo de Apa. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 6(1), 5-52.
- Urquía H, R. A. (1992). *Análisis del comportamiento del subsuelo por el paso de los túneles gemelos debajo del río Guaire, tramo Plaza Venezuela-Estación UCV, de la línea 3 del Metro de Caracas, Distrito Federal*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- USACE. (1980). *Method of test for direct shear strength of rock core specimens*. Vicksburg: United States Army Corps of Engineers.
- Vallier, F., Mitani, Y., & Boulon, M. E. (2010). A Shear Model Accounting Scale Effect in Rock Joints Behavior. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. doi:10.1007/s00603-009-0074-9
- Van Manh, N., & Heinz, K. (2014). Behaviour of joints. En K. Heinz, *Introduction into Geomechanics*. Freiberg: Technische Universität bergakademie Freiberg.

-
- Vásárhelyi, B. (1999). Shear failure in rock using different constant normal load. *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng.*, 43(2), 179-186.
- Vásárhelyi, B., & Ván, P. (2006). Shearing tests with continuously increasing normal stress. *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng.*, 50(2), 171-180.
- Venegas S, H. (1999). *Evaluación y diseño de técnicas de perforación y voladura de la mina subterránea La Camorra*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Vorgele, M. D., Hardin, E. L., Lingle, D., Board, M. P., & Barton, N. (1981). Site characterization of joint permeability using the heated block test. *22nd US Rock Mechanics Symposium*, (pág. 8). Boston.
- Waltham, A. C. (1994). *Foundations of engineering geology*. Glasgow, England: Blackie Academic & Professional.
- Williams B, A. N. (1985). *Optimización de la planta de tratamiento para roca caliza de la Cantera La Ceiba Distrito Zamora-Municipio Bolívar Estado Miranda*. Facultad de Ingeniería - Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Wisniak, J. (2005). Guillaume Amontons. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 36(3), 187-195.
- Wittke, W. (1990). *Rock mechanics : theory and applications with case histories*. (R. S.-o. Plischke, Trad.) Berlin ; New York : Springer-Verlag.
- Wittke, W. (2014). *Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*. Himmer AG, Augsburg, Germany: John Wiley & Sons Inc.
- www.flickr.com. (20 de 12 de 2015). Obtenido de http://farm5.static.flickr.com/4089/5169376387_12b5a30c59.jpg
- Wyllie, D. C., & Mah, C. H. (2004). *Rock slope engineering - Civil and Mining* (4 ed.). London: Spon Press.

-
- Xu, S., & De Freitas, M. H. (1990). The complete shear stress-vs-shear displacement behaviour of clean and infilled rough joints. *Rock joints*, 341-348.
- Yang, Z. Y., & Huang, Y. M. (1995). Joint surface matching and shear strength. Part A: Joint Matching Coefficient (JMC). *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, 173-144.
- Young, G. (1960). Stratigraphy of the Miocene La Puerta Formation in the Ceuta, area, Lake Maracaibo. (págs. 304-315). *ol, Inf. Asoc Venez. Geol., Min y Petrol*, 8 (3).
- Zapata C, E. G. (1990). *Análisis comparativo de los distintos ensayos en rocas*. Facultad de Ingeniería - Escuela de geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Zhao, J. (1997). Joint surface matching and shear strength. Part A: Joint Matching Coefficient (JMC). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 34, 179-185.
- Zhao, J. (1997). Joint surface matching and shear strength. Part B: JRC-JMC shear strength criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 34, 179-185.
- Zinck, A. (1980). *Valles de Venezuela*. (LAGOVEN, Ed.) Caracas, Distrito Federal, Venezuela: Cuadernos Lagoven, El hombre y su Ambiente.

APENDICE A

9 ISRM (2014) - Método Sugerido para la Determinación de la Resistencia al Corte en el Laboratorio de Discontinuidades: Versión Revisada **Equation Section (Next)**

José Muralha • Giovanni Grasselli

Bryan Tatone • Manfred Blümel •

Panayiotis Chryssanthakis • Jiang Yujing

Published online: 30 November 2013

© Springer-Verlag Wien 2013

9.1 Introducción

El término “discontinuidad” se refiere a cualquier rotura mecánica en el macizo rocoso con una resistencia al corte despreciable (Priest, 1993). El origen de las discontinuidades puede ser geológico (es decir, fallas, foliación, esquistosidad, plano de clivaje y foliaciones) o de origen antropogénico (es decir, inducidas por voladuras, esfuerzos inducidos o fracturamiento hidráulico inducido).

Por lo tanto el origen de las discontinuidades juega un papel significativo en el comportamiento del macizo rocoso y, consiguientemente en el comportamiento de varios proyectos de ingeniería que involucran taludes, excavaciones superficiales y excavaciones subterráneas tales como túneles o cavernas. Las fallas por discontinuidades inducidas en macizos rocosos son la causa de las mayores fallas en los proyectos de ingeniería civil y de minas, siendo responsables de muchos accidentes y costos de construcción, así como retrasos en la construcción.

La evaluación del riesgo planteado por estos sistemas en bloques a un proyecto en particular requiere la evaluación de la resistencia al corte de las discontinuidades de la roca. La

estimación de la resistencia al corte puede obtenerse a través de ensayos de corte. Las mejores estimaciones de resistencia al corte se obtienen a partir de ensayos de corte directo in situ, ya que inherentemente representan ningún efecto de escala posible (Barla et al 2011; Alonso et al 2011). Sin embargo, debido a la duración y el costo de tales pruebas, es una práctica común la realización de los ensayos de corte directo en el laboratorio sobre muestras relativamente pequeñas de la discontinuidad de un sitio en particular.

Convencionalmente, los ensayos de corte directo en roca eran realizados bajo la condición de Carga Normal Constante [Constant Normal Load (CNL)] aplicada al plano de discontinuidad. Siendo este ensayo apropiado para ciertos problemas ingenieriles como deslizamiento de bloques de roca cerca de la superficie (es decir, estabilidad de taludes en roca y estabilidad de excavaciones superficiales), en estos casos la carga normal no sufre variaciones, mientras ocurre el deslizamiento. Puede decirse, que la dilatancia de una discontinuidad está limitada al momento en que ocurre el deslizamiento (por ejemplo, alrededor de una excavación subterránea), el esfuerzo normal en la superficie de deslizamiento puede variar. Para este tipo de problema, una condición de contorno de Rigidez Normal Constante [Constant Normal Stiffness (CNS)] es mucho más apropiada para el ensayo de corte directo (Johnston and Lam 1989; Leichnitz 1985).

9.2 Propósito

- a) Este Método Sugerido (SM) es una revisión y una actualización de la Parte 2. Este Método Sugerido para la determinación en el laboratorio de resistencia al corte directo, incluido en el Método Sugeridos para determinar la resistencia al corte (ISRM 2007), y fue preparado tomando en consideración de los avances tecnológicos, ocurridos desde su publicación inicial y otros métodos estándar existentes, incluyendo la norma ASTM D 5607-08 (ASTM 2008), USACE RTH 203 a 80 (USACE 1980), y JGS 2541-2008 JGS (JGS 2008).
- b) El propósito de esta revisión y actualización es abarcar los requerimientos y procedimientos para realizar el ensayo de corte directo de discontinuidades en el laboratorio utilizando las condiciones de contorno de **Carga Normal Constante (CNL)** y **Rigidez Normal Constante (CNS)**.

-
- c) Esta norma está limitada a la determinación de la resistencia al corte en las discontinuidades bajo una carga de corte monótona. No establece la norma los procedimientos para realizar ayos de corte para cargas cíclicas y dinámicas.
 - d) Las discontinuidades pueden encontrarse abierta o cerradas, pudiendo tener una resistencia al corte despreciable. No abarca los ensayos de corte directo sobre roca intacta y/o otros tipos de discontinuidades naturales o artificiales, que presenten una resistencia al corte, tales como interfaces de roca-concreto o entre concreto-concreto (interfaces de vaciado).
 - e) Las discontinuidades pueden estar parcialmente o completamente rellenas de arcilla o brecha de falla. No abarca el ensayo de discontinuidades rellenas con arcillas donde en las condiciones in situ la presión de agua es considerada.
 - f) Esta norma de ensayo de corte directo en discontinuidades tiene como propósito la medición de la resistencia pico y última (residual) en la dirección seleccionada del plano de corte como una función del esfuerzo de normal aplicado al plano de corte. Estos resultados podrán ser aplicados en los análisis de equilibrio límite para bloques de roca en taludes o deslizamientos de los bloques de roca desde las paredes de la excavación hacia la excavación, y como parámetros de entrada para los elementos “junta (joint)” en los modelos numéricos continuos o discontinuos de macizos rocosos.
 - g) Los ensayos de corte directo en discontinuidades en roca pueden ser realizados bajo condiciones de Carga Normal Constante y Rigidez Normal Constante. El empleo del ensayo de corte con Carga Normal Constante, no es realizado un ensayo de resistencia de la discontinuidad, pero la resistencia al corte con una cierta carga normal puede ser apropiada para propósitos de diseño bajo ciertas condiciones de contorno. Los procedimientos de ensayos de corte con Rigidez Normal Constante puede ser empleado para definir la resistencia al corte última de una discontinuidad. A pesar de no considerar que la rigidez normal, es probable que esta aumente durante la dilatancia del corte. Los ensayos CNS, deben utilizarse preferiblemente para reproducir la respuesta natural al corte simple en discontinuidades no planas.
 - h) Bajo la condición de carga normal, la determinación de la resistencia al corte usualmente incluye la aplicación de varias magnitudes de carga normal o esfuerzo en múltiples muestras sobre la misma discontinuidad u horizonte, con las mediciones de esfuerzo de corte y respectivos desplazamiento de corte y normal, como resultado de una velocidad de

desplazamiento de corte establecida previamente. Deben realizarse 3 etapas de carga normal, pero es preferible realizar 5 etapas, de la misma discontinuidad y el mismo horizonte con características similares, la muestra debe ser muestreada y ensayada en la misma dirección.

- i) En caso de no ser posible disponer de un número de muestras grande para tener el número de especímenes requeridos, puede realizarse el ensayo sobre la misma muestra de manera repetida bajo diferentes condiciones de esfuerzo normal. Para una sola discontinuidad es requerido un número mínimo de etapas de 3, pero es preferible 5 etapas, con diferentes condiciones de carga normal aplicada sobre la misma discontinuidad. Existe la posibilidad de realizar un ensayo multietapa, el cual es solo aplicable cuando la degradación y fracturamiento de las asperezas de la superficie de corte sea mínimo durante la subsecuentes etapas del ensayo (es decir, esfuerzos normales bajos). Para minimizar la influencia del daño y desgaste, cada esta subsiguiente debe realizarse un esfuerzo normal mayor que el de la etapa anterior.
- j) Bajo la condición de rigidez normal constante, determinación de la resistencia al corte de una discontinuidad generalmente incluye el ensayo de múltiples muestras de la misma discontinuidad u horizontes de ensayo sometidas a diferentes cargas normales iniciales y/o rigidez normal constante, y la medición de los esfuerzos de corte y normales con los respectivos desplazamientos resultantes de la velocidad de desplazamiento establecida. Al menos tres especímenes, pero preferiblemente 5 especímenes, de la misma discontinuidad u horizonte deben ser ensayados a lo largo de la misma dirección de corte.

