

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE CAÑONEO EN LA
PRODUCTIVIDAD DE POZOS

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título de
Ingeniero Mecánico
Por el Br. León S., Edel A.

Caracas, 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE CAÑONEO EN LA
PRODUCTIVIDAD DE POZOS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Manuel Martínez

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Sergio Cigüela

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título de
Ingeniero Mecánico
Por el Br. León S., Edel A.

Caracas, 2002

León S., Edel

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE CAÑONEO EN LA PRODUCTIVIDAD DE POZOS

Tutor Académico: Prof. Manuel Martínez. Tutor Industrial: Ing. Sergio Cigüela.
Caracas U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año
2002.162 p.

Palabras Claves: Cañoneo, túnel, penetración, formación, esfuerzos, Morh-Coulomb,
parámetros de cañoneo, construcción de pozos.

En este trabajo de grado se planteó un modelo numérico que predice la penetración que tienen las cargas de cañoneo sometidas a diferentes condiciones de contorno, la penetración en este caso es en cemento. Después de determinar la influencia del parámetro de longitud de penetración en la productividad de pozos y analizar las condiciones que se utilizan para medir esta longitud, se propuso el desarrollo de un modelo en elementos finitos con mucha versatilidad, que permite desarrollos posteriores. Para llevar a cabo este trabajo se utilizó un paquete de elementos finitos que posee un pre y un postprocesador denominado GiD en su versión demo, y un procesador acoplado a éste, también en su versión demo, denominado RAM Solid.

La forma de predecir la penetración de las cargas se basa en diferenciar las zonas de esfuerzos y con la ayuda de la teoría de esfuerzo Mohr-Coulomb, determinar cuales son las zonas que fallan.

El modelo se calibró primero a condiciones atmosféricas y posteriormente se varió la presión hidrostática que actúa sobre él, entre 5 Mpa y 35 Mpa. Al evaluar el modelo a éstas presiones y realizar las comparaciones del caso, el modelo numérico reprodujo longitudes de penetración similares al modelo comparado, con la posibilidad de mejorar los resultados mediante estudios posteriores.

DEDICATORIA

A mi abuelo Edel, el fanático número uno de la ingeniería. Siempre te recordaré.

A mis padres por todas las oportunidades y el apoyo brindado durante mi carrera, mi tesis y mi vida.

A mis amigos que hacen que mi vida sea más divertida todos los días y en los que siempre puedo confiar.

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a PDVSA por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de grado en las instalaciones de Intevep.

A Emilio Guevara por la oportunidad y el apoyo brindado en la realización de esta tesis.

A Manuel Martínez, por el apoyo, colaboración y asesoramiento brindados en el desarrollo y culminación de esta tesis.

A Sergio Cigüela, por todo el apoyo, respaldo y orientación brindado.

A Gabriel Amorer por el apoyo, colaboración y aportes de gran valor en el desarrollo de la tesis.

A Jesús Betancourt por el asesoramiento y conducción en el proceso de desarrollo del tema.

A Miguel Tovar por la colaboración y el interés demostrado en el desarrollo del tema.

INDICE GENERAL

Capítulo 1	19
Marco Metodológico	19
1.1 Título de la investigación	19
1.2 Planteamiento del Problema	19
1.2.1 Objetivo General	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
1.3 Justificación e importancia	21
1.4 Tipo de Investigación	21
1.5 Instrumentos de Recolección de datos	22
1.6 Validez y Confiabilidad del Programa	22
Capítulo 2	23
Marco Teórico	23
2.1 Cañoneo	23
2.2 Condiciones de cañoneo	24
2.2.1 Cañoneo Bajo Balance (Underbalance)	25
2.2.2 Cañoneo Sobre Balance (Overbalance)	25
2.3 Métodos de cañoneo	25

	7
2.3.1 Cañones transportados y detonados mediante guaya eléctrica	26
2.3.1.1 Cañones bajados a través del revestidor (Casing Gun)	26
2.3.1.2 Cañones transportados a través de tubería de producción (Through-Tubing)	26
2.3.2 Cañones transportados por tubería (T.C.P.)	27
2.3.3 Cañones transportados por Coiled Tubing	28
2.4 Dinámica de las cargas huecas	29
2.5 Daños producto del cañoneo	30
2.5.1 Zona compactada	31
2.5.2 Residuos sólidos	32
2.6 Caracterización del daño cercano al pozo y efecto Skin	33
2.6.1 La fórmula de Hawkins	34
2.6.2 El componente Skin	37
2.6.3 Skin de completaciones parciales y por la inclinación	39
2.6.4 Calculo del efecto skin de cañoneo	41
2.6.4.1 Calculo de s_H	42
2.6.4.2 Cálculo de s_v	43
2.6.4.3 Cálculo de s_{wb}	44
2.7 Mecanismos de daño a la formación	45
2.7.1 Obstrucción de los espacios porosos por partículas	45

	8
2.7.2 Mecanismo de migración de los finos	47
2.7.3 Precipitación química	48
2.7.4 Daños ocasionados por los fluidos: emulsiones, permeabilidad relativa y cambios de mojabilidad.	49
2.7.5 Daños mecánicos	50
2.7.6 Daños biológicos	50
2.8 Fuentes de daño a la formación durante las operaciones de pozo	51
2.8.1 Daños de perforación	51
2.8.2 Daños de completación	52
Capítulo 3	54
Desarrollo del Tema	54
3.1 Análisis General de los modelos encontrados	54
3.2 Análisis de los parámetros de cañoneo en función de los modelos de índice de productividad	62
3.3 Herramienta utilizada	63
3.4 Evaluación de los parámetros de cañoneo	63
3.3 Características de la prueba API RP43	77
3.3.1 API Sección 1- Evaluación de los sistemas de cañoneo en condiciones de superficie. Pruebas en concreto.	78
3.3.2. API Sección 2- Evaluación de disparos bajo condiciones de presión, pruebas en Berea.	79

	9
Capítulo 4	82
El método de los elementos finitos	82
4.1 Desarrollo histórico	82
4.2 Introducción al método	83
4.2 Desarrollo histórico	84
4.3 Análisis tridimensional de tensiones	84
4.3.1 Características de los elementos tetraédricos	85
4.3.2 Análisis de Elasticidad Lineal	89
4.3.3 Matrices de rigidez, de tensión y de cargas	91
4.3.4 Generalización al dominio completo. Abandono del concepto de fuerza nodal	92
4.3.5 Criterios de Convergencia	95
Capítulo 5	97
Propiedades de los Materiales	97
5.1 Propiedades de las Rocas	97
5.1.2 Porosidad	97
5.1.3 Compresibilidad Isotérmica	98
5.1.4 Saturación de Fluidos	98
5.2 Propiedades mecánicas de los materiales	99
5.2.1 Leyes constitutivas de los materiales	99

	10
5.2.2 Teoría de la elasticidad lineal	102
5.3 Análisis de Esfuerzos	103
5.4 Criterio de Falla	105
Capítulo 6	108
Desarrollo del modelo	108
6.1 Bases del modelo	108
6.2 Herramienta utilizada	109
6.3 Desarrollo del modelo	110
6.3.1 Estructura geométrica.	111
6.3.2 Limitantes de Movimiento	115
6.3.3 Cargas Aplicadas	119
6.3.4 Mallado de la estructura	121
6.3.5 Visualización de Esfuerzos	122
6.4 Modelo a Comparar	127
Capítulo 7	130
Presentación de Resultados	130
7.1 Resultados con el modelo propuesto	131
7.2 Resultados con el modelo comercial	137
7.3 Análisis Comparativo	138

	11
7.4 Análisis General de Esfuerzos	140
Conclusiones	146
Recomendaciones	148
Glosario de Términos	149
Bibliografía	151
Direcciones en Internet	155
Anexos	156

ÍNDICE DE FIGURAS, GRÁFICAS E IMÁGENES

Figura 2.1 Cañón bajado por guaya a través del revestidor con flujo posterior.	26
Figura 2.2 Cañones transportados por tubería (T.C.P.)	28
Figura 2.3. Dinámica de las cargas huecas.	30
Figura 2.4 Geometría de Pozo Cañoneado.	32
Figura 2.5 Zona cercana al pozo con permeabilidad dañada.	35
Figura 2.6 Estructura para el desarrollo de la ley de Hawkins. Zona cecana al pozo . Presión de fondo real e ideal.....	35
Figura 2.7 Determinación del efecto efecto skin y coeficiente no Darciano para diferentes tasas de producción.	38
Figura 2.8 Cañoneo Parcial. Configuración de completación parcial vertical e inclinada (Cinco –Ley et al.1975).....	41
Figura 2.9 Variables para el cálculo del skin de cañoneo. (Karakas and Tariq,). [18].....	42
Figura 2.10 Configuración de los espacios entre poros de rocas. Imagen de espacio entre poros de rocas (Krueger, 1986). [20].....	46
Figura 2.11. Modos de obstrucción de las partículas.(Schechter, 1992). [12].....	47
Figura 3.1. Histograma de Locke para determinar índice de productividad y skin.[21]	61
Figura 3.2 Relación entre la presión y la productividad del pozo. Esta relación se denomina índice de productividad y la línea punteada identifica los valores de producción que alcanza el pozo que se está evaluando. [Autor]	66
Figura 3.3 Punto de operación del pozo evaluado, la línea se cruza en donde el pozo tiene su mejor relación entre la presión existente en la cara del pozo en la formación y la cantidad de producción que este tiene. [Autor]	66
Figura 3.4 Relación entre densidad de disparos producción.....	67
Figura 3.5 Relación fase entre los disparos y la producción.[Autor].....	67
Figura 3.6 Relación entre la producción y penetración de las cargas. [Autor]	68
Figura 3.7 Producción en función del diámetro de las perforaciones.....	69

Figura 3.7 Relación entre la producción y diámetro de penetración de las cargas. [Autor]	69
Figura 3.8 Puntos de operación en función de la variación de la densidad de disparos por pie. [Autor]	70
Figura 3.9 Producción en función de la densidad de disparos por pie.....	71
Figura 3.10 Puntos de operación en función de la penetración de los disparos.....	72
Figura 3.11 Producción en función de la longitud de penetración de las cargas	72
Figura 3.12 Puntos de operación en función de la fase de los disparos.....	73
Figura 3.13 Productividad en función de la fase las cargas.	74
Figura 3.14 Puntos de operación en función del diámetro de penetración.	75
Figura 3.15 Producción en función del aumento del diámetro de penetración de las cargas	75
Figura 3.16 Geometría de la sección 1 de la prueba API RP 43.....	78
Figura 3.17 Geometría de la sección 2 de la prueba API RP 43. [23].....	81
Imagen 4.1 Volumen tetraédrico. (Se debe utilizar siempre el mismo orden lógico para la numeración de los nodos). [29].....	85
Figura 5.1 Diagramas esfuerzo deformación para diferentes materiales.(1) Materiales dúctiles.(2) Material frágil.[25]	100
Figura 5.2. Método de los desplazamientos.[25]	101
Figura 5.3. Estado de esfuerzos de un sólido de forma arbitraria. [11]	104
Figura 5.4 Círculo de Mohr para esfuerzos con el mismo signo.	105
Figura 5.5 Áreas que indican que el punto no falla.[4].....	106
Figura 5.6 Círculo de Mohr y áreas donde un punto no falla, sometido a esfuerzos de signos diferentes.[4]	107
Figura 6.1. Geometría de trabajo. [Autor]	112
Figura 6.2 Ubicación de los planos en toda la geometría. [Autor]	113
Figura 6.3 Ubicación de los planos en la sección del casing. [Autor]	113
Figura 6.5 Ubicación de los volúmenes en la paredes del casing.[Autor].....	114
Figura 6.6 Se ilustran las limitaciones de movimiento impuestas al sólido.[Autor]	116
Figura 6.7 Limitaciones de movimiento en la estructura y diferentes materiales considerados en la geometría.[Autor].....	116

Figura 6.8 Limitaciones de movimiento y materiales en el casing.[Autor].....	117
Figura 6.9 Limitaciones de movimiento por colores, el color indica la dirección y que plano está limitado.[Autor]	118
Figura 6.10 Se pueden ver las direcciones y la configuración de las presiones que actúan sobre el modelo.[Autor].....	120
Figura 6.11 Malla de trabajo, con elementos tetraedros.[Autor]	121
Figura 6.12 Zonas de esfuerzo Si.[Autor].....	122
Figura 6.13 Zonas de esfuerzo Sii.....	122
Figura 6.14 Zonas de esfuerzo Siii.[Autor]	123
Figura 6.15 Esfuerzo en el plano Siii con betas de esfuerzos entodo el corte.[Autor]	124
Figura 6.16 Esfuerzo en el plano Siii con números de nodos a evaluar.[Autor]	124
Figura 6.17 Esfuerzo en el plano Sii con magnitudes de los esfuerzos en los nodos.[Autor].....	125
Figura 6.18 Esfuerzo en el plano Sii con selección de nodos. Dependiendo del interés del usuario se pueden obtener las magnitudes resultantes en los nodos de interés.[Autor]	125
Figura 6.19 Esfuerzo el plano Si con las magnitudes de los nodos en todo el corte.[Autor]	126
Figura 6.20 Esfuerzo en el plano Si con selección de nodos a tomar en cuenta.[Autor]	126
Figura 6.21 Histograma utilizado por los fabricantes de cargas para determinar penetración a fondo de pozo.[23].....	129
Gráfico 7.1 Comparación de resultados con la teoría Mohr-Coulomb para el caso Sii y Si.[Autor]	131
Gráfico 7.2 Comparación de reultados con la teoría Mohr- Coulomb para el caso Siii y Sii.[Autor]	132
Gráfico 7.3 Comparación de resultados con la teoría de Mohr-Coulomb para el caso Siii y Si.[Autor].....	132
Gráfico 7.4. Planos de corte para ubicar los puntos a considerar.[Autor]	133
Figura 7.5 Comparación entre modelo comercial y modelo propuesto.	139
Figura 7.6 Corte horizontal y planos de evaluación.[Autor]	140

Figura 7.7 Configuración de un elemento plano perteneciente al sólido.[Autor].....	141
Figura 7.8 variación de los esfuerzos en el plano 2 Si [Autor].....	142
Figura 7.9 Esfuerzos en el plano 1 con respecto a Sii.[Autor]	142
Figura 7.11 Esfuerzos en el plano 2 con respecto a Sii[Autor]	143
Figura 7.12 Esfuerzos en el plano 2 con respecto a Sii.[Autor]	144
Figura 7.13 Esfuerzo en el plano 1 con respecto a Siii.[Autor].....	145
Figura 7.14 Esfuerzo en el plano 2 con respecto a Siii.[Autor].....	145

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Constantes para el cálculo de skin de cañoneo.	43
Tabla 3.1 Valores de las constantes C1 y C2 a ser utilizadas en el modelo Karakas- Tariq.	57
Tabla 3.2 Valores de las constantes a_1 , A_z , b_1 , b_z a ser utilizadas en el modelo Karakas –Tariq.	58
Tabla 7.1 Resultados de penetración a presión atmosférica.	131
Tabla 7.2 Resultados de penetración para 20,19 Mpa.	134
Tabla 7.3 Resultados de penetración para 27,57 Mpa.	135
Tabla 7.4 Resultados de penetración para 34,47 Mpa.	135
Tabla 7.5 Resultados de penetración para 10 Mpa.	136
Tabla 7.6 Resultados de penetración para 5 Mpa.	136
Tabla 7.7 Longitudes de penetración para diversas presiones.	137
Tabla 7.8 Resultados de penetración de cargas que indica el modelo comercial.	138

INTRODUCCIÓN

El proceso de cañoneo determina el comportamiento que un pozo o grupo de pozos podrá tener en el futuro. Al realizar los primeros túneles en un pozo se produce una cantidad de daño en la formación; esta cantidad de daño indicará cuan eficiente será ese pozo y en cuanto tiempo será necesario utilizar procesos de estimulación. Por esto, cañonear un pozo bajo las condiciones adecuadas, implica una producción con menos inversión, tanto a corto como a largo plazo. Esta situación es bien conocida pero, no refleja lo que sucede en la industria, el estudio de cañoneo para los pozos no se hace en todos los casos, existen cargas de cañoneo preestablecidas y condiciones que delimitan los pasos a seguir.

En presencia de esta situación se muestra en el documento como primera parte, el conjunto de ecuaciones que definen el flujo en condiciones de cañoneo y después se evalúa, gracias a dos modelos diferentes, el comportamiento que la producción tiene ante los parámetros de cañoneo más comunes. Se debe tomar en cuenta que para simular este tipo de flujo se hacen consideraciones que delimitan la cantidad de parámetros, la geometría y otras características. Los modelos fueron seleccionados porque se encuentran entre las herramientas computacionales que posee PDVSA, y son modelos muy referenciados en la bibliografía existente. Después de determinada la importancia y la influencia de los parámetros, se lleva a cabo una selección de los parámetros a utilizar, dependiendo del tipo de desarrollo posible.

Para el caso de cañoneo se puede ver que uno de los parámetros donde el usuario posee menos control es el de penetración de longitud. Para la determinación de este parámetro se utilizan las pruebas API RP 43 que consisten en dos secciones; la primera sección indica la penetración de las cargas de cañoneo en cemento a condiciones atmosféricas, y la segunda sección indica la penetración de las cargas a 3000 psi, en una roca denominada Berea. El problema es que estas pruebas poseen un costo asociado y que la segunda sección muy pocas veces es llevada a cabo. Además las condiciones en las cuales penetran las cargas en la formación son bastante diferentes a los 3000 psi preestablecidos en la sección 2. Estas condiciones de trabajo indican que la selección de cargas se realiza a presión atmosférica.

En los casos de predicción para otras presiones, se utiliza un modelo existente, que se presenta en el trabajo y que sólo permite variaciones bien definidas de sus características.

Lo que se plantea con este trabajo de grado es la creación de un modelo numérico que permita simular las condiciones a fondo de pozo y que pueda variar sus características de manera sencilla. Con la ayuda de los elementos finitos y de la elasticidad lineal se deforma una sección de cemento con geometría similar a las de un pozo y se toma en cuenta la teoría de falla Mohr-Coulomb, donde se pueden identificar los puntos que fallan. El principio en el cual se basa el modelo es que aquellos puntos que fallen son puntos que no existen y que forman parte del túnel de penetración.

La información necesaria para definir las condiciones de reproducción de las pruebas API se recolectaron con la ayuda de expertos, con la información proporcionada sobre la prueba (procedimiento), y con los resultados obtenidos de las pruebas que se realizan a las cargas que PDVSA utiliza en sus procesos de cañoneo.

Para el desarrollo del modelo se usa un pre y postprocesador de elementos finitos denominado Gid y un procesador acoplado denominado Ramsolid, mediante los cuales se introduce la geometría y se obtienen los esfuerzos resultantes sobre los puntos de interés.

El fin del trabajo es definir las longitudes de penetración - y no una geometría - de penetración, este caso presenta complicaciones que van más allá de los objetivos de una tesis de pregrado. Se puede ver en los modelos presentados que los factores determinantes son el diámetro y la longitud de penetración. Esto indica que un modelo como el que se presenta puede funcionar perfectamente con los modelos de productividad de pozos existentes.

Capítulo 1

Marco Metodológico

1.1 Título de la investigación

Estudio de los parámetros de cañoneo en la productividad de pozos.

1.2 Planteamiento del Problema

Cuando se procede a construir un pozo, el primer paso, después de localizar la zona de interés, es la utilización de un taladro que llegará a las arenas productoras. Después de realizada la perforación, el pozo se aísla de sus alrededores a través de un revestidor o tubo con dimensiones similares a la perforación del taladro y una sección de cemento. Para establecer comunicación con la formación con fines de producción o inyección, es necesario efectuar operaciones de cañoneo. Estas operaciones poseen diferentes parámetros que pueden influir en la productividad final de los pozos. Por eso desde que se crearon estos procesos, se han desarrollado diferentes modelos y paquetes computacionales, que tomando en cuenta los parámetros que rigen el flujo, pueden predecir la productividad de un pozo.

Mediante consideraciones basadas en mecánica de fluidos, se puede llegar a modelos que predicen el tipo de comportamiento que tiene el fluido al desplazarse por los conductos cañoneados. Incluso, existen modelos comerciales que son utilizados por las industrias petroleras en la construcción de pozos nuevos. En función de esto, se desea llevar a cabo un estudio de la forma como los modelos toman en cuenta los diferentes parámetros de cañoneo, para estimar la importancia y la variabilidad que tiene cada uno, y así determinar como se pueden conseguir predicciones de productividad más confiables. Este análisis generará un modelo asociado a los parámetros que se consideren de mayor importancia, se tomarán diversos puntos como factores de selección, como son: qué datos se toman en cuenta para su utilización, como influyen en los modelos y el tipo de desarrollo que esto conlleva.

En las compañías que brindan servicios relacionados con la producción de energía en la actualidad, es indispensable la predicción de resultados, y en procesos tan importantes como el cañoneo de pozos estas herramientas representan la factibilidad que tiene un proyecto de ser llevado a cabo, como por ejemplo construir un pozo, o un número muy grande de pozos que puedan o no llegar a producir millones de barriles de hidrocarburos de diferentes tipos, lo que se ve reflejado en los costos de inversión. Una buena predicción puede constituir una primera aproximación a la mejora de estos procesos.

1.2.1 Objetivo General

- Estudio de los Parámetros de cañoneo en la productividad de pozos de petróleo y gas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar las correlaciones que permiten predecir la longitud, diámetro del túnel y daños ocasionados en la operación, para las condiciones actuales del yacimiento.
- Obtención de las correlaciones existentes que determinan, mediante los parámetros de cañoneo, la productividad del pozo.
- Desarrollo de histogramas para establecer los valores adecuados de los parámetros de cañoneo, para diferentes tipos de cálculos y condiciones de yacimiento.
- Definición de reglas básicas para cañoneo de pozos verticales e inclinados.
- Desarrollo de un modelo asociado a los parámetros que influyen en la productividad de pozos.

1.3 Justificación e importancia

En los procesos de cañoneo que se llevan en la industria petrolera venezolana, se utilizan únicamente programas comerciales de cañoneo que predicen los valores y el tipo de parámetros que se deben considerar cuando se va a cañonear un pozo.

Sin embargo este proceso tiene muchísimas variantes que pueden influir en los resultados que se obtienen de un pozo, como son: el tipo de modelo utilizado, o los diferentes tipos de cargas con las cuales se crean los túneles en la formación. Muchas de estas variables no son tomadas en cuenta en todas las herramientas de predicción, se desconoce que tipo de valores son los que se están manejando y en qué condiciones se obtienen.

Además muchas veces los procesos de cañoneo no se realizan de manera adecuado al tipo de parámetros que se manejan, lo que hace necesario que procesos alternos sean llevados a cabo, incrementando así los costos de los hidrocarburos que se obtienen del pozo. Los parámetros, como la longitud de penetración de las cargas, son obtenidos en condiciones de superficie y muy pocas veces con muestras de roca de yacimientos.

Esto hace necesario que se realice un estudio de los diferentes parámetros de cañoneo que influyen en la productividad de pozos, y en función de esto se llegue a cuales variables deben ser tomadas en cuenta y de que forma se puede desarrollar un modelo asociado a estos parámetros.

1.4 Tipo de Investigación

Esta es una investigación teórica con aplicación de tecnología, usa conceptos de la mecánica de los materiales y elementos de los procesos de construcción de pozos. La estrategia metodológica se basa en fuentes documentales, apoyo de especialistas de PDVSA y la utilización de modelos computacionales y gráficos para realizar comparaciones y determinar la importancia de alguno de los parámetros.

1.5 Instrumentos de Recolección de datos

Para el cumplimiento de los objetivos, se cuenta con el apoyo del personal de PDVSA, en este caso en las instalaciones de Intevep, especialistas en daños a la formación, así como diferentes fuentes documentales.

Los principales datos a tomar en cuenta son pruebas de longitud de penetración de cargas realizadas por las diversas compañías fabricantes, así como pruebas de impacto de cargas, diámetros de entrada, y diferentes resultados obtenidos mediante la prueba API RP 43 que certifica la capacidad de las cargas y cañones utilizados.

Los datos de condiciones de productividad serán obtenidos de pozos en funcionamiento, de los parámetros más utilizados en la industria, las propiedades de los diferentes materiales, pruebas llevadas a cabo en diferentes laboratorios en Intevep dependiendo de las necesidades, y del material bibliográfico relacionado al tema.

1.6 Validez y Confiabilidad del Programa

Para el análisis de los parámetros de cañoneo se utiliza el paquete Wellflo adquirido por la empresa, cuya eficiencia ha sido evaluada dentro y fuera de PDVSA. Las simulaciones de flujo para predicción de comportamiento de pozos en actividad o en construcción se realizan, en la mayoría, con este paquete, algunas de sus funciones y una pequeña descripción de él se pueden encontrar en este trabajo. Posteriormente, se desarrolla un modelo en elementos finitos de predicción de penetración de cargas de cañoneo, para este caso no existen en la industria herramientas computacionales que puedan servir de comparación. Pero los fabricantes de cargas presentan sus resultados de predicción en función de un modelo gráfico, que se utiliza como una comparación de este primer modelo de predicción de penetración de cargas. Al ser ésta una primera versión de un modelo de gran dificultad, las comparaciones serán en función de este modelo, aunque en el futuro desarrollo del modelo gráfico, se puedan necesitar otros sistemas de comparación.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo, se introducen los procesos involucrados con el cañoneo, como son el tipo de cañoneo, las cargas involucradas, y otros parámetros de importancia. Se quiere dar a conocer cómo la industria toma en cuenta las diferentes condiciones y cómo las asocia a soluciones analíticas o ecuaciones matemáticas que permiten simular lo que sucede en campo.

2.1 Cañoneo

El proceso de Cañoneo es aquél que permite la comunicación entre el fluido del yacimiento y el pozo. Cuando se crea un pozo se procede a efectuar una perforación con un taladro en la zona de interés y, dependiendo de las condiciones del pozo, se lleva a cabo o no un revestimiento de la perforación realizada.

En los comienzos de la producción petrolera, las zonas donde se encontraban los yacimientos eran muy buenas, en cuanto a sus características físicas, y las perforaciones que hacían los taladros permanecían en buen estado durante un tiempo conveniente sin necesitar revestimiento. Pero la evolución de los procesos de detección de hidrocarburos y la necesidad de extraer las mayores cantidades posibles de fluidos los pozos construidos, condujo a situaciones con más complejidad, donde las formaciones no son lo suficientemente buenas y las perforaciones creadas por los taladros se cierran después de abiertas. Estas condiciones generaron el desarrollo de los procesos de revestimiento de pozos que hoy existen.

El revestimiento de pozos consiste en que, una vez completada la perforación utilizando el taladro, se introduce un tubo o revestidor con dimensiones parecidas al tamaño de

perforación pero de menor diámetro, cementándose las paredes entre el pozo y el revestidor, para que la estructura quede más resistente. El problema es que, una vez instalado el conjunto, no existe comunicación entre el pozo y el yacimiento, por esto se procede a cañonear.

Para cañonear se desciende por dentro del revestidor hasta las zonas de interés un cañón con una serie de cargas direccionadas dependiendo de las necesidades del usuario, y se detonan las cargas, creando un conjunto de canales o túneles por donde fluirá el hidrocarburo. La detonación de las cargas crea una masa de metal líquido a altas temperaturas que atraviesa el revestidor, el cemento y posteriormente la formación. Estos canales deben ser limpios, de tamaño y profundidad uniforme y no pueden dañar el revestidor ni la adherencia del cemento. Durante la operación de cañoneo, los desechos de las cargas explosivas y los sólidos del fluido de completación pueden taponar los túneles o la formación, además dependiendo del tipo de cañón utilizado se tendrán condiciones diferentes en los túneles que pueden afectar la productividad de los pozos. Por eso se deben tomar en cuenta diferentes factores cuando se realiza un cañoneo de revestidores, como lo son: el tipo y resistencia de la formación, espesor y resistencia del revestidor, gradiente geotérmico y temperatura del fondo y otros. Tomar en consideración estos factores permite cañonear con las cargas adecuadas y así obtener la máxima productividad de los pozos.

2.2 Condiciones de cañoneo

Existen diferentes condiciones para cañonear un pozo en función de los resultados que se quieren obtener, se diferencian por la magnitud de la presión en el pozo con respecto a la presión en la formación, a continuación se presentan los casos posibles.

2.2.1 Cañoneo Bajo Balance (Underbalance)

Esta condición ocurre cuando la presión hidrostática en el pozo es más baja que la presión de la formación. Los cañoneos Bajo Balance crean una situación donde el flujo puede comenzar a entrar de manera inmediata al pozo. Al momento del cañoneo, el diferencial de presión ayuda a limpiar los túneles y a remover rocas comprimidas, sucio, y gases de la formación. El tipo de fluido de la formación y la permeabilidad son factores que influyen la cantidad de diferencial de presión a favor del yacimiento necesario, para remover rocas comprimidas y otros mecanismos de daño a la formación del área cercana al pozo.

2.2.2 Cañoneo Sobre Balance (Overbalance)

La presión hidrostática en el pozo es mayor que la presión de la formación, condición que permite que el pozo esté estático durante la operación. Esta técnica se usa entre 80 y 90 por ciento de los pozos nuevos. En algunos casos la utilización de Bajo Balance no es posible por las condiciones de la formación, en estos se requiere de Cañoneo Sobre Balance. Durante este proceso los tubos utilizados están llenos de líquido, con lo cual se garantiza que el pozo permanezca estático durante las operaciones.

2.3 Métodos de cañoneo

Los métodos de cañoneo se diferencian por el medio utilizado para transportar los cañones, y las características de cañoneo utilizadas, los principales métodos son descritos en esta parte.

2.3.1 Cañones transportados y detonados mediante guaya eléctrica

2.3.1.1 Cañones bajados a través del revestidor (Casing Gun)

Estos cañones se bajan a través del revestidor, utilizando una cabria o equipo de guaya. Generalmente las cargas se colocan en un soporte (cañón) recuperable. Este cañoneo se realiza con una presión hidrostática, a la profundidad de la arena a cañonear, mayor que la presión de la formación, o cañoneo sobre balance, permitiendo flujo hacia el pozo de una manera controlada. Los cañones de revestidor se utilizan cuando se requiere un buen control del tamaño de la perforación y se obtiene un máximo rendimiento al utilizar las cargas de tipo chorro.

Los cañones bajados a través del revestidor se utilizan también en procesos a hoyo abierto, para penetrar zonas dañadas en la formación. Para esto se utilizan cargas de gran penetración que realizarán túneles de mayor longitud. Este proceso es de uso poco frecuente.

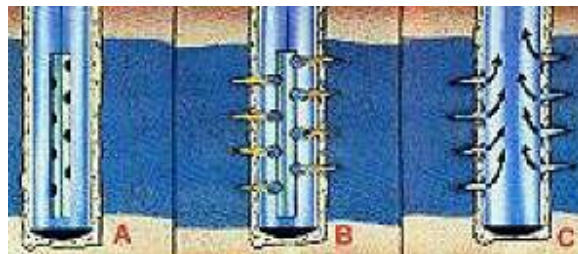


Figura 2.1 Cañón bajado por guaya a través del revestidor con flujo posterior.[I]

2.3.1.2 Cañones transportados a través de tubería de producción (Through-Tubing)

Con este método se procede primero a bajar la tubería con empaaduras de prueba, o la completación final que tendrá el pozo. Posteriormente se crea una diferencia de presión donde la presión de la columna hidrostática a la profundidad de la arena a cañonear será menor que la de la formación, o cañoneo bajo balance. Esta diferencia de presión se crea de

diferentes maneras: (1) La tubería eductora con empaadura permite el desplazamiento del fluido de completación por un fluido con menor densidad como por ejemplo gas-Oil, desplazamiento que se logra a través de las mangas de circulación, las cuales se cierran con el equipo de guaya; (2) Otro procedimiento consiste en achicar la tubería con la empaadura asentada, hasta que se logre una columna de fluido tal, que permita obtener una diferencia de presión negativa después de cañonear. Cuando se realiza una completación en una arena única, es posible utilizar un fluido de completación de menor densidad que el fluido de la formación. En estos casos se bajan los cañones, cuando la columna del fluido de completación permita obtener un diferencial de presión negativo, luego del cañoneo.

Una vez creadas las condiciones para obtener el diferencial de presión negativo, se baja el cañón con el equipo de guaya, se detona y posteriormente, gracias a un lubricador, se recuperan los restos del cañón, la herramienta de profundidad y la guaya que se utilizó en el proceso.

2.3.2 Cañones transportados por tubería (T.C.P.)

Este método para cañonear permite obtener orificios limpios, profundos y simétricos porque se utilizan cañones de mayor diámetro, cargas de alta penetración, alta densidad de disparo, y sin límites de longitud de intervalos a cañonear en un mismo viaje. Además se usa un diferencial de presión a favor de la formación ofreciendo excelentes resultados.

El cañón se transporta en el extremo inferior de la tubería eductora, y conjuntamente con la tubería se introduce la empaadura, que debe estar asentada antes de iniciar la operación de cañoneo. Esta configuración ofrece mayor seguridad porque al bajar el cañón adaptado a la tubería se utiliza el equipo de control de presiones en el cabezal del pozo. Al utilizar cañones transportados por tuberías no es necesario bajar los conectores con guaya, ya que se puede implementar un sistema de detonación hidráulico.



Figura 2.2 Cañones transportados por tubería (T.C.P.).[I]

2.3.3 Cañones transportados por Coiled Tubing

Esta forma de transportar cañones es la más flexible de las existentes en el mercado, en presencia de pozos muy desviados donde no se pueden bajar herramientas, ofrece ventajas que otros métodos, como transporte por guaya o TCP, no tienen. Pero, si su manejo no se hace de una forma adecuada, puede resultar un proceso muy costoso.

En algunos casos los pozos poseen ángulos altos que no permiten la utilización de métodos como la guaya eléctrica porque las herramientas no logran deslizarse y requieren llevar a cabo un transporte por *coiled tubing*. Pero éste no es el único caso, en la presencia de pozos con inclinaciones uniformes donde los objetivos sean los de alcanzar altas y prolongadas desviaciones, se utiliza este método para bajar los costos y mejorar las condiciones ambientales del pozo.

2.4 Dinámica de las cargas huecas

Las cargas utilizan un efecto de cavidad explosiva, que se basa en la tecnología de las armas militares, con un revestimiento metálico o *liner* que permite aumentar la penetración. Las cargas consisten de un explosivo de alta pureza, un casco, un *liner* cónico y metálico conectado a una cuerda de accionamiento. Las cargas deben crear túneles de una longitud adecuada y de una forma tal que permitan el flujo de hidrocarburo. Se podría pensar que las detonaciones producen grandes fracturas, pero no es así cada carga está diseñada para concentrar toda su energía en la creación del túnel. Cada sección de la carga cumple una función determinada y posee un orden específico mediante el cual actúa. A continuación se describe el proceso completo:

“Una cuerda de disparo activa el detonador y el explosivo principal. El *liner* colapsa y se forma un chorro de alta velocidad de partículas de metal fluidizado que es impulsado a lo largo del eje de la carga. Este chorro de gran potencia consta de una punta más rápida y una cola más lenta. La punta viaja a aproximadamente 7 km/seg [4,4 millas / seg] mientras que la cola se mueve más lentamente, a menos de 1 km /seg [0,6 millas/ seg]. Este gradiente de velocidad hace que el chorro se alargue de manera que atraviese el revestidor, el cemento y la formación. Los chorros de las cargas erosionan hasta que consumen toda su energía al alcanzar el extremo del túnel del disparo.