9.3 Equipos

9.3.1 Máquina de Ensayo

La determinación de la resistencia al corte en discontinuidades se realiza generalmente con equipos de resistencia al corte. Aunque existen muchas variaciones en la forma como los especímenes se preparan, montan y son cargados, las determinaciones de la resistencia al corte son por lo general similares (Boulon 1995; Blumel y Potsch 2003; Jiang et al 2004; Barla et al 2010). Los equipos de ensayos de resistencia al corte deben contar con las siguientes características (Figura 5.1):

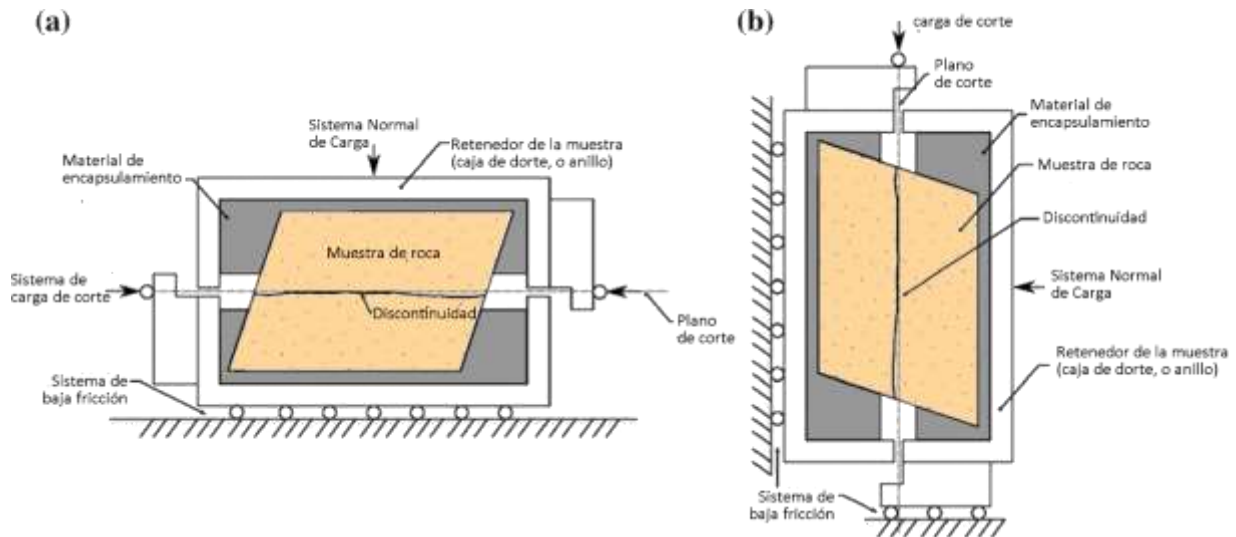


Figura 9.1 Ilustración esquemática del montaje del espécimen. a) Disposición horizontal convencional; b) Disposición vertical alternativa

- a) Un sistema de ensayo rígido, incluye un marco de carga rígido sobre el cual los dispositivos de carga puedan actuar y un sistema contenedor de muestras rígido que tenga la suficiente rigidez para evitar la distorsión durante el ensayo. Un sistema rígido que permita mantener la velocidad de corte programada y que permita que el comportamiento post-pico de la discontinuidad se registre correctamente.
- b) Un retenedor de la muestra, la como una caja de corte, anillos de corte o un dispositivo similar, donde se sujeten las dos mitades de la discontinuidad. Esta caja debe permitir el corte o cizallamiento y los desplazamientos normales de las dos mitades de la discontinuidad. Las fuerzas de fricción en el perímetro del retenedor de la muestra deben minimizarse por medio de rodillos o otros dispositivos de baja fricción similares.
- c) Los dispositivos deben aplicar la carga normal y de corte sobre el espécimen a velocidades adecuadas, de manera que la carga resultante de la carga de corte pase a través del centroide del área de corte para reducir al mínimo la rotación de la muestra.
- d) Debe disponer de dispositivos de medida de las cargas normal y de corte sobre la muestra, así como también de los desplazamientos normales y de corte durante todo el ensayo.

9.3.2 Cargas

- a) Las fuerzas de cizalla aplicadas son generalmente provistas por los actuadores [hidráulicos, neumáticos, mecánicos (engranaje accionado), etc.], con o sin control de lazo cerrado. Los

actuadores de la fuerza de corte y piezas de conexión, deben ser diseñados para asegurar que la carga de corte se distribuya uniformemente sobre el plano de discontinuidad a ser ensayado. Ellos deben permitir un mayor movimiento que la cantidad de la dilatación esperada en el ensayo y asegurar la carga normal aplicada se distribuya uniformemente sobre el horizonte de ensayo con la fuerza resultante que actúa perpendicular al plano de corte a través de su centroide.

- b) Debe disponer también de un sistema catiliver que pueda ser usado para aplicar una carga de peso muerto normal para los ensayos CNL bajo esfuerzos normales bajos y una rigidez normal nula, mientras que un resorte podrá utilizarse para mantener una condición de rigidez normal constante para los ensayos CNS.
- c) Mantener la condición de carga normal constante o rigidez es muy importante durante los ensayos de corte. Esta componente de carga del equipo debe ser diseñada para mantener la fuerza ó rigidez aplicada dentro de una tolerancia máxima de ($\pm 2\%$).

9.3.3 Registro de Cargas y Desplazamiento

- a) Las fuerzas normal y de corte deben ser medidas con un precisión superior al $\pm 2\%$, de manera directa, por las celdas de carga, o indirectamente por medidores de presión, transductores o anillos de carga. Los transductores de desplazamiento son empleados para medir los desplazamientos.
- b) Se requiere un número mínimo de dos (2) transductores de desplazamiento: uno montado con el plano de cizalla para medir el desplazamiento de corte y otro montado verticalmente en el centro de la muestra para medir el desplazamiento normal. Preferiblemente, dos transductores deben utilizarse para medir el desplazamiento de corte tal que se pueda medir la diferencia entre el desplazamiento de las dos mitades de la discontinuidad, y de tres a cuatro transductores, deben emplearse para medir el desplazamiento con respecto a la horizontal, de manera tal que el cabeceo y balanceo de la muestra pueda ser evaluado.
- c) Una práctica común para realizar mediciones casi continuas (velocidad de muestreo superior a 1 Hz) de estos parámetros, es emplear algún tipo de sistema de adquisición de datos basado en micro-procesadores, lo cual es aceptable para las condiciones cuasi-estáticas consideradas en la presente norma.

- d) Para asegurar que las cargas se aplican eficazmente a la superficie de corte, puede ser conveniente para medir las fuerzas de fricción o para realizar una prueba simulada antes de la prueba real. Si se requieren correcciones, deben ser reportado.

9.4 Ensayo de Especímenes

9.4.1 Muestreo, Manejo y Almacenamiento

- a) Seleccione el el horizonte a ser ensayado, registre el rumbo y buzamiento y otras características geológicas relevantes. Si es posible la orientación relativa de la muestra con el horizonte debe ser marcado en la muestra (por ejemplo, un núcleo orientado). De esta manera, la dirección de corte en el laboratorio se puede ajustar de manera que corresponda a una dirección de desplazamiento de interés particular in situ.
- b) El bloque o núcleo de roca que contenga el horizonte de interés a ensayar debe ser recolectado empleando técnicas que minimicen la perturbación. Las dimensiones de la muestra y la ubicación del horizonte a ser ensayado edentro del bloque ó núcleo debe ser tomado, si es posible, para que el montaje en el laboratorio pueada realizarse sin recortar la muestra de manera que tenga suficiente espacio para un encapsulamiento adecuado.
- c) Ningún líquido disntinto al gua puede esta en contacto con l amuestra antes de realziar el ensayo. Las discontinuidades pueden estar coontaminadas con arcillas producidas por la perforación o que muestren un desgaste no natural deben ser rechazadas.
- d) Las muestras deben ser rotuladas y empacadas de manera de evitar su daño en el traslado al laboratorio. Se debe prestar especial atención para prevenir movimientos diferenciales que ocurran a lo largo de las discontinuidad muestreada. Una opción para prevenir este tipo de movimiento sdiferenciales eincluye la unión de las paredes de la discontinuidad con alambre o centa adhesiva, las cuales permitirán mantener en posición la discontinuidad hasta antes de su ensayo. Si las muestras no son inmediatamente transportadas al laboratorio se deben almacenar fuera del los agentes de intemperismo, para preservar su integridad. Debido a que las muestras deben serán ensyadas cerca de su condición de humedad natural, deben ser almacenados y transportados en contenedores a prueba de humedad. Alternativamente, cinta adhesiva, papel plástico (envo-plats), cera, u otros medios pueden ser utilizado para preservar el contenido de humedad in situ a lo largo de

la zona de ensayo. Muestras frágiles requieren un tratamiento especial, por ejemplo los envases de espuma de poliuretano (Stimpson et al. 1970).

- e) En el laboratorio, manejo y almacenamiento de la muestra debe seguir las precauciones antes mencionadas para evitar cualquier daño a las muestras, y para preservar el contenido de humedad in situ si es necesario.

9.4.2 Tamaño y Forma

- a) Son preferibles las muestras con secciones transversales regulares (rectangular o elíptica). Sin embargo, las muestras pueden tener cualquier forma, siempre que el área de la sección transversal puedan ser determinada con la precisión requerida.
- b) La altura de la muestra debe ser mayor que el espesor de la zona de corte (ensayo) y deber suficiente para poder encapsular la muestra en el portamuestras.
- c) La longitud del plano de prueba (medida a lo largo de la dirección de corte) debe ser al menos 10 veces la altura máxima aspereza.
- d) La anchura del plano de ensayo (medido perpendicularmente a la dirección de corte) debe tener al menos 48 mm, correspondiente a discontinuidades obtenidas a partir de núcleos NQ.
- e) La anchura del plano de ensayo no debe cambiar significativamente en la longitud de corte. El ancho mínimo debería ser mayor que 75% del ancho máximo.
- f) La mitad de la muestra que permanece fija durante el ensayo de corte, debe tener una longitud mayor que la media de
- g) La mitad de la muestra que permanece fija durante el ensayo de corte debe tener una longitud mayor que la mitad de la muestra que tiene movimiento, de modo que la discontinuidad siempre está apoyada y el área nominal en contacto permanezca constante. Si este procedimiento no es factible debido a la reducida longitud de la muestra, la reducción de la superficie nominal durante corte tiene que ser tomado en cuenta en los cálculos.

9.4.3 Observación y Mediciones en la Muestra y Especímenes

- a) Todas las características de la superficie de discontinuidad, que pueden influir en su resistencia al corte, incluyendo la alteración, recubrimientos, rellenos, etc., deben ser

evaluadas de acuerdo con la metodología descrita en el ISRM en Método Sugerido para la descripción cuantitativa de discontinuidades en macizos rocosos (ISRM 2007).

- b) Las dos paredes de la discontinuidad a ser ensayada deben ser fotografiadas antes y después de la prueba. También es importante para medir la topografía de ambas paredes de la muestra de ensayo antes y después de la prueba para evaluar la rugosidad de la superficie y el desgaste de rugosidad. Para este propósito, dos tipos de equipos pueden ser utilizados:
- i. Rugosímetros son dispositivos simples que producen una serie de perfiles de rugosidad lineales de la superficie de la muestra a lo largo de la cizalla y las direcciones transversales. El número de perfiles depende de la dimensión de la superficie, pero por lo menos tres a lo largo de cada dirección debe ser levantada (Aydan et al 1992; Grasselli 2001).
 - ii. Si están disponibles, dispositivos de medición sin contacto 3D disponibles (por ejemplo, un escáner láser, hendidura del escáner, o cámaras de fotogrametría o stereotopométricas) se pueden utilizar para digitalizar toda la superficie de discontinuidad (Fig. 6.2). Tales sistemas son capaces de obtener mediciones de puntos con una separación nominal de 0,5 mm con una precisión mayor de 0,025 mm (Tatone y Grasselli 2009).
- c) Medición de la superficie de sección transversal nominal del plano de cizallamiento espécimen se hará antes de cada ensayo con una precisión mayor a 2,5 mm². Para formas geométricas regulares, las dimensiones relevantes requeridas para calcular el área de sección transversal nominal se pueden medir usando un vernier o micrómetro. Para formas irregulares, el contorno de la sección transversal puede ser dibujada en el papel y el área podrá medirse con un planímetro o dispositivo similar. La área también se puede medida usando un dispositivo de medición sin contacto 3D y software de CAD.

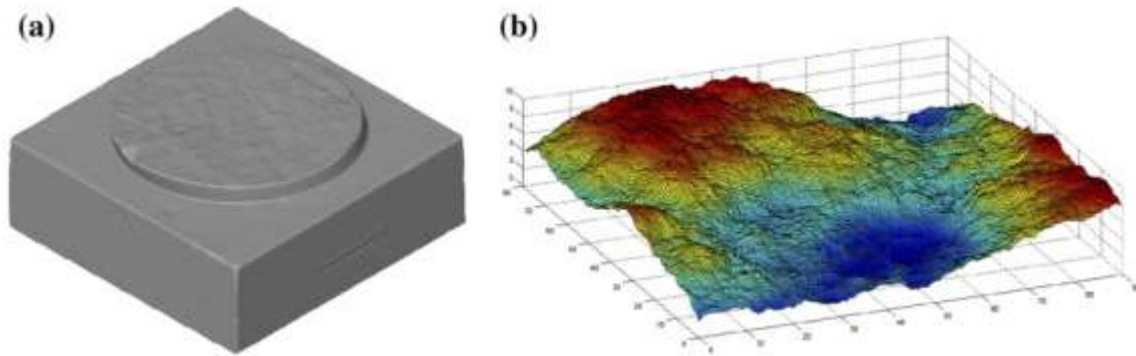


Figura 9.2 Ejemplos de medición de las superficies de las discontinuidades: a) circular; b) rectangular

9.4.4 Encapsulamiento de la Muestra

a) Para ensayar una muestra de discontinuidad, cada mitad de la muestra debe ser asegurada en cada mitad del portamuestras (es decir, anillos de corte o cajas de corte). Como muestras de discontinuidad rara vez se cortan para encajar perfectamente en el soporte de la muestra, deben ser encapsulados en algún otro material de encapsulamiento (por ejemplo, cemento, resina o similar) para asegurar un ajuste completo. La encapsulación también permite que el plano de discontinuidad esté alineado con el plano de corte. Las muestras pueden ser encapsulados directamente dentro de la portamuestras del equipo de ensayo o, si son varios especímenes que están preparados de forma simultánea, en moldes separados, con una dimensión idéntica a la del portamuestra se puede utilizar. Aunque algunas adaptaciones se permiten, el encapsulamiento de una muestra para el ensayo debe proceder de la siguiente manera:

- i. Retire la muestra del embalaje.
- ii. Coloque la mitad inferior de la muestra en el centro de la mitad inferior del portamuestras. Asegúrese de que el horizonte de corte a ensayar es el seleccionado, es paralelo con el plano de corte y orientado correctamente con respecto a la dirección de corte. Asegúrese de que la posición de la muestra se puede mantener durante el vertido y el curado del material de encapsulamiento.
- iii. Verter el material de encapsulamiento, preparado de acuerdo con las instrucciones del fabricante, debe tenerse especial cuidado en el espacio entre la mitad inferior de la muestra y la mitad inferior del portamuestras. Deje de verter justo por debajo del plano general de la zona de ensayo. Asegurarse una zona de aproximadamente 5 mm

alrededor de los lados del plano de cizallamiento debe permanecer libre de material de encapsulamiento. No perturbe la muestra que está en el portamuestras después de verter el material de encapsulamiento, hasta que este se encuentre curado suficientemente.

- iv. Después de que el material de encapsulamiento inferior está suficientemente curado, coloque un anillo espaciador partido del espesor especificado en el soporte inferior, tal que su borde se acople de manera perfecta con la mitad inferior encapsulada de la muestra y abarque el espesor de zona de ensayo. Rellene con arena gruesa o platilina en toda la zona de corte. Si es necesario, se puede aplicar una capa de grasa de silicona sobre la superficie del material encapsulado. Coloque la mitad superior del portamuestra sobre la mitad inferior encapsulado con el separador y el relleno espaciador. Coloque la mitad superior del portamuestras en la placa espaciadora partida sin perturbar la posición de la mitad superior de la muestra. Conecte las dos mitades del soporte del portamuestra. Vierta el material encapsulador en el espacio anular entre la mitad superior del soporte de la muestra y la mitad superior de la muestra. No perturbe la muestra hasta que el material de encapsulamiento este curado.
- v. Retire las placas separadoras, arena o arcilla para exponer el horizonte de ensayo para la prueba de corte (Fig. 3).



Figura 9.3 Mitad inferior de una discontinuidad encapsulada de un espécimen de forma rectangular

-
- b) Después del encapsulamiento, el plano medio a través del horizonte de ensayo debe ser verificado que sea paralelo a la superficie superior e inferior del portamuestras (es decir, plano de corte). Cualquier desviación angular entre el plano medio y plano de corte, medida en la dirección de corte, debe ser medido y reportado. Esta desviación angular también debe tenerse en cuenta en la determinación resistencia al corte.

9.5 Procedimiento de ensayo

9.5.1 Tareas Preliminares

- a) Antes de realizar cualquier ensayo, las condiciones de carga y el rango de cargas normales que deben aplicarse durante el corte deben ser definido, de acuerdo con los esfuerzos normales que se espera que actúen en las discontinuidades en el proyecto de que se trate (por ejemplo, el talud, fundación de una presa, excavación subterránea o túnel).
- b) Si se considera conveniente pueden realizarse ensayos de ajuste con especímenes de baja deformabilidad, como el acero, con las mismas dimensiones de especímenes reales, y una vez encapsulado seguir el mismo procedimiento de ejecución. Los ensayos simulados de especímenes de discontinuidades permiten establecer que todos los dispositivos funcionan correctamente, y pueden permitir la calibración de instrumentos de medición. Las pruebas simuladas de especímenes intactos también permiten a uno la evaluación de la rigidez normal y corte del sistema de carga, y permitir tomar los correctivos necesarios a tiempo (Chryssanthakis 2004).

9.5.2 Montaje de la Muestra

- a) Montar y orientar el espécimen dentro de la caja de encapsulamiento con los separadores de la caja en la máquina de ensayo.
- b) Asegurarse que todos los dispositivos de medición se calibran de acuerdo con los procedimientos de calibración del laboratorio.
- c) Garantizar mediante una prueba que todos los dispositivos de control responden correctamente y están bien conectados con el sistema de adquisición de datos.
- d) Montar todos los dispositivos de medición de desplazamientos perpendicularmente a la superficie de corte, de manera tal que estenen contacto con el perímetro de movimiento

de la mitad del portamuestras del espécimen para medir los desplazamientos normales durante el ensayo. En general, cuatro dispositivos normales de medición de desplazamiento se utilizan para evaluar el cabeceo y balanceo de la mitad móvil del espécimen durante el ensayo. Aunque no se recomienda, el empleo de un número un menor de dispositivos de medición también se pueden emplear. En todos los casos, estos dispositivos deben ser distribuidos alrededor del perímetro de la superficie de corte del espécimen para proporcionar la información necesaria para evaluar el desplazamiento normal en el centroide de la superficie de corte.

- e) Instale todas las unidades de medición de desplazamiento en el equipo de manera tal de asegurar la medición del desplazamiento de corte durante el ensayo. Un par de dispositivos posicionados simétricamente con respecto a la sección transversal del espécimen debe ser empleado. Para algunos equipos, un único dispositivo de posicionamiento a lo largo del eje de deslizamiento de corte puede ser suficiente. Sin embargo no se recomienda esta última opción, ya que no se detectará un eventual movimiento de parpadeo o guiño.
- f) Un par de dispositivos de posicionado simétricamente con respecto a la sección transversal de muestras debe ser utilizado. Para algunas máquinas, un único dispositivo de posicionado a lo largo del eje de desplazamiento de cizalladura puede ser suficiente. Sin embargo, no se recomienda esta última opción, ya que no se detectará el movimiento de guiñada final de la muestra.
- g) Asegurese que todos los dispositivos de medición de desplazamiento tienen el suficiente recorrido, de manera de poder registrar los desplazamientos normales y de corte esperados. Además, asegurese que estos dispositivos se mantienen en contacto con el portamuestra durante todo el ensayo para medir correctamente los desplazamientos.
- h) Si es necesario, monte y posicione todos los demás dispositivos de medición, por ejemplo, celdas de carga.

9.5.3 Aplicación de Cargas

9.5.3.1 Carga Normal

Antes de realizar cualquier ensayo de corte, se debe aplicar la carga normal la cual consiste de una carga incremental continua a la zona de corte y debe tener una velocidad establecida

hasta que el esfuerzo normal programado sea alcanzado, registrando los desplazamientos normales que se hayan producido.

- a) La aplicación de la carga normal debe ser aplicada de manera continua a la velocidad de esfuerzo seleccionado, asegurándose que cada trayectoria de carga o descarga tome cerca de 5 min. De acuerdo con esto, la velocidad debe estar en el orden de 0,01 MPa/s o menos.
- b) Cualquier carga normal accionada sobre el horizonte de ensayo debe ser tomada en cuenta cuando se determine los esfuerzos normales aparentes en el espécimen, especialmente en esfuerzos normales bajos. Por ejemplo, si el espécimen se mantiene en posición horizontal en el equipo de ensayo, el peso de la mitad superior del espécimen debe ser considerado.
- c) Para el ensayo de CNL, se debe asegurar que el equipo mantiene constante la carga normal especificada durante toda la ejecución del ensayo. Para ensayos CNS, se debe asegurar que el equipo de ensayo mantiene la rigidez normal especificada durante toda la ejecución del ensayo.
- d) Si es el caso, se puede permitir que la presión del agua de los poros en la roca y material de relleno adyacente al plano de corte, esta se debe disipar antes de realizar el ensayo de corte. No aplique la carga de corte hasta que el desplazamiento normal, se halla estabilizado.

9.5.3.2 Carga de Corte

- a) Después que los desplazamientos normales se hayan estabilizado, aplique el desplazamiento de corte de manera continua a la velocidad de corte seleccionada.
- b) El desplazamiento de corte debe continuar a la velocidad especificada hasta que el esfuerzo último o residual haya sido alcanzado. Generalmente, los desplazamientos de corte están en el rango de 5 a 10 % de la discontinuidad es suficiente.
- c) Las velocidades del desplazamiento de corte están en el orden de 0,1 – 0,2 mm/min son suficientes para cualquier ensayo, aunque pueden aumentarse hasta valores de alrededor de 0.5 mm/min, después de alcanzar la resistencia pico. En casos especiales tales como discontinuidades con rellenos arcillosos necesario utilizar velocidades menores (menor a 0.05 mm/min).

9.5.4 Procedimientos Alternativos

- a) La determinación de la resistencia al corte en las discontinuidades en roca puede realizarse con dos tipos de procedimientos: Procedimiento de corte simple o procedimiento de multietapa. Ambos tipos de procedimientos pueden ser realizados bajo condiciones CNL y CNS (Muralha 2007; Blümel et al. 2003).
- b) El procedimiento de corte simple incluye la aplicación de varios esfuerzos normales constantes en múltiple muestras de una discontinuidad u horizonte de ensayo y medir los esfuerzos de corte y respectivos desplazamientos normales resultantes de una velocidad de desplazamiento de corte establecida. Deben realizarse al menos tres pero es preferible cinco especímenes del mismo horizonte de ensayo y deben ser ensayados en la misma dirección.

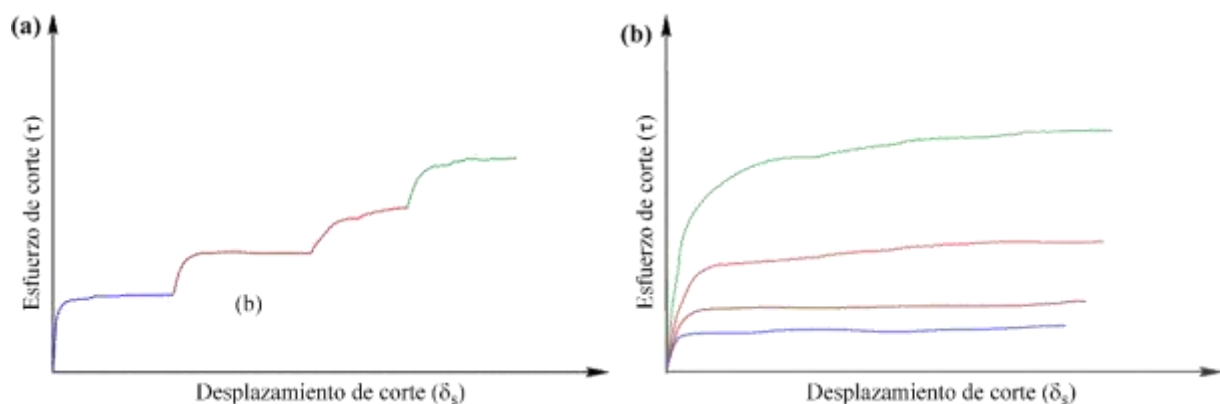


Figura 9.4 Ejemplos de ensayos de corte multi-etapas bajo diferentes cargas normales, (a) sin reposicionamiento; (b) con reposicionamiento

- c) El procedimiento multi-etapa consiste en ensayar repetidamente bajo diferentes cargas normales la misma muestra, con la dirección de corte en la misma dirección. Más aún es posible pbajo esta modalidad tener dos posibles técnicas para realizar el ensayo de corte multietapa de la siguiente manera: Sin reposicionar la discontinuidad a su posición inicial en la etapa de corete (Fig. 4a), o reposicionando la discontinuidad a su posición inicial antes de cada etapa de corte (Fig. 4b).