Los chorros actúan como varillas de alta velocidad y con un alto poder de expansión. En lugar de reducir el estallido, la combustión, la perforación o el desgaste con abrasivos, la penetración se logra mediante una presión de impacto sumamente elevada; $3 \cdot 10^6$ lpc [20Gpa] sobre el revestidor y 300.000 lpc [2GPa] sobre la formación. Estas enormes presiones de impacto hacen que el acero, el cemento, la roca y los fluidos del poro fluyan en forma plástica hacia fuera. El rebote elástico daña la roca, deja granos de la formación pulverizados y residuos en los túneles de los orificios recientemente creados”. [5]

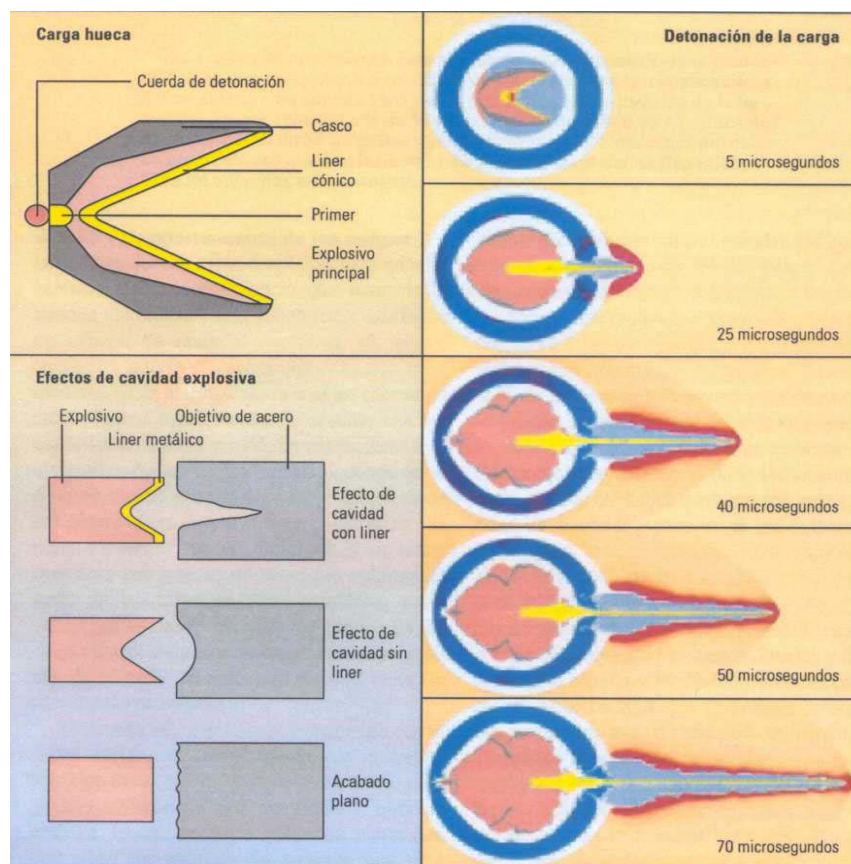


Figura 2.3. Dinámica de las cargas huecas.[5]

2.5 Daños producto del cañoneo

Un efecto secundario y poco conveniente del disparo es el daño adicional, que se traduce en una zona de baja permeabilidad alrededor de los disparos. El flujo a través de un solo disparo y los resultados de laboratorio confirman este componente del daño inducido por los disparos. El daño posee diversos elementos como son: la zona triturada, la migración de partículas finas de la formación y la presencia de detritos dentro de los túneles del disparo. Las presiones provenientes de la onda de vibración desde la cara de la roca a los extremos

de los disparos fragmentan la roca adyacente y dañan la permeabilidad, especialmente al reducir el tamaño de los poros. También se han encontrado migraciones de pequeñas partículas, debidas a la fragmentación de los granos, disgregación de las arcillas y los detritos de las cargas que bloquean las gargantas de los poros y reducen aún más la permeabilidad.

“Los estudios muestran que el daño inducido aumenta cuando las cargas explosivas son más grandes. El alcance del daño provocado por el disparo depende de la litología, la resistencia de la roca, la porosidad, la compresibilidad del fluido alojado en los poros, el contenido de arcilla, el tamaño del grano de la formación y el diseño de las cargas huecas. La investigación junto con la simulación numérica permite una mejor comprensión del daño de la permeabilidad en los pozos con disparos, lo cual puede servir para mejorar los diseños de las completaciones.” [5]

Durante la penetración de las cargas en la formación o zona en donde se encuentran los hidrocarburos en la corteza terrestre, el daño mayor ocurre cerca de las entradas donde la presión de los chorros productos de las cargas tiene su mayor valor, mientras que los daños menores se concentran en la punta del túnel donde el impacto es menor. En función de esto se pueden distinguir las siguientes zonas:

2.5.1 Zona compactada

Las cargas que se utilizan en el proceso de cañoneo penetran en la formación utilizando la alta presión y temperatura que se crea cuando estas detonan, para pulverizar la roca a su paso. Pero no sólo se obtiene un túnel, además se observa una zona compacta alrededor de la perforación con una permeabilidad menor que influye en el flujo de hidrocarburo hacia el pozo. Esto se produce por la reducción de la garganta de los poros al fracturarse los granos, así como la porosidad y los esfuerzos locales reducidos debidos a la propagación de la onda de choque.

2.5.2 Residuos sólidos

Otro efecto del cañoneo es la creación de residuos que se acumulan dentro de la perforación, disminuyendo la permeabilidad. Estos residuos están compuestos por: residuos de las cargas, rocas más grandes que las de la formación, granos separados unos de otros, granos compactados de dimensiones menores a las de los otros, y partículas muy finas que son llamadas finos, obtenidas del material cementante compactado. Todos estos reducen la permeabilidad de la zona donde se crea el túnel, pero además la diminuta dimensión de los finos permite que sean arrastrados inicialmente al crear la cavidad penetrando en la formación y afectando de manera dramática la permeabilidad de la formación.

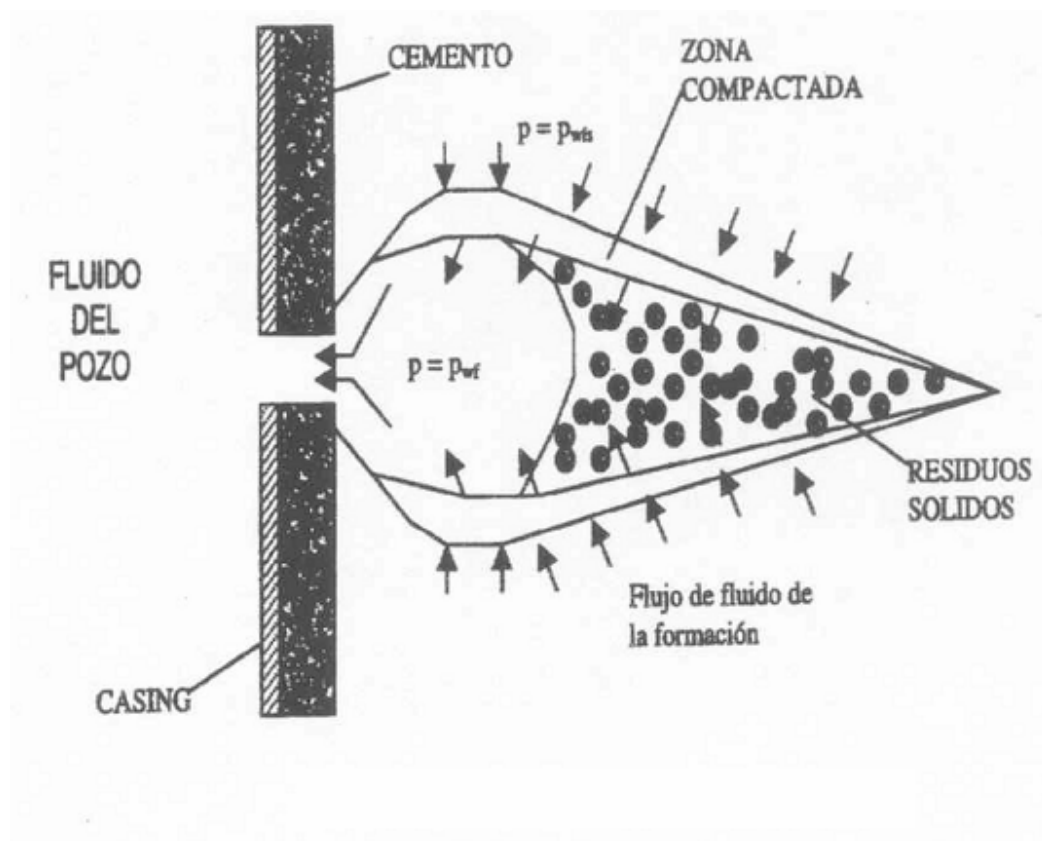


Figura 2.4 Geometría de Pozo Cañoneado.[6]

2.6 Caracterización del daño cercano al pozo y efecto Skin

“Las relaciones que existen entre la presión y la distancia dentro del pozo evidencian que la condición de cercanía al pozo es crítica. Van Everdingen y Hurst (1949) introdujeron el efecto del “skin”, como una manera de caracterizar esto, como una zona en estado estable y diferencia de presión Δp_s , que es proporcional al efecto del “Skin”.

Matemáticamente, el efecto del “skin” no tiene dimensiones y es análogo al coeficiente de transferencia de calor. La presión adicional asociada con el efecto “skin” se define en términos del mismo grupo de constantes, como soluciones adimensionales de caída de presión en el medio poroso. El efecto skin puede ser adicionado al $\ln(r_e/r_w)$ para flujo estático, $\ln(0,472r_e/r_w)$ para flujo en estado pseudo-estático, o p_D para la solución transitoria (donde r_e es el radio de drenaje, r_w es el radio del pozo y el término p_D es el valor adimensional de la presión, ver figura 2.3). Sin embargo, la suma de caídas de presión (caída de presión en el yacimiento más la caída de presión en la zona cercana al pozo) se convierte proporcionalmente en la caída total de presión.

El efecto “skin” del pozo es una variable compuesta. En general, cualquier fenómeno que ocasione una distorsión de las líneas de flujo de la dirección normal del pozo o una restricción al flujo (que puede ser vista como una distorsión en la escala de la garganta del poro), resultará en un valor positivo del efecto del “skin”.

El “skin” con valor positivo puede ser creado por causas “mecánicas” como completación (por ejemplo, un espesor perforada menor que el espesor del yacimiento), por cambio de estado (reducción de permeabilidad relativa al flujo principal), turbulencia, y, por supuesto, por el daño a la permeabilidad natural del yacimiento.

Un valor negativo del “skin” denota que la caída de presión en la zona cercana al pozo es menor de lo que sería en un flujo normal en el yacimiento, sin modificaciones. Tal efecto

de “skin” negativo, o contribución negativa al efecto de “skin” total, puede ser el resultado de: estimulación (la permeabilidad de la zona cercana al pozo excede el valor natural), fracturas hidráulicas, o un pozo muy inclinado.

El impacto del “skin” se puede cuantificar a través del concepto del radio efectivo del pozo, donde un “skin” negativo tiene el efecto opuesto. Un caso interesante y extremo es cuando una larga fractura conductiva penetra el pozo. Esta situación conlleva a un radio efectivo igual a un cuarto de la longitud de la fractura.

Es importante resaltar que pueden haber grandes contrastes en el skin a lo largo del intervalo productivo. Esto es particularmente observable en pozos donde la producción de dos o más intervalos disímiles y verticales separados, se mezclan. Diferentes propiedades de la formación (permeabilidad, esfuerzos, estabilidad mecánica, fluidos) y diferentes presiones crean situaciones de daño debido a la invasión de fluido, deficiente limpieza de la perforación, y otras causas.

En este capítulo, el “skin”, sus componentes, y la estimación de la contribución mecánica son presentados en detalles. También se presenta el efecto “skin” caracterizando el daño. Finalmente la naturaleza de la formación y el tipo de daño a la formación son resaltados como los precursores de la apropiada selección de la estimulación matricial.

2.6.1 La fórmula de Hawkins

Mientras el efecto “skin” es adimensional, el daño asociado no lo es. La Figura 2.5 es una representación de las condiciones cercanas al pozo, con r_s y k_s como radio dañado y la permeabilidad respectivamente. Fuera de esta zona el yacimiento permanece imperturbado, con permeabilidad k .

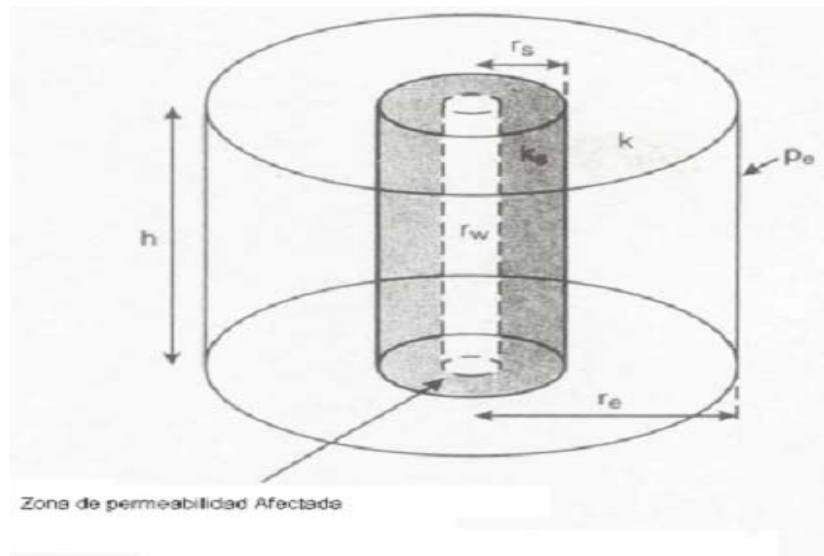


Figura 2.5 Zona cercana al pozo con permeabilidad dañada.[12]

Una ecuación bien conocida que relaciona el efecto "skin" y los materiales adyacentes fue presentada por Hawkins (1956) y es conocida como la fórmula de Hawkins. La figura siguiente provee una estructura sencilla para el desarrollo de esta relación.

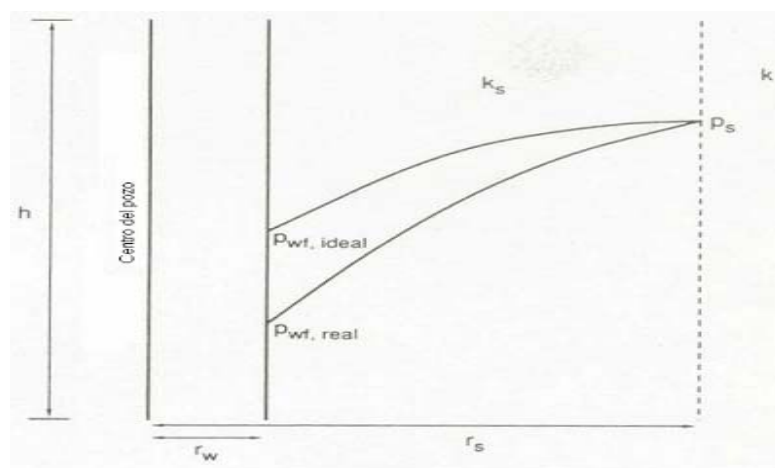


Figura 2.6 Estructura para el desarrollo de la ley de Hawkins. Zona cecana al pozo . Presión de fondo real e ideal.[12]

Si la permeabilidad cercana al pozo es la permeabilidad del yacimiento (por ejemplo, sin daño), entonces una caída de presión en estado estable entre la presión más allá de la frontera y el pozo, resultará en un $p_{wf,ideal}$ dada por

$$p_s - p_{wf,ideal} = \frac{q\mu}{2\pi kh} \ln \frac{r_s}{r_w}, \quad (2.1)$$

Si, la permeabilidad es alterada a k_s , entonces la presión de fondo de pozo viene dada en función de

$$p_s - p_{wf,real} = \frac{q\mu}{2\pi k_s h} \ln \frac{r_s}{r_w}, \quad (2.2)$$

La diferencia entre $p_{wf,ideal}$ y $p_{wf,real}$ es la caída de presión debida al efecto skin, Δp_s . Sin embargo, de las ecuaciones anteriores se obtiene que

$$\frac{q\mu}{2\pi kh} s = \frac{q\mu}{2\pi k_s h} \ln \frac{r_s}{r_w} - \frac{q\mu}{2\pi kh} \ln \frac{r_s}{r_w}, \quad (2.3)$$

Y simplificando

$$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w}, \quad (2.4)$$

La ecuación anterior es la fórmula de Hawkins y es de gran utilidad en la obtención del deterioro de la permeabilidad y el daño del cañoneo.

2.6.2 El componente Skin

El efecto total del “skin” para un pozo, s , consiste en un número de componentes. Generalmente pueden ser añadidos en conjunto, entonces

$$s = s_d + s_{c+\theta} + s_p + \sum s_{\text{pseudo}}, \quad (2.5)$$

donde s_d es el “skin” de daño, $s_{c+\theta}$ es el skin debido a la completación parcial y la inclinación, y s_p es el efecto skin de cañoneo. Todos los “pseudo skin” son agrupados en conjunto con el signo de sumatoria ($\sum s_{\text{pseudo}}$).

Estos “pseudos-skin” incluyen todas las fases, y los efectos de dependencia. A continuación se presenta una discusión de los efectos “skin”. Más adelante se discutirá sobre los componentes mecánicos del “skin”.

El efecto de la relación de dependencia ha sido discutido en conjunción con la turbulencia de altas producciones de gas (también podría afectar los pozos en estado líquido). Este efecto “skin” es igual a Dq , donde D es el coeficiente no darciano. El efecto “skin” extraído de una prueba de un pozo con una alta producción de gas es mayor, y en algunos casos, mucho más que la relación de no dependencia del efecto “skin”. Entonces, de una prueba de pozo, se puede obtener un “skin” aparente por la expresión:

$$s' = s + Dq, \quad (2.6)$$

Pruebas en condiciones de producción diferentes pueden ser utilizadas para aislar el efecto “skin”, s . Una gráfica como la presentada a continuación de s' versus q , sugiere que s es la intercepción, y D es la pendiente. Esta es la manera correcta de determinar D y tener una idea de la relación de dependencia del “skin” en la producción de pozos en el futuro.

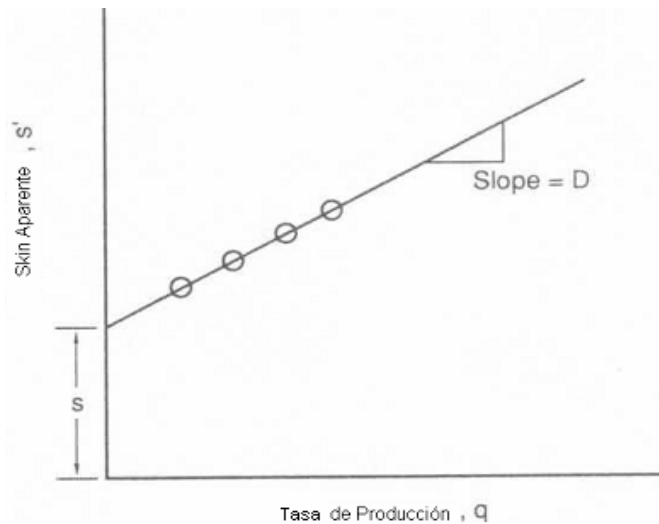


Figura 2.7 Determinación del efecto skin y coeficiente no Darciano para diferentes tasas de producción..[12]

La dependencia de la fase en el efecto skin está asociada con los cambios debidos al gradiente de presiones en las cercanías del pozo.

En el caso de los pozos en estado líquido, si la presión de fondo de pozo está por debajo del punto de burbujeo, entonces se formará una saturación de gas libre, causando la reducción de la permeabilidad efectiva del hidrocarburo líquido, inclusive si el gas no está en movimiento. Una versión de la fórmula de Hawkins con k/k_s sustituida por el radio de efectiva (o relativa) permeabilidad puede ser utilizada.

Un fenómeno similar puede ser observado en el caso de yacimientos de gas retrógrado condensado, donde se forma líquido alrededor del pozo, ocasionando una reducción en la permeabilidad relativa al gas, éste es un fenómeno particularmente adverso. Mientras que

en el caso del gas que se forma en un yacimiento de hidrocarburo líquido, el gas ingresará de nuevo a una elevada presión (e. g., mientras la presión aumenta cuando el pozo es cañoneado), en el caso de yacimientos de gas condensado la mayor parte del condensado no ingresará de nuevo. Muchos autores (Fussell, 1973; Cvetkovic et al., 1990) [15] han estudiado el proceso de deposición del líquido condensado y han probado que el deterioro de la permeabilidad al gas en yacimientos de gas condensado no es eliminado después del cañoneo. Entonces, después de operar el pozo, el flujo de gas sigue afectado por la reducción de permeabilidad cercana al pozo. Un método para combatir este efecto skin es la inyección neta de gas natural, que disuelve el condensado lo convierte de nuevo en gas al aumentar la presión. Este “inflado y desinflado” puede repetirse periódicamente.

El efecto “skin” en la Ecuación 2.5 es aquel que causa una alteración del flujo cercano a un pozo inclinado o vertical en un yacimiento radial. Otros efectos skin pueden ser introducidos para otras configuraciones de flujo, especialmente asociadas a fracturas (efecto estrangulador, fase de fractura) o al contacto del pozo con la fractura, como en el caso de una larga fractura vertical interceptando un pozo horizontal transversalmente. Sin embargo, una vez generada una fractura hidráulica, la mayoría de los efectos del “skin” ($s_d + s_{c+\theta} + s_p$) son minimizados y no tienen impacto en el tratamiento del rendimiento del pozo.

Fenómenos similares pueden afectar el caso de un cañoneo profundo que puede sobrepasar el daño cercano al pozo. La fase y la dependencia del efecto del skin son eliminados o contribuyen en el cálculo del efecto skin de fractura. En general, no es correcto sumar el efecto skin de pretratamiento a cualquier efecto skin de postfractura.

2.6.3 Skin de completaciones parciales y por la inclinación

Frecuentemente, los pozos son completados parcialmente, es decir, el espesor que se cañonea es menor que el espesor total del yacimiento. Este procedimiento se conoce como cañoneo parcial. Esta situación puede ser consecuencia de un deficiente trabajo de cañoneo

o deliberadamente para evitar los efectos de cono. Si el pozo no es cañoneado al menos en la mitad del espesor del yacimiento, el problema puede empeorar mucho.

En todos los casos la convergencia resultante de las líneas de flujo se verá como un efecto “skin” llamado s_c . Mientras más pequeño es el intervalo cañoneado comparado con el espesor total del yacimiento y mientras más sesgada la completación, mayor será el efecto “skin”. Si el intervalo completado es del 75% del espesor del yacimiento o más, el efecto “skin” será despreciable.

Mientras la completación parcial genera un efecto “skin” positivo reduciendo la exposición del yacimiento, un pozo desviado resulta en lo opuesto. A mayor ángulo o inclinación, mayor será la contribución negativa al efecto total del “skin”. El efecto del “skin” debido a la inclinación llamado s_θ , y el “skin” compuesto de la completación parcial y la inclinación es llamado $s_{c+\theta}$.

Cinco-Ley et al. (1975) [7] resolvieron el problema de una manera semianalítica y presentaron tablas del efecto “skin” para varias combinaciones de completación parcial y desviación del pozo. La figura 2.8 a continuación muestra las variables relevantes. Aquí h_w es la longitud cañoneada, z_w es la elevación del punto medio cañoneado desde la base del yacimiento, h es el espesor del yacimiento, θ es el ángulo de la desviación del pozo, y r_w es el radio del pozo.

Las Tablas A-1, A-2, A-3, A-4 en el apéndice A, dan resultados para espesores de yacimiento adimensionales, $h_d=h/r_w$ igual a 100 y 1000, respectivamente. Relaciones relevantes son z_w/h (relación de elevación) y h_w/h (radio de completación). El efecto skin compuesto, $s_{c+\theta}$ y las partes individuales, s_c y s_θ , son listadas. Como se puede ver, el valor absoluto de s_θ incrementa con el ángulo de inclinación y en algunos casos puede dar $s_{c+\theta}$ negativos a pesar del s_c positivo asociado con la completación parcial. Finalmente, el “skin” correspondiente a la relación de elevación es mayor cuando $h_d=1000$, reflejando la mayor penetración de las líneas de flujo distorsionadas.

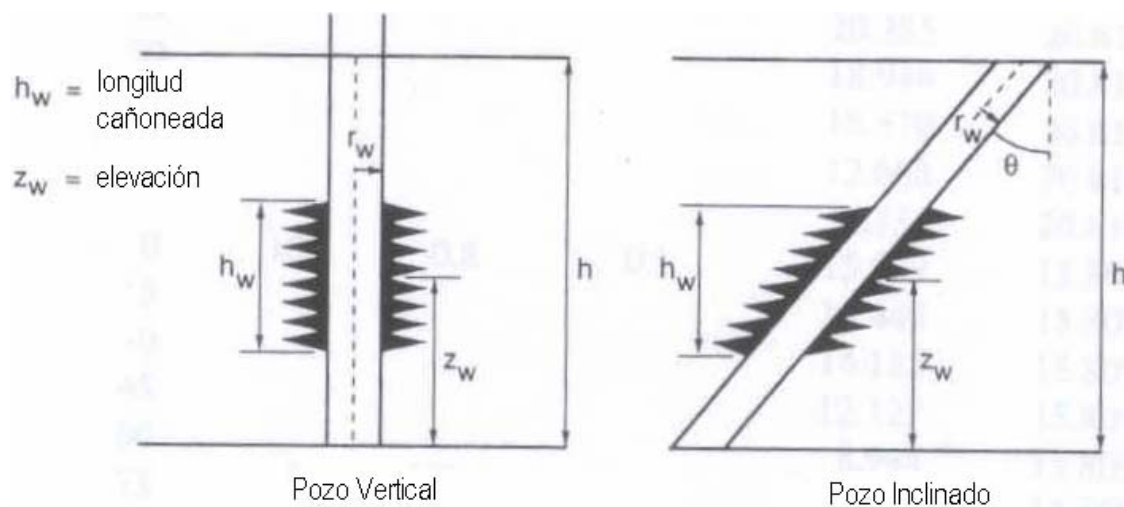


Figura 2.8 Cañoneo Parcial. Configuración de completación parcial vertical e inclinada
(Cinco-Ley et al.1975)

2.6.4 Calculo del efecto skin de cañoneo

Karakas y Tariq [18] presentaron una solución semianalítica para el cálculo del efecto skin de cañoneo, que dividieron a través de componentes: el efecto de flujo plano, s_H ; el efecto de convergencia vertical, s_v ; y el efecto de pozo, s_{swb} . El skin total de cañoneo es

$$s_p = s_H + s_v + s_{swb}, \quad (2.7)$$

A continuación se dan las variables relevantes para el cálculo del skin de cañoneo. Estas incluyen el radio del pozo, r_w , el radio de cañoneo r_{perf} , la longitud de los túneles creados, l_{perf} , el ángulo de fase de cañoneo, θ , y lo más importante la distancia entre los túneles, h_{perf} , que es inversamente proporcional a la densidad del cañoneo (por ejemplo, 2 disparos por pie, SPF, dan $h_{perf} = 0.5$ ft). Posteriormente se desarrolla el método de estimación de los componentes del skin de cañoneo.

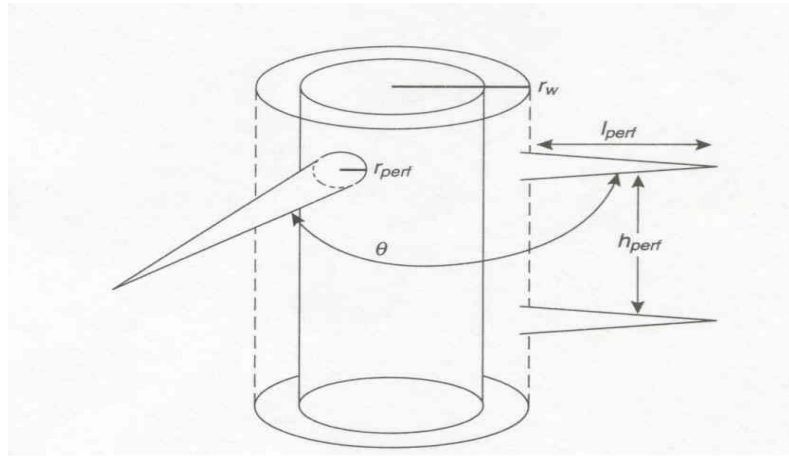


Figura 2.9 Variables para el cálculo del skin de cañoneo. (Karakas and Tariq,). [18]

2.6.4.1 Calculo de s_H

$$s_H = \ln \frac{r_w}{r'_w(\theta)}, \quad (2.8)$$

Donde $r'_w(\theta)$ es el radio efectivo y está en función del ángulo de fase θ :

$$r'_w(\theta) = \begin{cases} \frac{l_{perf}}{4} & \text{para } \theta = 0 \\ a_\theta(r_w + l_{perf}) & \text{para } \theta \neq 0 \end{cases}$$

(2.9)

La constante a_θ depende de la fase de la perforación y puede ser obtenida de la siguiente tabla. El efecto skin es negativo (salvo para $\theta = 0$), pero su contribución total es pequeña.

Constantes para el cálculo del Skin de Cañoneo							
Fase de Cañoneo	a_θ	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2
0° (360°)	0.250	-2.091	0.0453	5.1313	1.8672	1.6E-1	2.675
180°	0.500	-2.025	0.0943	3.0373	1.8115	2.6E-2	4.532
120°	0.648	-2.018	0.0634	1.6136	1.7770	6.6E-3	5.320
90°	0.726	-1.905	0.1038	1.5674	1.6935	1.9E-3	6.155
60°	0.813	-1.898	0.1023	1.3654	1.6490	3.0E-4	7.509
45°	0.860	-1.788	0.2398	1.1915	1.6392	4.6E-5	8.791

Karakas and Tariq, 1988.

Tabla 2.1 Constantes para el cálculo de skin de cañoneo.[12]

2.6.4.2 Cálculo de s_v

Para obtener s_v , dos variables adimensionales deben ser calculadas:

$$h_D = \frac{h_{perf}}{l_{perf}} \sqrt{\frac{k_H}{k_v}}, \quad (2.10)$$

donde k_H y k_v son las permeabilidades horizontal y vertical, respectivamente, y

$$r_D = \frac{r_{perf}}{2h_{perf}} \left(1 + \sqrt{\frac{k_v}{k_H}} \right), \quad (2.11)$$

El pseudo- skin vertical es entonces

$$s_v = 10^a h_D^{b-1} r_D^b, \quad (2.12)$$

con

$$a = a_1 \log r_D + a_2, \quad (2.13)$$

y

$$b = b_1 r_D + b_2, \quad (2.14)$$

Las constantes a_1 , a_2 , b_1 son también funciones de la fase de cañoneo y pueden ser obtenidas de la tabla anterior. El efecto skin vertical, s_v , es potencialmente la mayor contribución para s_p ; para pequeñas densidades de cañoneo, o también, grandes h_{perf} , s_v puede ser muy grande.

2.6.4.3 Cálculo de s_{wb} .

Para el cálculo de s_{wb} se calcula primero una cantidad adimensional:

$$r_{wD} = \frac{r_w}{l_{perf} + r_w}, \quad (2.15)$$

Entonces

$$s_{wb} = c_1 e^{c_2 r_{wD}}, \quad (2.16)$$

Las constantes c_1 y c_2 se pueden obtener de la Tabla 2.1.

2.7 Mecanismos de daño a la formación

En esta sección serán descritas: las diferentes causas de daños a la formación y la procedencia del daño durante las operaciones del pozo. El daño a la formación puede ser ocasionado por: la obstrucción de los espacios de los poros por partículas sólidas, por el mecanismo de compactación, desintegración del medio poroso, mediante efectos como la creación de emulsiones o por cambios en la permeabilidad relativa. La obstrucción de los poros por partículas sólidas es el mecanismo más penetrante de estos y puede ser resultado de múltiples causas, incluyendo la inyección de sólidos en la formación, dispersión de arcillas en la formación, precipitación, el crecimiento de bacterias y la interacción química de los fluidos introducidos en el pozo con los minerales y fluidos de la formación.

A continuación se hará una breve descripción de la obstrucción de los espacios porosos, los mecanismos de migración de los finos, la precipitación química, los daños ocasionados por fluidos, los daños mecánicos, los daños de completación y los daños biológicos como las fuentes de daño a la formación más comunes.

2.7.1 Obstrucción de los espacios porosos por partículas

Un medio poroso es un complejo arreglo de granos minerales con espacios vacíos (poros), que están irregularmente conformados y distribuidos, proporcionando la vía para el transporte de fluido. Fotografías de microscopía electrónica de barrido, como se muestran en la siguiente figura (Krueger, 1986), han ilustrado la tortuosa naturaleza del espacio entre los poros y la común presencia de pequeñas partículas, llamadas finos. Esta complicada estructura puede ser idealizada por una colección de cámaras relativamente grandes y el cuerpo de los poros conectados por entradas redondeadas o gargantas de los poros. La permeabilidad del medio es controlada en gran parte por el número y conductividad de las gargantas de los poros.

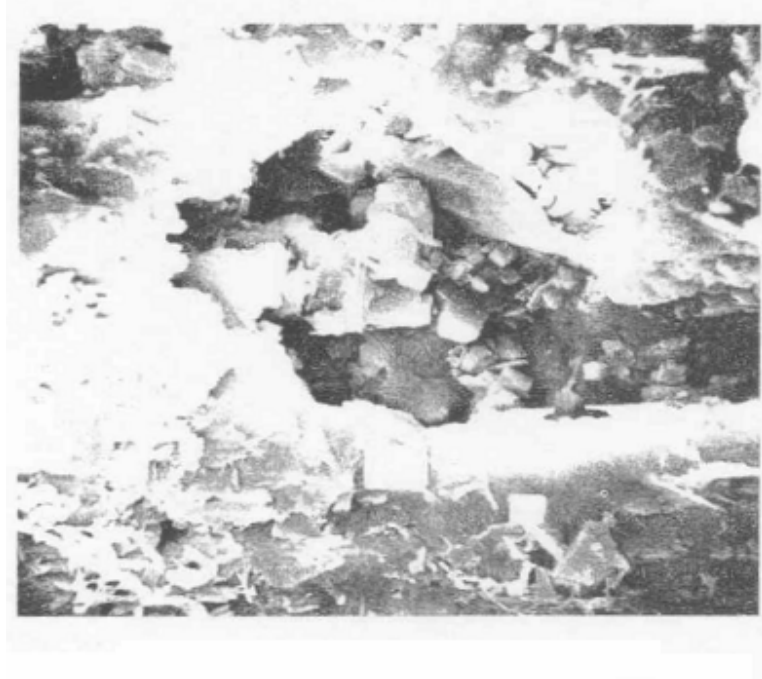


Figura 2.10 Configuración de los espacios entre poros de rocas. Imagen de espacio entre poros de rocas (Krueger, 1986). [20]

Cuando los finos se mueven a través del medio poroso, se depositan, y si esto ocurre en las gargantas de los poros, se nota una severa reducción de la permeabilidad. La Figura 2.8 ilustra los posibles modos para la fijación de las partículas. Grandes partículas transportadas en la superficie del medio poroso pasarán por encima de la superficie de los poros formando un filtro externo al medio poroso. Un ejemplo de esto y de la formación del filtro es la masa que se forma en el hoyo del pozo durante la operación de taladrado. Tal masa filtrante reduce, en gran medida, la capacidad de transportar fluidos desde o a través del medio poroso, pero es relativamente fácil su remoción o desvío.

Pequeños finos pasando a través del medio poroso pueden adherirse a la superficie del cuerpo de los poros, dando como resultado un empeoramiento de la permeabilidad, o pueden depositarse sobre la garganta del poro, tapándolo. Esto puede ocurrir cuando las partículas están entre un tercio y un séptimo del tamaño de la garganta del poro, o mayores; el tamaño relativo de los finos y de las gargantas de los poros es un factor principal en la

determinación de cuando el daño a la formación, debido al movimiento de los finos, puede ocurrir.

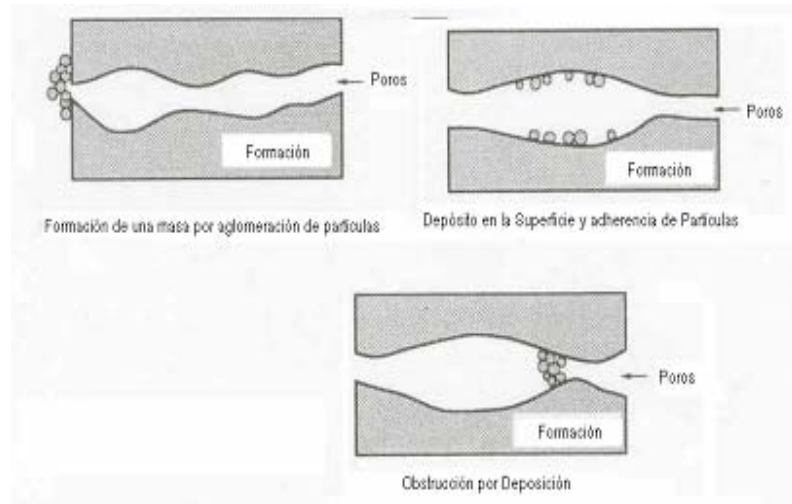


Figura 2.11. Modos de obstrucción de las partículas.(Schechter, 1992). [12]

2.7.2 Mecanismo de migración de los finos

Los finos responsables de la obstrucción de los poros pueden venir de fuentes externas o pueden ser originados en el mismo medio poroso. Los finos del medio poroso pueden ser movilizados por cambios en la composición química del agua, o mecánicamente arrastrados debido a las fuerzas que genera el fluido cuando se mueve. Los daños a la formación son ocasionalmente causados por la dispersión de finos cuando la salinidad del agua intersticial se reduce o la composición iónica cambia. Cualquier fluido que entre en contacto con la formación productora (fluido infiltrado del taladrado, fluidos de completación, fluidos de estimulación, etc.), debe tener una composición iónica que no sea dañina.