9.5.5 Mediciones

9.5.5.1 *Desplazamiento Normal* (δ_n)

- a) Medición y registro de los desplazamiento snormales del espécimen en cada observación y determinar los desplazamientos normales de la sdiscontinuidad ensayada tal como ha sido definido previamente en la sección 5.3.3.
- b) Es recomendable que cuatro dispositivo sde medidad sean empleados para monitorearel cabeceo y balanceo de cada muestra ensayada. Menos unidades de medición pueden ser empleadas, p en todos los casos deben permitir determinar el desplazamiento normal en el centroide de la sección transversal de la muestra.

9.5.5.2 *Desplazamiento de Corte* (δ_s)

- a) Medición de los desplazamientos de corte del espécimen en cada observación de carga para determinar el desplazamiento de corte de la dismcontinuidad ensayada definida previamente en la sección 5.3.3.
- a) Es recomendable que dos unidades de medición sean empleadas para hacer el seguimiento de cabeceo y balanceo de la muestra ensayada. Menos unidades de medida pueden ser empleadas, pero en todos los casos debe poder determinarse el desplazamiento normal en el centroide de la sección transversal de la muestra.

9.5.5.3 *Carga Normal* (N)

Si el mecanismo de carga normal es distinto a carga por peso muerto (es decir, para la prueba CNL) la medición de la carga carga normal aplicada debe realizarse en cada observación de carga de cizallamiento con un dispositivo de medición de carga. La carga normal debe tener un seguimeinto continuo durante el ensayo

9.5.5.4 *Carga de Corte* (T)

La medición de la carga de corte aplicada con un dispositivo de medida de carga. Debe seleccionarse una frecuencia de medición que sea capaz de registrar completamente la

respuesta de carga al desplazamiento del espécimen. Esta frecuencia dependerá de la naturaleza del espécimen y de la velocidad de desplazamiento de corte. Generalmente, una medición cada 1 s o menos a lo largo de todo el ensayo.

9.6 Cálculos, Gráficos y Resultados

9.6.1 Datos

- a) Verifique que cada registro de dato tenga consistencia en todas las mediciones
- b) Si los esfuerzos nominales no son suministrados directamente por el sistema de adquisición de datos, calcule los esfuerzos normales y de corte de la siguiente manera:

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \quad (9.1)$$

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (9.2)$$

donde N es la carga normal, T es la carga de corte, A área nominal, σ_n esfuerzo normal, τ esfuerzo de corte.

- c) Como se mencionó en la sección 5.3.4.2(f), si el área nominal disminuye durante el desplazamiento de corte, esta debe ser tomada en consideración durante los cálculos de los esfuerzos nominales.
- d) Calcule los desplazamientos normales y de corte, si estos no son suministrados directamente por el equipo de adquisición de datos.

9.6.2 Gráficos y Cálculos

- a) Los siguientes gráficos son necesarios para la determinación de la resistencia al corte de la discontinuidad ensayada (Fig.5):
 - i. Gráfico del esfuerzo de corte versus el desplazamiento de corte;
 - ii. Desplazamiento normal versus desplazamiento de corte;
 - iii. Carga normal versus desplazamiento de corte, en el caso de ensayos CNS.

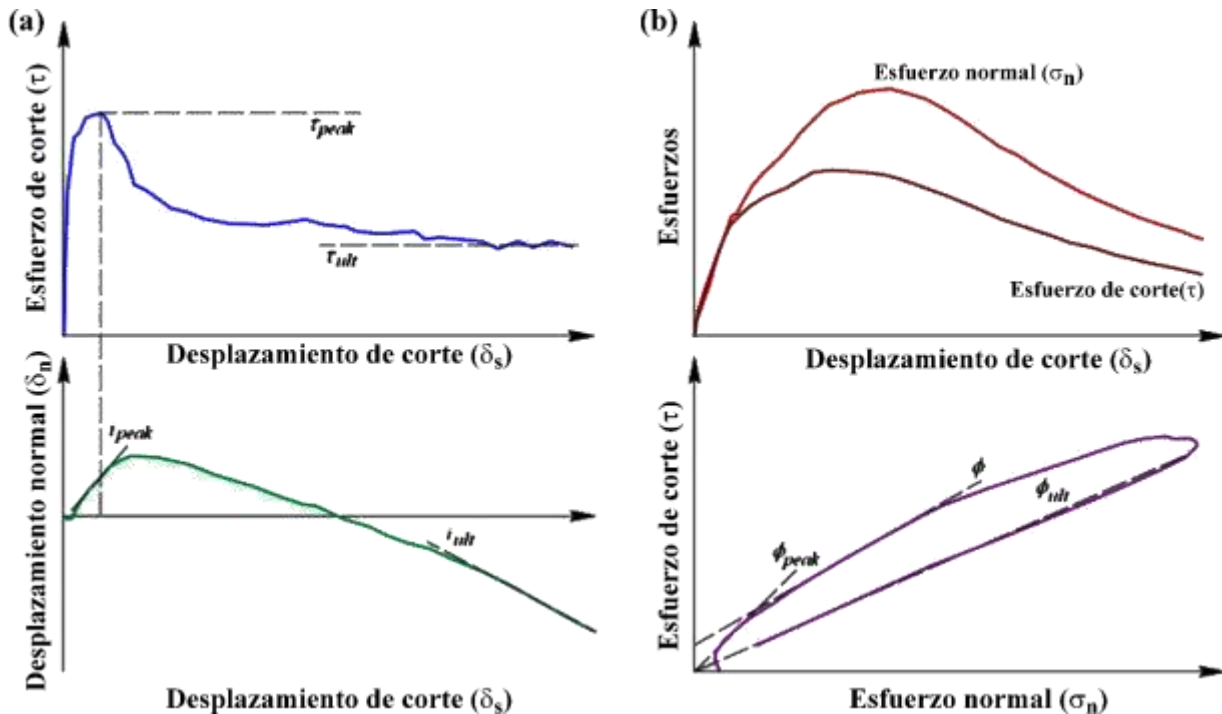


Figura 9.5 Gráfico típico de un ensayo de corte de una discontinuidad en roca, (a) bajo condición de carga normal constante (CNL); (b) bajo la condición de rigidez normal constante (CNS)

- b) Carga normal versus desplazamiento normal de la aplicación de las etapas de carga normal pueden ser también suministradas.
- c) Empleando los registros de datos y los gráficos de esfuerzo de corte versus los desplazamientos de corte, evalúe los esfuerzos de corte pico y último o residual para cada muestra de la misma discontinuidad u horizonte de ensayo, en el caso que los ensayos hallan sido de etapas simples, o para todas las etapas de ensayos multietapas de la misma muestra de roca (Fig. 6.6) (Wittke 1990).
- d) Empleando los registros de datos y el gráfico de desplazamiento normal versus desplazamiento de corte, evalúe los ángulos de dilatación pico y último o residual para cada muestra de la misma discontinuidad de roca u horizonte de ensayo, en el caso que los ensayos hallan sido de etapas simples, o para todas las etapas de ensayos multietapas de la misma muestra de roca.
- e) Realice los gráficos que representen las relaciones de esfuerzo de corte pico versus esfuerzo normal y esfuerzo de corte último o residual versus esfuerzo normal.
- f) Utilice estos gráficos para evaluar los parámetros de resistencia según el criterio de falla a emplear. El criterio de Mohr-Coulomb es generalmente adecuado para modelar los

resultados del ensayo de corte en discontinuidades en roca. En este caso, los parámetros de este criterio lineal de falla son definidos de la siguiente manera:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (9.3)$$

donde c cohesión aparente, $\tan \phi$ coeficiente de fricción, ϕ ángulo de fricción

- g) Debe tenerse especial cuidado en el uso de los parámetros de resistencia del criterio de Mohr-Coulomb. Los resultados no deben extrapolarse más allá de la gama de esfuerzos normales aplicados durante los ensayos, especialmente para valores bajos de σ_n , tal como es ilustrado en la Figura 6.6.

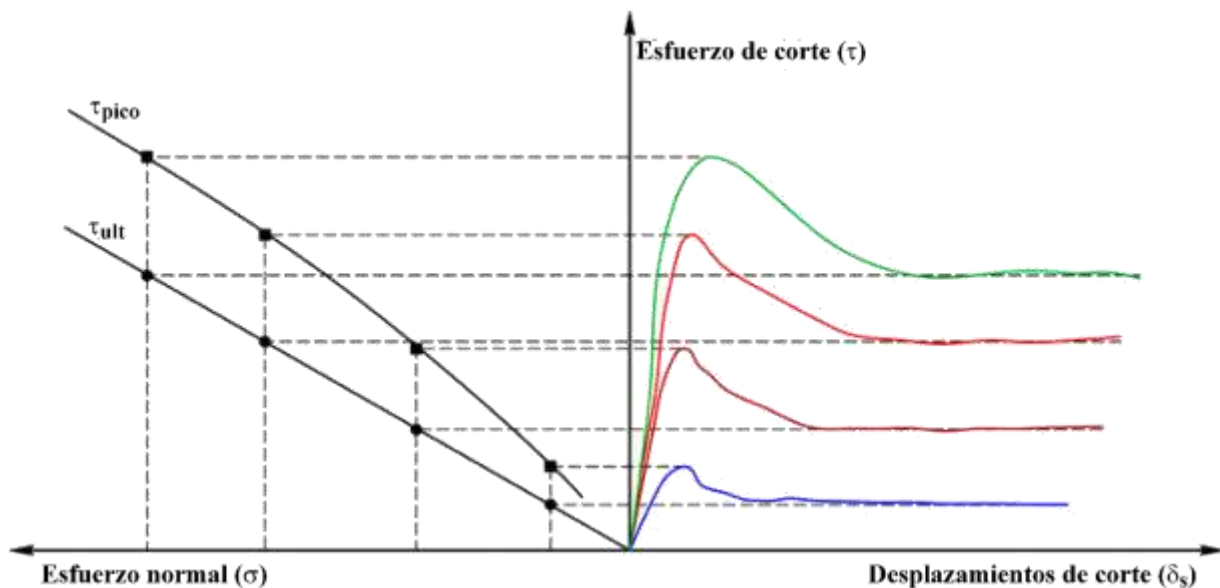


Figura 9.6 Evaluación de los esfuerzos de corte pico y último o residual

- h) En el caso de las discontinuidades rugosas o no planas, una envolvente de resistencia al corte no lineal puede ser más representativo de los resultados del ensayo. En estos casos, es posible considerar otros criterios de falla bien establecidos, calcular los parámetros respectivos, y entregarlos también como resultados de los ensayos. Estos criterios incluyen: el valor i de Patton (Barton 1976) o el JRC de Barton y Choubey (1977). Este último también permite considerar los efectos del tamaño de la muestra (Bandis et al. 1981).

-
- i) En el caso de los ensayos de varias etapas, la cohesión aparente puede ser exagerada debido a la acumulación de daño por corte con sucesivo de la misma muestra de discontinuidad ensayada.
 - j) Como las mediciones de desplazamiento al corte y normales están disponibles, los parámetros de deformabilidad tales como rigidez normal y de cizallamiento de las muestras también se pueden obtener de los ensayos.

9.6.3 Reporte de Resultados

- a) El reporte debe incluir lo siguiente:
 - i. Una descripción de los especímenes a ensayar;
 - La fecha del muestreo y ensayo; el número total de especímenes ensayados;
 - Las dimensiones del espécimen, incluyendo área nominal de la sección transversal;
 - Origen de cada espécimen, incluyendo el nombre del Proyecto, localidad, profundidad, identificación de la perforación e inclinación;
 - Una descripción geológica de cada espécimen, incluyendo la descripción de la roca intacta y superficie de corte (es decir, rugosidad, apertura, etc)
 - Orientación de las muestras y horizonte de ensayo (rumbo y buzamiento), incluyendo el ángulo relativo entre el buzamiento y la dirección de corte, o, en el caso de perforaciones, el ángulo entre la muestra y el eje de la perforación;
 - Fotografías del espécimen antes y después del ensayo;
 - ii. Un conjunto de gráficos, incluido el gráfico de esfuerzo de corte versus desplazamiento de corte, desplazamiento normal versus desplazamiento de corte, y carga normal versus desplazamiento de corte, en el caso de ensayos CNS

El gráfico de esfuerzo normal versus desplazamiento normal que representan la aplicación de la carga normal, también puede ser agregado.
 - iii. Gráficos y tablas de los valores de resistencia al corte pico y última o residual versus esfuerzo normal, pico y último o ángulo de dilatación, junto con los valores calculados para los parámetros de resistencia al corte.

- b) En el reporte, los siguientes items pueden ser incluidos. Si no, estos deben estar disponibles bajo requerimiento:
- i. Un diagrama y descripción de los equipos ensayo y descripción de los métodos empleados para las tareas de empaquetamiento, transporte, almacenamiento monitoreo y ensayos de especímenes. Se puede hacer referencia a este Método sugerido por el ISRM indicando solo las desviaciones de los procedimientos señalados e nest norma.
 - ii. Detalles de cualquier dispositivo de medición especial empleado para medir la rugosidad, áreas nominales y otras características de el espécimen. Por ejemplo, el nombre, tipo, resolución y precisión de cualquier dispositivo de medición sin contacto empleado debe ser informado.
 - iii. Tablas de datos con todos los valores requeridos para dibujar los gráficos en el presente reporte.

9.6.4 Apéndice: Terminología

Ángulo de Dilatación: es el arco tangente de la relación del desplazamiento normal al desplazamiento de corte correspondiente.

Ángulo de Fricción: es el arco tangente de la relación de los esfuerzos de corte aplicados a los correspondientes esfuerzos normales aparente, lo cual es equivalente al arco tangente de la relación de la carga de corte pico a la correspondiente carga normal.

- a) Ángulo de fricción pico (ϕ_{pico}): es el arco tangente de la relación de la esfuerzo de corte pico al correspondiente esfuerzo normal el cual es equivalente al arco tangente de la relación de la carga de corte pico a la correspondiente carga normal.
- b) Ángulo de fricción último (ϕ_{ultimo}): es el arco tangente de la relación de la esfuerzo de corte último al correspondiente esfuerzo normal el cual es equivalente al arco tangente de la relación de la carga de corte última a la correspondiente carga normal.

- c) Ángulo de fricción residual (ϕ_{res}): es igual al ángulo de fricción residual, si el equipo tiene la posibilidad de alcanzar grandes cantidades del desplazamiento de corte.

Apertura: Distancia entre las paredes de la discontinuidad medidas perpendicularmente al plano promedio de la discontinuidad.

Área Nominal (A): es el área obtenida por la medición o calculo del área de la sección transversal de la proyección de la superficie de la discontinuidad en el plano de corte.

Asperidad; Cualquier irregularidad superficial o desviación con respect al promedio del plano de discontinuidad. Las irregularidades y desviaciones pueden desde afilada o angulas a suave o redondeada.

Asperezas: Es una colección de irregularidades de la superficie que comprenden la rugosidad de la superfici de la disconyinuidad.

Cabeceo: es la rotación angular alrededor de un eje paralelo a la dirección de corte.

Cabeceo (Yaw): Es la rotación angular alrededor de un eje perpendicular a la dirección de corte y al plano de corte.

Carga de Corte Pico (T_{pico}): Es la carga de corte registrada mas alta que corresponde a una carga normal específica, después de la cual la carga de corte disminuye hasta que alcanza la carga de corte última o residual.

Carga de Corte Residual (τ_{res}): Es igual a la carga de corte residual, si el equipo es capaz de llegar a un desplazamiento de corte suficientemente grande.

Carga Máxima de Rotura (T_{ult}): Es la carga de corte correspondiente a una carga normal inicial específica, para lo cual la carga de corte permanece esencialmente constante con el aumento de desplazamiento de corte.

Carga Normal Constante [Constant Normal Load (CNL)]: es una metodología del ensayo de corte directo en roca, donde la carga normal aplicada, se mantiene constante, durante toda la ejecución del ensayo y la rigidez normal puede variar.

Coefficiente de fricción: es la relación de los esfuerzos de corte aplicados al correspondiente esfuerzo normal aparente el cual es equivalente al arco tangente de la relación de la carga de corte a la correspondiente carga normal.

- a) Coeficiente de fricción pico (μ_{pico}): es la relación de la esfuerzo de corte pico al correspondiente esfuerzo normal el cual es equivalente al arco tangente de la relación de la carga de corte pico a la correspondiente carga normal.
- b) Coeficiente de fricción último (μ_{ultimo}): es la relación de la esfuerzo de corte último al correspondiente esfuerzo normal el cual es equivalente al arco tangente de la relación de la carga de corte última a la correspondiente carga normal.
- c) Coeficiente de fricción residual (μ_{res}): es igual al coeficiente de fricción residual, si el equipo tiene la posibilidad de alcanzar grandes cantidades del desplazamiento de corte.

Ángulo de Dilatancia: es el arco tangente de la relación de desplazamiento normal al correspondiente desplazamiento de corte.

- a) Ángulo de Dilatancia Pico (i_{pico}): es el arcotangente de la relación de desplazamiento normal al la resistencia de corte pico, correspondiente al desplazamiento de corte;
- b) Ángulo de Dilatancia Último (i_{ult}): es el arcotangente de la relación de desplazamiento normal al la resistencia de corte última, correspondiente al desplazamiento de corte;

- c) Ángulo de Dilatancia Residual (i_{res}): es el arcotangente de la relación de desplazamiento normal al la resistencia de corte última, correspondiente al desplazamiento de corte; (Nota: Tenga en cuenta que por lo general es difícil llegar a la verdadera resistencia residual, debido a que el desplazamiento al corte es limitado, y el término "resistencia última" debe ser utilizado).

Desplazamiento de corte (δ_s): Es el desplazamiento relativo de las mitades de la discontinuidad medidos a lo largo de la dirección de la carga de corte.

Discontinuidad: Cualquier fractura mecánica de la integridad de las propiedades físicas de la roca, tales como planos de estratificación, fracturas, clivaje, grietas, diaclasas o fallas. Las discontinuidades pueden ser descritas como:

- a) Cerrada; (es decir, consiste en superficies rocosas en contacto permanente y generalmente contacto continuo);
- b) Abiertas: (es decir, consiste en superficies rocosas separadas por un espacio abierto)
- c) Parcialmente o totalmente Rellenas: (es decir, que esta configurada por de superficies de roca separadas por un espacio, que es parcial o totalmente llena por cualquier tipo de material de relleno, tal como arcilla, brechas, milonita, revestimientos delgados o venas de relleno), y puede ser caracterizadas como una función de su geometría como:
 - i. Planas o no planas (onduladas); (es decir, el nivel de desviación del plano promedio de la discontinuidad)
 - ii. Bien encajadas a mal emparejadas: (es decir, el grado de entramamiento de dos paredes)

Esfuerzo Aparente: es el esfuerzo nominal en la superficie de la discontinuidad, la cual es la carga normal externa o carga de corte aplicada a la discontinuidad por unidad de área.

Esfuerzo de Corte Pico: Es el esfuerzo de corte registrado más alto que corresponde a un esfuerzo normal aparente, después de la cual el esfuerzo de corte disminuye hasta que alcanza el esfuerzo de corte último o residual.

Esfuerzo de Corte Residual: igual a la resistencia al corte residual, si el aparato es capaz de alcanzar un desplazamiento de corte lo suficientemente grande.

Esfuerzo de Corte Último (τ_{ult}): Es el esfuerzo de corte correspondiente a un esfuerzo normal inicial aparente, durante la cual el esfuerzo de corte permanece esencialmente constante con el aumento de desplazamiento de corte.

Inclinación Angular: Es la rotación alrededor de un eje perpendicular a la dirección de corte y paralelo al plano de corte.

Sistema de Lazo Cerrado: Es un Sistema de ensayo en el que la verdadera respuesta del actuador (es) de carga se compara continuamente con la respuesta deseada de la carga del actuador (es decir, un ciclo cerrado de retroalimentación) y se corrige si es necesario.

Rigidez Normal Constante [Constant Normal Stiffness (CNS)]: es una metodología del ensayo de corte directo en roca, donde una rigidez normal es aplicada, se mantiene constante durante toda la ejecución del ensayo y la carga normal puede variar.

Rugosidad: una medida de la desigualdad inherente y la ondulación de una superficie de discontinuidad con respecto a su plano medio.

Rigidez de Corte: Es la relación de la esfuerzo de corte al desplazamiento de corte correspondiente antes de alcanzar la resistencia al esfuerzo cortante de pico.

Sistema de Ensayo de Lazo Abierto: Es un sistema de ensayo en el cual la carga requerida por el ensayo es enviada como parámetro de entrada al actuador de carga sin tener una retroalimentación de la respuesta instantánea del actuador no permitiendo la corrección del valor del parámetro dado como entrada.

Sistema de Ensayo de Lazo Cerrado: Es un sistema de ensayo en el cual la carga requerida por el ensayo es enviada como parámetro de entrada al actuador de carga teniendo

una retroalimentación de la respuesta instantánea del actuador permitiendo la corrección del valor del parámetro dado como entrada, si es necesario (es decir, un lazo de retroalimentación).

9.7 Referencias

- Alonso EE, Pinyol NM, Pineda JA (2011) Foundation of a gravity dam on layered soft rock. Shear strength of bedding planes in laboratory and large “in situ” tests. In: Anagnostopoulos A et al. (eds) Proc. 15th European Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Athens, Greece, IOS Press, Amsterdam
- ASTM (2008) Standard test method for performing laboratory direct shear strength tests of rock specimens under constant normal force. ASTM International, West Conshohocken, p 12
- Aydan O, Shimizu Y, Kawamoto T (1992) The anisotropy of surface morphology characteristics of rock discontinuities. *Rock Mech Rock Eng* 29(1):47–59
- Bandis S, Lumsden AC, Barton N (1981) Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 18(1):1–21
- Barla G, Barla M, Martinotti M E (2010) Development of a new direct shear testing apparatus. *Rock Mech Rock Eng* 43:117–122
- Barla G, Robotti F, Vai L (2011) Revisiting large size direct shear testing of rock mass foundations. In: Pina C, Portela E, Gomes J (eds), 6th International Conference on Dam Engineering, Lisbon, Portugal. LNEC, Lisbon
- Barton N (1976) Shear strength of rock and rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 13(9):255–279
- Barton N, Choubey V (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech Rock Eng* 10:1–54

-
- Blümel M, Pötsch M (2003) Direct shear testing system. *Geotechnical Measurements and modelling*. In: Natau O, Fecker E, Pimentel E (eds), Karlsruhe, Germany, Swets and Zeitlinger, Lisse, pp 327–332
- Blümel M, Button EA, Pötsch M (2003) Stiffness controlled shear behavior of rock. 10th ISRM Congress, Technology roadmap for rockmechanics. Johannesburg, SouthAfrica. SouthAfrican Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, vol 1, pp 121–124
- Boulon M (1995) A 3D direct shear device for testing the mechanical behaviour and the hydraulic conductivity of rock joints. In: *Second Int. Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock MJFR-2*, Vienna, Balkema, Rotterdam, pp 407–413
- Chryssanthakis P (2004) Oskarshamn site investigation. Drill hole KSH01A. The normal stress and shear tests on joints. SKB Report No. P-04-185. SKB, Stockholm, p 38
- Grasselli G (2001) Shear strength of rock joints based on quantified surface description. PhD Dissertation. École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- Hencher SR, Richards LR (1982) The basic frictional resistance of sheeting joints in Hong Kong granite. *Hong Kong Engineer*, pp 21–25
- Indraratna B, Haque A, Aziz N (1999) Shear behaviour of idealized infilled joints under constant normal stiffness. *Geotechnique* 49(3):331–355
- ISRM (2007) The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay R Hudson JA (eds), *Suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM*, Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara
- JGS (2008) Method for direct shear test on a rock discontinuity. *Japanese Geotechnical Society*, Tokyo, p 8
- Jiang Y, Xiao J, Tanabashi Y, Mizokami T (2004) Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition. *Int J Rock Mech Min Sci* 41(2):275–286

-
- Johnston I, Lam T (1989) Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints—analysis. *J Geotec Engng* 115(5):711–727
- Leichnitz W (1985) Mechanical properties of rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 22(5):313–321
- Muralha J (2007) Stress paths in laboratory rock joint shear tests. In: Ribeiro Sousa L, Olalla C, Grossmann N (eds), 11th ISRM Congress The second half century of Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, Taylor & Francis, London, vol 1, pp 431–434
- Priest SD (1993) *Discontinuity analysis for rock engineering*, 1st edn. Chapman & Hall, London
- Stimpson B, Metcalfe RG, Walton G (1970) A new field technique for sealing and packing rock and soil samples. *Q J Eng Geol* 3:127–133
- Tatone BSA, Grasselli G (2009) A method to evaluate the three dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials. *Rev Sci Instrum* 80:125110–125119
- USACE (1980) Method of test for direct shear strength of rock core specimens. United States Army Corps of Engineers, Vicksburg, p 9
- Wittke W (1990) *Rock mechanics: theory and applications with case histories*. Springer-Verlag, Berlin

APENDICE B

10 Laboratorio de Mecánica de Rocas **Equation Section (Next)**

El Laboratorio de Mecánica de Rocas esta adcrito al Departamento de Minas, Escuela de Geología Minas y Geofísica, Faculatd de Ingenieria de la Universidad Central de Venezuela: El cual cuenta con un Sistema Servo-Controlado Computarizado, para realizar ensayos Triaxiales y Corte Directo, modelo RDS-500,, sumitrado por la empresa Geotechnical Consulting Testing System (GCTS), Figura 5.1.