Numerosos estudios han mostrado que una disminución de la salinidad del agua que pasa a través de las rocas causa daños a la formación por la dispersión de partículas de arcilla. Este fenómeno denominado sensibilidad al agua, depende de los cationes presentes, el PH, y la forma como varía la salinidad. En general, los cationes monovalentes son mucho más dañinos que los bivalentes o trivalentes; La sensibilidad del agua es mayor para NaCl y

decrece para los otros $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$. Cuanto mayor es el pH, más sensibilidad tendrá el medio poroso a los cambios de salinidad. Para prevenir la dispersión de arcillas debida a los cambios de salinidad, cualquier fluido acuoso que pueda estar en contacto con la formación debe estar en una concentración mínima de iones monovalentes o una fracción suficiente de iones bivalentes. Comúnmente el criterio utilizado para prevenir el daño es el de tener composiciones de 2% de KCl o por lo menos un décimo de cationes bivalentes. El lector puede ver Schechter (1992) para una completa discusión sobre las arcillas y su dispersión.

2.7.3 Precipitación química

La precipitación de sólidos de las aguas de los crudos en la formación puede causar severos daños, cuando estos obstruyen los espacios libres de los poros. Los precipitados formados pueden ser tanto componentes inorgánicos del agua como especies orgánicas del hidrocarburo; en cualquiera de los casos, la precipitación puede deberse a cambios de temperatura o presión cerca del pozo o por cambios en la composición de la fase por fluidos inyectados.

Los precipitados inorgánicos que causan daños a la formación son generalmente cationes divalentes, como calcio o bario, combinados con carbonatos o iones de sulfato. Las especies iónicas en soluciones en el agua en los yacimientos están inicialmente en equilibrio químico con los minerales de la formación. Un cambio en la composición del agua podría generar la precipitación.

Las especies orgánicas más comunes que pueden causar daños a la formación son ceras (parafinas) y asfaltenos. Las ceras son largas cadenas de hidrocarburos que precipitan de ciertos hidrocarburos cuando se reduce la temperatura, o la composición del hidrocarburo cambia por la liberación del gas mientras se reduce la presión. Los asfaltenos son moléculas de gran tamaño con compuestos aromáticos y nafténicos que son dispersadas coloidalmente en el crudo (Schechter, 1992). Este estado coloidal se estabiliza en la presencia de resinas

en el hidrocarburo. Cuando estas resinas son removidas, los asfáltenos crean partículas lo suficientemente grandes como para causar daños a la formación. Los cambios químicos del hidrocarburo reducen la concentración de la resina y pueden dejar residuos de asfáltenos en la formación.

2.7.4 Daños ocasionados por los fluidos: emulsiones, permeabilidad relativa y cambios de mojabilidad.

Los daños a la formación pueden ser ocasionados por cambios en los fluidos, más que por cambios en la permeabilidad de la roca. El daño causado por los fluidos es debido a un cambio de la viscosidad de la fase líquida o a un cambio de la permeabilidad relativa. Este tipo de daños se puede considerar como temporal, porque el fluido es móvil y puede ser totalmente removido de las cercanías del pozo. Sin embargo, tal remoción es en algunos casos difícil.

La formación de emulsiones de hidrocarburos y agua en el yacimiento alrededor del hoyo del pozo, puede causar incremento en la viscosidad de los fluidos, puede ser mayor en órdenes de magnitud que la del hidrocarburo líquido. Además, las emulsiones son generalmente Newtonianas y puede ser necesaria bastante fuerza para lograr su movilización. Las emulsiones son generalmente mezclas mecánicas de hidrocarburo y agua, formadas por pequeñas gotas de una fase dispersas en la otra fase. En la formación, las emulsiones se estabilizan, a través de la introducción de finos que tienden a estabilizar estas gotas, colocándose en su superficie.

Daños a la formación pueden ser debidos a incrementos en la saturación del agua alrededor del pozo, teniendo como resultado la reducción de la permeabilidad relativa al hidrocarburo. Este efecto, llamado bloqueo de agua, puede ocurrir siempre que un fluido acuoso es introducido a la formación.

Finalmente, algunos productos químicos pueden alterar la mojabilidad de la formación, cambiando la permeabilidad relativa característica de la formación. Si el agua de la formación se cambia por hidrocarburos alrededor del hoyo del pozo, la permeabilidad relativa al hidrocarburo puede reducirse bastante en la región cercana al pozo.

2.7.5 Daños mecánicos

La formación cercana al pozo puede tener daños por aplastamiento o compactación de la roca. La pulverización y compactación de las rocas en los alrededores de los túneles cañoneados son una consecuencia inevitable del cañoneo. Basándose en pruebas de laboratorio Krueger (1986), expone que la zona dañada alrededor de la perforación es entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ in. de ancho con una permeabilidad entre 7% y 20% de la permeabilidad sin daño. Por la convergencia del flujo en el túnel, esta pequeña malla de daño alrededor del túnel puede actuar significativamente en la productividad.

Los daños mecánicos alrededor del pozo pueden ser el resultado del colapso de material débil presente en esa zona. Este tipo de daño es factible en formaciones desmoronables o en aquellas débiles por acidificación.

2.7.6 Daños biológicos

Algunos pozos, particularmente aquellos con inyección de agua, son susceptibles a daños causados por la acumulación de bacterias en la zona cercana al pozo. Bacterias inyectadas en la formación, particularmente las anaeróbicas, pueden crecer de manera rápida, tapando los espacios en los poros con ellas mismas o con precipitaciones que resultan de la actividad biológica de los organismos. La reducción de la permeabilidad causada por las bacterias puede ser tan significativa que la inyección de bacterias de manera intencional, como un método para reducir la permeabilidad, se encuentra bajo estudio (Zajic et al. 1983). El daño biológico se previene mejor tratando el agua con bacterias.

2.8 Fuentes de daño a la formación durante las operaciones de pozo

Las operaciones en la construcción de pozos son actividades que invaden la formación con fluidos y partículas sólidas provenientes de diferentes fuentes como la misma formación y los fluidos de perforación, en esta parte se describen los posibles daños que pueden ocurrir.

2.8.1 Daños de perforación

La fuente de daño más común a la formación es el proceso de perforación. Los daños son resultado de la invasión de la formación por parte de las partículas sólidas y de los fluidos de perforación filtrados. El daño ocasionado por las partículas es generalmente el más severo.

La deposición de partículas de barro en la formación alrededor del pozo puede reducir la permeabilidad en gran medida en esta zona. Afortunadamente, la profundidad de la invasión de las partículas es generalmente pequeña, desde menos de una pulgada hasta el máximo de un pie. Para minimizar este daño, las partículas de barro deben ser de mayor tamaño que los poros, Abrams (1977) sugiere que teniendo el 5% de partículas de barro con un diámetro mayor que un tercio del cuerpo de los poros, se prevendrá significativamente la invasión de las partículas. Siempre que la invasión de las partículas sea pequeña, será posible traspasar el daño al perforar, cañoneando a través del daño o por acidificación.

El taladrado del lodo de perforación podría generar una invasión a la formación mayor que la de las partículas, con profundidades comunes de invasión entre 1 y 6 pies (Hassen, 1980). Como existen filtraciones en la formación, un revoque de sólidos de lodo se va formando en la cara de la formación, decreciendo la velocidad de filtración de filtraciones invasoras. Este revoque también será erosionado por los esfuerzos del fluido de

perforación. La relación dinámica de filtración, es tomada en cuenta para este balance entre la masa y la erosión y está dada por

$$u_f = \frac{C}{\sqrt{t}} + 3600b\gamma, \quad (2.17)$$

Donde u_f es el flujo másico del fluido filtrado, C es la pérdida en el coeficiente dinámico de pérdida para el revoque, t es el tiempo de exposición, b es la constante que toma en cuenta la estabilidad mecánica del revoque, y γ es la cantidad de esfuerzo en la pared [sec^{-1}]. Hassen (1980) expone que los valores de b están de $2 \cdot 10^{-8}$ hasta $5 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{cm}^2$. El coeficiente de pérdida de filtrado del fluido puede ser obtenido de pruebas dinámicas de laboratorio.

2.8.2 Daños de completación

Los daños a la formación durante la completación de un pozo pueden ser causados por la invasión de los fluidos de completación en la formación, por cementado, cañoneo, o por las técnicas de estimulación del pozo. Ya que el fluido de completación tiene como propósito mantener un nivel de presión mayor en el pozo que la presión de la formación (overbalance), los fluidos de completación son forzados hacia la formación. Si los fluidos de completación contienen sólidos o son químicamente incompatibles con la formación, el daño puede ser similar al daño que causa el lodo de perforación. Es muy importante que los fluidos de completación estén muy bien filtrados para evitar la inyección de sólidos dentro de la formación. Es recomendable que los fluidos de completación contengan menos de 2 ppm de sólidos de un tamaño menor de $2\mu\text{m}$ (Millhone, 1982).

El filtrado de cemento constituye otro fluido potencialmente dañino cuando entra en la formación, porque el filtrado de cemento usualmente contiene altas concentraciones de iones de calcio, generando daños por precipitación.

El cañoneo genera inevitable aplastamiento en la formación en la cercanía de la perforación. Este daño es minimizado por el cañoneo bajo balance; esto es, con la presión en el pozo, menor que la presión de la formación.

Los fluidos de estimulación, aunque tienen el propósito de incrementar la productividad del pozo, puede causar daños a la formación por la invasión de sólidos de la formación o por la precipitación”.[12]

Capítulo 3

Desarrollo del Tema:

3.1 Análisis General de los modelos encontrados

Con el fin de tener un conocimiento completo de la forma como funcionan los modelos que predicen la productividad de los pozos cañoneados, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de las publicaciones en inglés y español de los últimos quince años y del material existente en PDVSA, donde se encontraron diversos autores que, desde diferentes puntos de vista, obtienen expresiones equivalentes entre sí, pero con algunas diferencias en cuanto a las consideraciones, aproximaciones y otros. A continuación se nombran y clasifican algunos de estos modelos:

1.) Modelos Analógicos: Modelos Electrolíticos:

- Mc. Dowell y Muskat.
- Howard y Watson.
- Pan y Tang .

2.) Modelos Numéricos:

a.) Elementos Finitos:

- Perez y Kelkar.
- Karakas y Tariq.
- Locke.
- Saleh y Stewart.

b.) Diferencias Finitas:

- Harris.
- Hong.

3.) Modelos Analíticos y Semianalíticos:

- Yildiz y Cinar.
- Okonkwo y Onyekwo.
- Karakas y Tariq.

En estos modelos se observan una serie de consideraciones en lo correspondiente a la geometría de los pozos y sobre el comportamiento del flujo. El análisis mostrado en el esquema anterior permite tener una primera idea de cómo se desarrollan estos modelos, aunque se puede decir que el fin último de construir un modelo como estos es llegar a una expresión analítica que, en función de los parámetros de cañoneo, sea capaz de dar valores de productividad. Mucho de estos modelos están actualmente desarrollados en las herramientas computacionales que en estos momentos utiliza PDVSA, sobre todo aquellos que han llegado a expresiones analíticas que consideran diversos parámetros de cañoneo, ponerlas en funcionamiento no resulta nada complicado. A continuación se desarrolla un análisis de los métodos utilizados en el desarrollo de los modelos.

Modelos Analógicos: En este caso se utilizan modelos electrolíticos que consisten en soluciones de circuitos eléctricos que simulan el comportamiento de los fluidos alrededor del pozo. Los circuitos simulan las condiciones de borde y de desarrollo del fluido, y mediante el comportamiento de la carga en las pruebas, se pueden dar soluciones a las ecuaciones que rigen el flujo tomando las consideraciones de cada caso. Estos modelos ofrecen soluciones muy buenas con resultados realmente diferenciados entre caso y caso, pero son difíciles de implementar y muy complicados si se quiere variar su configuración.

Modelos Numéricos: Los modelos que se consideran aquí basan su estructura en una serie de cálculos que ofrecen soluciones aproximadas. El computador lee datos de un conjunto, en diferentes puntos, dependiendo del tipo de modelo que se utilice y da soluciones para el caso general. Existen muchos métodos pero en estos casos solamente se utilizan el de los elementos finitos y el de diferencias finitas. Son modelos muy amplios y pueden ofrecer soluciones para una gran cantidad de casos o para un mismo caso en diferentes situaciones, sin que esto indique que se tiene que modificar su estructura.

Modelos Analíticos y Semianalíticos: Se da una solución exacta del problema sin considerar errores. Los modelos tratan casos específicos y en los semianalíticos se basan en métodos numéricos para posteriormente dar soluciones para casos específicos que no consideran todas las variaciones posibles y que poseen simplificaciones. Son métodos muy útiles para determinados casos porque son muy rápidos y sencillos, pero sólo se pueden utilizar en las condiciones que se especifican.

La estructura que sigue cada uno de los modelos es muy similar entre sí. En función de la variación de presión que existe entre el yacimiento y la cara de un pozo completado idealmente y un pozo completado con cañoneo se obtiene un índice de productividad. Para ilustrar mejor esto se desarrollará el modelo semianalítico de Karakas y Tariq, que es uno de los modelos más citados en la literatura.

Karakas y Tariq presentan un método simple y sistemático que consta de siete pasos:

1. Se obtiene el valor del “skin” horizontal

$$s_H = \ln(r_w / r_{we}), \quad (3.1)$$

El radio efectivo del pozo viene dado por:

$$r'_w(\theta) = \begin{cases} \frac{lperf}{4} & \text{para } \theta = 0, \\ a_\theta (rw + lperf) & \text{para } \theta \neq 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

El parámetro a_θ viene dado en la Tabla 2.1.

1. Se obtiene el “skin” del hoyo del pozo.

$$S_{wb} = c_1(\theta) \exp[c_2(\theta)r_{wD}], \quad (3.3)$$

donde $r_{wD} = r_w / (L_p + r_w)$. La ecuación anterior sólo será válida para $0.30 \leq r_{wD} \leq 0.90$. c_1 y c_2 vienen dados por la tabla a continuación.

Fase (grados)	C1	C2
0 (360)	1,60E-01	2,675
180	2,60E-02	4,532
120	6,60E-03	5,32
90	1,90E-03	6,155
60	3,00E-04	7,509
45	4,60E-05	8,791

Tabla 3.1 Valores de las constantes C_1 y C_2 a ser utilizadas en el modelo Karakas- Tariq.

3. Se obtiene el “skin” vertical, s_v

$$S_v = 10^a h_D^{b-1} r_{pD}^b, \quad (3.4)$$

Válida para $h_D \leq 10$ y $r_{pD} \geq 0.01$

$$\text{donde } a = a_1 \log_{10} r_{pD} + a_2, \quad (3.5)$$

$$\text{y } b = b_1 r_{pD} + b_2, \quad (3.6)$$

los valores de $a_1, a_2, b_1,$ y b_2 son dados en la Tabla 3.2.

Fase (grados)	a_1	a_2	b_1	b_2
0(360)	-2,091	0,0453	5,1313	1,8672
180	-2,025	0,0943	3,0373	1,8115
120	-2,018	0,0634	1,6136	1,777
90	-1,905	0,1038	1,5674	1,6935
60	-1,898	0,1023	1,3654	1,649
45	-1,788	0,2398	1,1915	1,6392

Tabla 3.2 Valores de las constantes a_1, a_2, b_1, b_2 a ser utilizadas en el modelo Karakas –Tariq.

Además

$$h_D = (h/L_p) \sqrt{k_H k_v}, \quad (3.7)$$

y

$$r_{pD} = (r_p/2h)(1 + \sqrt{k_v/k_H}), \quad (3.8)$$

4. Se determina el “skin” combinado causado por el cañoneo, s_p .

$$s_p = s_H + s_v + s_{wb}, \quad (3.9)$$

5. Se toma en cuenta el efecto de la zona compactada.

$$s_c = \frac{h}{L_p} \left(\frac{k}{k_c} - 1 \right) \ln \left(\frac{rc}{rp} \right), \quad (3.10)$$

$$s_p' = s_p + s_c, \quad (3.11)$$

6. Se añade el efecto de la zona dañada. Para cañoneos con zona dañada, el efecto “skin” causado por los efectos combinados de cañoneo y zona dañada será:

$$s_t = \left(\frac{k}{k_d} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_d}{r_w} \right) + \left(\frac{k}{k_d} \right) (s_p + s_x) \quad (3.12)$$

donde s_x o “skin” causado por los efectos frontera cuando los túneles cañoneados terminan cerca de la zona dañada, no se toma en cuenta para $r_d > 1.5(r_w + L_p)$. Los valores de s_x se puede ver en la Tabla 3.3. Para cañoneo más allá de la zona dañada, modificando el radio del pozo y la longitud de la perforación:

Re/(Lp+rw)	Sx
18	0
10	-0,001
2	-0,002
1,5	-0,024
1,2	-0,085

Tabla 3.3. “Skin” causado por los efectos frontera.

$$L_p' = L_p - [1 - (k_d / k)] L_d, \quad (3.13)$$

y

$$r_w' = r_w^{1 - (k_d / k)} L_d, \quad (3.14)$$

Se utilizan en este caso los valores de L_p y r_w desde el Paso 1 hasta el 5. El skin calculado en el Paso 5 refleja efectos combinados de geometría de cañoneo y de zona dañada.

7. Cuando se tienen efectos de anisotropía, se modifica el radio de cañoneo, r_p :

$$r_{pe} = (r_p / 2)(1 + \sqrt{k_v / k_H}), \quad (3.15)$$

y se utiliza este valor de r_{pe} sustituyendo el valor de r_p del paso 1 al 5.

Después de obtenida una expresión de skin total para el pozo que se quiere evaluar, se procede a obtener el valor del índice de productividad, con el cual se realizan las comparaciones con otros modelos de productividad o como un valor referencia, para tomar decisiones con respecto a un pozo a cañonear. La expresión del índice de productividad vendrá dada por:

$$I_p = \frac{q_p}{q_o} = \frac{\ln(r_e / r_w)}{\ln(r_e / r_w) + s_t}, \quad (3.16)$$

Para tener una idea general de los modelos, además de presentar el modelo de Karakas-Tariq, se presenta el modelo de Locke que mediante una serie de gráficas permite obtener los valores de productividad del pozo que se quiere evaluar. Los modelos que se utilizan en este trabajo, como guías en la forma como se evalúa la productividad de pozos cañoneados, se eligieron por ser representativos de los diferentes métodos utilizados y por ser modelos que están disponibles en paquetes comerciales que posee PDVSA.

A continuación se presenta el gráfico mediante el cual Locke consigue los resultados de productividad. Este modelo posee ecuaciones similares a las de Karakas-Tariq para la determinación de sus resultados, pero se presenta el gráfico para obtener una manera visual de la relación que tienen los parámetros en el índice de productividad. Una vez conocida la

estructura principal de los modelos se puede saber cuales son los parámetros que éstos toman en cuenta.

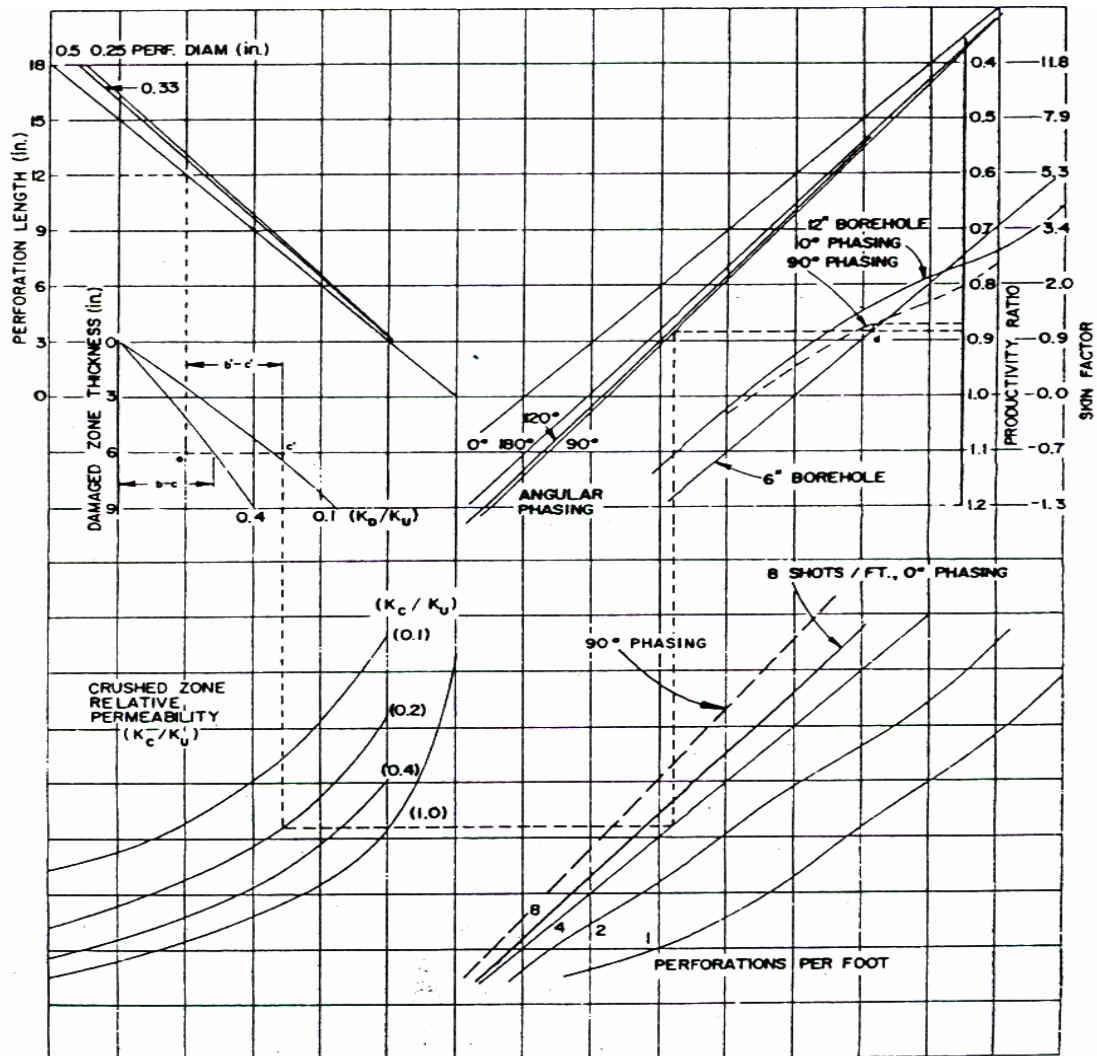


Figura 3.1. Histograma de Locke para determinar índice de productividad y skin.[21]

El gráfico que se presenta está en inglés, pero para no modificar su configuración con la traducción se procederá a dar una descripción de cómo se obtiene el índice de productividad y el valor del skin tomando en cuenta los diferentes parámetros de cañoneo.

El primer paso consiste en dar las características de la carga utilizada en el proceso, podemos ver a la izquierda en la parte superior que la entrada al gráfico se hace mediante la

longitud de penetración y posteriormente se va hasta las líneas que indican el diámetro de la penetración, estos datos se obtienen de la prueba API RP 43 de la carga que se va a utilizar, una serie de ensayos de las cargas determinan estos valores. Posteriormente se evalúa el daño mediante dos daños principales, la zona dañada y la zona compacta, que se describen en el Capítulo 2. Se definen estas zonas por la variación de la permeabilidad que existe entre ellas y la formación. Además se debe considerar que en la zona compacta el espesor influye también en los resultados, así que primero se realiza la intersección con la magnitud del espesor de esa zona y posteriormente se va hasta el valor de la relación de permeabilidades que se tenga. Una vez que se llega a las líneas de zona compacta, se desplaza de forma horizontal hasta llegar a la cantidad de perforaciones por pie que se tienen y después la fase entre disparos que se va a utilizar. Llegado a este punto y movilizándose de forma horizontal en la parte superior del gráfico, se puede leer con claridad los valores de “skin” y la relación de productividad.

3.2 Análisis de los parámetros de cañoneo en función de los modelos de índice de productividad

Los parámetros de cañoneo poseen características diferentes entre sí e influyen de manera diferente en el índice de productividad de los pozos cañoneados, entre estos parámetros podemos nombrar:

- Longitud y diámetro de la penetración de la carga.
- Fase entre los disparos
- Tipo de proyectil
- Características de la formación
- Tipo de cañoneo
- Características de los fluidos a extraer y de los fluidos de perforación
- Tipos de daños generados
- Separación vertical entre los cañones.
- Inclinación del pozo a cañonear

Para ilustrar la influencia que tienen los parámetros de cañoneo en la productividad se hizo un análisis de datos reales de cañoneo, mediante un programa que en función de las condiciones de trabajo que se tienen, lleva a cabo un análisis nodal; es decir, modela el flujo como función de las propiedades de temperatura y presión del fluido. Este programa posee diversos modelos que indican índices de productividad bajo parámetros de cañoneo, entre los cuales se encuentran el modelo Krarakas-Tariq y el modelo Locke que se explicaron anteriormente. En este proceso se tomó un pozo real y se modificaron algunos de los parámetros de cañoneo para conocer la influencia que éstos poseían sobre la productividad, después de presentar los datos del pozo se dan los parámetros que fueron tomados en cuenta y los resultados obtenidos.

3.3 Herramienta utilizada

“Wellflo es un programa de análisis nodal. Su función es el análisis del comportamiento del petróleo y gas en los pozos. Este comportamiento modela, la presión y la temperatura de los fluidos como una función del flujo. El programa toma como datos de entrada las condiciones en el yacimiento, los datos de completación del pozo, y los datos de equipos en la superficie, combinado con los datos de las propiedades de los fluidos. El programa realiza diferentes cálculos para determinar la presión y temperatura de los fluidos. Diferentes modos de operación se pueden emplear para hallar tasas de flujo, dadas por las presiones controlantes, o hallar caídas de presión para tasas de flujo medidas”. [13]

3.4 Evaluación de los parámetros de cañoneo

Para esta simulación se tienen los siguientes datos que se toman en cuenta para el modelo de Karakas-Tariq y el modelo de Locke:

Pozo MUD-4: Este pozo y sus especificaciones son parte de la información manejada por el grupo de daños a la formación de PDVSA ubicado en las instalaciones de Intevep.

Tubería de producción = 15.178 pies

Diámetro exterior = 3,214 in

Diámetro interior = 2,922 in

Intervalo Cañoneado.

Profundidad medida en pies

15.4389 pies

15.508 pies

Profundidad vertical medida en pies

15.286 pies

15.354 pies

Perforaciones:

Diámetro = 0,31 in

Densidad = 6 tiros por pie

Fase = 60 grados

Longitud = 9 in

Tiros por pie = 6 tiros

Permeabilidades:

Permeabilidad vertical = 5 md

Permeabilidad dañada = 7 md, con un espesor de 0,5 in.

Presión del yacimiento = 7.340 psi

T = 300 ° F

Permeabilidad efectiva = 35 md

Espesor de la arena = 278 pies

Punto medio de las perforaciones = 15.473

Revestidor Cementado = 15.178 pies

Diámetro Externo = 6,604 in

Diámetro interno = 6,004 in

Tubería de producción 330 pies Hoyo Abierto

Bajo estas condiciones el programa Wellflo puede establecer el tipo de flujo con el que se está trabajando y con los modelos de productividad estima como varía la producción del pozo para las condiciones de cañoneo posibles. Cada parámetro influirá de una manera diferente sobre el flujo hacia el pozo, así se podrá atribuir un valor de “skin” a estas variaciones y obtener los diferentes resultados. .

En las primeras gráficas (3.2 y 3.3) se pueden ver las condiciones en las que funciona el pozo, punto de operación y cantidad de barriles diarios en función de la presión. Una vez obtenidas las gráficas de operación, se hicieron variaciones de los parámetros característicos del tipo de valores que son utilizados en la industria. Aunque en todos los casos menos en la fase (ángulo que existe entre las cargas de cañoneo), se notan incrementos de producción al incrementar el valor de los parámetros, se debe recordar que se está en presencia de un proceso que posee sus valores óptimos en función de los costos de producción. Al variar la cantidad de daño del pozo se pudo observar como los parámetros de cañoneo influyen mucho más en pozos con mayores daños; es decir, entre mayor sea el daño más cuidado se debe prestar al cañoneo. Aunque esto suene contradictorio se debe recordar que el daño no es función exclusiva del cañoneo, se representa como una sumatoria de diferentes daños que se explicaron en el segundo Capítulo.

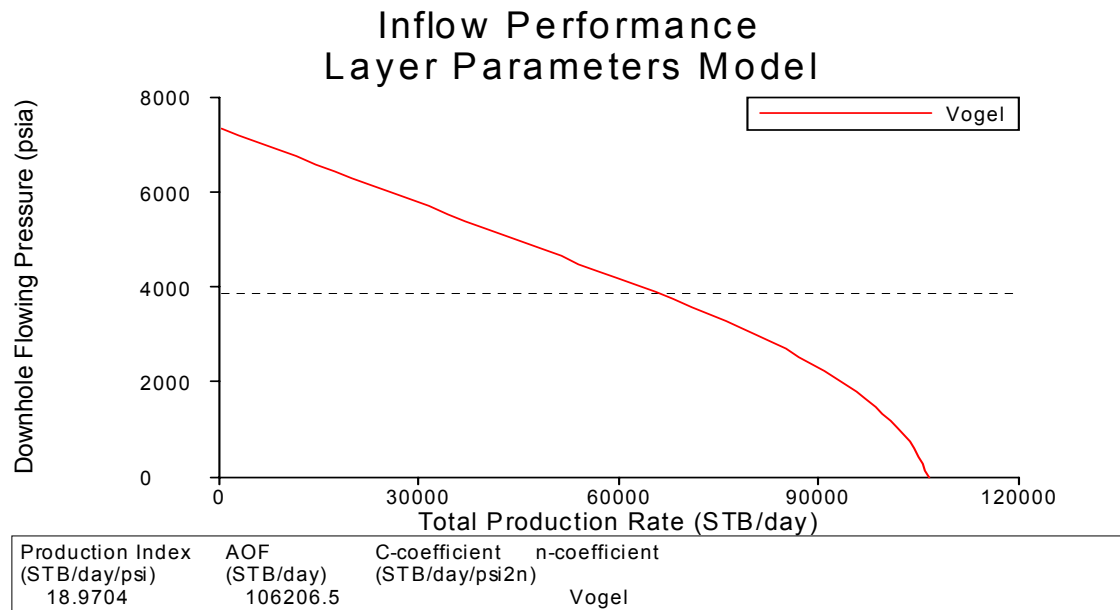


Figura 3.2 Relación entre la presión y la productividad del pozo. Esta relación se denomina índice de productividad y la línea punteada identifica los valores de producción que alcanza el pozo que se está evaluando. [Autor]

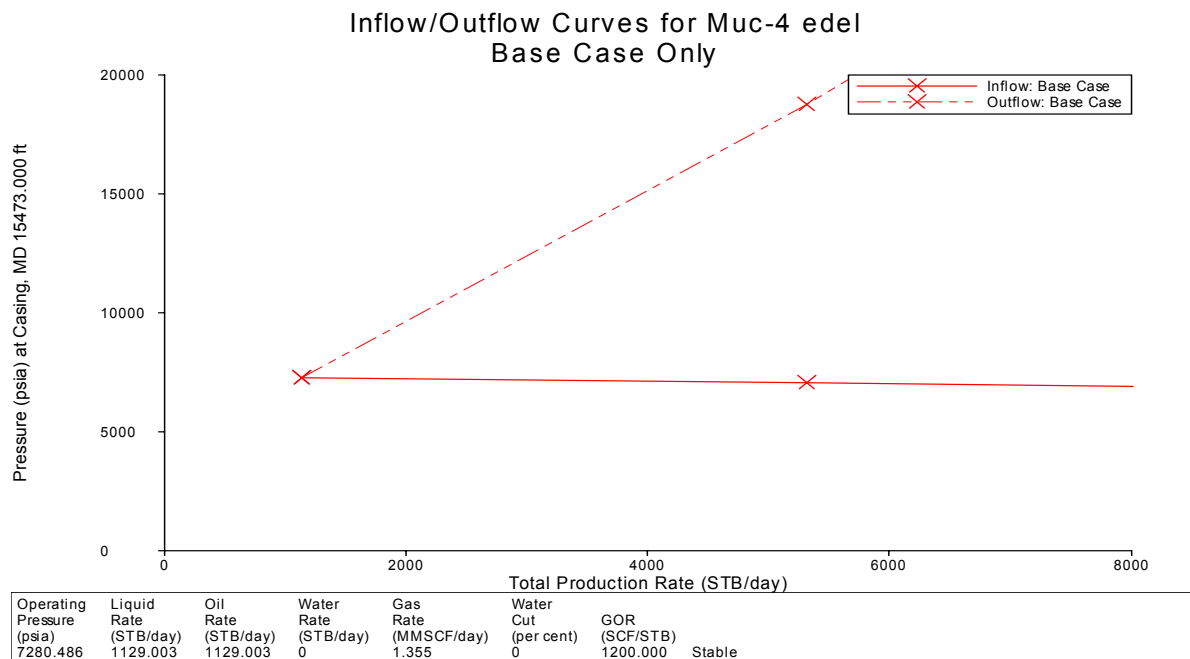


Figura 3.3 Punto de operación del pozo evaluado, la línea se cruza en donde el pozo tiene su mejor relación entre la presión existente en la cara del pozo en la formación y la cantidad de producción que este tiene. [Autor]

La figura a la 3.4 muestra un incremento de la producción mientras aumenta la densidad de disparos, se debe considerar que el mejor valor está alrededor de 8 disparos por pie, porque en estos procesos de producción, es determinante la inversión con respecto a los resultados, y una densidad mayor de cañoneo sería antieconómica.