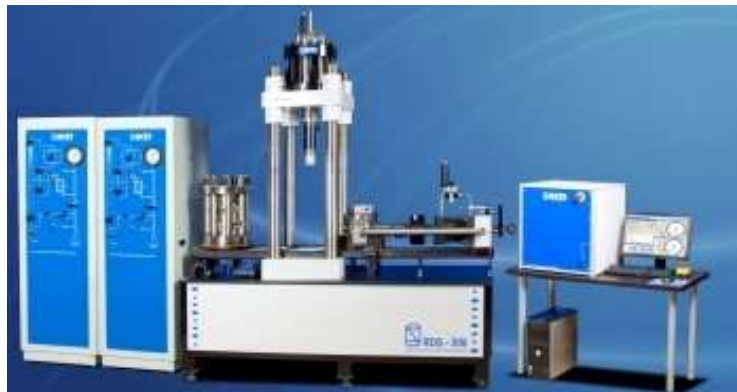


Figura 10.1 Sistema RDS-500, para ejecución de Ensayos de Corte Directo y Triaxial

Este equipo es sumamente versátil, para realizar una amplia gama de ensayos en roca. Está totalmente automatizado para la realización de ensayos, permitiendo que se diseñe el ensayo y el equipo lo realice de manera automatizada.

Dentro de las principales características tenemos las siguientes:

10.1.1 Sistema de lazo cerrado de doble actuador (compresión/tracción):

- Para el ensayo de corte el actuador de carga de corte puede alcanzar una fuerza de 500 kN (50 ton) con un desplazamiento máximo del actuador de ± 50 mm.
- Para los ensayos de compresión se puede alcanzar una fuerza máxima de 1500 kN (150 ton), con un desplazamiento máximo del actuador de ± 100 mm.

10.1.2 Marco de Carga

Cuatro columnas verticales de montaje con extremos roscados para el ajuste de la cruceta, con las siguientes especificaciones:

- 50 mm (2 pulgadas) de ajuste
- 1.500 kN de capacidad de carga de compresión estática (820 kN de capacidad de carga a tracción).
- Velocidad máxima 300 mm/minuto.
- Rótula giratoria de 100 mm con una dureza 45HRC.
- Rigidez 1.750 kN/mm.
- Sensor de Deformación, con un rango de 100 mm.
- Colector, incluyendo el solenoide de control de encendido de alta presión y acumulador para reducir al mínimo las ondas de presión.
- Servo válvula electro-hidráulica de alta frecuencia de dos etapas con un flujo de 38 l/min.
- Distancia máxima entre platos de 800 mm.
- Distancia entre columnas de 400 mm entre.
- Montado en la plataforma de acero de alta resistencia

10.1.3 Celda de Carga para Ensayos Triaxiales

La celda de carga, es tipo columna, con una capacidad de 1,600 kN y una precisión de 0.25%

10.1.4 Ensayos de Corte

La caja de corte superior con caja de corte traslación horizontal fija e inferior montado sobre cojinetes de fricción para minimizar la fricción horizontal.

- Se incluye un mecanismo de bloqueo ajustable para prevenir la rotación en una o dos direcciones, o permitir la rotación en cualquier dirección (del plano de corte de la muestra ha ensayar, si es necesario)
- El tamaño máximo de la muestra, hasta de 150 mm (6") de diámetro y muestras de forma prismática de hasta 100 x 100 mm de área y hasta 150 mm de altura.

- ± 500 kN (± 50 toneladas) de doble acción (pull/push) en el actuador hidráulico de carga de corte
- ± 50 mm (± 2 pulgadas) de recorrido
- Servo-válvula electro-hidráulica alta frecuencia de dos etapas con un flujo de 19 l/min.
- Colector, incluyendo el solenoide de control de encendido de alta presión y acumulador para reducir al mínimo las ondas de presión.
- Cajas de corte superior e inferior para dar cabida a los anillos con los especímenes
- Anillos para especímenes muestra con un diámetro interno de 150 mm para las muestras de roca de hasta 150 mm de alto. Para ensayos con núcleos cilíndricos, cubos, prismas, o fragmentos de roca.
- Separador de anillos porta muestras con un espacio de corte de 10 mm.
- Transductor de presión diferencial para medir la fuerza de corte.
- Sensor de deformación. Para medir las deformaciones por esfuerzo de corte. Rango ± 50 mm. 0,075% de precisión
- Celda de Carga Normal de bajo perfil de 500 kN. 0,05% de precisión.
- Celda de Carga Corte de bajo perfil de ± 300 kN. 0,05% de precisión.

10.1.4.1 Caja de Corte

Dispositivo de deformación plana de la caja de Corte. Para la medición de la caja de corte superior con respecto al plano normal de deformación.

- (4) LVDT's con un rango de ± 6 mm.
- (4) soportes para los cuatro sensores de deformación (LVDT), posicionados a 90 grados para la medición de la deformación normal promedio y medición del tope de caja a medida que ocurre el desplazamiento
- El programa de control permite la ejecución de ensayos de corte directo bajo las siguientes modalidades:
 - Esfuerzo Normal Constante [Constant Normal Load (CNL)]
 - Rigidez Normal Constante [Constant Normal Stiffness(CNS)]

10.1.5 Celda Triaxial de alta Presión - HTRX-200

La Celda Triaxial está construida en acero inoxidable, para una presión de confinamiento máxima de 200 MPa (29,000 psi) y una carga axial de hasta 3,500 kN.

- Permite muestras con un diámetro de 25 mm hasta 63 mm y con una longitud de hasta 2 veces el diámetro.
- 14 conectores de alta presión, para conectar los diferentes sensores dentro de la celda (in-vessel) con el controlador.
- Pistón de carga construido con acero tratado térmicamente con una capacidad máxima de carga axial de 3.5 MN
- Conectores para los fluidos de la presión de celda y presión de poros
- Instrumentación axial y circunferencial dentro del diámetro interno de la celda para una medición precisa de las deformaciones y relación de Poisson
- El control de temperatura de la celda triaxial HTRX, es realizado por medio de termocuplas internas y externas para minimizar los gradientes de temperatura y controlar los choques térmicos en la celda.
- El cabezal superior de la muestra tiene un asiento esférico, para compensar las caras no paralelas
- Diámetros de cabezales disponibles
 - BX (42 mm)
 - NX (54 mm – 2.125")
 - HQ (63 mm – 2.5")
- Diámetro del Cabezal para Fracturamiento Hidráulico
 - NX (54 mm – 2.125")
- Unidad de medición de las deformaciones axiales y circunferenciales dentro de la celda triaxial hasta presiones de 210 MPa. En un medio no conductivo.
 - Diámetros desde 35 mm hasta 54 mm
 - LDVT con un rango de ± 25 mm
- Sistema de calentamiento para la celda triaxial hasta +150°C.
 - (2) termocuplas con un rango de 0°C a +150°C
 - (2) Módulos Universales de Acondicionamiento de Señal para las termocuplas

- EL aislamiento en la base de la celda es muy importante para eliminar los gradientes térmicos en el espécimen.

10.1.6 Sistema de Intensificación de Presión

El sistema de Intensificador de presión es ideal para el control de la presión de celda en los ensayos triaxiales, presión head en los ensayos de permeabilidad o presión de fluidos en ensayos de hidro-fracturamiento. Este intensificador también puede medir el flujo en ensayos de permeabilidad y cambio de volumen en ensayos triaxiales mientras se aplican las presiones prescritas en el ensayo. Este intensificador trabaja con el Controlador Digital Servo y el programa triaxial, permitiendo realizar ensayos más avanzados tales como trayectorias de esfuerzo/deformación. Estas unidades incluyen un tanque de almacenamiento de 19,000 cc, nivel del tanque e indicadores de flujo del fluido, medidor de presión análogo y todas las válvulas necesarias para simplificar todas las operaciones. Los tres componentes se encuentran en un armario de metal. El intensificador de pistón dual para ensayos donde el flujo continuo es requerido y las pérdidas de presión no pueden ser tolerados. Este intensificador incluye dos intensificadores y dos servo válvulas con todos los accesorios de verificación necesarios, llaves y control de software para una operación automática. Estas unidades operan con una presión de aire de 700kPa (100 psi) de entrada para obtener una presión de salida de 140 MPa (20,000 psi)

10.1.6.1 Sistema de Intensificación de Presión de Celda

El intensificador de presión de celda está construido de acero inoxidable con un servo control Presión/Volumen para el control directo y/o medición de la presión de celda y volumen.

- Presión de servicio de 210 MPa (30,000 psi) y transductor con una resolución de 0.01 MPa
- Volumen del intensificador 280 cc y transductor con una resolución de 0.005 cc
- Servo válvula Electro-Hidráulica de dos etapas y de Alta Frecuencia permitiendo un flujo de 4 l/min
- El colector incluye un solenoide de control de presión encendido/alto y acumulador para minimizar las ondas de presión

- Panel de presión con válvulas, transductores de presión con una precisión de 0.25% y controles de flujo
- Tanque de almacenamiento de fluido con una capacidad de 19 litros con presión/vacio/ventilación y paneles indicadores de nivel y flujo para el fácil llenado y drenaje de la celda triaxial

10.1.6.2 Sistema de Intensificación de Presión de Poros

El sistema de intensificación de presión de poros, está construido con acero inoxidable para un control directo y/o medición de la presión de poro y volumen. Esta opción permite realizar ensayos con Trayectoria de Esfuerzos (Stress Path), Fracturamiento Hidráulico (Hydraulic Fracturing) /y Medición de Permeabilidad (Permeability).

- Presión de servicio de 210 MPa (30,000 psi) y transductor con una resolución de 0.01 MPa
- Volumen del intensificador 280 cc y transductor con una resolución de 0.005 cc
- Servo válvula Electro-Hidráulica de dos etapas y de Alta Frecuencia permitiendo un flujo de 4 l/min
- El colector incluye un solenoide de control de presión encendido/alto y acumulador para minimizar las ondas de presión
- Panel de presión con válvulas, transductores de presión con una precisión de 0.25% y controles de flujo
- Tanque de almacenamiento de fluido con una capacidad de 19 litros con presión/vacio/ventilación y paneles indicadores de nivel y flujo para el fácil llenado y drenaje de la celda triaxial

10.1.7 Equipo de Tracción Indirecta (Ensayo Brasilerero)

El equipo para la determinación de la tracción indirecta por el Método Brasilerero, esta de acuerdo a las especificaciones de la International Society for Rock Mechanics.

Se disponen de mordazas de carga para ensayos con muestras con diámetros de BX (42 mm), NX (54 mm) y HQ (63 mm)

10.1.8 Sistema de Medición de Velocidades Ultrasónicas – ULT-100

Las mediciones de velocidad ultrasónica son empleadas para el estudio del comportamiento de los materiales geológicos para simular las condiciones de esfuerzo in-situ a través de especímenes de suelo, roca o concreto. Los ensayos ultrasónicos no son destructivos y suministran información de la onda de compresión (P) y de corte (S), las cuales pueden ser empleadas para calcular las constantes dinámicas tales como Relación de Poisson (ν), el Módulo de Young (E), Módulo de Compresibilidad (bulk) (K) y Módulo de Corte (G).

El Sistema de ensayo de Medición de Velocidades, puede ser programado para obtener mediciones instantáneas o programar varias mediciones atiempos estipulados y/o otros parámetros de ensayo.

El programa determina las velocidades de las ondas de compresión y corte, almacenandolas de forma digital. El sistema emplea un computador de adquisición de datos de alta velocidad y un paquete sofisticado para el análisis de los datos.

El programa de computación está integrado en el entorno del programa CATS. La amplitud de pulso, velocidad de muestreo, ganancia de entrada y generador de formas de onda se encuentra controlado por el programa, mientras la que la forma de onda es visualizada en la pantalla del computador.

Las correcciones de los cabezales “cara a cara” (“face to face”) pueden ser dadas al software para que las velocidades de las ondas de corte y compresión puedan ser calculadas de manera simultánea. Los datos pueden ser almacenados en el disco para análisis posteriores empleando el programa. El programa permite al usuario ver los datos originales y el espectro de frecuencias de las formas de onda. Filtros de las formas de onda, grado de filtraje de las formas de onda, selección de frecuencias Pasa Banda (bajo/alto), Stop Band Rejection (dB) y Transición de Ancho de Banda (kHz) pueden ser aplicados a los datos originales para generar una forma de onda “filtrada”, la cual es muy conveniente cuando tenemos formas de onda de muy mala calidad.

El Programa de Velocidad Ultrasónica puede ser empleado con una variedad de sistemas de laboratorio, que permitan simular las condiciones de esfuerzo in-situ o ensayos de "banco" (es decir, no son aplicados esfuerzos adicionales al espécimen). Los sistemas que pueden simular las condiciones de esfuerzo in-situ incluyen las celdas triaxiales y poliaxiales (triaxial verdadero) como también los ensayos de campo in-situ. Este sistema también incluye datos generales de adquisición de datos de otros parámetros de ensayos como la carga y la deformación.

El programa contiene una base de datos extensiva de velocidades ultrasónicas para materiales comunes tales como metales, rocas y suelos que sugieren de manera gráfica los tiempos de llegada.

10.1.8.1 Especificaciones

10.1.8.1.1 Acondicionamiento de Señal y generación de Pulso

- Pulso digitalmente controlado y receptor con filtro anti-alias.
- Receptor con un ancho de banda de 10 MHz.
- Energía de la amplitud de pulso seleccionable por el usuario.
- Aumento del tiempo de pulso menor de 5 nano-segundo
- Velocidad de adquisición de 20 MHz con una tarjeta de digitalización con resolución de 12 bit (con 8 rangos: 156 kHz, 312 kHz, 625 kHz, 1.25 MHz, 2.5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, y 20 MHz)
- 20 MHz acquisition rate with 12 bit resolution digitizing board (with 8 ranges:

10.1.8.1.2 Interfase al computador & Adquisición de datos

- 8 entradas analógicas con un filtro anti-alias de 200 Hz
- 12-bit de resolución, ± 10 volt, tarjeta de adquisición de datos A/D (frecuencia de muestreo de 10 kHz).
- 2 canales D/A para salidas de velocidades de ondas P & S a una adquisición externa o sistema de control

10.1.8.1.3 Velocidad Ultrasonica & Controlador de Adquisición de Datos:

- Procesamiento de señal digital basada en Micro-Procesador y controladora de mejoramiento de señal con software para medición automática de velocidades, inclSoftware de adquisición con visualización de unidades y gruye el apilamiento de la forma de onda, filtrado y análisis espectral.
- Software de adquisición con visualización de unidades ingenietiles y gráficos hast 8 canales.
- Medición automática de las velocidades P & S, programable por tiempo o por cambio en el nivel de la señal de entrada.
- Salida de datos compatibles con Excel u otros programas.
- Selector controlado por computador para la selección automática del pulsador de onda P & S y transductores receptores.
- Cálculo automatico de la velocidad los los siguientes métodos:
 1. Umbral absoluto (Absolute threshold)
 2. Umbral relativo de máxima amplitud (Relative threshold of maximum amplitude)
 3. Umbral relativo del primer pico (Relative threshold of first peak)
 4. Primer pico (First peak)
 5. Tangente del primer pico (Tangent of first peak)
- Resultados de la Relación de Poison, Módulo de Young, Módulo de Compresibilidad (Bulk) y Módulo de Corte.

10.1.9 Sistema de Adquisición de Datos (SCON-2000)

Sistema controlador servo-digital basado en microprocesador, generador de funciones, adquisición de datos, y la unidad de E/S digital. Servo-control avanzado de cualquier sensor de sistema con "on-the-fly bump-less" de conmutación de transferencia entre cualquier transductor conectado o entrada calculada. Puede ser conFigurado para leer hasta 28 transductores o insumos y controlar hasta 8 salidas.

- Micro-procesador de 850MHz con 64Mb RAM y 128Mb de disco de estado sólido.
- 6kHz de velocidad máxima de ciclo (velocidad de conversion entre canales 250kHz)
- Sample & Hold para eliminar el sesgo en los datos
- Resolución 16-bit.

- Acepta hasta 24 tarjetas de acondicionamiento de señal.
- Acepta hasta 8 series de tarjetas en cualquier combinación de tarjetas de salidas servo-controladas.
- Lectura interna del controlador, bomba de aceite, nivel de la bomba de aceite y temperature externa.
- 8 entradas digitales y 8 salidas digitales.
- Contador digital de 48 bit.
- Controlador de perro guardian para detectar la condición del programa para parade automática por interlock
- Comunicaciones TCP/IP y RS-232

10.1.10 Tarjeta Universal de Acondicionamiento de Señal

Módulo para acondicionamiento de señal universal para celdas de cargas, LDVT (AC y DC), sensors de presión, termocuplas y otras señales de entrada analógicas. Cada modulo incluye un controlador digital de ganancia y ajuste (computador).

- Resolución 16bit
- Rango de ajuste: ± 5 volts.
- Excitación DC ± 5 volt
- Excitación AC 5 Volt RMS @ 3 kHz
- Filtro anti-alias con una respuesta plana de 0-100 Hz con menos de 0.009 dB de onda y más de 60 dB de atenuación a frecuencias mayores de 1,500 Hz.

10.1.11 Tarjeta de Amplificación Servo

Resolución de 16 bits y 325 mA máximo tablero servo amplificador de salida para controlar servoválvulas. Incluye nula, la ganancia, la amplitud de oscilación, la frecuencia de oscilación, y los ajustes de límite de corriente.

10.1.12 Programa de Control Avanzado (CATS-ADV Advanced Computer Aided Testing Software)

Programa avanzado para el servo-control digital desde cualquier sensor o canal calculado "sobre la marcha" con menor interferencia. Incluye canales calculados para esfuerzos, deformaciones, etc y ecuaciones definidas por el usuario. Pajo el Sistema operativo WINDOWS 32bit

- Conversiones polinómicas de tercer grado desde la salida del sensor en tiempo real.
- Capacidad para definir entradas definidas por el usuario como una función de otras entradas y corregir por otra entrada a través de un polinomio de tercer grado o para ver el control en tiempo real.
- Biblioteca unidades conFigurable para realizar automáticamente conversiones de unidades.
- Capacidad de representar gráficamente en ejes lineales, semi-log y log de los parámetros especificados por el usuario
- Capacidad ilimitada de herramientas de visualización conFigurables por el usuario (metros, bares, etc.)
- Análisis de la señal que dará FFT de cualquier sistema de señal.
- Control avanzado PID con control ajustable.
- Compensación de Pico/Valle en el control del sistema.
- Estabilización por cualquier entrada de control asociada, no sólo el sensor de control de retroalimentación.
- Definición por el usuario de procedimientos con hasta 100 etapas.
- Modos de adquisición de datos temporizadas, paso a nivel, y pico/valle.
- Sincronización de control independiente y simultánea de hasta 16 canales de servo control digital (bucle cerrado o abierto).
- Control de transferencia "suave o bump-less" desde/o a cualquier sensor o entrada calculada.
- Procedimientos de pruebas automaticas.
- Biblioteca de formas de onda incluyendo Rampa, Rampa + Dwell, Seno, Haversine, triangular, cuadrada, aleatorio, y definidas por el usuario.

- Frecuencia y la amplitud de barrido.
- Creación de variedad de formas de onda incluyendo perfiles generados por los usuarios, tales como registros terremotos digitalizados.
- Creación sencilla de procedimientos de ensayos cíclicos y estáticos.

10.1.12.1 Módulo para el ensayo de corte directo

(CATS-DSH Direct Shear Software Module)

- Control por esfuerzo de corte o por deformación de corte, esfuerzo normal, presentación en tiempo real de manera gráfica del progreso del ensayo con auto-zoom, Sistema automático de conversión de unidades SI o Ingles, corrección automática del área y presentación amigable de los datos de salida.
- Control de la carga Normal/Deformación para realizar el ensayo de Rigidez Normal donde las cargas son una función de una rigidez preestablecida para simularr la compresibilidad del terreno en un plano de corte.

10.1.12.2 Módulo para el Ensayo Triaxial

(CATS-TRX-Triaxial Software Module)

El módulo CATS Triaxial, permite realizar ensayos triaxiales de una manera muy simplificada, por la incorporación de la programación directa del usuario parámetros calculados en las unidades de interés (esfuerzo, deformación, etc.) basados en las dimensiones del espécimen. Estos parámetros son calculados en tiempo real y están disponibles para su representación gráfica y/o control. Empleando los parámetros calculados directamente se elimina la compleja y laboriosa tarea de precalcular el diseño de los programas de ensayo. Permitiendo al usuario concentrarse en el comportamiento del material más que la operación del equipo y la electrónica. Los datos pueden ser fácilmente exportables a otros programas de Windows como Excel. El programa ofrece una amplia selección de unidades para visualizar cada parámetro permitiendo una mezcla de sistemas de unidades. El manejo de las unidades es totalmente automático.

El módulo de ensayo triaxial, tiene la habilidad de controlar automáticamente los tres ejes de ejes del ensayo.: Actuador Axial, Presión de Celda, Presión de Poros. Los Avanzados controles del marco de carga, presión de celda, presión de poro y temperatura de la cámara permite una muy precisa y sincronizada ejecución de los comandos prescritos en el ensayo,

En adición, los parámetros son leídos directamente de los sensores, el módulo triaxial tiene 20 entradas de entradas calculadas, tal como se muestra en la tabla 5.1. Estos parámetros son calculados en tiempo real y están disponibles para el seguimiento y/o control. El usuario puede seleccionar el método para calcular las deformaciones: ϵ_a , ϵ_r , y ϵ_v , las cuales pueden ser a través de una entrada directa, o calculadas como una función de otra deformación. ϵ_a medida directamente del sensor de deformación axial desde el marco de carga, empleando como entrada el medidor de deformación axial. ϵ_r puede ser medido directamente por medio de la unidad de deformación Radial, Diametral o Circunferencial o puede ser calculada como función de otras deformaciones y puede ser medida internamente de la muestra (presión de poro) o externamente (volumen de la celda), o puede ser una función de ϵ_a y ϵ_r . Todos los parámetros mencionados son automáticamente calculados de las dimensiones del espécimen y de la configuración del sistema.

Tabla 10.1 Salidas de entradas calculadas directamente por CATS-TRX

1. ϵ_a – Deformación Axial (Axial Strain)	11. p Cambridge Mohr Parameter Stress
2. ϵ_r – Deformación Radial (Radial Strain)	12. p' Cambridge Mohr Parameter Effective Stress
3. ϵ_v – Deformación Volumétrica (Volumetric Strain)	13. p MIT Mohr Parameter Stress
4. ϵ_{oct} – Deformación Octahédrica (Octahedral Strain)	14. p' MIT Mohr Parameter Effective Stress
5. γ – Deformación de corte (Shear Strain)	15. q Mohr Parameter Stress
6. A_c – Corrected Area	16. τ_{oct} – Esfuerzo de corte Octahédrico (Octahedral Shear Stress)
7. σ_d – Deviator Stress	17. U_{ex} – Exceso de presión de poros
8. σ_a – Axial Stress	18. μ – Relación de Poisson
9. σ_a' – Axial Effective Stress	19. E_t – Módulo de Young tangente
10. σ_c' – Cell Effective Pressure	20. E_s – Módulo de Young secante

El programa incluye un procedimiento automático para que el pistón haga contacto con el espécimen por la primera medición de deformación de control o hasta que la carga sea detectada y entonces el control de esfuerzo alcanzará la carga de asiento prescrita. El programa corrige el σ_d – esfuerzo desviador para las cargas de empuje del pistón generadas por la presión confinante. Controla el σ_d – esfuerzo directamente previniendo que el pistón de carga pierda el contacto con el espécimen cuando cambia la presión de confinamiento (manual o programada). Los esfuerzos son calculados con respecto al área corregida, no sobre el área original, de manera de obtener los “esfuerzos verdaderos” que son calculados y/o controlados en tiempo real. El programa CATS-TRX suministra un procedimiento por defecto para la adquisición de datos que puede ser modificado por el usuario, variando las velocidades de adquisición de datos.