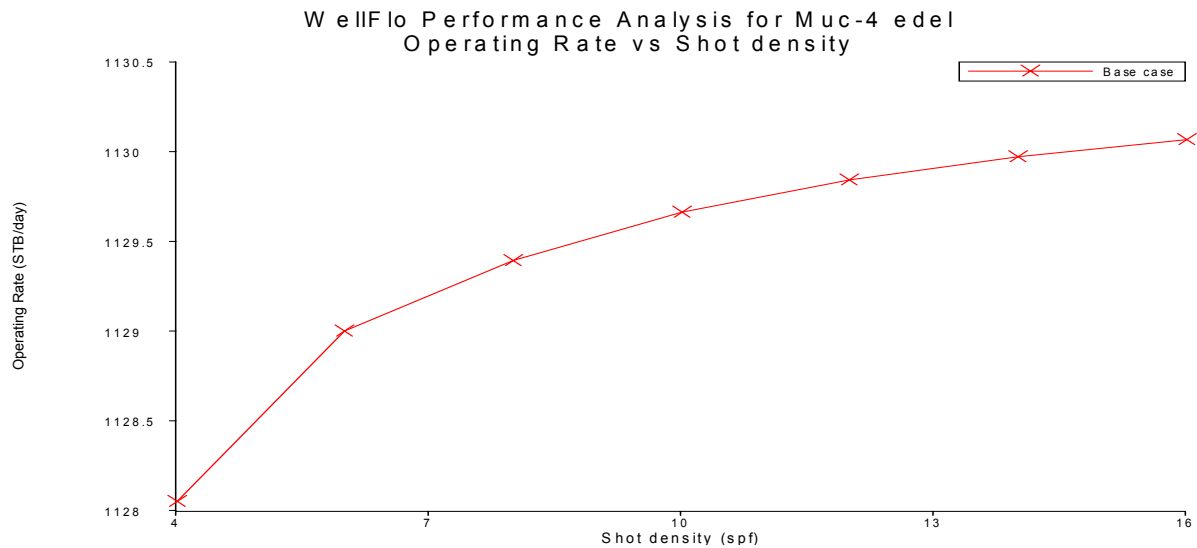


Figura 3.4 Relación entre densidad de disparos producción.[Autor]

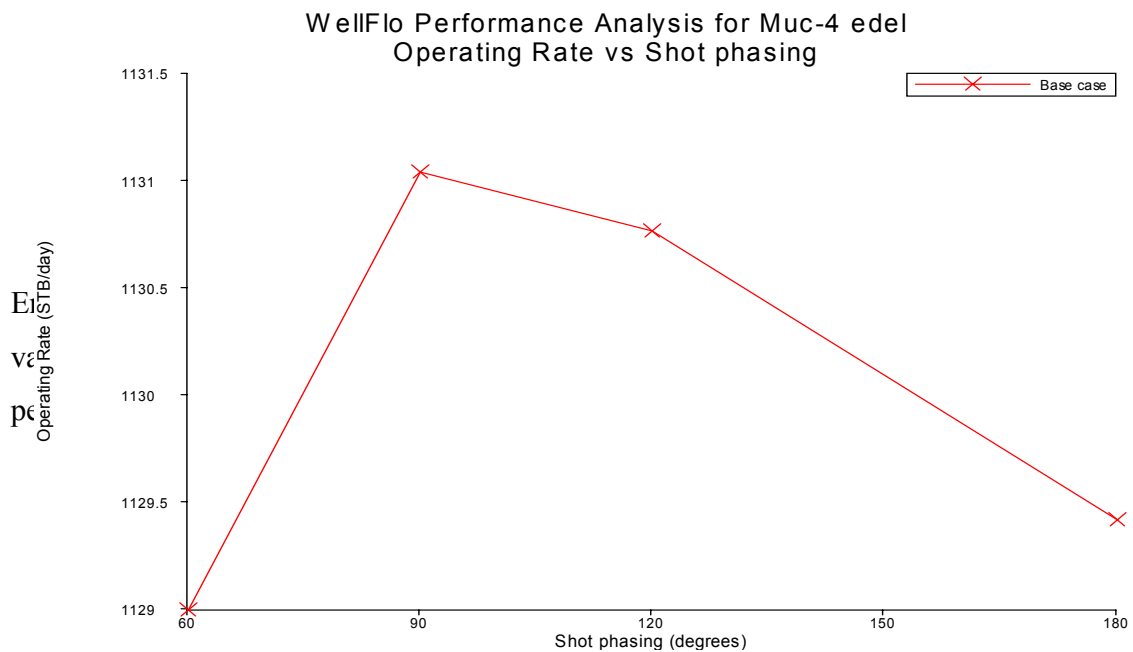


Figura 3.5 Relación fase entre los disparos y la producción.[Autor]

En ambas gráficas (3.6 y 3.7) a continuación aumenta la producción en función del incremento de la penetración y del diámetro, pero como se mencionó anteriormente, estas variaciones tienen que ser de magnitudes importantes para que la inversión sea justificable. En la gráfica de penetración los valores adecuados están alrededor de 7 pulgadas de penetración y en la de diámetro los 0,40 pulgadas aparecen como la mejor opción.

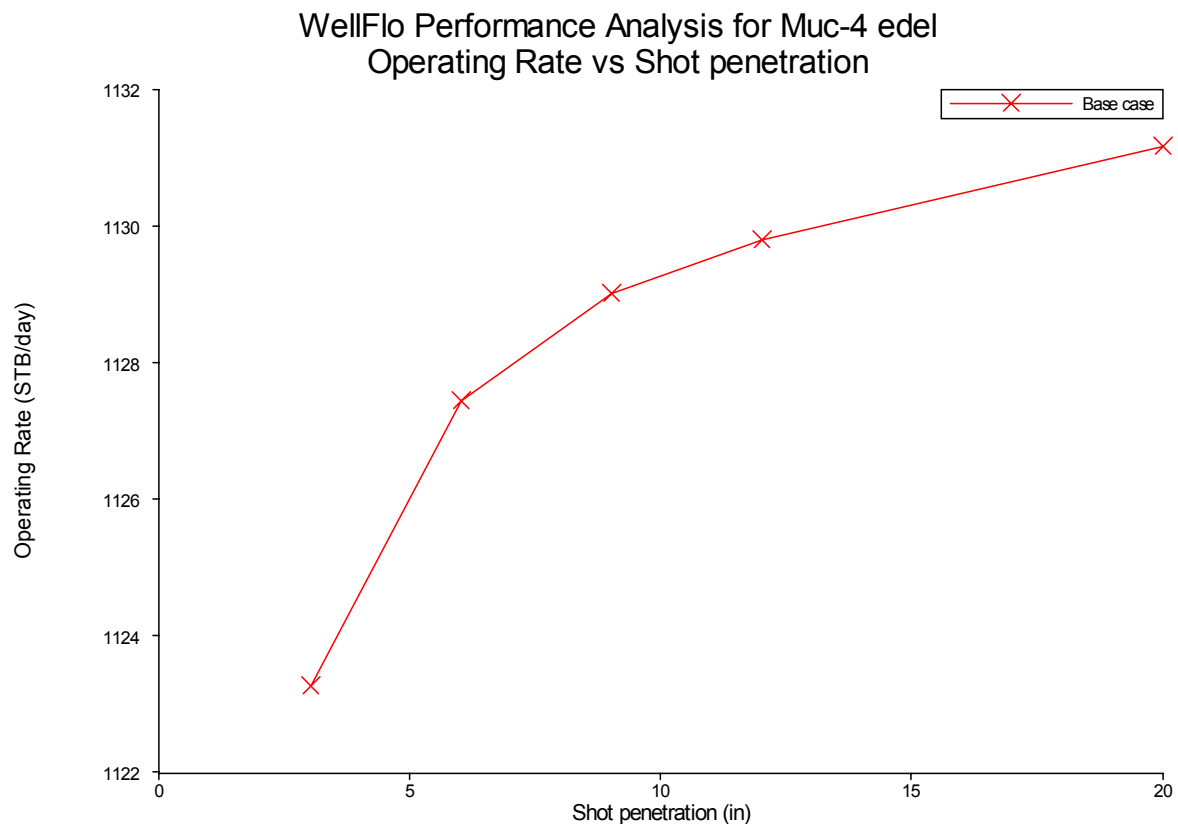


Figura 3.6 Relación entre la producción y penetración de las cargas. [Autor]

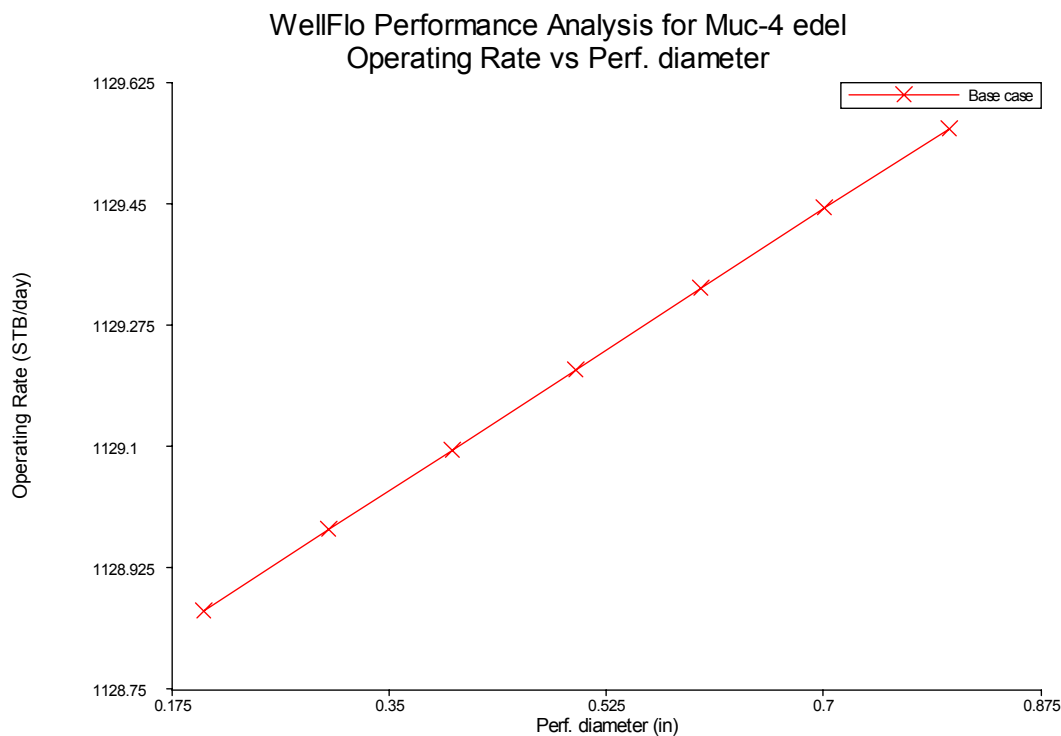


Figura 3.7 Producción en función del diámetro de las perforaciones.

Figura 3.7 Relación entre la producción y diámetro de penetración de las cargas. [Autor]

Para conseguir resultados diferentes se evaluó el mismo pozo modificando la cantidad de daño considerado, aumentando bastante esta cantidad, de esa manera se simulan dos pozos bajo dos condiciones de daño diferentes, con las cuales se obtiene la influencia del cañoneo.

Los resultados que se obtienen son similares al evaluar cada uno de los parámetros de cañoneo, pero en las gráficas de punto de operación (3.8, 3.10, 3.12, 3.14, 3.16) se puede ver que al aumentar el daño se pueden obtener mejores resultados si se modifican las condiciones de descarga (outflow). Esta sección contribuye para obtener una serie de reglas generales que se nombran después de las gráficas, pero su parecido a la sección anterior permite que el análisis de cada uno de los parámetros, de forma individual, sea el mismo.

En la Figura 3.8 se nota que las líneas de “inflow” o líneas que están ubicadas a la derecha con múltiples colores indican que al variar el número de disparos por pie se podrían obtener

mejores resultados con una tubería de producción con mayores dimensiones. Las variaciones para el punto de operación no son muy grandes, pero se pueden ver los resultados que se obtienen al conjugar la variación de los parámetros de cañoneo con parámetros de geometría de completación diferentes de los de cañoneo.

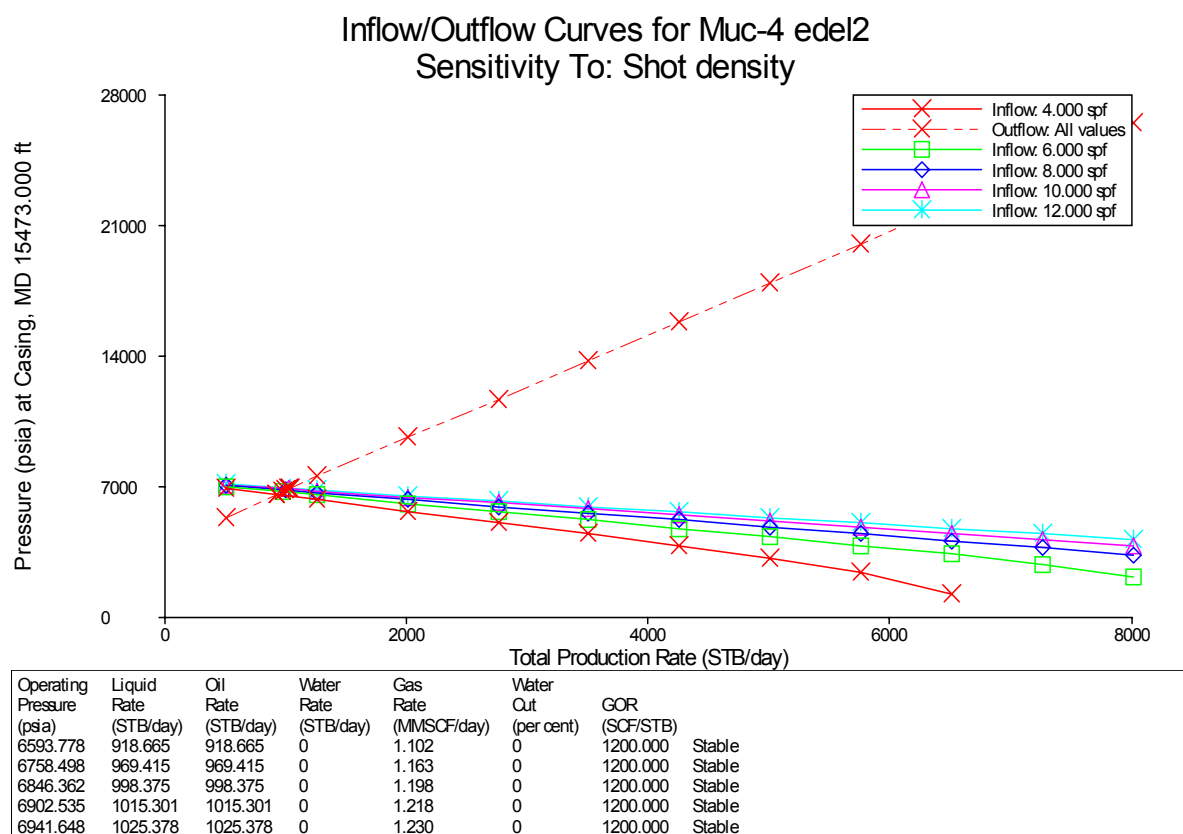


Figura 3.8 Puntos de operación en función de la variación de la densidad de disparos por pie. [Autor]

En la Figura 3.9 los resultados son similares a los que se obtuvieron en el pozo con menos daño, pero esta gráfica se debe observar en conjunto con la Figura 3.8 y ver que aunque este caso los aumentos de producción también se ven con el incremento del número de disparos por pie, en estas condiciones los resultados pueden ser mejores al modificar la geometría de la tubería de producción.

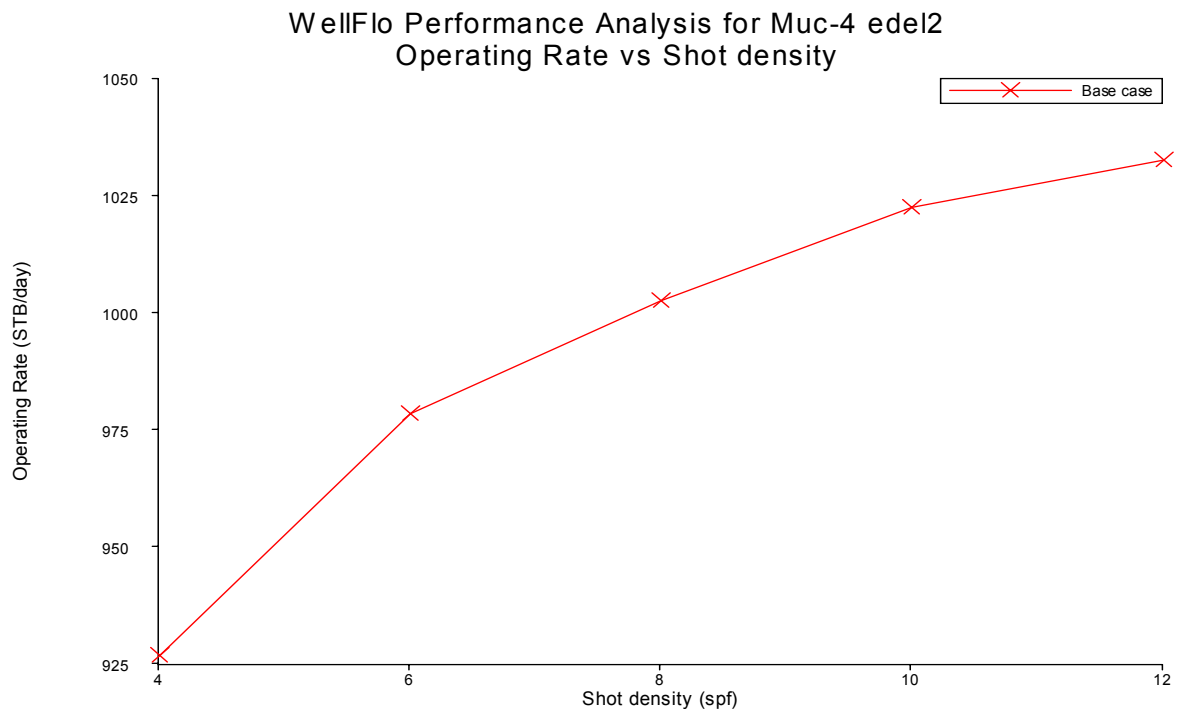


Figura 3.9 Producción en función de la densidad de disparos por pie.[Autor]

Para las Figuras 3.10 y 3.11 el comportamiento es igual al de las dos Figuras anteriores, pero este caso es determinante para el planteamiento del modelo, se sabe que el pozo fue completado con longitudes de penetración de 9 pulgadas por limitaciones para tener un cañón más grande en esas condiciones. Se puede ver que si las penetraciones no alcanzan esa longitud, la producción se puede ver seriamente afectada, esto indica que es sumamente importante conocer cuanto penetrará nuestra carga a condiciones de pozo.

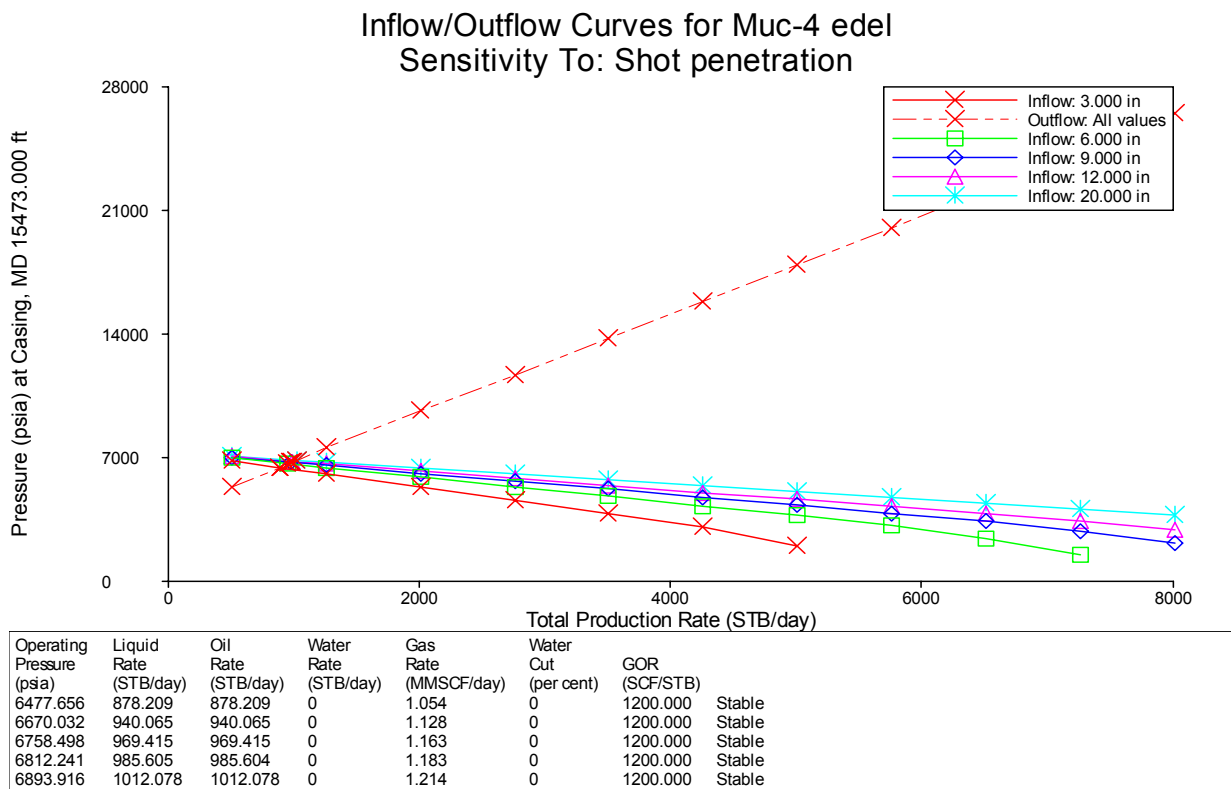


Figura 3.10 Puntos de operación en función de la penetración de los disparos.[Autor]

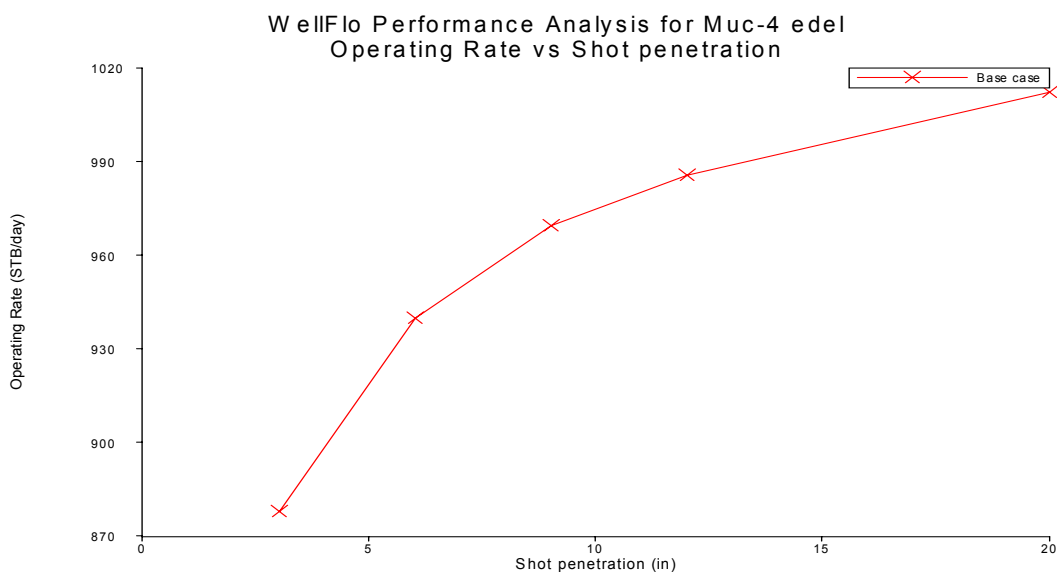


Figura 3.11 Producción en función de la longitud de penetración de las cargas[Autor]

El caso de la fase entre las caras, es bastante peculiar en ambos casos, se puede ver que los pozos poseen uno o dos valores de fase con los que podrían operar y para todos los otros valores la variación o es mínima o es desfavorables. La fase viene dada por el tipo de cañón utilizado en el cañoneo y por las características del medio. Este comportamiento se puede ver en las Figuras 3.12 y 3.13.

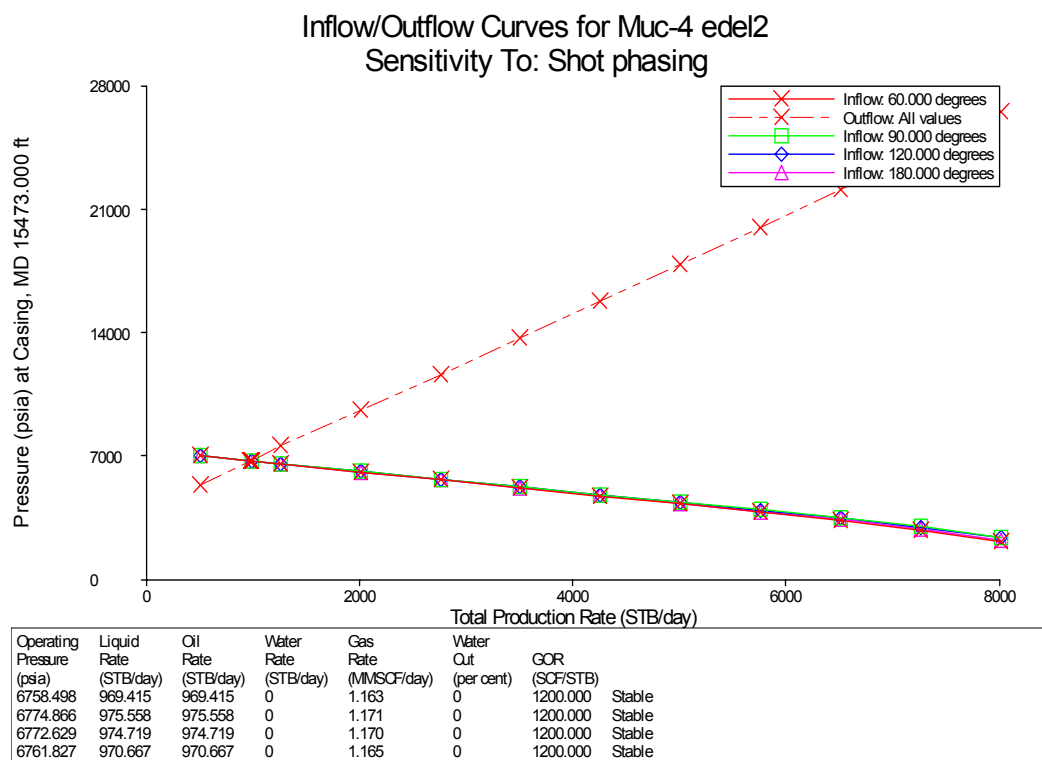


Figura 3.12 Puntos de operación en función de la fase de los disparos.[Autor]

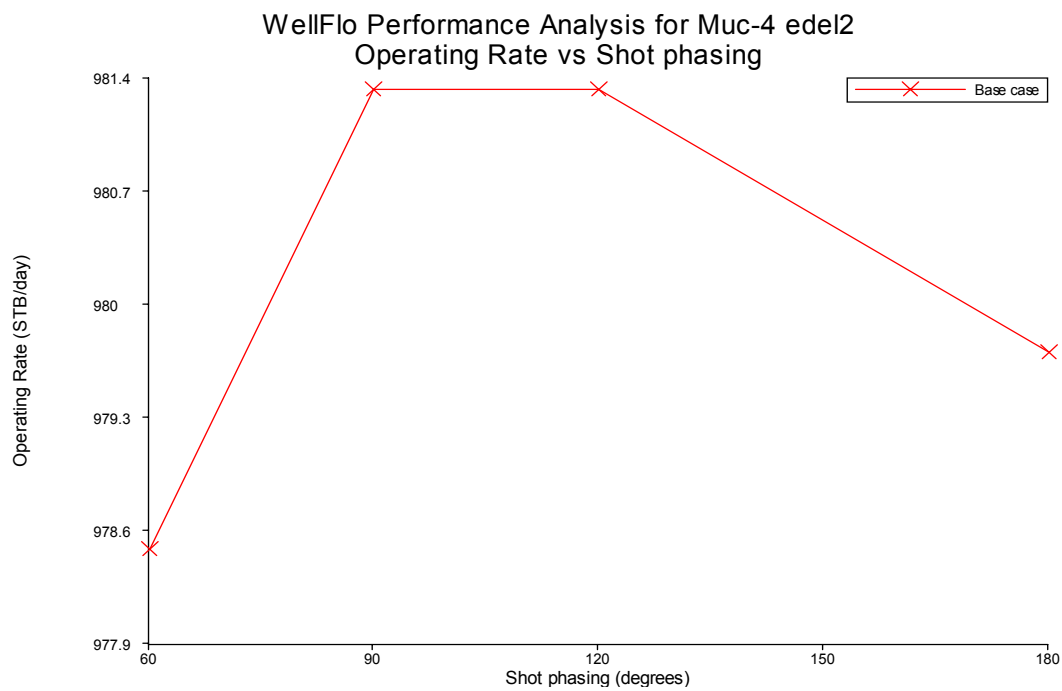


Figura 3.13 Productividad en función de la fase las cargas.[Autor]

Por último se tienen las Figuras 3.14 y 3.15 en función del diámetro de penetración, en estas se observa el mismo comportamiento que en la longitud de penetración de las cargas de cañoneo. Se perforó con 0,31 pulgadas, y se puede ver que al variar el diámetro la producción se puede ver seriamente afectada, por esto es importante tanto para el caso de la longitud de penetración como para el del diámetro de penetración conocer la geometría, por lo menos diámetro y longitud a las condiciones de fondo de pozo que se tengan.

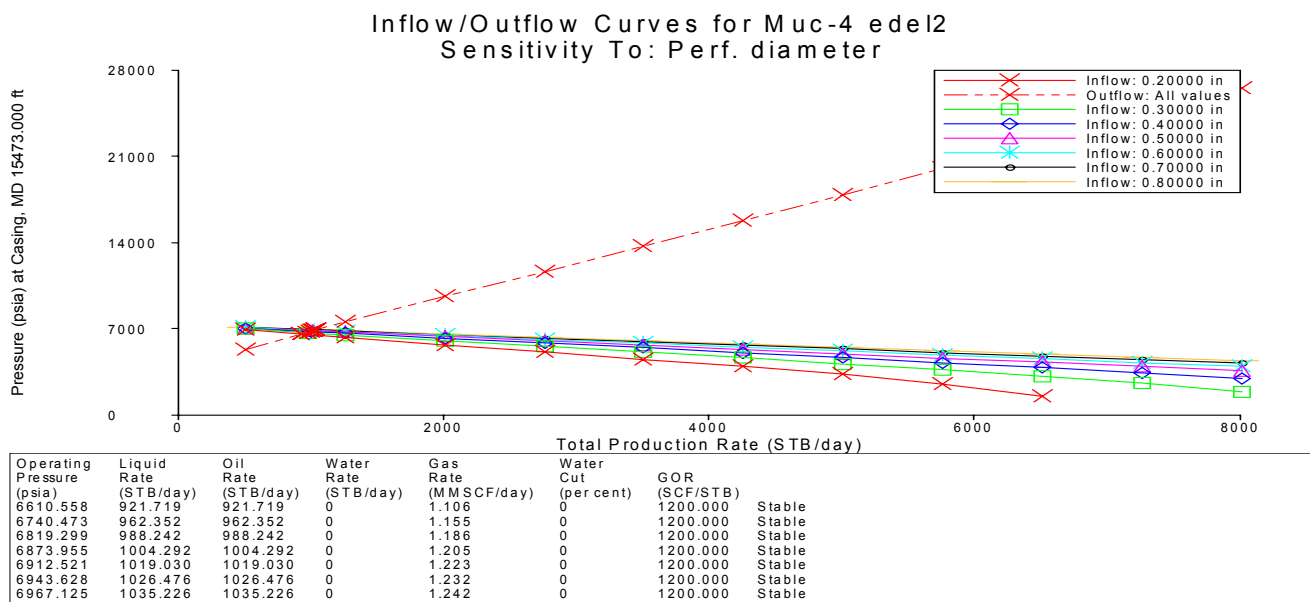


Figura 3.14 Puntos de operación en función del diámetro de penetración.[Autor]

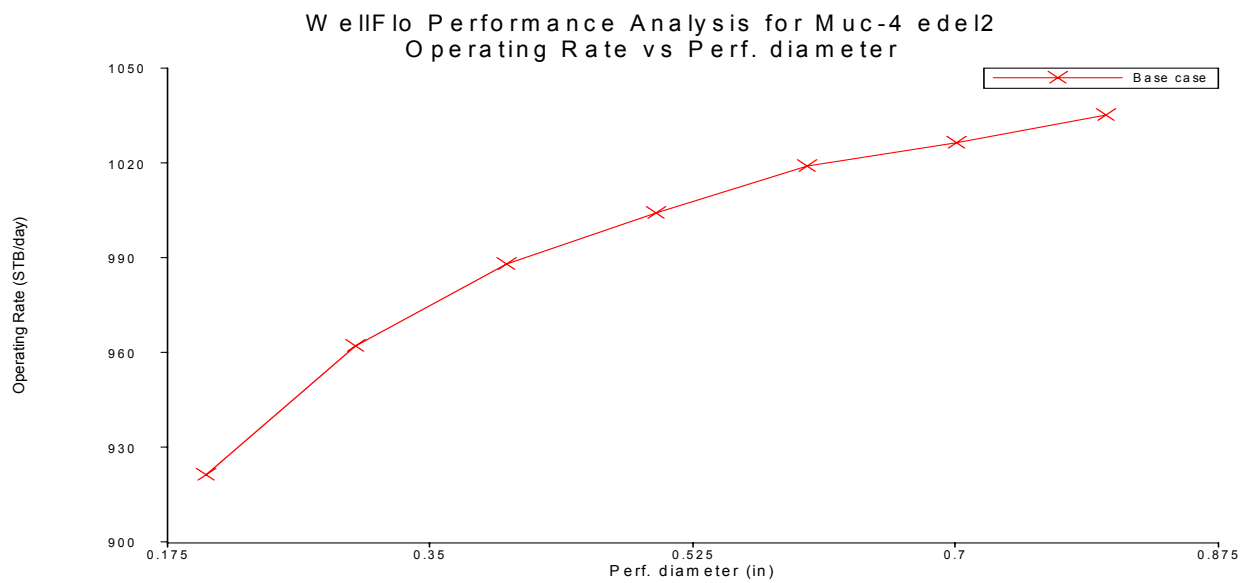


Figura 3.15 Producción en función del aumento del diámetro de penetración de las cargas.[Autor]

En la elaboración de las Figuras anteriores se sensibilizó la producción de los pozos y el índice de productividad en función de los parámetros que son característicos del cañoneo como son:

- Tiros por pie
- Longitud de penetración
- Diámetro de entrada de las cargas
- Fase entre los disparos

En función del estudio del comportamiento de la producción ante la variación de los parámetros de cañoneo que se realizó, y de la revisión bibliográfica se pudo determinar para los procesos de cañoneo una serie de reglas generales a seguir:

- Los parámetros de cañoneo tienen una mayor influencia en la producción de los pozos en función del incremento del daño total. [18]
- La fase entre los disparos ofrece mejores resultados cuando sus valores son mayores a 90° , pero para las condiciones del pozo pueden existir reducciones de productividad importantes por encima de los 120° . Es indispensable considerar las condiciones en las que producirá el pozo.
- La utilización de modelos o herramientas que permitan predecir el comportamiento al cañonear se hacen indispensables, aunque existen algunos valores mínimos preestablecidos, para algunas condiciones uno de los parámetros puede ser determinante.
- El incremento de la producción es directamente proporcional al incremento del diámetro y de la longitud de penetración de las cargas, pero se deben considerar los costos que esto implica. El mismo comportamiento se puede ver al incrementar el número de cargas por pie. [21]

- Uno de los objetivos principales en la construcción de pozos debe ser la producción del menor daño posible, puesto que el “skin” asociado incrementa los costos que se deben considerar para mejorar los parámetros de cañoneo.
- La obtención de la longitud adecuada de penetración es muy importante, porque para obtener penetraciones mayores la inversión es mucho mayor y, si los valores son menores, los resultados se pueden ver realmente afectados, con variaciones drásticas de la producción.

En función de los diferentes modelos estudiados en la revisión bibliográfica, se pudo determinar que uno de los factores que se tomaba menos en cuenta era el de la penetración. Los modelos toman en cuenta la penetración para evaluar el índice de productividad, una longitud y un diámetro de penetración que vienen dados por una prueba denominada API RP 43, pero estos datos no simulan las condiciones reales. El principal problema es que las pruebas se realizan en condiciones atmosféricas, cosa que es muy diferente a lo que sucede en la realidad. La prueba posee dos secciones una donde se obtiene la penetración y diámetro de entrada de las cargas en cemento y otra que se realiza en roca de yacimiento. Pero obtener los datos de esta última sección no es muy fácil porque los fabricantes consideran que su costo es muy alto. Por esto, las decisiones a la hora de utilizar una u otra carga se toman en función de estos datos y la industria sólo posee un modelo que toma en cuenta la dureza de la roca y algunas de las condiciones en el pozo para simular el comportamiento de las rocas.

3.3 Características de la prueba API RP43

La prueba API RP 43 fue desarrollada para proveer las bases para comparar el desempeño de diferentes cargas bajo condiciones controladas. Aunque algunos de los factores con los cuales se simulan las condiciones de cañoneo son tomados de manera parcial, en la industria se toman como las bases para la predicción del desempeño de las cargas sometidas a diferentes condiciones. A continuación se da una breve descripción de las dos primeras secciones de la prueba API.

3.3.1 API Sección 1- Evaluación de los sistemas de cañoneo en condiciones de superficie. Pruebas en concreto.

Como se muestra en la Figura 3.20 a continuación, las pruebas en la Sección 1 simulan la configuración de cañón y casing, dando las referencias para las configuraciones de cañoneo típicas. Los esfuerzos en la formación y la presión efectiva no son simulados. La prueba provee información de disparos de cañones utilizados a su máxima densidad a través de "casing" L-80, en concreto con esfuerzos controlados, realizando disparos bajo temperatura ambiente y presión atmosférica. Los cañones son posicionados de tal manera que tengan la misma configuración que tendrán en el pozo.