El módulo de Triaxial en Roca, dispone de 4 Etapas totalmente independientes: Consolidación, carga estática, Carga Dinámica y Universal. El programa puede estar compuesto de hasta 100 etapas en cualquier orden o repetirse tantas veces como sea requerido. Con la capacidad de colocar las deformaciones en cero y la actualización de las dimensiones del espécimen al finalizar cualquier etapa, el usuario puede realizar ensayos multi etapas empleando un solo espécimen y un solo programa de ensayo. CATS-TRX-ROCKS, le permite al usuario configurar la pantalla de su computador con un número virtual e infinito de presentaciones y gráficos. El usuario puede seleccionar diferentes herramientas y visualizarlas en tiempo real de cualquier sensor de salida o parámetro calculado. Adicionalmente el usuario puede configurar gráficos y presentarlos también en tiempo real de cualquier parámetro durante la ejecución del ensayo. La pantalla puede ser guardada y re-usada en cualquier momento posterior.

10.1.12.2.1 Consolidación

La etapa de Consolidación permite realizar una consolidación isotrópica o anisotrópica. Esta etapa de consolidación tiene la característica de aplicación de esfuerzo de consolidación en el tiempo (Time to Apply Consolidation Stress), es decir la consolidación es aplicada de manera incremental en vez de manera instantánea.

10.1.12.2 Carga Estática

La etapa de Carga Estática es fácil de configurada, en la etapa de carga donde el control de todos los tres ejes de la prueba se puede establecer, ya sea con las funciones constantes o incrementales. Cualquier parámetro del ensayo, medido o calculado, se puede seleccionar para el control permitiendo la realización de ensayos sofisticados. El control de transferencia suavizado o "bump less" de un parámetro a otro en el medio de un ensayo son también posibles, eliminando cualquier perturbación de la muestra durante esta transferencia. De esta manera, un ensayo puede ser programado para comenzar con el control del esfuerzo y a continuación, cambiar el control a deformación axial o radial, para obtener mejores tasas de carga, así como para reducir la velocidad durante la falla del espécimen. Estas opciones de control están disponibles en los tres ejes, accionamiento axial, presión de la celda, y la presión de poro. De esta manera, el pistón de carga se puede programar fácilmente para aplicarse deformaciones axiales a una velocidad constante mientras que la presión de confinamiento está programado para mantener en cero la deformación radial (ensayo K_0).

Esta etapa también cuenta con la capacidad de cambiar manualmente las tasas de esfuerzo/deformación durante el ensayo, para los tres ejes. El usuario puede dejar la selección de adquisición de datos para ser automática, mientras que el software selecciona los parámetros, o el usuario puede prescribir manualmente los parámetros de adquisición de datos. La etapa de carga estática puede ser detenida por numerosos métodos que se pueden programar, incluyendo por el tiempo, llegando a un límite de entrada, o por inversión de pico, cuando pico cae una cierta cantidad, y estas opciones se pueden seleccionar en cualquier combinación.

10.1.12.3 Carga Dinámica

La etapa de carga dinámica es fácil de configurar las etapas cíclicas donde el control de los tres ejes puede ser establecido, con ondas dinámicas tradicionales seno, triangular y cuadradas (Ondas de forma constantes son disponibles para los ejes de Presión de Celda y Presión de Poros. Controlando el esfuerzo axial (como oponerse a la carga axial) y asegurando la

compensación de Picos y Valles, la precisión de la amplitud de la forma de onda programada, incluso después que la muestra se somete a deformaciones significativas o la degradación de la rigidez. Formas de ondas más avanzadas pueden aplicarse empleando el módulo Universal.

10.1.12.2.4 Universal

El módulo puede ser empleado cuando los módulos estándar no ofrezcan los requerimientos del programa de ensayo.

Este módulo Universal suministra al usuario un completo control de todos los equipos disponibles en la configuración (marco de carga, presión de celda, temperatura de celda, etc.) Este módulo ofrece varias formas de ondas pre-programadas tales como incremental, seno, triangular, cuadrada, aleatoria, etc. Donde las frecuencias y amplitudes pueden ser especificadas como constantes o variables de ciclo a ciclo. En adición, una característica de "playback" permite al usuario programar cualquier perfil generado por el usuario para cualquiera de los ejes de control. Todos los parámetros calculados para el ensayo triaxial están disponibles para seguimiento y/o control dentro del módulo Universal.

10.1.13 Accesorio para el Ensayo de Fracturamiento Hidráulico HTRX-HF

Con los equipos disponibles en el Laboratorio de Mecánica de Rocas, es posible realizar ensayos de fracturamiento hidráulico, estabilidad de hoyo y ensayos de permeabilidad. Los ensayos se pueden realizar con o sin presión de confinamiento,

Generalmente la presión de fracturamiento se incrementa a una velocidad de flujo constante, mientras la presión de inyección y la deformación radial son medidas para determinar el esfuerzo de fracturamiento. Cuando el ensayo está acoplado con el sistema de Emisión Acústica [Acoustic Emissions (AE)], es posible graficar AE versus la presión interna y detectar mejor el punto de fracturamiento. En el laboratorio se dispone del acoplador para muestras de diámetro NX (54 mm).

10.1.14 Sistema Hidráulico

La bomba hidráulica tiene una capacidad de 28 lpm, con un motor de 15 HP y una presión constante a volumen variable de 21 MPa

- Tiene un tanque de 150 litros, indicador de la temperatura del aceite, presión y filtros de retorno, manómetros, válvulas, nivel de fluidos térmico y protección por bajo nivel de aceite, intercambiador de calor, mangueras hidráulicas (10 m de largo), acumulador, filtro de retorno, llave de drenaje y arranque de motor.
- Controles computarizados controles remotos de bajo/alta/apagado, temperatura del aceite y sensores de nivel para un diagnóstico computarizado y bloqueo de seguridad.

10.1.15 Equipo de Obtención de Núcleos de Presión Controlada –RDC-250

Equipo de Obtención de Núcleos de Presión Controlada, tiene como principal característica que el avance de la broca sobre el bloque es controlada, incluso para extraer el núcleo de la muestra y es capaz de alcanzar una amplia gama de velocidades para proporcionar un rendimiento óptimo cuando se preparan muestras para los ensayos, sin tener en cuenta las propiedades del material que está siendo muestreado.

- Motor eléctrico 1.5HP con 12 velocidades, ajustable desde 150 a través de 4.200 rpm.
- Tasa de perforación controlada por el mecanismo de presión, la velocidad y la tasa penetración con 250mm de recorrido
- Bastidor Rígido Multi-Columna de perforación para eliminar las crestas o resaltos en la muestra
- Bomba hidráulica, entrada giratoria de agua, bandeja de desague
- Soporte de la muestra rápida pestillo de extracción de muestras de 100 mm (4 pulg.) hasta 150 mm (6 pulg.) de muestras compactas
- Coronas de perforación disponibles Diametro NX
- Otros diámetros

○ EX	21.5	0.845	○ HQ	63.5	2.500
○ AX	30.1	1.185	○ HX	76.2	3.000
○ BX	42.0	1.654	○	100.0	4.000
○ NX	54.7	2.154			

10.1.16 Refrentadora de Muestras RSG-200

Esta referntadora permite la perparación de las caras de las muestras antes de ser ensayadas con caras paralelas y lisas. El eje es activado por un moptor de 2 HP de servicio pesado. La herramienta de pulitura de diamante rotatoria con el sopote de fijación de la muestra de acero inoxidable garantiza los estándares requeridos por las normas ASTM y ISRM. El sistema incluye un suministro de refrigerante y arrastre de detritos. Esto permite que las muestras tengan el acabado requerido en un solo paso, Permite la preparación de muestras hast 76 mm.

10.1.17 Medidor de Paralelismo de las Caras de las Muestras

Es una herramienta que permite medir el paralelismo de las caras de la muestra a ser ensayada. Consiste un una base de granito de 200 mm x 300 mm x 50 mm /grado A, $\pm 0.0001^\circ$ de precisión), con un dial de medición digital [precisión 0.01 mm (0.0005°)] ajustado a la base y permite medir especímenes de hast 200 mm de altura

10.1.18 Calibrador de LVDT – DCD-025

Este es un equipo que pemite calibrar los LDVT que serán empleados en los distintos ensayos

- Lectura digital de valores.
- Desplazamiento lineal de resorte cargado (no rotacional)
- Selección de unidades Si o Inglés
- Rango de desplazamiento 25 mm (1 pulgadas), resolución de 0.001 mm (0.00005 pulgadas)
- Medición de desplazamientos absoluta o relativa
- Acepta LVDT con diámetros de 3/8", 3/4" y 7/8"

10.1.19 Unidad de medición de deformaciones en roca – DEF-5000

Unidad de medición de deformaciones axiales y laterales, ajustada directamente al espécimen permite tener mediciones muy precisas directamente sobre la muestra. Esta unidad ´puede ser empleada dentro de la celda triaxial para altas presiones y altas o bajas temperaturas.Las constantes tales como el Módulo de Young y Relación de Poisson pueden ser determinadas,

como también las constantes inelásticas que pueden ocurrir después de la falla de la muestra (análisis post falla).

La unidad de medición de deformación axial consiste de dos soporte (anillo), uno superior y otro inferior, de bajo peso y alta resistencia, donde se encuentran dos LDVT para realizar la medición.

La unidad de medición circunferencial está construida con una mini cadena con rodamientos y de uniroses rígidas para obtener la alta precisión de medición de la deformación. La unidad de medición también es un LDVT.

- Puede estar sometida dentro de la celda triaxial y soportar 200 MPa y temperaturas hasta 150°C

10.1.20 Equipo para el ensayo de Resistencia a la Abrasion por el Método de Los Angeles

Este equipo permite realizar el ensayo de Resistencia a la Abrasión por el Método de Los Angeles sobre roca triturada, escoria, lajas y grava sin triturar.

- Cumple con las normas ASTM C131, C535; AASHTO T96.
- Tambor de acero resistente a la abrasión
- Motor de 1HP, acoplado al tambor con un tornillo sin fin con reductor de velocidad y rodamientos y kubicación sellada.
- Panel contador de revoluciones

10.1.21 Equipo para el ensayo “Slake Durability”

El equipo de Slake Durability o Meteorización Acelerada, se utiliza para determinar la durabilidad de las rocas y la cantidad probable de deterioro de rocas débiles, durante un período de tiempo,

10.1.22 Equipo para el Ensayo “Cerchar” (Abrasividad de la Roca)

En ensayo Cerchar es empleado para determinar la medida de abrasividad de la roca de acuerdo con las normas del Ensayo Cerchar. El ensayo consiste en medir el desgaste o

aplanamiento de la punta de acero con una resistencia de 200 kg/mm^2 , que es cargada con una fuerza de 70 N, después que se ha arañado la superficie de la roca la distancia de 10 mm. Luego de realizar esto la punta de indentación se analiza bajo el microscopio y la cantidad de desgaste se correlaciona con el Índice de Abrasividad Cerchar [Cerchar Abrasiveness Index (CAI)].

- Precisión de desplazamiento del carro para el movimiento del carro de 0.01 mm

10.1.23 Equipo de Carga Puntual

El sistema de Carga Puntual permite la determinación rápida y precisa del Índice de Resistencia de la Roca, que se puede utilizar para estimar la resistencia a la compresión uniaxial de la roca. Debido a su diseño compacto, esta prueba se puede realizar ya sea en un laboratorio o en el campo. Este sistema opera con una bomba hidráulica controlada manualmente.

- Capacidad de carga de 100 kN
- Diseño ligero que pesa menos de 14 kg
- Salida digital con 10 N resolución
- Funcionamiento de la batería interna
- Aforo automático del espécimen