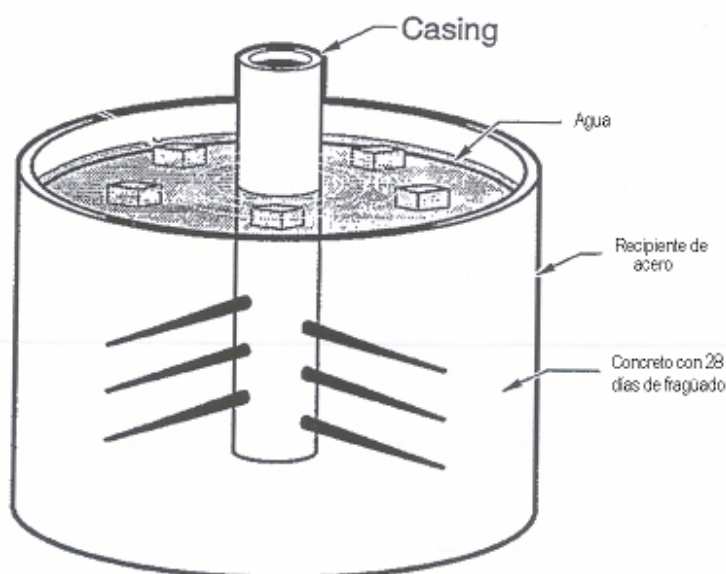


Figura 3.16 Geometría de la sección 1 de la prueba API RP 43.[23]

La resistencia a la compresión que posee el concreto es de 5000 psi mínimo, basado en pruebas en seco en el momento de las pruebas de disparo. Esta prueba es aquella que ofrece los resultados en cuanto a la predicción de penetración de cargas tomada en cuenta por

fabricantes y consumidores, para la selección del equipo a utilizar, y satisface los casos donde múltiples cargas disparadas a gran densidad puedan, en algunos casos, no alcanzar los valores de penetración mínimos que deberían lograr.

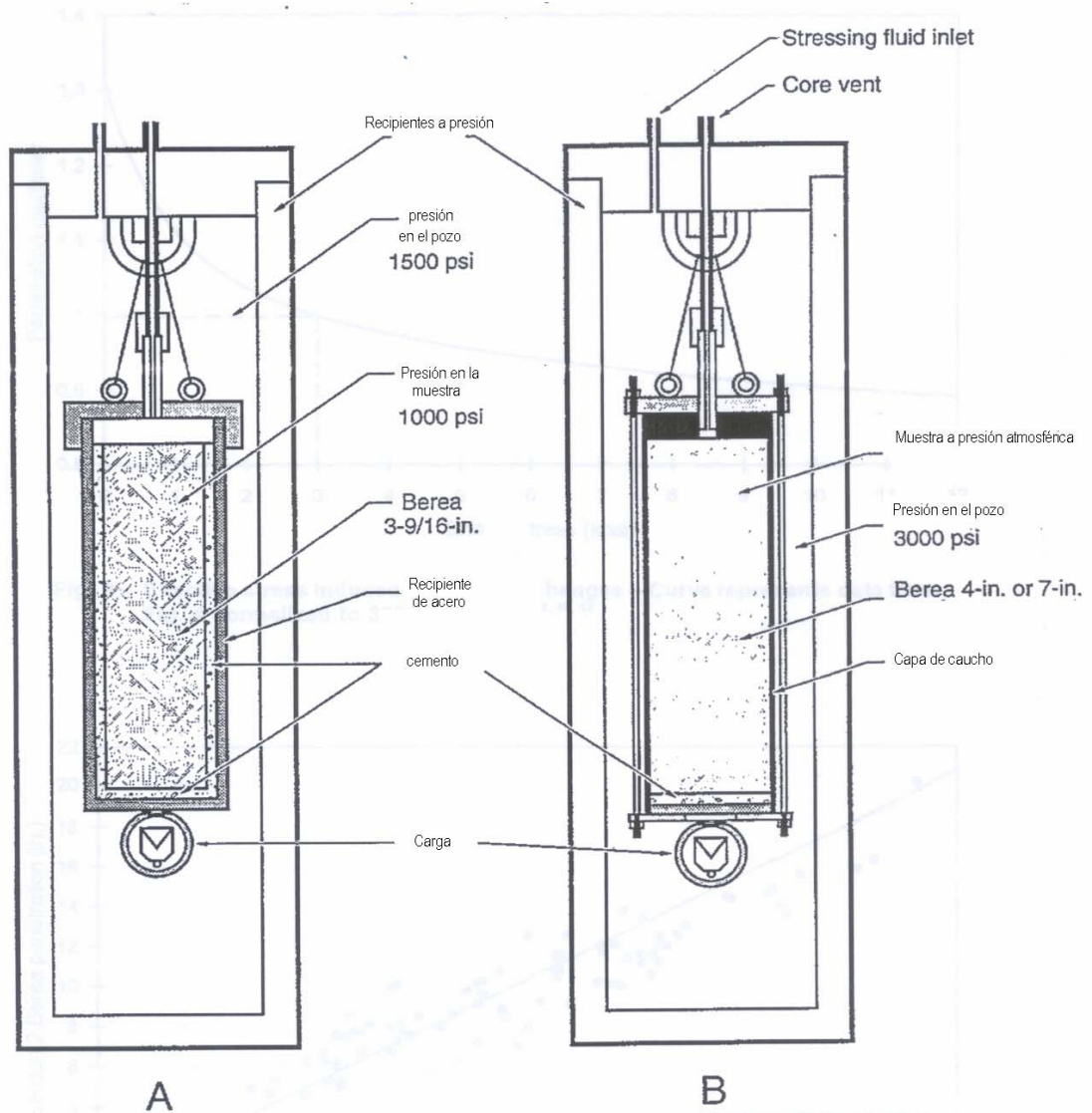
3.3.2. API Sección 2- Evaluación de disparos bajo condiciones de presión, pruebas en Berea.

Diseñada para simular penetración de cargas bajo condiciones de presión simuladas, la Sección 2, utiliza Berea (tipo de roca con propiedades bien caracterizadas). La prueba de cargas bajo condiciones de presión, fue diseñada para obtener las longitudes de penetración en las condiciones que se podrían tener en el pozo. Una presión efectiva de 3000 psi se seleccionó por el Comité API como el mejor valor para simular, tomando en cuenta el precio de las pruebas y la simulación a fondo de pozo.

Además de las dos secciones anteriores, la prueba API está compuesta por otras que toman en cuenta la variación de temperatura, el flujo en el pozo y otras condiciones, pero estas secciones no son llevadas a cabo por los fabricantes, a menos que se requieran para un tipo de carga muy específica. El análisis de los modelos, como el que se presentó anteriormente, da una idea de lo que se debía hacer para obtener mejoras de los resultados o para generar formas alternativas a las existentes para predecir la longitud de penetración en condiciones de pozo. Las condiciones utilizadas para la predicción están normalizadas para dos presiones características, que son la presión atmosférica en el caso de penetración en cemento y 3000 psi en el caso de penetración en roca, y el método de predicción comercial parte de la penetración en cemento y da un valor de penetración en roca. Por esto se decidió desarrollar una simulación del cañoneo de un pozo. Para llevar a cabo esta simulación es necesario obtener los datos de las pruebas API para los explosivos utilizados por PDVSA y una vez conseguidos los resultados para condiciones ambientales, realizar las diferentes pruebas variando las presiones. Como los datos existentes son en su mayoría de la sección 1 de la prueba API, se procederá a generar como primer simulador la penetración en cemento

para lograr en trabajos posteriores a éste, un simulador de cargas de cañoneo en diferentes condiciones de presión en roca de yacimiento.

Para la simulación se seleccionó el método de los elementos finitos por las facilidades gráficas que brindan los paquetes comerciales, para introducir la estructura o porción del pozo a cañonear y además el tipo de resultados que se puede obtener de este como deformación y esfuerzos, que se concentran en los materiales. En la próxima sección se describe el método de los elementos finitos y posteriormente se desarrolla el modelo.



A - Edition 4, 0 con esfuerzos aplicados
 B - Edition 5, 3000 psi de esfuerzos aplicados

Section 2 API RP 43 Test - Edition 4 versus Edition 5.

Figura 3.17 Geometría de la sección 2 de la prueba API RP 43. [23]

Capítulo 4

El método de los elementos finitos

Los objetivos de este trabajo llevaron a la selección del método de los elementos finitos para la generación del modelo, pero no es el interés de este trabajo el desarrollo del método para conseguir el acople entre éste y el medio a discretizar, si no la utilización de este método para la solución de un problema, por esto se realiza un breve desarrollo histórico, se introducen los conceptos básicos y se muestran las matrices a utilizar.

4.1 Desarrollo histórico

La idea de los elementos finitos viene desarrollándose como una simple estructura de análisis desde hace mucho tiempo. “en 1941 Hrenikoff introduce los denominados métodos de encuadre, donde un medio plano elástico fue presentado como un conjunto de barras y puntos. El uso de elementos finitos para definir funciones continuas en un subdominio para aproximar los valores de las funciones desconocidas viene de los trabajos de Courant (1943), quien desarrolló un arreglo de elementos triangulares y el principio del mínimo potencial de energía para el estudio del problema de torsión de St. Venant. Aunque algunas pistas del elemento finito pueden ser encontradas en los trabajos de Hrenikoff (1941) Y Courant (1943), la presentación formal del método de los elementos finitos es atribuida a Argyris y Kelsey (1960) y a Turner, Clough, Martin, y Topp (1956). Sin embargo, el término “ elemento finito” fue utilizado primero por Clough en 1960” [26]. A partir de esto el uso de los elementos finitos ha crecido de forma exponencial, a tal punto que bicicletas, materiales de uso doméstico, y por otra parte elementos de usos de alta complejidad son desarrollados mediante el uso del método de los Elementos Finitos.

4.2 Introducción al método

“Cualquier fenómeno en la naturaleza, sea biológico, geológico, o mecánico, puede ser descrito con la ayuda de las leyes de la física, en términos algebraicos o de ecuaciones diferenciales. Determinar la distribución de los esfuerzos en las formaciones de túneles extrañamente formados y con diversos espesores y sujetos a fuerzas mecánicas, térmicas, y/o aerodinámicas; conseguir la concentración de contaminantes en agua salada o en la atmósfera, y simular el clima en un intento de entender y predecir los mecanismos de la formación de tornados y de tormentas eléctricas, son algunos de los ejemplos de muchos de los problemas prácticos. Mientras que la derivación de las ecuaciones gobernantes es muy difícil, su solución mediante métodos de análisis exactos es una tarea complicada. En casos como estos, los métodos de aproximación proveen una alternativa para encontrar soluciones. Entre estos, el método de las diferencias finitas y los métodos variacionales tales como el de Ritz y Galerkin son los más utilizados en la literatura”. [26]

Según los requerimientos de este trabajo el medio estudiado se discretizará mediante el método de los elementos finitos. “Aunque el método de los elementos finitos es simple en concepto, tiene varias desventajas. La más notable es la inexactitud de las derivadas de las soluciones aproximadas, la dificultad de imponer condiciones de borde en límites no definidos, la dificultad de representar de forma adecuada dominios complejos, y la dificultad para emplear mallas no uniformes”. [26]

Pero todos los métodos de aproximación son como dice su nombre un acercamiento a la solución real que depende de parámetros como los mencionados anteriormente y de muchos otros, que se tienen que manejar de tal manera que puedan adaptarse a las necesidades del usuario.

“El método de los elementos finitos puede ser interpretado como una aplicación de los métodos variacionales, donde las funciones de aproximación son polinomios algebraicos y los parámetros indeterminados representan los valores de la solución en un número finito de puntos preseleccionados, llamados nodos, en los límites exterior e interior de los

elementos. Gracias a la teoría de interpolación se consigue que el grado de interpolación dependa del número de nodos en el elemento” [26]. En función de esto se desarrollará a continuación la estructura que sigue el método de los elementos finitos.

4.2 Desarrollo histórico

La idea de los elementos finitos viene desarrollándose como una simple estructura de análisis desde hace mucho tiempo. “en 1941 Hrenikoff introduce los denominados métodos de encuadre, donde un medio plano elástico fue presentado como un conjunto de barras y puntos. El uso de elementos finitos para definir funciones continuas en un subdominio para aproximar los valores de las funciones desconocidas viene de los trabajos de Courant (1943), quien desarrolló un arreglo de elementos triangulares y el principio del mínimo potencial de energía para el estudio del problema de torsión de St. Venant. Aunque algunas pistas del elemento finito pueden ser encontradas en los trabajos de Hrenikoff (1941) Y Courant (1943), la presentación formal del método de los elementos finitos es atribuida a Argyris y Kelsey (1960) y a Turner, Clough, Martin, y Topp (1956). Sin embargo, el término “ elemento finito” fue utilizado primero por Clough en 1960” [26]. A partir de esto el uso de los elementos finitos ha crecido de forma exponencial, a tal punto que bicicletas, materiales de uso doméstico, y por otra parte elementos de usos de alta complejidad son desarrollados mediante el uso del método de los Elementos Finitos.

4.3 Análisis tridimensional de tensiones

A continuación se procede a llevar a cabo un desarrollo en elementos finitos mediante el elemento tetraedro, que se considera el elemento más sencillo en el caso de tres dimensiones.

4.3.1 Características de los elementos tetraédricos

En la figura a continuación, “ se representa un elemento tetraédrico (i, j, m, p) en el espacio definido por las coordenadas x, y, z”. [29]

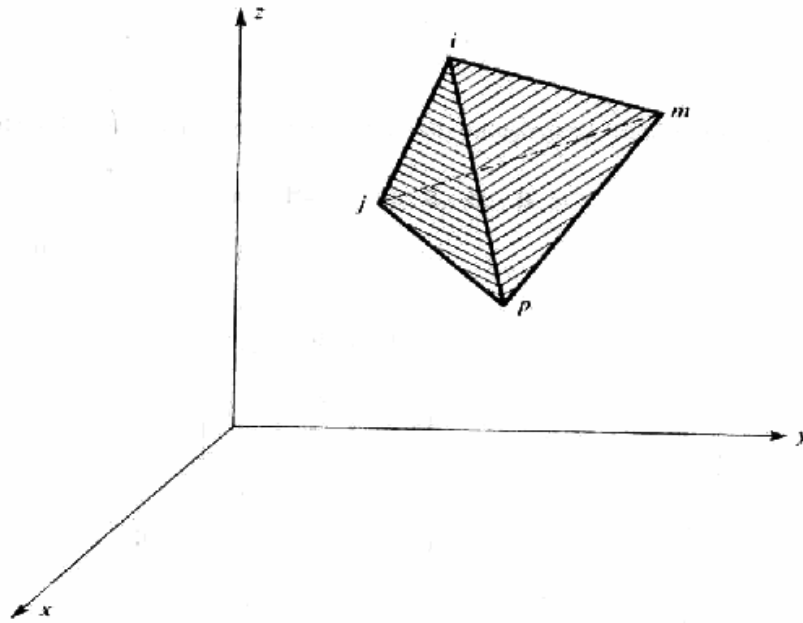


Imagen 4.1 Volumen tetraédrico. (Se debe utilizar siempre el mismo orden lógico para la numeración de los nodos). [29]

El desplazamiento de un punto queda definido por tres componentes u, v y w en las direcciones de los ejes cartesianos x, y, z. Por lo tanto

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}, \quad (4.1)$$

Los valores nodales definen la variación lineal de una cantidad. Se puede ver que en el caso de tensión plana

$$u = \{u(x, y, z); v(x, y, z), w(x, y, z)\}, \quad (4.2)$$

con esta expresión quedan definidos los movimientos de un punto en las tres direcciones correspondientes al espacio cartesiano. A su vez los desplazamientos de un nodo, en este caso el nodo i quedan expresados mediante

$$a^e = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}, \quad (4.3)$$

El conjunto de ecuaciones que definen el desplazamiento de un nodo y los movimientos de cualquier punto se utilizan para obtener los desplazamiento de un elemento por medio de la siguiente ecuación

$$u \cong \hat{u} = \sum N_i a_i^e = [N_i, N_j, \dots] \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \\ \dots \end{Bmatrix} = N a^e, \quad (4.4)$$

Donde N representan las funciones de forma que se tienen que seleccionar de tal manera que al sustituir en la ecuación anterior, se puedan obtener los desplazamientos en cada nodo, tomando en cuenta que cada nodo posee una función de forma. Para esto la función debe cumplir la condición donde será igual a uno cuando se evalúe en el nodo, e igual a cero si se evalúa en cualquier otro punto.

$$\begin{aligned} N_i(x_i, y_i, z_i) &= I && \text{(matriz identidad = 1)} \\ N_i(x_j, y_j, z_j) &= 0 && \text{(matriz nula =) para cualquier otra condición.} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Y serán de la siguiente forma :

$$N_i = (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) / 6V, \quad (4.6)$$

y se tiene que:

$$6V = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_p & y_p & z_p \end{vmatrix}, \quad (4.7)$$

$$a_i = \det \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_m & y_m & z_m \\ x_p & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad b_i = \det \begin{vmatrix} 1 & y_i & z_j \\ 1 & y_m & z_m \\ 1 & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad (4.8)$$

$$c_i = \det \begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_m & 1 & z_m \\ x_p & 1 & z_p \end{vmatrix} \quad d_i = \det \begin{vmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_m & y_m & 1 \\ x_p & y_p & 1 \end{vmatrix}$$

Una vez conocidas los desplazamientos referentes a los puntos de un elemento, se pueden determinar las deformaciones en función de los desplazamientos. De forma matricial se obtiene que:

$$\varepsilon = Su, \quad (4.9)$$

donde S es el operador lineal tal que

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = Su, \quad (4.10)$$

Empleando las relaciones de desplazamiento, se comprueba que

$$\varepsilon = Ba^e = [B_i, B_j, B_m, B_p]a^e, \quad (4.11)$$

En donde

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N'_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N'_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N'_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N'_i}{\partial y} & \frac{\partial N'_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N'_i}{\partial z} & \frac{\partial N'_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N'_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N'_i}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

y se conoce como la matriz de deformación-desplazamiento del elemento, para un nodo i .

Una vez establecidas las deformaciones de los elementos, las tensiones se pueden relacionar con las deformaciones mediante la ley de Hooke.

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0, \quad (4.13)$$

Los valores de σ_0 y ε_0 indican los esfuerzos residuales y las deformaciones iniciales del elemento. D es la matriz de elasticidad y σ es el vector de tensiones con sus proyecciones en los planos y los esfuerzos cortantes respectivos.

$$\sigma = \{ \sigma_x; \sigma_y; \sigma_z; \tau_{xy}; \tau_{yz}; \tau_{xz} \}, \quad (4.14)$$

y se obtiene la matriz D para un medio isotópico en función de las propiedades de los materiales

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} * \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & \nu/(1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & \nu/(1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ & & & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 \\ & & & & & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

simétrica

4.3.2 Análisis de Elasticidad Lineal

Al suponer el caso de elasticidad lineal se obtiene la relación característica

$$k^n a^n = f_p^n + f_{\varepsilon_0}^n + f_v^n + q_n, \quad (4.16)$$

donde

f_p^n = fuerzas nodales producto de las cargas distribuidas que actúen sobre los lados del elemento.

f_v^n = fuerzas nodales debidas a las cargas volumétricas.

$f_{\varepsilon 0}^n$ = fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier deformación inicial.

q_n = forma matricial de las fuerzas que actúan sobre los nodos de un elemento.

Y para el caso plano:

$$K^n = \iint B^t D B d(\text{area}), \quad (4.17)$$

en donde K^n representa las fuerzas inducidas por los desplazamientos de cada uno de los nodos o matriz de rigidez del elemento, D es la matriz de elasticidad del material, B es la matriz de deformación del elemento y B^t es la matriz B transpuesta.

La matriz K^n será siempre cuadrada y de la siguiente forma:

$$K^n = \begin{vmatrix} k_{ii}^n & K_{ij}^n \dots & k_{im}^n \\ k_{mi}^n & \dots \dots & k_{mm}^n \end{vmatrix}, \quad (4.18)$$

Después de definir esto, es posible dar las tensiones o reacciones internas de cualquier punto en función de los desplazamientos de los nodos, mediante la matriz σ^n :

$$\sigma^n = S^n a^n + \sigma_p^n + \sigma_{\varepsilon 0}^n, \quad (4.19)$$

en donde

$\sigma_p^n, \sigma_{\varepsilon_0}^n$ = tensiones originadas por las cargas distribuidas que actúan sobre el elemento o por las tensiones iniciales al restringir el desplazamiento de los nodos.

S^n = matriz de tensiones del elemento.

4.3.3 Matrices de rigidez, de tensión y de cargas

Las componentes de deformación y de tensión son constantes dentro de cada elemento. Por eso se pueden integrar explícitamente para obtener la estructura de las matrices de rigidez, de tensión y de cargas.

La submatrices ij de la matriz de rigidez será una matriz 3x3 definida así:

$$K_{ij}^e = B_i^t D B_j V^e, \quad (4.20)$$

Donde V^e representa el volumen del tetraedro elemental. Las fuerzas nodales debidas a las deformaciones iniciales se convierten, en

$$f_i^e = -B_i^t D \varepsilon_0 V^e, \quad (4.21)$$

Siendo una expresión similar las fuerzas debidas a las tensiones.

4.3.4 Generalización al dominio completo. Abandono del concepto de fuerza nodal

El interés de aplicar métodos como el de los elementos finitos es en muchos casos obtener los resultados en el continuo completo, partiendo de una idea en donde se considera cada elemento por separado. Esto representa una idea conceptualmente difícil, pero necesaria, en el desarrollo total del método.

Se puede tomar en cuenta que la expresión de desplazamiento expresada anteriormente se puede interpretar como válida para toda la estructura.

$$u = \bar{N}a, \quad (4.22)$$

en donde se representan a todos los puntos nodales mediante a , y

$$\bar{N}_i = N_{ii}^e, \quad (4.23)$$

siendo el punto considerado, un punto dentro del elemento en particular e i un punto asociado a ese elemento.

$$\bar{N}_{i=0}, \quad (4.24)$$

La matriz \bar{B} se puede definir de la misma forma suponiendo que las funciones de forma están definidas en todo el volumen.

Ahora se puede escribir para cualquier desplazamiento virtual δa la suma del trabajo interno y externo para todo el dominio es de la forma

$$\delta a^t r = -\int_V \delta u^t b dV - \int_A \delta u^t t dA + \int_V \delta \epsilon^T \sigma dV, \quad (4.25)$$

Sustituyendo por las ecuaciones anteriores de desplazamiento y de deformación correspondientes se obtiene que:

$$Ka + f = r, \quad (4.26)$$

Para llegar a esta expresión se debe considerar que, para que una estructura tenga una solución completa se deben satisfacer las siguientes condiciones:

- a.) Compatibilidad de los desplazamientos
- b.) Equilibrio.

Sea el siguiente sistema de desplazamiento nodal:

$$a = \left\{ \begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{array} \right\}, \quad (4.27)$$

considerando esta expresión para toda la estructura incluidos todos los elementos de ésta, se satisface de manera automática la primera condición planteada.

Una vez obtenida la primera condición, se deben establecer las condiciones de equilibrio de los nodos de la estructura. Para esto, consideraremos la estructura sometida a un sistema de fuerzas externas r aplicadas en los nodos tal que:

$$r = \left\{ \begin{array}{c} r_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_n \end{array} \right\}, \quad (4.28)$$

además de las cargas distribuidas que estén aplicadas a cada elemento.

Al establecer el equilibrio en un nodo i cualquiera, cada componente de r_i tiene que ser igual a la suma de las fuerzas que aportan los elementos que se reúnen en ese nodo. De esta manera :

$$r_i = \sum_{e=1}^m q_i^e = q_i^1 + q_i^2 + \dots, \quad (4.29)$$

donde:

q_i^1 = fuerza que el elemento 1 aporta al nodo i .

q_i^2 = fuerza que el elemento 2 aporta al elemento 2 . Así para todos los elementos que contengan al nodo i .

Conocido que para cada nodo:

$$q_{i1} = \left[\sum_{e=1}^m K_{i1}^e \right] a_1, \quad (4.30)$$

y para la expresión general se tiene que:

$$r_i = \left(\sum_{e=1}^m k_{i1}^e \right) a_1 + \left(\sum_{e=1}^m k_{i2}^e \right) a_2 + \dots + \sum_{e=1}^m f_i^e, \quad (4.31)$$

donde

$$f^e = f_p^e + f_{\varepsilon 0}^e, \quad (4.32)$$

La sumatoria solamente afecta a los elementos que contengan al nodo i , reuniendo las ecuaciones, se obtienen que:

$$Ka + r = f, \quad (4.33)$$

Y las sumatrices son:

$$K_{ij} = \sum K_{ij}^e \quad f_i = \sum f_i^e, \quad (4.34)$$

Entonces como ya se obtuvo la expresión (4.22), se conoce que el sistema de ecuaciones dado está compuesto por:

$$K = \int_V B^T DB dV, \quad (4.35)$$

$$f = -\int_V N^t b dV - \int_A N^t \bar{t} dA + \int_V B^T D \epsilon_0 dV + \int_V B^T \sigma_0 dV, \quad (4.36)$$

De esta manera se extienden las integraciones en todo el volumen V y en toda la superficie a donde se encuentran las fuerzas de superficie. En virtud de las propiedades de las integrales definidas, que establece que la integral total es la suma de las integrales de las partes, se ve de esta manera que para que la aproximación tenga las propiedades del sistema discreto, simplemente se tienen que escribir la aproximación en forma integral.

4.3.5 Criterios de Convergencia

La utilización de funciones de forma en el método de los elementos finitos reduce los grados de libertad de sistema y en algunos casos esto podría dificultar que se obtenga el valor mínimo de la energía que actúa sobre el sistema. Para evitar este tipo de comportamiento y asegurar una convergencia del sistema existen criterios de convergencia que se presentan a continuación.

Criterio #1: las funciones de desplazamiento de los elementos deben ser tales que no permitan deformaciones de los elementos cuando se esté en presencia de un desplazamiento de conjunto como un cuerpo rígido.

Criterio #2: las funciones de desplazamiento deben garantizar que al existir desplazamientos nodales con un estado de deformación, se obtenga ese estado de deformación constante.

NOTA: Ambos criterios necesitan ser satisfechos en el límite cuando el tamaño del elemento tiende a cero. (Bazeley et al. 1965).

Criterio #3: Se deben seleccionar las funciones de desplazamiento de tal forma que las deformaciones que se producen en los límites de las separaciones entre los elementos sean finitas.[29]

Capítulo 5

Propiedades de los Materiales

5.1 Propiedades de las Rocas

Las propiedades que se presentan en esta sección incluyen porosidad, compresión isotérmica, y saturación de fluido. Aunque la permeabilidad es una propiedad de la matriz de la roca generalmente se toma como un factor determinante en el cálculo del comportamiento de los fluidos.

5.1.2 Porosidad

“La porosidad del medio viene dada por el símbolo ϕ y se define como la relación de espacio vacío, volúmenes de poros, del volumen total de la roca. La relación se expresa tanto en fracción como en porcentaje. Cuando se utiliza un valor de porosidad en una ecuación generalmente se utiliza en forma de fracción. El término hidrocarburo poroso se refiere a la parte del medio que contiene hidrocarburo y se le asigna un valor igual a la cantidad total de poros multiplicada por la fracción de poros que contiene hidrocarburo.

El valor de la porosidad generalmente se da como una porosidad efectiva, dependiendo del tipo de medición llevada a cabo. La porosidad total representa la cantidad de espacios libres en el medio. La porosidad efectiva la cantidad de espacios que contribuyen al flujo. Este es el tipo de porosidad que generalmente se mide en los laboratorios y se utiliza en el cálculo de flujo de fluido”. [7]

5.1.3 Compresibilidad Isotérmica

“La compresibilidad isotérmica para una sustancia viene dada por la siguiente ecuación

$$c = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp}, \quad (5.1)$$

donde,

c=compresibilidad isotérmica

v=volumen

p=presión

La ecuación describe los cambios en volumen que sufre una sustancia durante los cambios de presión, mientras la temperatura es mantenida constante. Las unidades son unidades de presión recíprocas. Cuando la presión interna de fluidos que están dentro de los espacios de las rocas, sujetas a constantes variaciones externas de presión, se reduce, el volumen del bulto rocoso decrece, mientras el volumen de material sólido rocoso incrementa. Estos dos elementos actúan para reducir la porosidad de la roca de manera pequeña, en el orden de 0.5% por cada 1000 psi de cambio en la presión interna del fluido (Ej. A 20% la porosidad será del 19,19 %). [7]

“Aunque la compresibilidad de las rocas influye ligeramente, sus efectos pueden ser importantes en algunos cálculos en el yacimiento u otras fuentes que contengan fluidos con rangos de compresibilidad entre 3 y 25e-6 psi⁻¹.” [7]

5.1.4 Saturación de Fluidos

“La relación entre el volumen que ocupa un fluido y el volumen poroso es llamada saturación de un fluido. El símbolo para la saturación de hidrocarburos es S_o , donde S se refiere a la saturación y la o a oil, por la denominación en inglés de hidrocarburo. La

saturación es expresada tanto en fracción como en porcentaje, pero es usada como fracción en las ecuaciones.

Existen dos maneras de medir la saturación original de los fluidos: la directa y la indirecta. La directa trata de la extracción de los fluidos de yacimiento. La indirecta de medir otras propiedades, como la presión de capilaridad, y la derivación de las relaciones matemáticas entre las relaciones de las propiedades medidas y la saturación.” [7]

La idea de esta sección es presentar las condiciones mínimas en las que se encuentran las rocas alrededor del pozo, pero se debe tomar en cuenta que el desarrollo del modelo a continuación se realiza para el concreto especial de pozo, que se convierten un material presentando propiedades que pueden ser tratadas desde el punto de vista de la mecánica de materiales, sin tener que desarrollar sobre los datos específicos de composición, que aunque serán mencionados, no serán estudiados a profundidad.

5.2 Propiedades mecánicas de los materiales

A continuación se realiza una pequeña descripción de los materiales con los que se hace el desarrollo del modelo.

5.2.1 Leyes constitutivas de los materiales

El estudio de las propiedades de los materiales se realiza en función de la deformación que estos sufren al ser sometidos a un esfuerzo. Esto no implica que cualquier material de cualquier forma pueda ser caracterizado al aplicarle una fuerza. Para esto es necesario tomar en cuenta que las fuerzas aplicadas actuarán de forma diferente dependiendo del área que tenga la sección estudiada. Por esto los estudios de esfuerzo de deformación se realizan en probetas normalizadas, de donde se pueden obtener valores que realmente tengan sentido físico, e indiquen como se comportará el material.

“En la mecánica de los sólidos es de primordial importancia el comportamiento de materiales reales en condiciones de carga. Los experimentos, principalmente ensayos a

tensión y a compresión, proporcionan la información básica acerca de este comportamiento. En ellos, el comportamiento en conjunto, o macroscópico de especímenes se utiliza para formular las leyes empíricas o fenomenológicas. Tales formulaciones se denominan leyes constitutivas o relaciones constitutivas. Los libros de ciencias de materiales intentan proporcionar las razones del comportamiento observado.” [25]

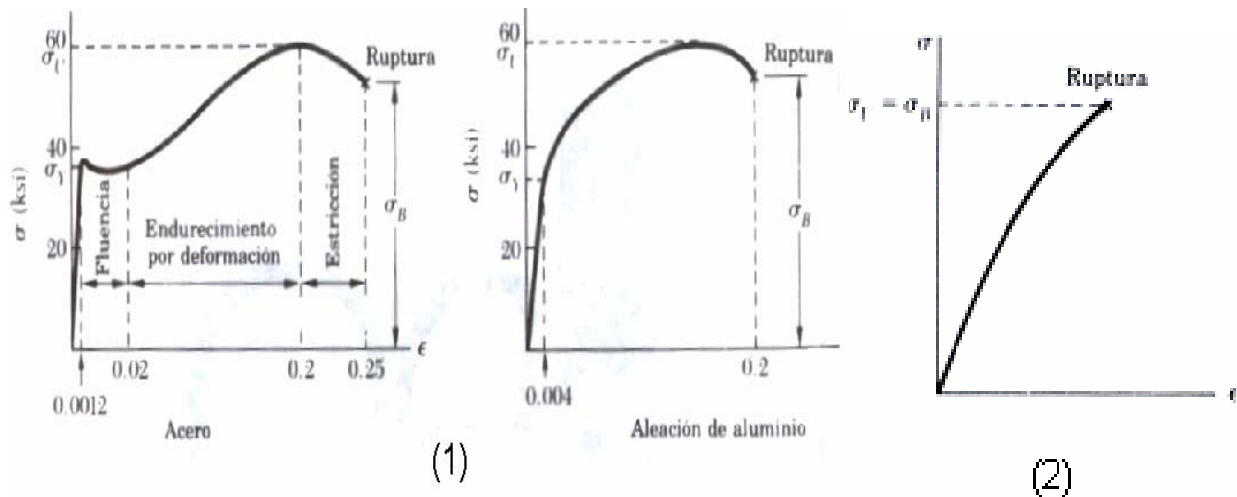


Figura 5.1 Diagramas esfuerzo deformación para diferentes materiales.(1) Materiales dúctiles.(2) Material frágil.[25]

Tomando en cuenta esto cada material posee su curva de deformación versus esfuerzos, donde el último punto de la curva se conoce como el punto de falla total, donde el material no se deforma más, y se rompe. En la Figura 5.1 se presenta las curvas para la mayoría de los materiales caracterizados.

Las leyes constitutivas dan una explicación al comportamiento de los materiales sometidos a esfuerzos, una interpretación de las curvas que se muestran anteriormente. En el caso que se trata en este trabajo se utiliza un material frágil (cemento) que posee una curva con una pendiente constante o casi constante en toda su longitud, hasta llegar al punto de ruptura donde existe un pequeño declive, insignificante para mucho de los casos. “ Una ecuación conveniente capaz de representar un amplio intervalo de gráficas esfuerzo deformación ha sido desarrollado por Ramberg y Osgood. Tal ecuación es

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n, \quad (5.2)$$

donde ε_0 , σ_0 y n son constantes características para un material. Las constantes ε_0 , σ_0 corresponden al punto de fluencia, que para todos los otros casos diferentes al de plasticidad ideal se halla por el método de desplazamiento. El exponente n determina la forma de la curva.”

El método de los desplazamientos se ilustra en la Figura 5.2, se utiliza para determinar el punto de fluencia en materiales que no tienen este punto bien definido, una recta desplazada a una distancia correspondiente al 2% de la deformación total de la prueba se dibuja de forma paralela a la parte rectilínea inicial de la curva esfuerzo deformación.

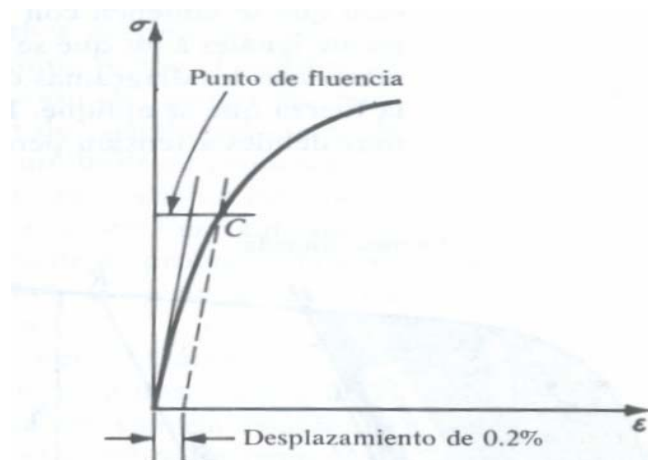


Figura 5.2. Método de los desplazamientos.[25]

Para el caso que se tratará a continuación se utilizará la relación que indica que el esfuerzo σ es directamente proporcional a la deformación ε y se puede escribir como:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (5.3)$$

“Esta relación es la Ley de Hooke, llamada así en honor del matemático inglés Robert Hooke (1635-1703). Como la deformación ϵ no tiene dimensiones, el modulo E se expresa en las mismas unidades del esfuerzo σ , o sea, en pascales o uno de sus múltiplos en el sistema SI, y en psi o ksi si se usa el sistema americano”. [4]

5.2.2 Teoría de la elasticidad lineal

La teoría de elasticidad lineal, permite establecer relaciones entre las fuerzas aplicadas y las deformaciones sufridas por el material. Según la teoría de elasticidad lineal, los materiales se deforman mientras se les ejerce un esfuerzo, pero mientras ese esfuerzo no supere los límites de elasticidad el material regresa a su estado original cuando se deja de aplicar el esfuerzo. Pero una vez que el esfuerzo supera los límites elásticos, se produce una deformación plástica permanente en el material que culmina con la falla del material.

Este rango ofrece sus virtudes sobre el rango plástico y a su vez sus contradicciones, puesto que en la mayoría de los casos en la naturaleza se producen deformaciones permanentes de los materiales, y no deformaciones que pueden regresar a su estado inicial. Para las siguientes definiciones se debe tomar en cuenta una muestra cilíndrica para definir las variaciones que esta sufrirá al aplicarle una carga.

Relación de Poisson(ν): considerando la muestra anteriormente expuesta, y un esfuerzo (σ_x) aplicado, se produce un incremento del diámetro, y una elongación lateral (ϵ_y). La relación de Poisson será entonces la relación entre la extensión lateral (ϵ_y) y la contracción longitudinal (ϵ_x). Esta será

$$\nu = -\epsilon_y / \epsilon_x \quad (5.4)$$

Módulo de Young(E): relación existente entre el esfuerzo axial (σ_x) y la deformación (ϵ_x) a lo largo de la muestra cilíndrica anteriormente descrita, al aplicar una fuerza sobre la

superficie de los extremos de la muestra. Si se está en presencia de un comportamiento lineal entre las dos magnitudes σ_x y ϵ_x se puede expresar mediante la Ley de Hooke.

$$\sigma_x = E * \epsilon_x \quad (5.5)$$

5.3 Análisis de Esfuerzos

Una vez planteadas las características de los tipos de materiales que se van a utilizar en el desarrollo del modelo y de tener una idea del comportamiento de estos, en cuanto a su respuesta al estar expuestos a una carga, se procederá a dar un breve análisis de los esfuerzos que se generan en un sólido, tomando esto como el caso tridimensional de esfuerzos.

“ En el análisis de esfuerzos la geometría es dada y además, en la mayoría de los casos, sus condiciones de borde. El análisis de esfuerzos se lleva a cabo para determinar la cantidad de esfuerzos en cada punto. En el caso general de análisis de esfuerzos en un cuerpo, requiere determinar el estado de cada punto, obteniendo las seis magnitudes desconocidas que son el valor de los tres esfuerzos normales en cada plano y el valor de los esfuerzos cortantes resultantes.” [11]

En el sólido que vemos a continuación se obtienen los estados resultantes de esfuerzos para un cuerpo de geometría arbitraria.

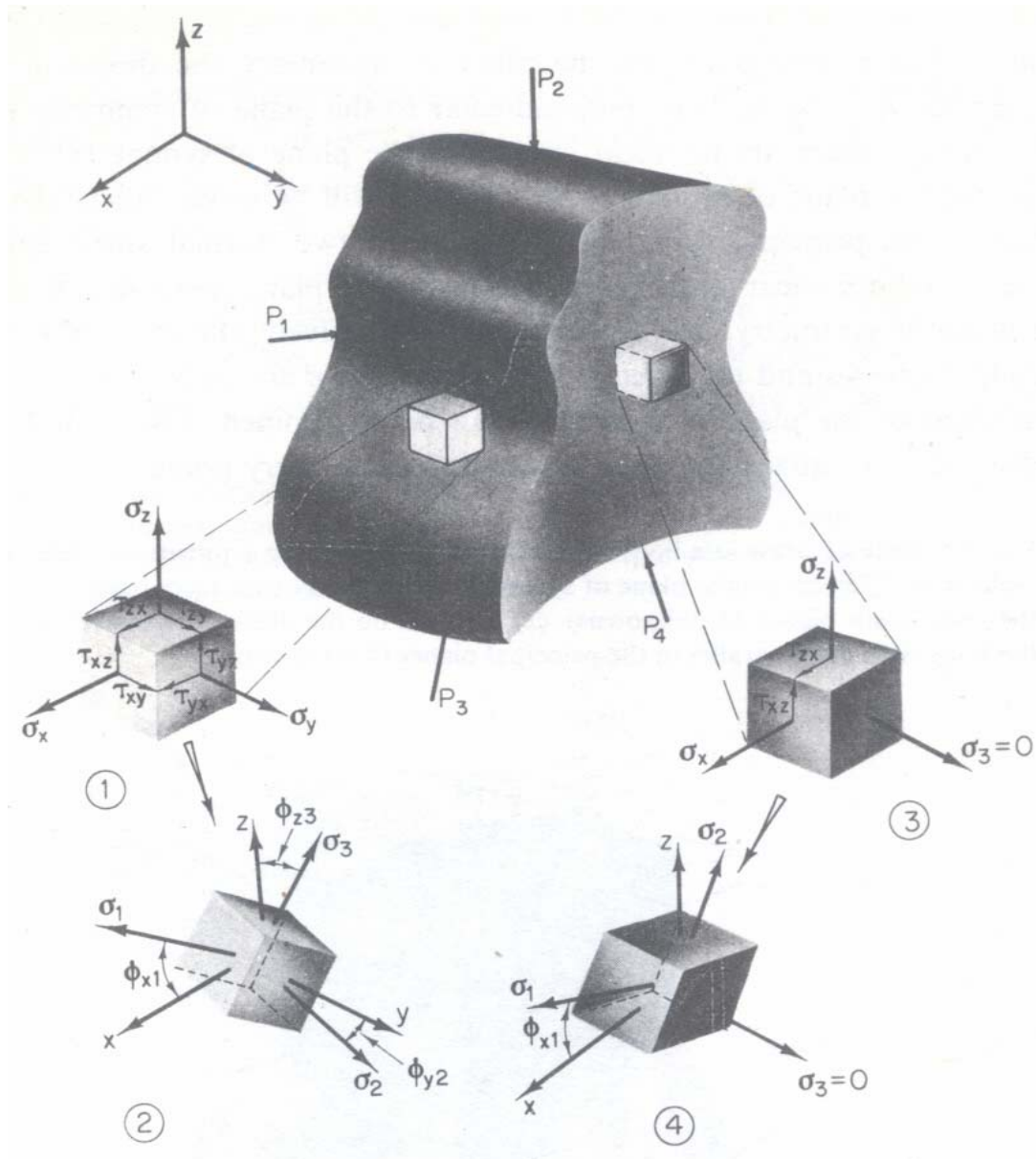


Figura 5.3. Estado de esfuerzos de un sólido de forma arbitraria. (1) Elemento arbitrario en el cuerpo con las caras paralelas a los planos de coordenadas. (6 incógnitas). (2) Elemento en el cuerpo con caras paralelas a los planos principales (6 incógnitas). (3) Elemento en la superficie del cuerpo con caras paralelas a los ejes de coordenadas, σ_3 perpendicular a la superficie. (4) Elemento en la superficie del cuerpo con caras paralelas a los planos principales (3 incógnitas). [11]

5.4 Criterio de Falla

“Este criterio, sugerido por el ingeniero alemán Otto Mohr, puede usarse para predecir el efecto de un estado dado de esfuerzo plano en un material frágil, cuando los resultados de varios tipos de pruebas están disponibles para el material.

Primero supóngase que se han realizado una prueba de tensión y una de compresión en un material dado y que se han determinado los valores σ_{ut} y σ_{uc} de los esfuerzos últimos a la tensión y a compresión para dicho material. El estado de esfuerzos correspondiente a la rotura de la muestra a tensión puede representarse en un diagrama de círculo de Mohr por el círculo que interseca el eje horizontal en 0 y σ_{ut} (véase la figura a continuación).

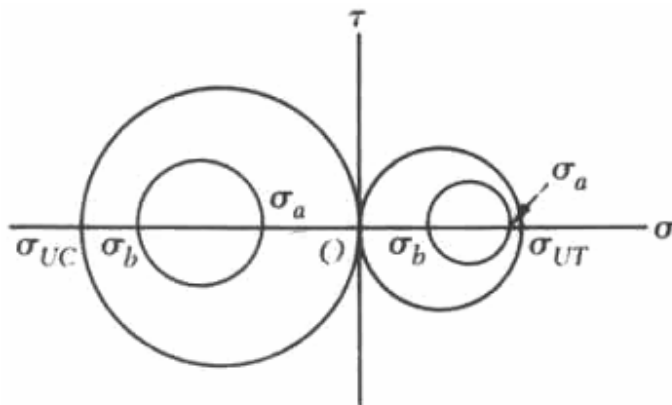


Figura 5.3 Círculo de Mohr para esfuerzos con el mismo signo. Cada uno de los círculos de menor tamaño compuestos por σ_a y σ_b a la derecha y a la izquierda, muestran el estado de esfuerzos en el cual se encuentra un punto. El círculo a la izquierda para dos valores de esfuerzos negativos y el de la izquierda para dos valores positivos.[4]

Análogamente, el estado de esfuerzos correspondiente a la falla de la probeta por compresión puede representarse por el círculo que corta al eje horizontal en σ_{uc} y σ_{ut} . Es claro que en un estado de esfuerzo representado por un círculo enteramente contenido en

cualquiera de estos dos círculos será seguro. Así, si los dos esfuerzos principales son positivos, el estado de esfuerzos es seguro mientras $\sigma_a < \sigma_{ut}$ y $\sigma_b < \sigma_{ut}$; si ambos esfuerzos principales son negativos, el estado de esfuerzos es seguro siempre que $|\sigma_a| < |\sigma_{uc}|$ y $|\sigma_b| < |\sigma_{uc}|$. Dibujando el punto de coordenadas σ_a y σ_b (véase la figura 5.6) se verifica que el estado de esfuerzos es seguro mientras el punto caiga dentro de una de las áreas cuadradas mostradas en esa figura.

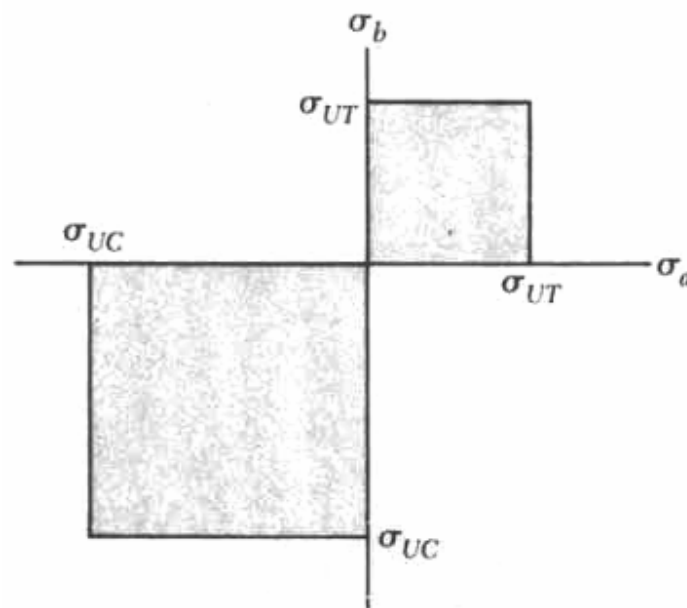


Figura 5.4 Áreas que indican que el punto no falla.[4]

Para analizar los casos cuando σ_a y σ_b tienen signos opuestos, se supondrá que se ha realizado una prueba de torsión en el material y que se ha determinado su resistencia última a cortante, τ_u . Dibujando el círculo centrado en o, que representa el estado de esfuerzos correspondiente a la falla de la probeta de la prueba de torsión (véase la figura 5.7), se observa que cualquier estado de esfuerzos representado por un círculo contenido en ese círculo, es también seguro. El Criterio de Mohr, es una extensión lógica de esta observación: de acuerdo con el criterio de Mohr, un estado de esfuerzos es seguro si está representado por un círculo localizado enteramente dentro del área limitada por la envolvente de los círculos correspondientes a los datos disponibles. Las porciones restantes del diagrama de esfuerzos principales pueden obtenerse dibujando varios círculos tangentes

a esta envolvente, determinando los valores correspondientes de σ_a y σ_b , trazando los puntos de coordenadas σ_a y σ_b (véase la figura a continuación).

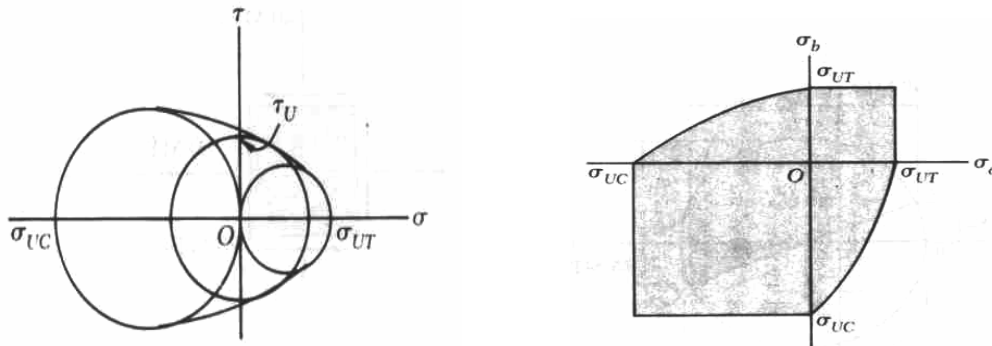


Figura 5.5 Círculo de Mohr y áreas donde un punto no falla, sometido a esfuerzos de signos diferentes.[4]

Algunos diagramas más exactos se pueden dibujar cuando hay disponibilidad de resultados de pruebas adicionales, correspondientes a varios estados de esfuerzo. Si, por otra parte, los únicos datos disponibles son las resistencias últimas σ_{uc} y σ_{ut} , la envolvente de la Figura 5.8 se reemplaza por las tangentes AB y $A'B'$ a los círculos correspondientes, respectivamente, a falla a tensión y falla a compresión. En los triángulos semejantes dibujados en esa figura, se observa que la abscisa del centro C de un círculo tangente a AB y a $A'B'$ está relacionada linealmente con su radio R . Como $\sigma_a = R - OC$ y $\sigma_b = OC - R$, se sigue que σ_a y σ_b están también linealmente relacionados. Así, el área sombreada correspondiente a este criterio simplificado de Mohr está limitada por las líneas rectas en el segundo y cuarto cuadrantes".[4]

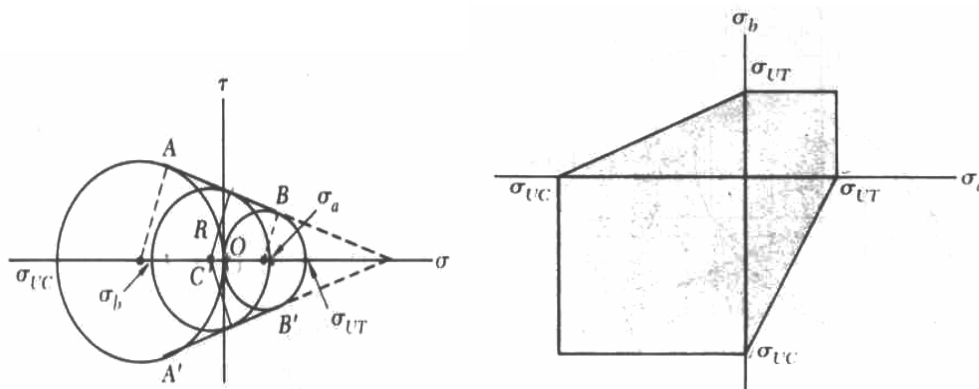


Figura 5.6 Círculo de Mohr y áreas donde un punto no falla en los casos en donde sólo se conocen los valores de falla a la compresión y a la tensión.[4]

Capítulo 6

Desarrollo del modelo

6.1 Bases del modelo

Una vez analizadas las características de la prueba API RP 43, y determinados los factores limitantes que este ensayo tiene, se procedió a verificar que modelos existían y cuales eran utilizados en la industria para la predicción de cargas de penetración. En esta búsqueda se determinó que sólo existía un modelo gráfico, contra el cual se compara el simulador desarrollado en este trabajo. Este modelo, que se denominará 27424 para efectos de este trabajo, posee diversas características desfavorables, primero es un modelo que consta de una serie de gráficas interconectadas con las cuales se llega al valor de la penetración de la carga dependiendo de las condiciones de la presión y otros factores que se desarrollaran más adelante cuando se comparan en los modelos. Al ser un método gráfico sus resultados siempre vienen acompañados de errores de magnitud importante. Además de esto es un sistema que no puede sufrir modificaciones, la relación que se creó no puede determinar la variación de longitud de penetración al enfrentarse a otros factores como son esfuerzos en la roca o presencia de fluidos de diferentes características.

Por esto se decidió trabajar en un simulador de penetración de cargas bajo el método de los elementos finitos, aunque esto representa un problema difícil de simular porque el proceso de cañoneo consiste en una carga dinámica que se aplica por instantes de tiempo, y la respuesta de la roca no es la misma, al someterse a una carga estática aplicada o a un impacto; a continuación se genera un primer modelo que simula las condiciones del pozo de forma estática para incrementar sus capacidades en próximos desarrollos y obtener un simulador completo en el futuro. En función de esto se hicieron las siguientes consideraciones:

- Carga estática aplicada
- Estudio bajo Elasticidad Lineal
- Simulaciones a fondo de pozo bajo diferentes presiones aplicadas en el modelo
- Medición de la penetración mediante una teoría de falla
- Se realiza la suposición de que existe penetración de la carga en todo aquellos puntos donde el criterio de falla a la compresión, determina que existe falla.
- Penetración de la carga exclusivamente en "casing" y cemento.
- Se tomará en cuenta como factor principal medido, la penetración y no la forma de esta.
- Restricciones estáticas en función del tipo de desplazamiento resultante al someter a la estructura a una carga
- Calibración del modelo mediante las pruebas API RP 43 para su posterior evaluación a diferentes condiciones.

El modelo desarrollado puede obtener resultados de penetración y con esto se puede evaluar la productividad de pozos. Es posible realizar comparaciones iniciales de en que medida se puede utilizar; pero una evaluación más profunda de su comportamiento y su comparación con pozos productores podrían indicar en que factores se puede mejorar el modelo, pero para esto es necesario un trabajo más extenso, posterior a la creación del modelo.

6.2 Herramienta utilizada

Para el desarrollo del modelo se utilizó el programa Gid, que es un pre y post procesador de elementos finitos que permite crear con facilidad complejas geometrías, además de las opciones de importar geometrías de otras fuentes. Este programa genera mallas sobre las geometrías, y una vez finalizado el análisis, se pueden visualizar los resultados de diferentes formas. Una de las capacidades interesantes de este programa es que permite incorporar en función de su pre y postprocesador, a cualquier procesador dependiendo de las necesidades del usuario y lo hace de manera sencilla. Gid es una herramienta que ofrece

facilidades de mallado, en donde se pueden modificar el tamaño y las estructuras a mallar con sólo seleccionar las estructuras. Este programa malla en triángulos, cuadriláteros tetraedros y hexaedros, pero los procesadores en función de las conectividades y del tipo de resultados que ofrecen preestablecen el tipo de elemento con el que deben trabajar.

En este caso se utiliza uno de los procesadores que viene con el programa denominado RAM Series que es un entorno de análisis estructural y de cálculo de sólidos tridimensionales basado en el método de los elementos finitos, se utiliza el tipo de problema denominado RAM Solid porque este es el que permita el desarrollo y análisis de sólidos. Además Ram Series ofrece múltiples técnicas de visualización de resultados que se adaptan a la correcta interpretación del modelo en estudio. Una de las limitantes de esta herramienta es que el procesador para el caso de sólidos sólo permite la utilización de tetraedros para la creación de la malla. Estos dos programas son de fácil manejo y cumplen con las necesidades que posee el caso en estudio.

6.3 Desarrollo del modelo

Para llevar a cabo el modelo se simuló una porción de pozo en función de los datos obtenidos de los proyectiles más utilizados en PDVSA, los resultados de sus pruebas API que se puede ver en el apéndice e información dada por expertos. En el análisis en elementos finitos se utiliza un programa que, al generar una estructura y sus condiciones de borde así como sus cargas externas, da los resultados de sus esfuerzos en los diferentes planos, sus deformaciones y otros.

En función de esto se creó una pared de "casing" así como una porción de cemento de longitud mucho mayor a la longitud de la penetración para que las limitantes de movimiento no crearan esfuerzos mayores a los de compresión generados por la carga aplicada. Esta configuración es casi igual a la de la prueba API de las cargas de 4 5/8 de pulgada seleccionadas, su diferencia radica en que la prueba consiste en un cañón completamente cargado que realiza varios disparos, dependiendo de la fase y el tipo de

carga. El modelo plantea una sola carga con la fase que la prueba toma en cuenta, pero no se simula la interacción con las otras cargas.

Para determinar la penetración no se puede visualizar una deformación en la estructura, pero se pueden ver los diferentes esfuerzos que afectan esta porción del pozo. Con el valor de estos esfuerzos y con la ayuda de una teoría de falla, el modelo supone que la penetración de la carga llega hasta aquellos puntos donde los valores de sus esfuerzos combinados sean mayores que el valor del esfuerzo último a la compresión del cemento, tomando en cuenta que los valores en el “casing” son de magnitudes muy altas, que el “casing” posee un espesor muy pequeño y que evidentemente existe penetración en esa zona.

Para comparar los resultados obtenidos se utilizará el modelo de predicción a fondo de pozo que utilizan los fabricantes (modelo 27424), y bajo estos parámetros se podrá dar una primera aproximación de cuan útil es el modelo. La capacidad que brinda un modelo numérico es la de obtener diferentes estructuras para cada carga a utilizar y además conseguir expresiones analíticas que simplifiquen la evaluación de una carga, punto este que no se desarrolla en el primer modelo.

6.3.1 Estructura geométrica.

Primero se debe escoger una carga para simular las condiciones de la prueba API de la manera más precisa que se pueda. Para este caso se trabaja con una carga de 4-5/8 de pulgada con fase de 120 grados entre cada carga. Además se sabe que se utiliza un "casing" de 7 pulgadas con un peso de 32 lb/pie, estos datos fueron obtenidos de la información dada por expertos de PDVSA. Gracias a estos, se pueda obtener una tabla del fabricante donde se especifican las características de la prueba que se desarrollo, en el apéndice se puede ver la tabla A-5 con la información. Una vez especificados los puntos a tomar en cuenta, se reproduce en el programa de elementos finitos una porción que simula las condiciones del pozo, es decir, se trabaja una sola penetración, tomando en cuenta el espesor del “casing” y

120 grados de una circunferencia formada de cemento. A continuación se puede ver la geometría que se desarrolló:

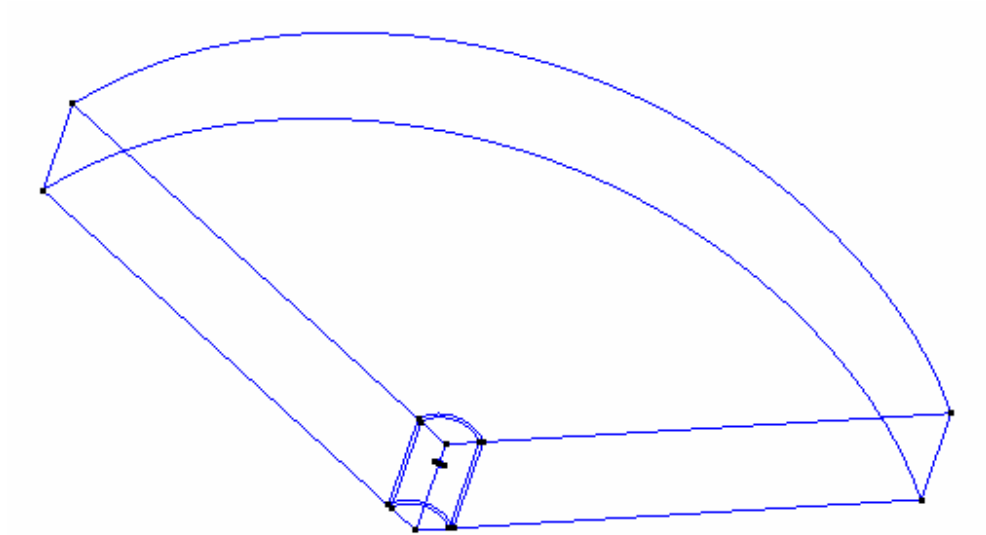


Figura 6.1. Geometría de trabajo. [Autor]

El programa utilizado Gid, posee un protocolo de generación de estructuras, es decir, el primer paso es desarrollar la geometría en el plano con la ayuda de puntos y de rectas, y posteriormente se desarrolla el sólido en tres dimensiones, pero a partir de la geometría en el plano.

Una vez concluido el dibujo, se generan los planos que se muestran en las Figuras 6.2 y 6.3 a continuación con color rozado, los planos definen el tipo de sólido que se va a desarrollar, así que se debe prestar mucho cuidado en que planos se van a tomar en cuenta y cuales no. En este caso se eliminan los planos que pertenecen a la parte interna del pozo porque en esta zona no se desea obtener un sólido.

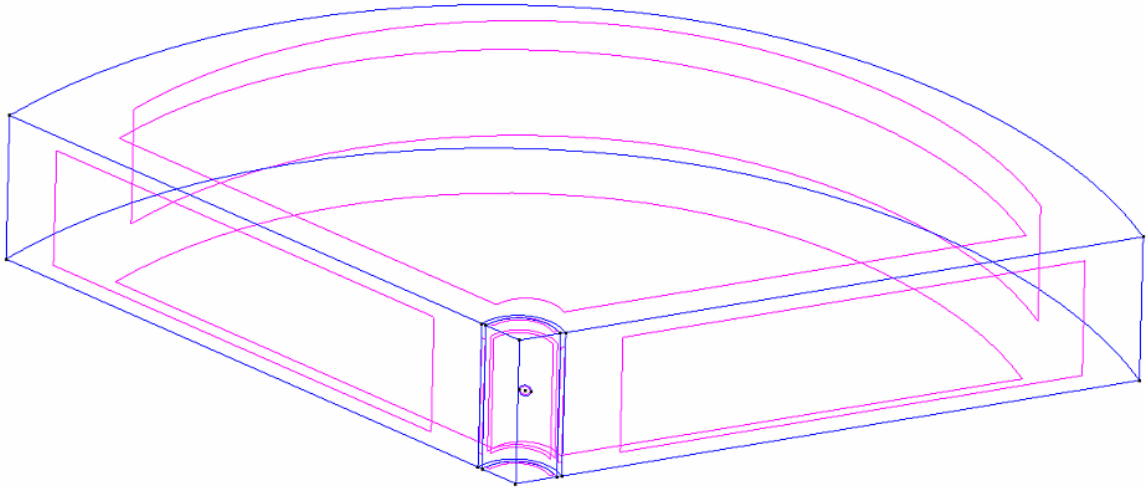


Figura 6.2 Ubicación de los planos en toda la geometría. [Autor]

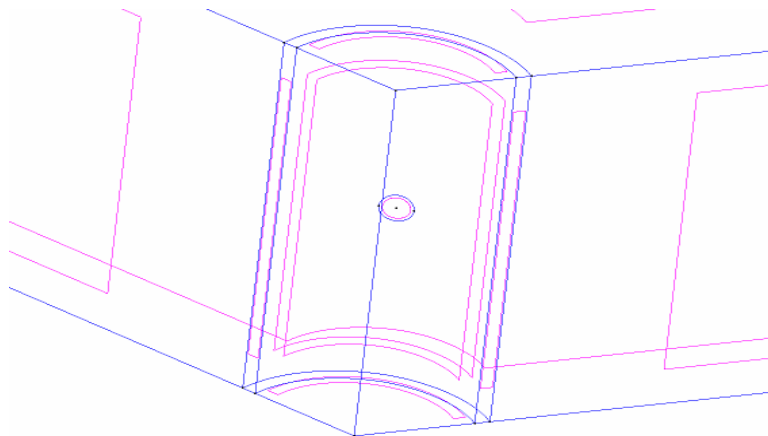


Figura 6.3 Ubicación de los planos en la sección del casing. [Autor]

Cuando se tienen todos los planos, se procede a desarrollar el sólido, o los sólidos que serán mallados, se puede ver en las figuras 6.4 y 6.5, que se creó un plano en la pared del “casing” de dimensiones iguales al diámetro de penetración que indica la prueba API, éste será el plano sobre el cual se ubicará la carga producida en la pared del “casing”.

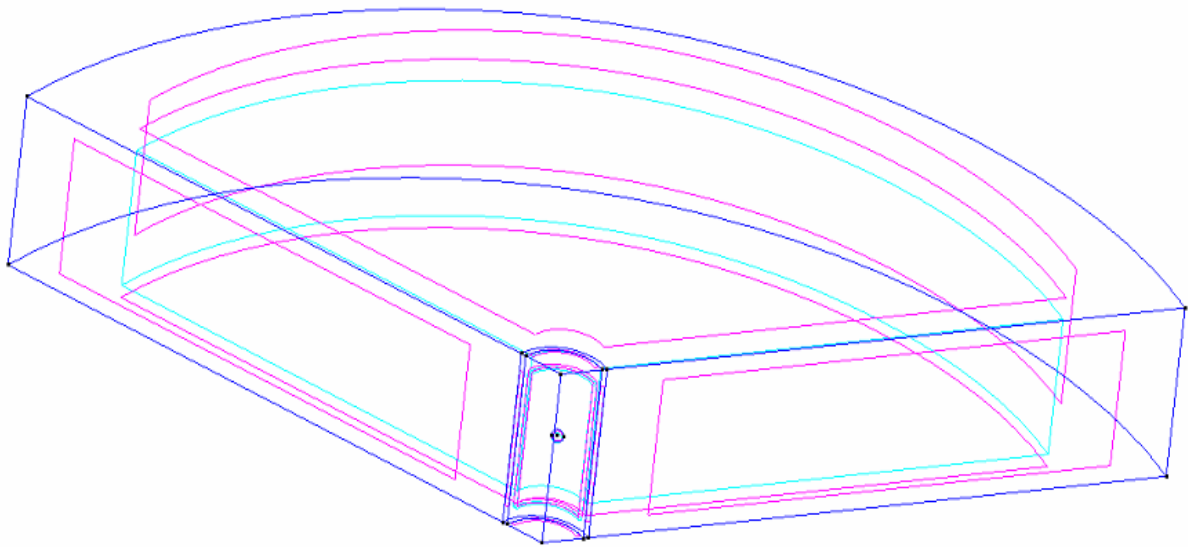


Figura 6.4 Ubicación de los volúmenes en la geometría. [Autor]

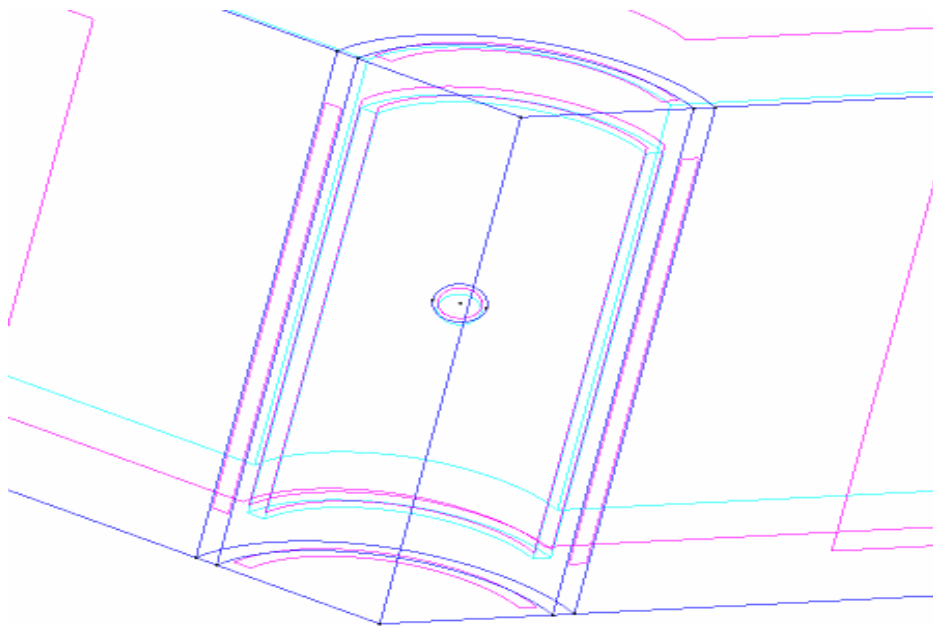


Figura 6.5 Ubicación de los volúmenes en las paredes del casing. [Autor]

En el plano circular ubicado en la pared del “casing”, se crea un volumen y en las paredes del “casing” también, podría parecer que se están considerando muchos planos, pero se debe realizar una intercepción entre los planos de las paredes del “casing” y el plano donde

se ubica la fuerza aplicada, para poder indicar la dirección que tiene esta fuerza de manera correcta. Al obtener la configuración final de la geometría, incluyendo planos y sólidos, se asignan las limitantes de movimiento en función de las características de la prueba y del comportamiento que tiene la formación al ocurrir el cañoneo.

6.3.2 Limitantes de Movimiento

Una vez determinada la geometría a utilizar, se asignaron los apoyos necesarios para conseguir que los esfuerzos se desarrollaran en la misma dirección con la que se aplica la presión que simula la carga. Estos se asignaron tomando en cuenta que los apoyos tendrían que simular las limitaciones de movimiento que se imponen tanto en la prueba, como en cañoneos a fondo de pozo.

En esta parte se pueden fijar las limitaciones de movimiento, pero para conseguir que los esfuerzos se desarrollaran en la dirección que se quería, fue necesario aplicar diferentes presiones simulando la configuración de cañoneo y trabajando en los apoyos hasta conseguir los resultados que se querían. La herramienta utilizada permite que las limitantes sean sobre punto, rectas o líneas dependiendo de las necesidades del usuario. En este caso el interés era limitar el movimiento general del sólido de tal manera que las deformaciones y esfuerzos fuesen sólo en la dirección del eje X.

Como se puede ver en la figura 6.6 se realizaron limitaciones de movimiento en cuanto al desplazamiento total de la geometría, como la resistencia que ofrece el “casing”, al ceder solamente en la sección donde impacta la carga.

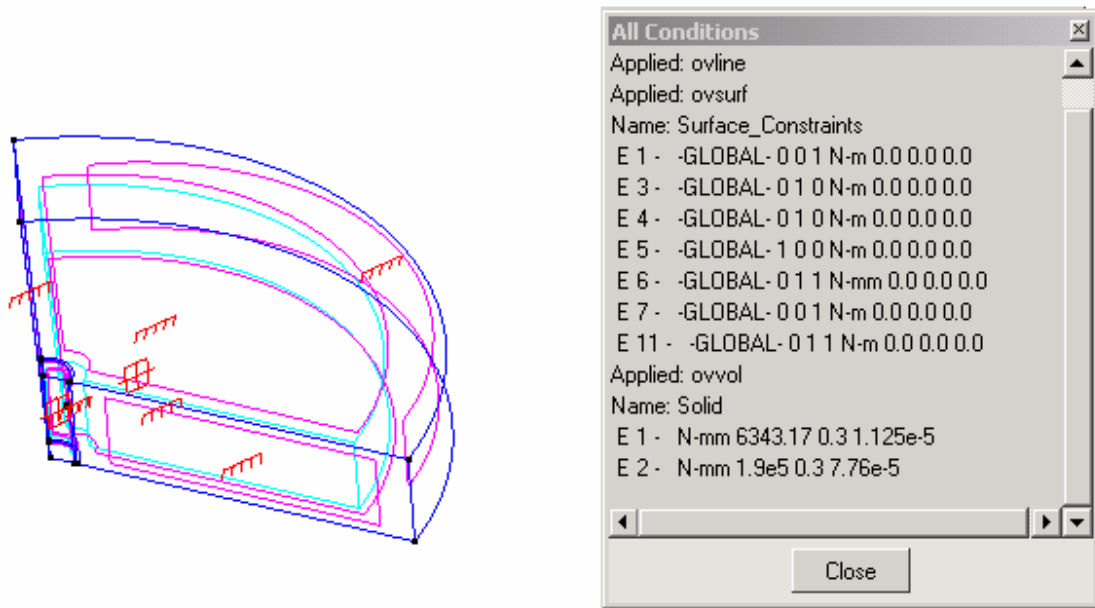


Figura 6.6 Se ilustran las limitaciones de movimiento impuestas al sólido.[Autor]

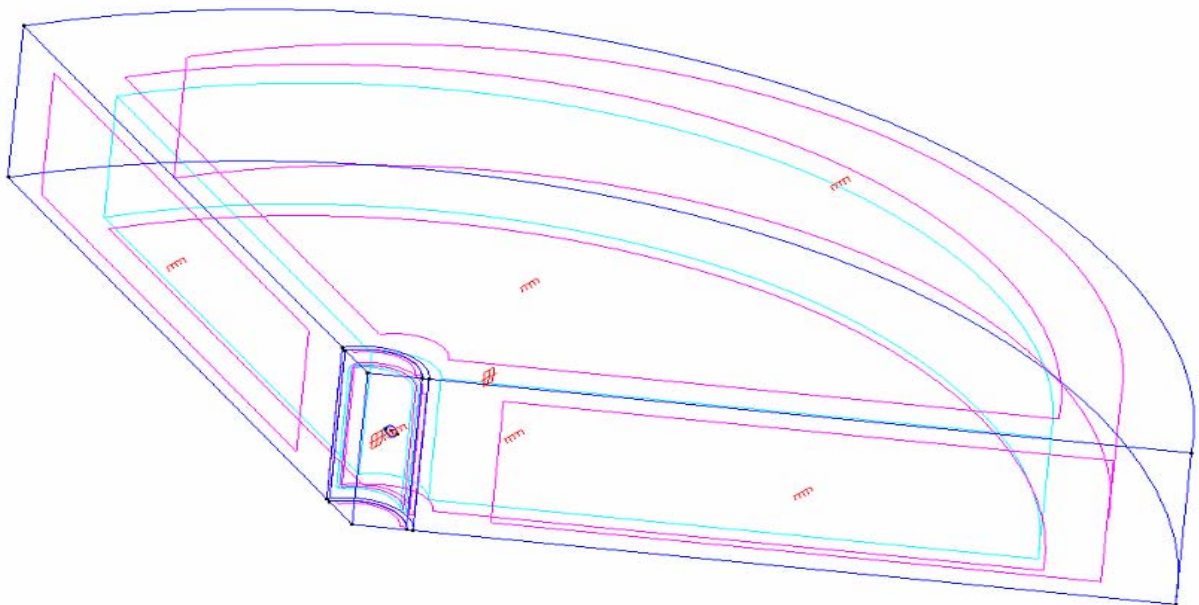


Figura 6.7 Limitaciones de movimiento en la estructura y diferentes materiales considerados en la geometría.[Autor]

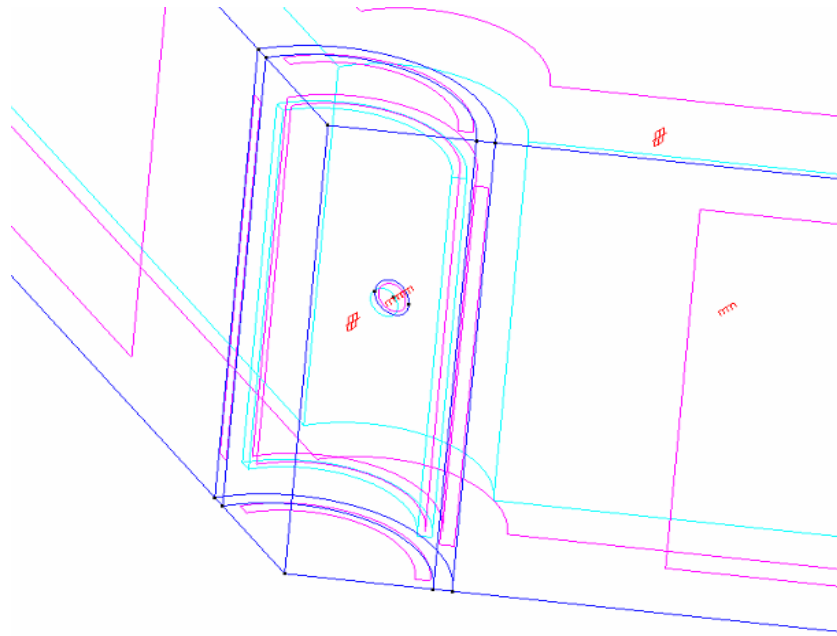


Figura 6.8 Limitaciones de movimiento y materiales en el casing.[Autor]

En la Figura 6.9 a continuación, además de ver cómo queda la configuración se puede ver el cuadro de limitaciones de movimiento que ofrece el programa Gid. En la gráfica se puede ver cómo son las limitaciones de cada uno de los planos, el cuadro ubicado a la derecha indica un color para cada restricción y posteriormente tres números separados, estos pueden ser uno, para los casos donde existe limitación de movimiento y cero para cuando no existe, e indican en que dirección está la restricción, el primer dígito será la restricción en la dirección X, el segundo en la dirección Y y el tercero en la dirección Z. La configuración de los ángulos de coordenadas puede apreciarse en la gráfica de las cargas aplicadas.

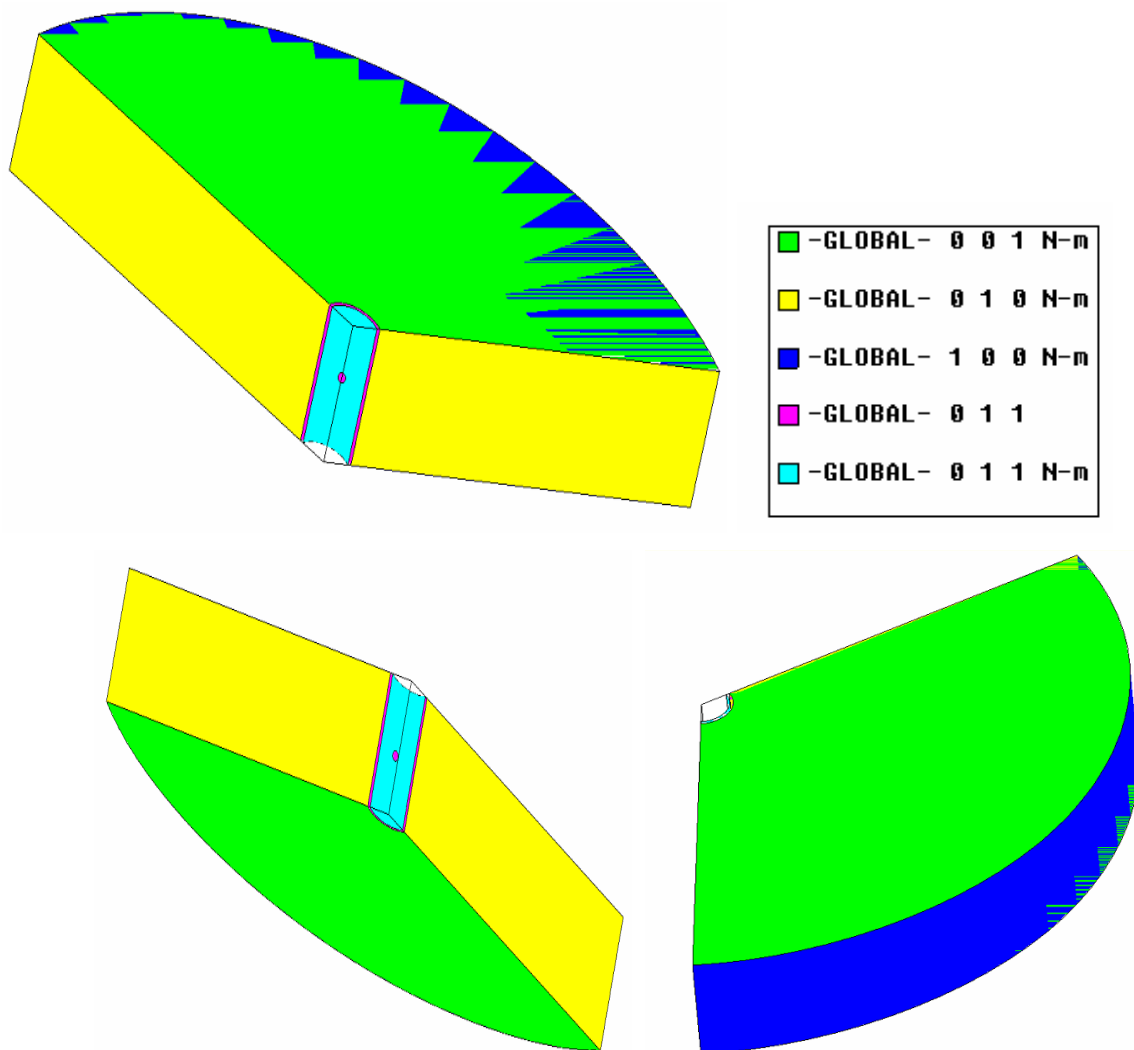


Figura 6.9 Limitaciones de movimiento por colores, el color indica la dirección y que plano está limitado.[Autor]

Muchas de las restricciones fueron creadas una vez aplicadas las cargas para que el comportamiento fuese lo más parecido a la prueba API, pero las restricciones en los planos de la pared del “casing”, que sólo permiten desplazamiento en el eje X y en la pared trasera, donde el desplazamiento no se permite en el eje X, son las limitaciones que tiene la carga al penetrar en el “casing” y penetrar en la formación.

Las limitaciones en la pared del “casing” se ilustran como si todo el plano estuviese restringido, pero realmente sólo se restringe el movimiento a la zona entre el plano circular

y el resto de la porción de “casing” dibujada. Además de esto se pueden ver pequeños cuadros en la geometría de color rojo, en estos se indica que se está asignando un material a esa sección. En este caso los materiales se obtuvieron de bibliografía referente a propiedades del “casing” y propiedades del acero. En el cuadro de la figura 6.6 ubicado a la derecha de la Figura, se ve en la parte inferior las propiedades de los materiales, el primer término indica el módulo de elasticidad del material en Mpa, el segundo el coeficiente de poisson adimensional y el tercer término el peso específico en N/mm^3 , para obtener información sobre estos materiales se pueden consultar las referencias [2] y [4].

6.3.3 Cargas Aplicadas

Al determinar los apoyos sólo queda colocar las presiones que se ejercen sobre la geometría diseñada, en las condiciones en las que se realiza el ensayo. Tomando en cuenta esto, se tenían que simular las condiciones de presión atmosféricas a las que está sometido el ensayo, así como la carga aplicada en la pared del “casing”, que por ser una carga aplicada en un área se aplicaría como una presión en un plano de las dimensiones del diámetro de penetración de cargas dado por la prueba API. Las presiones aplicadas sobre la geometría se pueden ver de dos maneras diferentes, desde el punto de vista de una carga externa o desde el punto de vista de una carga interna que permite el equilibrio del cuerpo. En este caso, para la simulación de las condiciones iniciales, cualquiera de los dos enfoques da resultados satisfactorios, pero se observó posteriormente que al variar las presiones sólo se podía conseguir una variación de la longitud, si las presiones que actúan sobre la geometría eran consideradas como fuerzas externas que mantienen en equilibrio el sólido en cuestión.

Se debe tomar en cuenta que, para llegar a una configuración como la que se obtuvo, fue necesario modificar varias veces el estado de esfuerzos y las limitaciones impuestas para el movimiento. Aunque como éstas se realizaron para calibrar el modelo con la prueba API RP 43, y en función de la calibración final de la prueba se obtuvieron los resultados, se puede decir que el modelo en función de unas condiciones predeterminadas, dará una predicción de la penetración de la carga al variar esas condiciones.

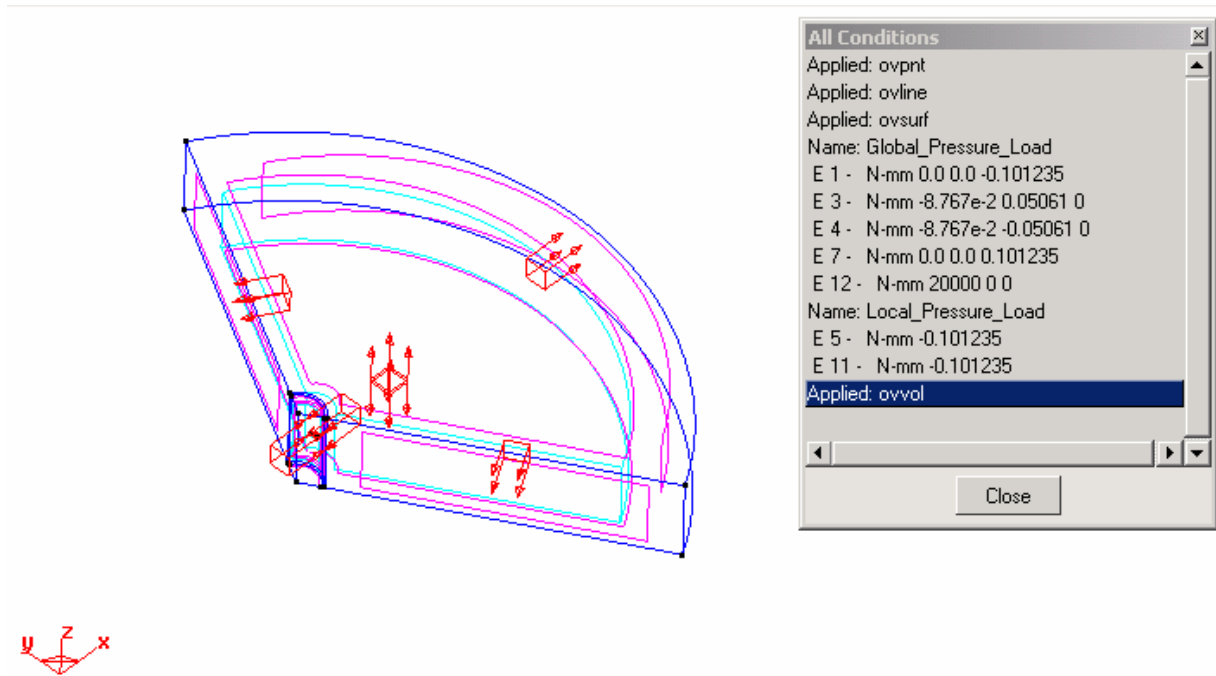


Figura 6.10 Se pueden ver las direcciones y la configuración de las presiones que actúan sobre el modelo.[Autor]

En las paredes de la geometría se pueden ver las diferentes cargas con su dirección saliendo del sólido, pero en la pared del “casing” se ve una carga entrando que en este caso es de 20 Gpa, que es la fuerza que simula el impacto de la carga al detonar. Uno de los problemas es que las fuerzas producidas por las cargas no están completamente caracterizadas para cada carga, así que para definir el valor de la magnitud que impacta se utilizó un valor estándar producido por este tipo de cargas, se puede consultar la referencia [5] para mayor información.

Las cargas que se dibujan en estos casos, no poseen las mismas características entre si, es decir, para conseguir direcciones perpendiculares a los planos laterales, se debe utilizar una descomposición de las fuerzas, y en los casos en los que las superficies no son planas el programa permite utilizar fuerzas distribuidas que poseen la misma configuración

geométrica de la superficie. La fuerza que simula el impacto se colocó perpendicular al plano circular en la pared del “casing”.

6.3.4 Mallado de la estructura

El análisis de la malla a realizar se limita al tipo de configuración que acepta el procesador utilizado en este caso, es decir, aunque la herramienta utilizada produce mallas de múltiples configuraciones, el procesador acoplado a la salida gráfica utilizado (RAM Solid) sólo permite la utilización de tetraedros. Pero con estas limitantes se producen resultados con la calidad suficiente para los objetivos de este trabajo, que son obtener una variación cuantificable de la penetración de las cargas a diferentes presiones.

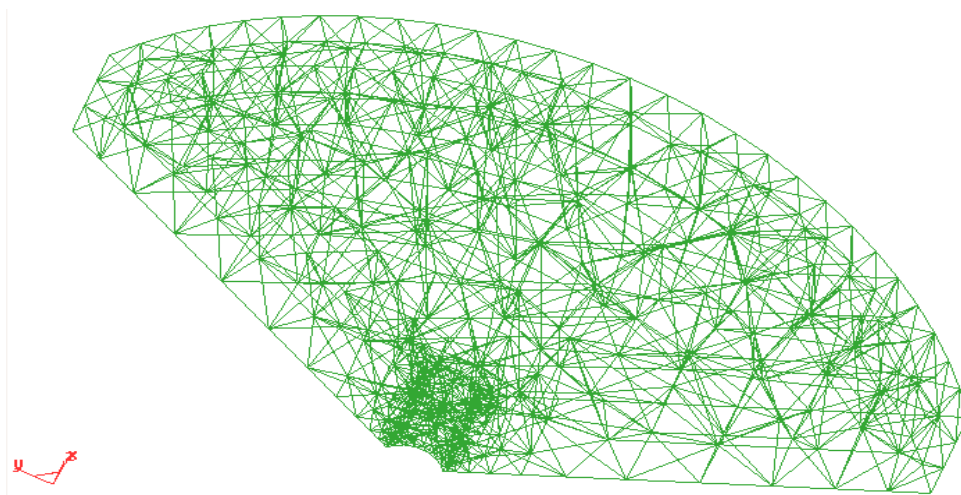


Figura 6.11 Malla de trabajo, con elementos tetraedros.[Autor]

Para realizar el mallado es importante saber que todas aquellos mallados dentro del sólido que no sean tetraedros no permitirán que el procesador realice sus cálculos. Por esto al mallar la estructura, se tiene que indicar que no se mallará ni el plano que se encuentra en la superficie del “casing”, ni las líneas que definen la parte interna del pozo, que no se considera en el análisis de penetración.

6.3.5 Visualización de Esfuerzos

La herramienta utilizada determina de manera inmediata los esfuerzos resultantes en

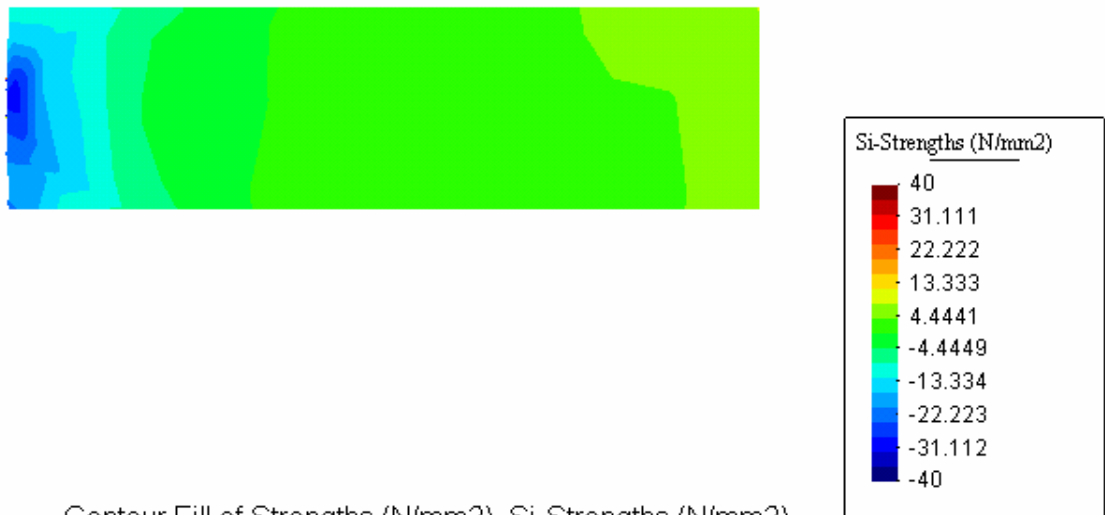


Figura 6.12 Zonas de esfuerzo Si.[Autor]

cada uno de los elementos y los expresa como esfuerzos resultantes en el sólido mallado. Con esto se pueden obtener los esfuerzos en cada uno de los planos X, Y, Z, los esfuerzos principales, y otros parámetros de interés como son las deformaciones, y reacciones. Así se identifican los puntos de interés en cada uno de los casos que se quiera y, utilizando una teoría de falla, saber si se está en presencia de un punto que falla o no para las consideraciones del modelo.

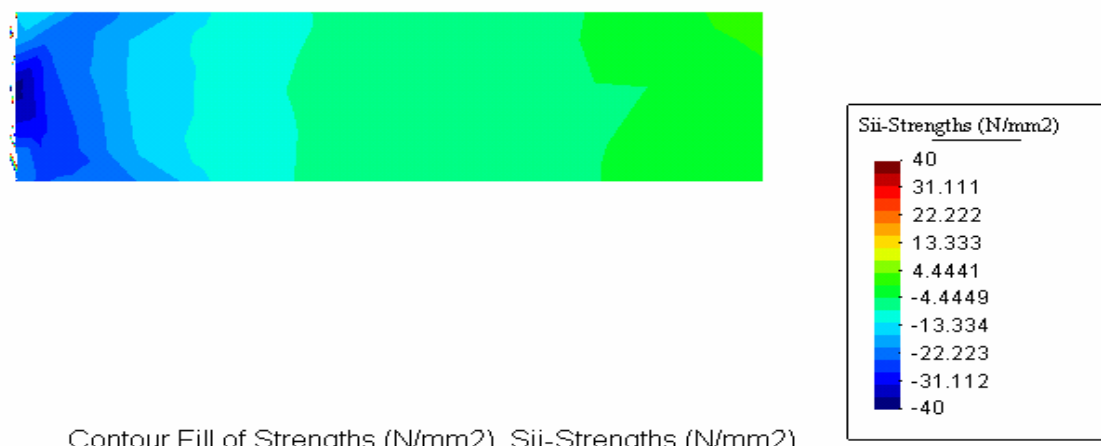
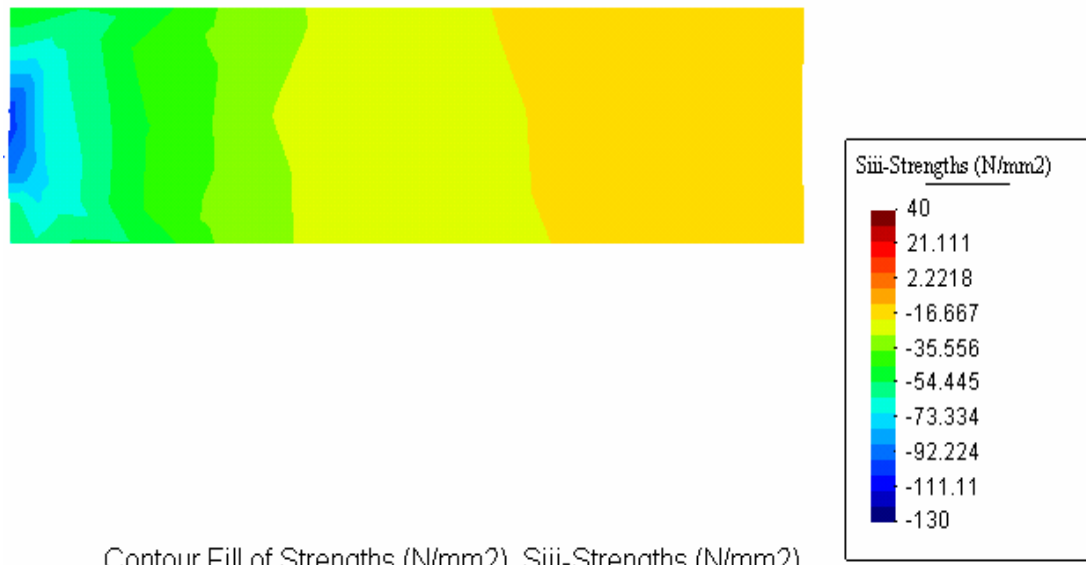


Figura 6.13 Zonas de esfuerzo Sii.[Autor]



Contour Fill of Strengths (N/mm²) Siii-Strengths (N/mm²)

Figura 6.14 Zonas de esfuerzo Siii.[Autor]

Cuando se obtienen los contornos de esfuerzos en el material, se conocen las magnitudes con las que se va a trabajar. Si se conocen los esfuerzos de falla del material que se está utilizando es posible determinar, en base a una teoría de falla si una sección determinada del material que estemos considerando falla o no falla. Como podemos ver en los gráficos que están a continuación es posible identificar cada uno de los puntos, y determinar cuales son los valores de sus magnitudes de esfuerzos.

En los diferentes gráficos se identifica el número del nodo a evaluar, para este caso se evalúan de tres a cinco nodos dependiendo de la variación de las magnitudes y de la cantidad de nodos distanciados que ofrezca el corte realizado. Una vez identificados los puntos a evaluar, se debe obtener en cada uno de los planos principales la magnitud de sus esfuerzos. Como se ve en los cortes presentados, las betas de esfuerzos son zonas semicirculares que aumentan su radio con el aumento de la distancia que tengan con respecto al “casing”. Al no existir un nodo ubicado perfectamente en el medio del corte, se pueden tomar puntos de la misma beta y dar el resultados en función de estos puntos.

Cuando se evalúan los primeros puntos es conveniente generar betas de esfuerzos para conocer el comportamiento de los esfuerzos en todo el corte, pero cuando se trabaja con la teoría de esfuerzo simultáneamente, sólo conociendo las magnitudes de esfuerzo de cada uno de los puntos de interés, se puede tener una idea de cuales son los puntos que pueden fallar.

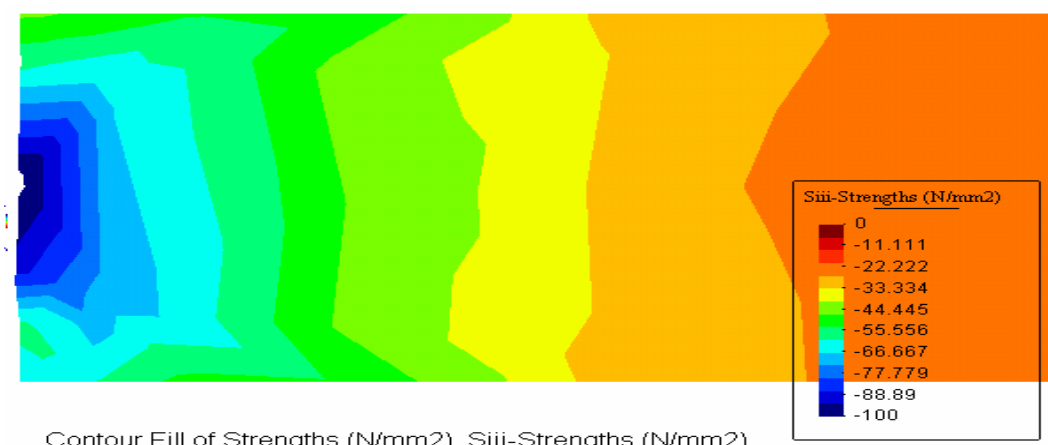


Figura 6.15 Esfuerzo en el plano Siii con betas de esfuerzos entodo el corte.[Autor]

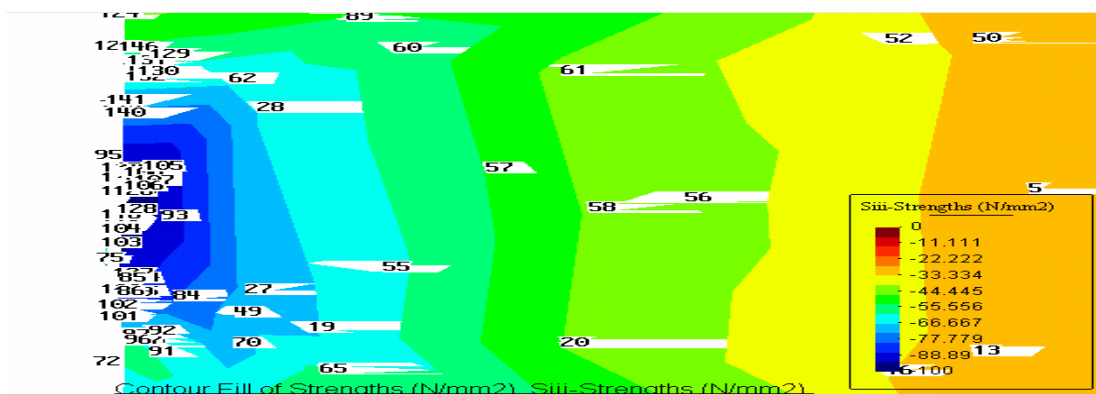


Figura 6.16 Esfuerzo en el plano Siii con números de nodos a evaluar.[Autor]

Cuando se trabajo con los gráficos a continuación no es necesario trabajar con betas de esfuerzo muy marcadas como en el caso de las gráficas 6.17 y 6.18. Al tener idea del

comportamiento de las magnitudes con respecto a la teoría de esfuerzo, se conoce cuales puntos pueden fallar y se evalúan los puntos de interés, es decir, para facilitar la obtención de las magnitudes en el corte se pueden seleccionar los nodos en donde se quiere tener el valor de la magnitud y no considerar aquellos que no son de interés. En los gráficos 6.18 y 6.20 se muestran las magnitudes de todos los nodos y posteriormente se muestra la selección que se puede hacer. Se debe resaltar que cuando se trabaja en puntos muy cercanos al “casing” es imprescindible realizar este tipo selección para poder obtener o ver un resultado.

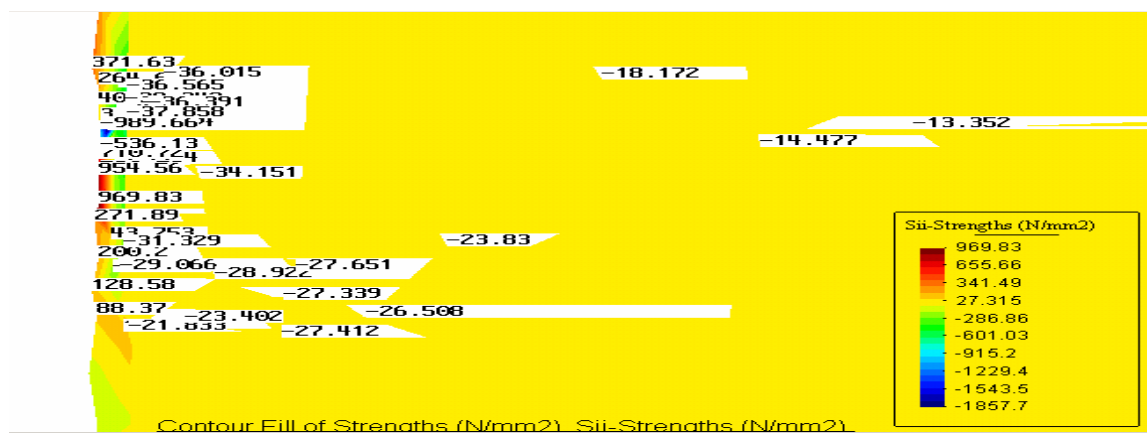


Figura 6.17 Esfuerzo en el plano Sii con magnitudes de los esfuerzos en los nodos.[Autor]

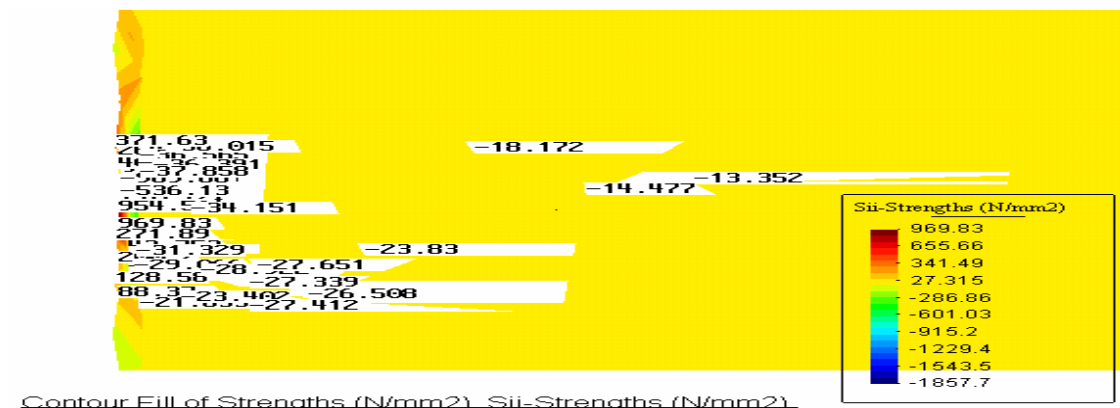


Figura 6.18 Esfuerzo en el plano Sii con selección de nodos. Dependiendo del interés del usuario se pueden obtener las magnitudes resultantes en los nodos de interés.[Autor]

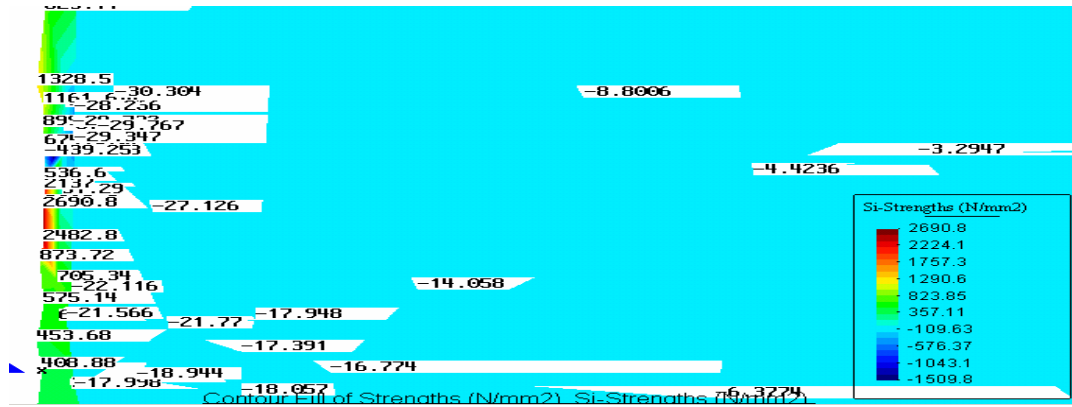


Figura 6.19 Esfuerzo el plano Si con las magnitudes de los nodos en todo el corte.[Autor]

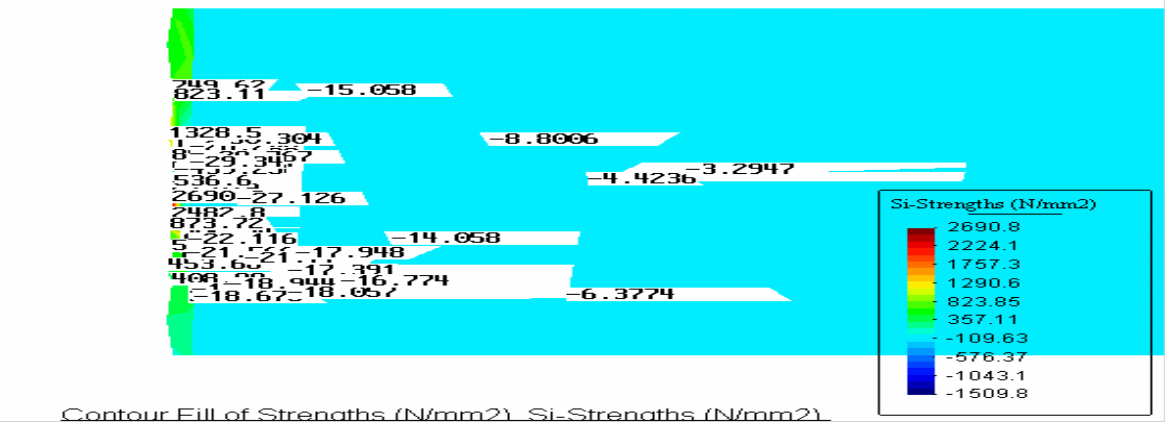


Figura 6.20 Esfuerzo en el plano Si con selección de nodos a tomar en cuenta.[Autor]

6.4 Modelo a Comparar

Después de conocer todos los parámetros que se toman en cuenta para el desarrollo del modelo de predicción de cargas, es necesario establecer un punto de comparación para tener una idea de la calidad de los resultados. Para esto se desarrolla el modelo que utilizan los fabricantes. Para mostrar el procedimiento de cálculo, se procede a obtener la penetración de una carga hipotética, de una manera similar se obtienen variaciones de penetración para los datos con los que se diseñó el modelo variando las presiones se obtienen diferentes. Estos resultados se muestran en el próximo capítulo.

Datos de entrada:

Sección I de la prueba API

Esfuerzos de compresión en el cemento = 7650 psi

Penetración (L API) = 15,6 in

Diámetro de entrada = 0,28 in

Condiciones a fondo de pozo

Esfuerzos de compresión uniaxiales de superficie húmeda = 7200 psi

Esfuerzos efectivo en fondo de pozo = 6000 psi

Espesor combinado d cemento y “casing” = 1.5 in

Grado del “casing” = P-110

Usando el nomograma para determinar los valores de penetración

Punto A- Entre al nomograma con el valor del esfuerzo compresivo del cemento de la sección I (7560 psi) y continúe de forma horizontal hacia la derecha.

Punto B- Intercepte las líneas de compensación para el valor de los esfuerzos internos. Desde la intersección continúe vertical hacia abajo.

Punto C- introduzca el valor de la penetración total de la carga que da la sección I de la prueba API.

Punto D- Intercepte las proyecciones horizontal y vertical que dan el valor de penetración equivalente corregido con el esfuerzo de compresión uniaxial de superficie húmeda a 3100 psi.

Punto E- Introduzca el valor de esfuerzo de compresión uniaxial de superficie húmeda del caso considerado (7200 psi).

Si los esfuerzos de la formación no son un dato, se pueden estimar de la porosidad de la formación entrando al nomograma en el punto G y procediendo del tipo de formación. En este caso el punto H y verticalmente hacia arriba.

Punto F- Desde el punto d paralelo a la familia de curvas e interceptando la línea que viene del punto E o del punto h, se tendrá la penetración a fondo de pozo corregida para esfuerzos de superficie húmeda.

Punto I- Horizontalmente desde el punto F e interceptando los esfuerzos efectivos de la formación (6000 psi).

Punto J- Proyecte verticalmente hacia abajo para determinar la penetración total a fondo de pozo. (10.1)

Punto K- Continúe verticalmente hasta interceptar la línea de espesor combinado de cemento y "casing".(1.5 in)

Punto L- Proyecte horizontalmente hasta leer la penetración a fondo de pozo (8.6), que es la utilizada en los cálculos de flujo en pozos.

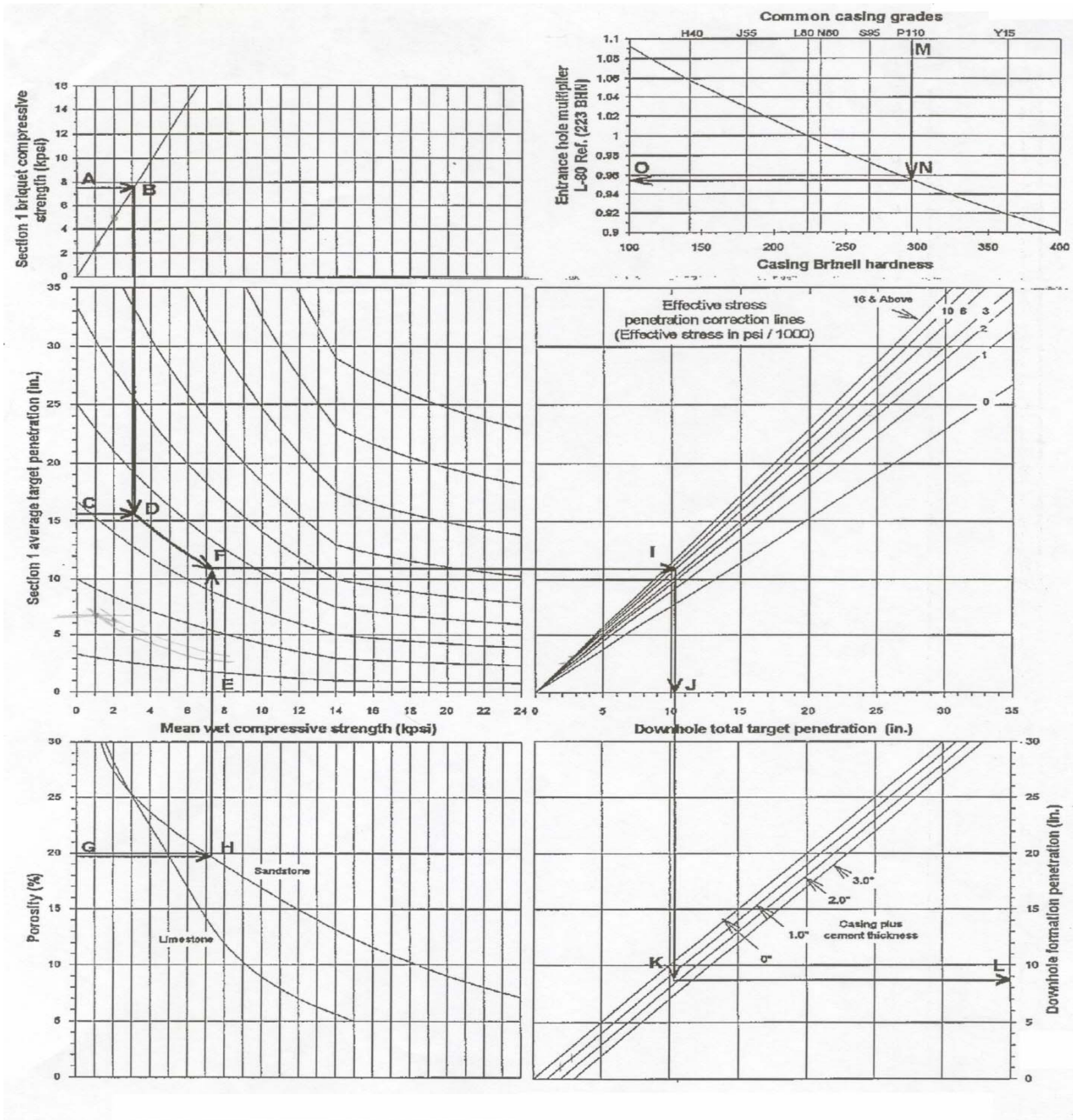


Figura 6.21 Histograma utilizado por los fabricantes de cargas para determinar penetración a fondo de pozo.[23]

Capítulo 7

Presentación de Resultados

Se debe señalar que los resultados de este trabajo, toman en cuenta las longitudes de penetración alcanzadas por la presión de la carga y sólo esa longitud, sin tomar en cuenta la forma de los túneles. En los diagramas de contorno de esfuerzos se pueden determinar zonas en donde los esfuerzos son de las mismas magnitudes, y por lo tanto se podría determinar que en esas zonas existen fallas similares a las que se producen en la zona que se considera como túnel. Pero se debe tomar en cuenta que para determinar una forma de penetración se deben realizar estudios más profundos, los modelos que estiman índice de productividad para pozos, solamente toman en cuenta el diámetro y longitud de penetración, aunque las simulaciones generalmente se realizan con una geometría preestablecida, se obtienen expresiones analíticas, que no consideran las formas de la penetración.

En función de lo establecido anteriormente, se realizan en esta presentación de resultados las pruebas para calibrar el modelo en donde se consiguen las longitudes que indica la prueba API para la carga considerada, se toma como longitud el nodo de la maya con más lejanía con respecto al borde interior de la geometría o “casing” para el caso real, que indique esfuerzos de falla. Una vez demostrada la longitud de penetración a condiciones atmosféricas, se procede a modificar las presiones y a comparar las longitudes obtenidas con otro modelo de predicción de penetración bajo diferentes condiciones de presión.

7.1 Resultados con el modelo propuesto

Prueba a condiciones Atmosféricas:

Presión Atmosférica

Punto	Distancia (mm)	Si(Mpa)	Sii(Mpa)	Siii(Mpa)	Criterio de Falla
55	101	-14,058	-23,83	-63,994	Falla
57	147,558	-8,8006	-18,172	-54,086	Falla
58	190,846	-4,4236	-14,477	-46,002	
56	235,235	-3,2947	-13,352	-42,998	

Tabla 7.1 Resultados de penetración a presión atmosférica.[Autor]

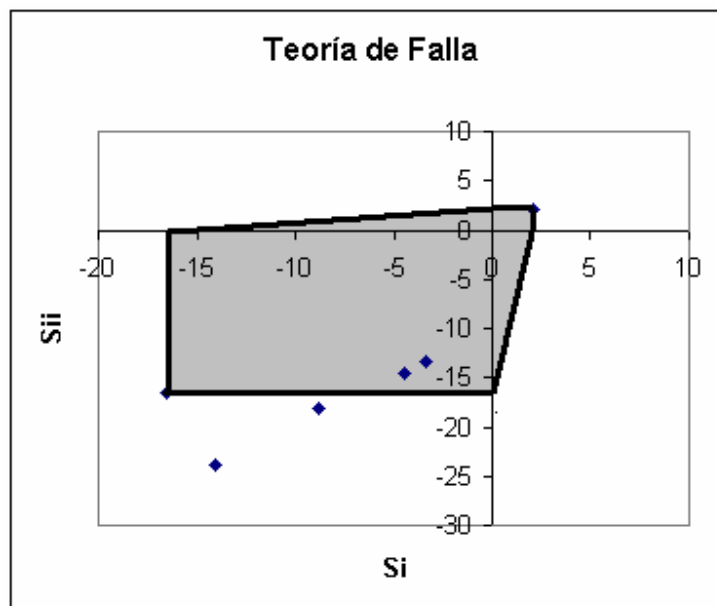


Gráfico 7.1 Comparación de resultados con la teoría Mohr-Coulomb para el caso S_{ii} y S_i . [Autor]

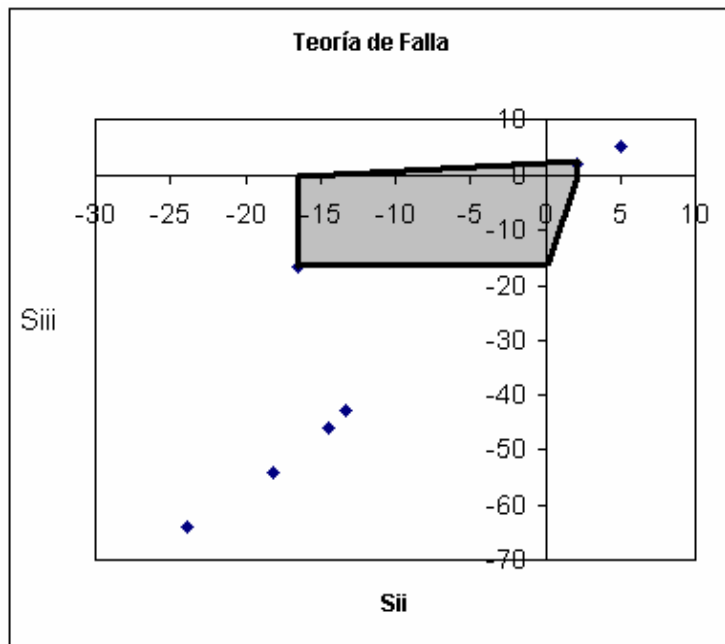


Gráfico 7.2 Comparación de reultados con la teoría Mohr- Coulomb para el caso Siii y Sii.[Autor]

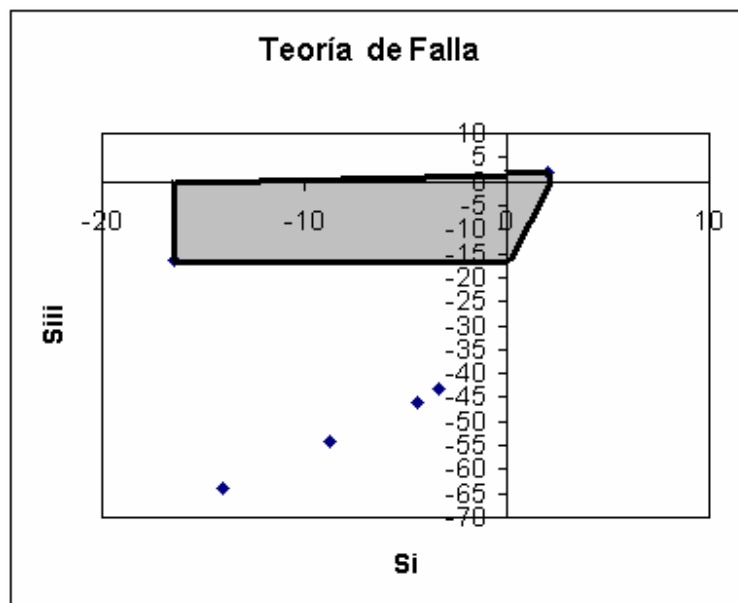


Gráfico 7.3 Comparación de resultados con la teoría de Mohr-Coulomb para el caso Siii y Si.[Autor]

En los gráficos anteriores se presenta el estado de esfuerzos de un corte radial de la estructura geométrica, como los que se muestran en el capítulo anterior en donde se deben identificar los puntos. Se considera que si los puntos están dentro de la zona gris no fallan, pero si caen fuera de ella, los puntos fallan, y se toma en cuenta que no existe material en esta zona. Pero para que un punto falle debe quedar fuera de la zona coloreada en los tres planos de esfuerzos, es decir, en S_1 , S_2 , y S_3 . Como se puede ver los puntos se encuentran bastante alejados de la zona gris en las gráficas S_{iii} vs. S_1 y S_{iii} vs. S_{ii} , pero en el gráfico S_{ii} vs. S_i los puntos varían mucho su ubicación con respecto a esa zona, es decir, algunos caen dentro y otros afuera, indicando que algunos fallan en este plano y otros no lo hacen. Esto indica que el plano S_2 vs. S_1 es aquel que determina si los puntos fallan o no. Este comportamiento se repite para cada una de las presiones que se evalúan después, se puede observar en las tablas de resultados la variación de la magnitud, que es similar para todos los casos, sólo que la distancia en dónde fallan los nodos se reduce por el incremento de la presión. Como el comportamiento es similar, se identifica en cada tabla en donde comienza la falla.

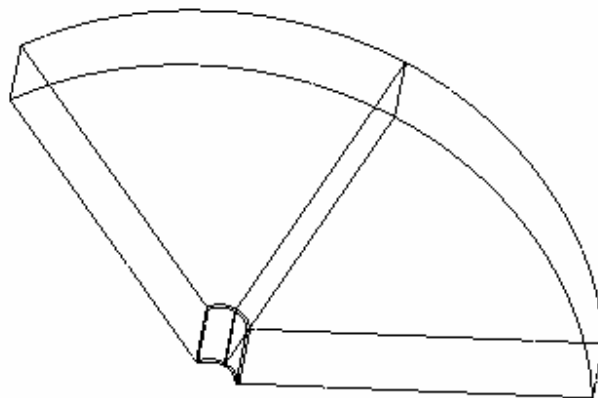


Gráfico 7.4. Planos de corte para ubicar los puntos a considerar.[Autor]

En el primer caso estudiado los puntos indican que la falla comienza entre los puntos 57 y 58, lo que indica que los puntos fallan hasta una distancia entre 160 mm y 170 mm de la cara del “casing” o superficie del círculo menor de la geometría utilizada, reproduciendo las condiciones de la prueba API, aunque con poca precisión debido al número de nodos utilizados. La prueba API que se incluye en el apéndice para esta clase de carga indica una penetración de 6,30 pulgadas (160.02 mm), en función de esto se realizan las variaciones de presión y se obtienen los resultados para compararlos con un modelo comercial que predice penetración de cargas.

La selección de las presiones se hizo en función de la cantidad de longitud que se reduce con el incremento de presión, como se verá a continuación en algunos valores de presión los esfuerzos a la compresión tienden a cero en longitudes de penetración muy pequeñas. Por esto se tomaron presiones desde la presión atmosférica hasta 5000 psi.

Presión 20.19 Mpa

Punto	Distancia (mm)	Si(Mpa)	Sii(Mpa)	Siii(Mpa)	Criterio de Falla
52	51,5952	-10,957	-22,613	-61,538	Falla
74	54,27	-12,633	-22,761	-60,113	Falla
31	62,076	-7,4519	-18,568	-57,344	Falla
58	125,148	-4,963	-16,202	-48,826	Falla
56	192,062	-2,2075	-10,402	-39,15	

Tabla 7.2 Resultados de penetración para 20,19 Mpa.[Autor]

Se produce falla hasta los 150mm, para este caso el número de puntos presentes en la zona afectada dificulta la calidad de los resultados del modelo.

Presión 27,57 Mpa

Punto	Distancia (mm)	Si(Mpa)	Sii(Mpa)	Siii(Mpa)	Criterio de Falla
81	40,2222	-16,612	-24,949	-68,78	Falla
49	56,7553	-12,012	-23,092	-62,159	Falla
27	60,3066	-12,427	-23,148	-62,522	Falla
19	77,77	-11,451	-22,111	-59,373	Falla
24	88,7056	-6,2709	-15,157	-42,573	

Tabla 7.3 Resultados de penetración para 27,57 Mpa.[Autor]

A diferencia del caso anterior, podemos observar que cuando se tienen dos puntos cercanos entre sí, el modelo puede ofrecer resultados de mayor calidad. En este caso la falla está entre 77 y 88 mm de la superficie del casing.

Presión 34,47 Mpa

Punto	Distancia (mm)	Si(Mpa)	Sii(Mpa)	Siii(Mpa)	Criterio de Falla
90	27,2488	-13,692	-20,441	-59,038	Falla
81	33,342	-7,4422	-14,098	-47,314	
27	57,0908	-3,3074	-12,67	-39,731	

Tabla 7.4 Resultados de penetración para 34,47 Mpa.[Autor]

La falla se presenta hasta unos 30 mm aproximadamente al incrementar la presión es más difícil determinar las longitudes de penetración porque las penetraciones son mas cortas y

se acumulan en las paredes del casing, en donde la geometría posee más nodos, además los cambios entre zonas en donde no hay falla y zonas en donde si hay falla se producen en distancias muy pequeñas.

Presión 10 Mpa

Punto	Distancia (mm)	Si(Mpa)	Sii(Mpa)	Siii(Mpa)	Criterio de Falla
19	799,2117	-14,589	-24,292	-63,347	Falla
55	105,944	-11,557	-21,383	-58,704	Falla
57	149,451	-6,3058	-15,939	-49,25	
58	190,778	-2,0622	-12,407	-41,496	

Tabla 7.5 Resultados de penetración para 10 Mpa.[Autor]

Presión 5 Mpa

Punto	Distancia (mm)	Si(Mpa)	Sii(Mpa)	Siii(Mpa)	Criterio de Falla
24	88,7019	-13,835	-23,656	-61,909	Falla
58	122,842	-9,6677	-19,662	-55,517	Falla
60	155,912	-5,4226	-15,27	-47,883	
61	190,683	-2,0481	-12,464	-41,726	

Tabla 7.6 Resultados de penetración para 5 Mpa.[Autor]

Las últimas dos pruebas a 5 Mpa y a 10 Mpa, se realizaron para poseer más datos sobre como afectan leves variaciones de presión al modelo utilizado, al enfrentarse a que las longitudes decrecen rápidamente con los incrementos de presión, tal y como se esperaba, se consideró importante observar la sensibilidad del modelo a variaciones pequeñas de

presión. Como se ve en los cuadros anteriores la falla para el caso de 10 Mpa sucede entre 105mm y 159mm, y para el caso, y para el de 5Mpa sucede entre 122mm y 190mm, aunque pueda parecer que una variación de 5 Mpa es grande, el objetivo de estas dos pruebas se ve si se considera que se está en presencia de un pozo en producción en donde este tipo de variaciones puede presentarse de manera cotidiana. Como existe una variación suficiente en 5 Mpa, se pueden obtener excelentes resultados de precisión al mejorar la calidad de la malla.

Presión (Mpa)	Longitud a fondo de pozo (in)
34,47	3,46
27,57	3,03 - 3.46
20,19	5,9
10	4,13 - 6,25
5	7,48 - 4,80

Tabla 7.7 Longitudes de penetración para diversas presiones.[Autor]

7.2 Resultados con el modelo comercial

Después de obtener los resultados con el modelo propuesto, se utilizó el modelo utilizado por los fabricantes de cargas, como en este caso, no se dispone de porosidad en el medio, los datos que faltaban se acercaron al reproducir de manera gráfica la penetración, es decir, se entra al modelo con la longitud de la prueba API, y se tiene como objetivo obtener esa misma longitud, tomando en cuenta la presión atmosférica, así se obtienen las curvas que faltan. Una vez conocido como se llega hasta las rectas en donde se varía la presión sólo se tiene que variar este parámetro y obtener las penetraciones restantes.

Presión (Mpa)	Longitud a fondo de pozo (in)
34,47	4,7
27,57	4,9
20,19	5
10	5,5
5	6

Tabla 7.8 Resultados de penetración de cargas que indica el modelo comercial.[Autor]

7.3 Análisis Comparativo

Si se observan los resultados, se puede ver que el modelo propuesto ofrece una gama de distancias de penetración de la carga entre las cuales puede variar la falla que se está representando, esto se debe, a que al utilizar el programa en versión demo, sólo se pueden graficar hasta 500 nodos, lo que no permite tener en los planos de corte una cantidad de puntos suficientemente grande como para obtener mayor precisión.

Se observan drásticas reducciones de penetración, similares a las que predice el modelo utilizado por los fabricantes de cargas, aunque este modelo posee otras consideraciones. Pero al ver las variaciones de esfuerzos que se generan en los planos de corte y las magnitudes de éstas, se puede decir que el comportamiento general del modelo es el esperado, existe un decrecimiento de la longitud en función del incremento de la presión. Se puede considerar que el modelo funciona para la predicción de penetración de cargas para cañoneo en condiciones de fondo de pozo.

En la figura 7.5 se pueden ver los resultados de los dos modelos, es evidente que existe un comportamiento similar entre ambos. Esta comparación se hace tomando en cuenta que los dos modelos poseen sus diferencias, pero indica que el modelo propuesto siendo una

primera versión podría generar resultados confiables en la predicción de penetración a fondo de pozo en su posteriores versiones. El comportamiento de los puntos del modelo propuesto es estable en la mayoría de kilos casos menos para el caso de 20 MPA, sería interesante una vez mejorada la malla, realizar un estudio en esos valores para saber si las diferencias son consecuencia de la malla o que existe una discontinuidad en esas magnitudes.

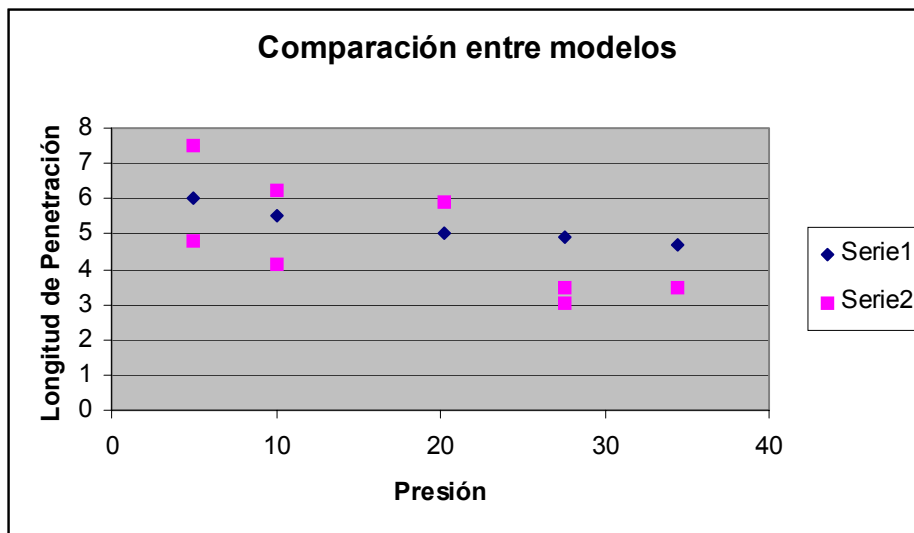


Figura 7.5 Comparación entre modelo comercial y modelo propuesto. La serie 1 representa el modelo comercial y la serie 2 el modelo propuesto. [Autor]

Para tener una idea diferente de la difusión de los esfuerzos en el sólido se realiza también un corte horizontal que no será tomado como determinante para la obtención de la longitud de penetración, pero que da una idea de cómo son los esfuerzos en ese plano y como actúan los factores externos. Para evaluar el comportamiento de estos se toman dos planos de manera arbitraria en el corte y se grafican las magnitudes de los esfuerzos en función del radio. A continuación se puede ver el corte y los planos de evaluación.

7.4 Análisis General de Esfuerzos

A continuación se presenta un gráfico donde se realiza un corte horizontal y se evalúa, en dos planos, con ángulos arbitrarios, la magnitud de los esfuerzos en función de la distancia radial. Realizando un procedimiento igual al de la referencia [11] se va avanzando de forma radial y se obtienen las magnitudes de los esfuerzos para diferentes medidas, posteriormente se grafican las distancias y las magnitudes obtenidas.

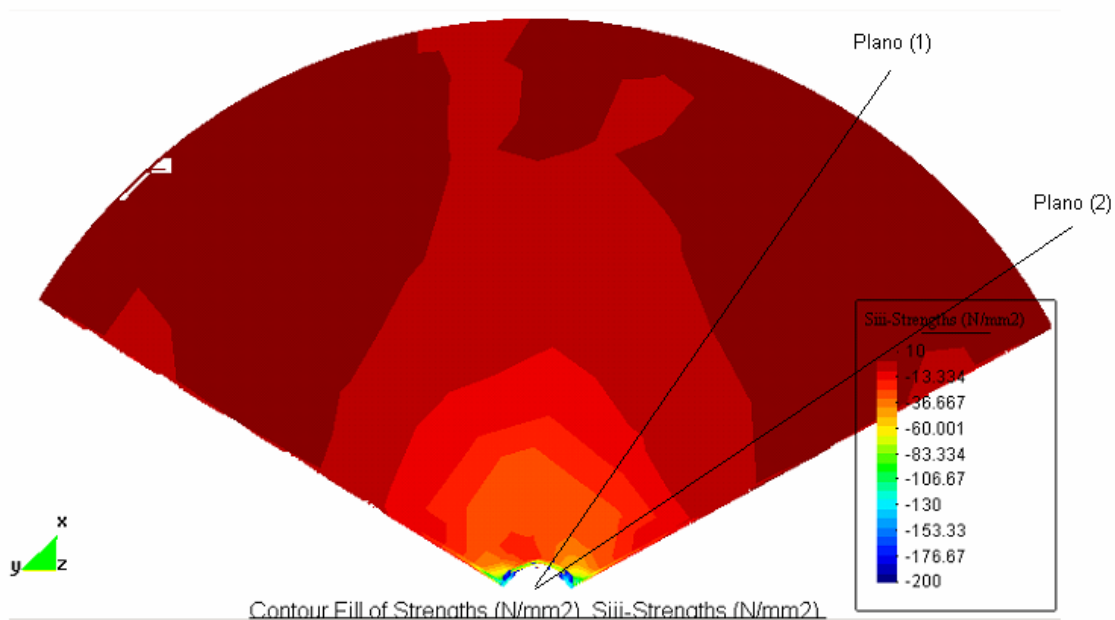


Figura 7.6 Corte horizontal y planos de evaluación.[Autor]

La distancia se toma en función de los nodos que se pueden identificar para cada una de las líneas consideradas, en la Figura 7.5 se ve como los esfuerzos son muy grandes cuando se está en la zona cercana al casing, y como cuando la distancia incrementa existe un fuerte cambio al principio para tener después un comportamiento más lineal de variación de magnitudes. Se puede ver que los valores que se encuentran por debajo del eje de la distancia, indican que el cuerpo está sometido a compresión. Posteriormente los esfuerzos a compresión se atenúan hasta desaparecer y comienzan los de tensión hasta el final de la geometría. Los esfuerzos altos en la cara del casing se deben a las restricciones que actúan

como acumuladores de esfuerzo, lo mismo sucede en los extremos del sólido pero con magnitudes menores y son esfuerzos a la tensión.

Se puede señalar que la configuración que se tendrá en el sólido en este análisis será de la siguiente forma:

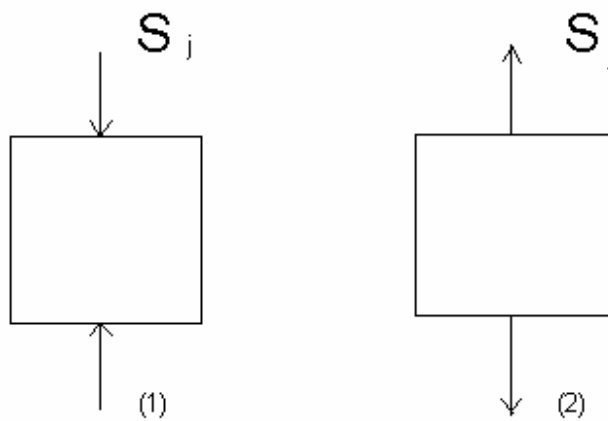


Figura 7.7 Configuración de un elemento plano perteneciente al sólido.[Autor]

Cuando los esfuerzos sean a compresión, por debajo de la línea de distancia en los figuras distancia versus esfuerzo a continuación, se tendrá el caso de la figura 1 y en el caso que sean a la tensión, valores positivos por encima del eje de la distancia, se tendrá el caso de la figura 2. Sólo se grafica el estado de esfuerzos con respecto a un tipo de esfuerzo porque existen tres combinaciones diferentes para cada punto y no es ilustrativo en el caso de esfuerzos en los tres planos dibujar el sentido que tendrían los otros esfuerzos.

Al evaluar los esfuerzos en los dos planos , se nota un comportamiento similar entre ellos, pero se puede ver que para el plano 2 las magnitudes son mayores. Esto se debe a que existen limitantes de movimiento en las paredes del sólido que crean acumulación de esfuerzo. En las Figuras 7.7 y 7.8 a continuación se pueden ver este comportamiento, además se ve que los esfuerzos para S_i se comportan a la tensión cuando la distancia tiende a cero, pero existe una fuerte variación hasta valores de compresión para después obtener

un comportamiento casi lineal en el resto del cuerpo. Las paredes posteriores del cuerpo, cuando r tiende a 1400 mm, poseen valores de esfuerzos bastantes altos que a su vez son consecuencia de las limitaciones de movimiento, pero son mucho menores a los encontrados en el casing por la magnitud de las fuerzas aplicadas en su superficie.

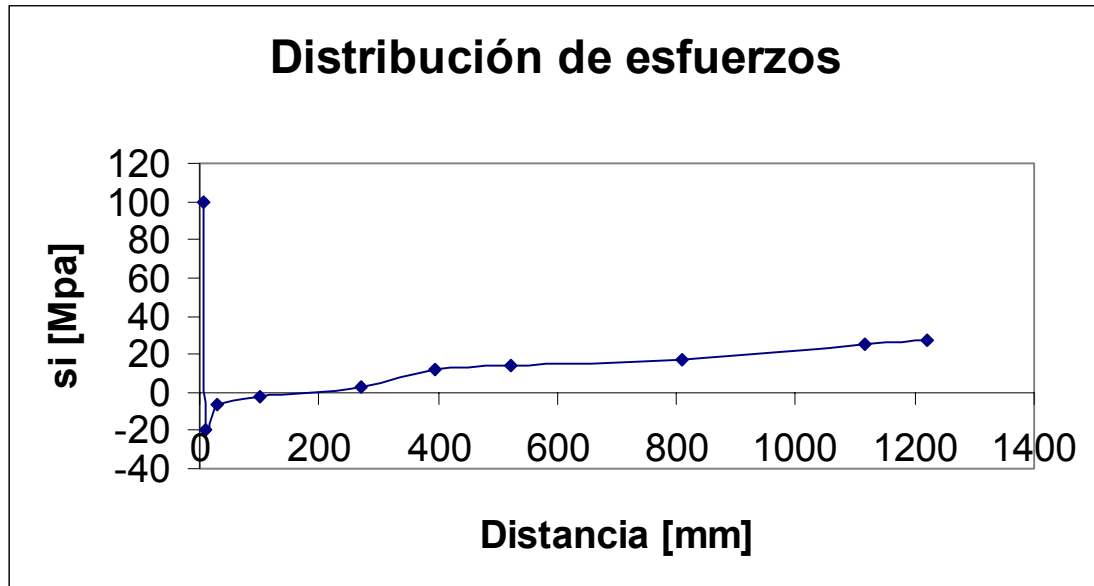


Figura 7.8 variación de los esfuerzos en el plano 2 Si [Autor]

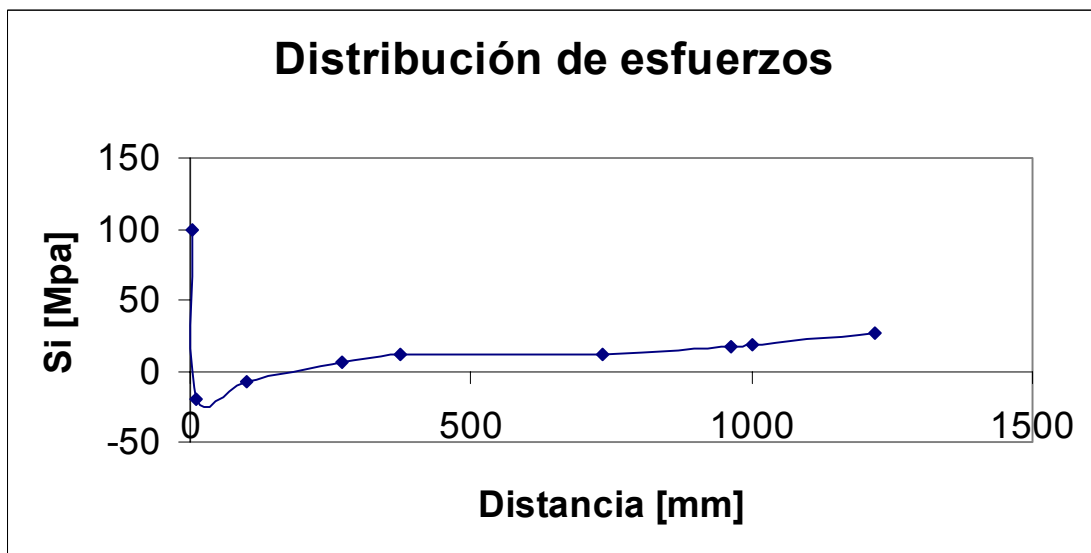


Figura 7.9 Esfuerzos en el plano 1 con respecto a Sii.[Autor]

En el caso de los esfuerzos en S_{ii} el comportamiento cambia con respecto al caso anterior porque los esfuerzos cerca del casing son de altas magnitudes pero siempre se mantienen a la compresión no existe ese cambio drástico observado en la primera sección. En este caso el factor concentrador de esfuerzos no es determinante entre un plano y otro, pero se ve que los esfuerzos a la tensión son de magnitudes muy pequeñas. A continuación se puede ver en las Figuras 7.9 y 7.10, el comportamiento anteriormente mencionado.

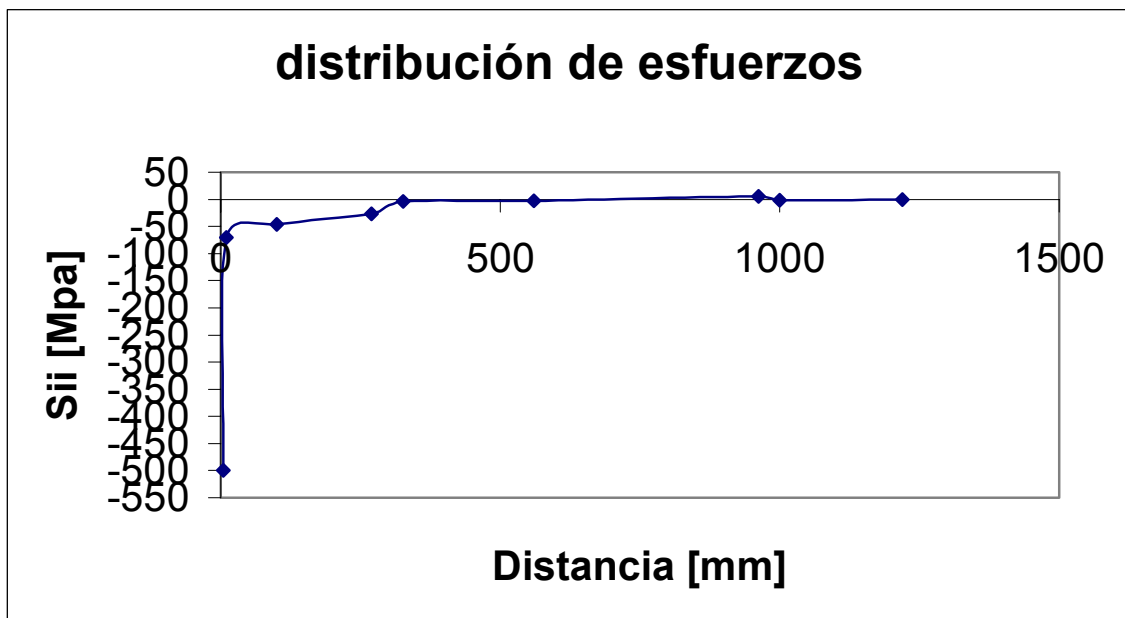


Figura 7.11 Esfuerzos en el plano 2 con respecto a S_{ii} [Autor]

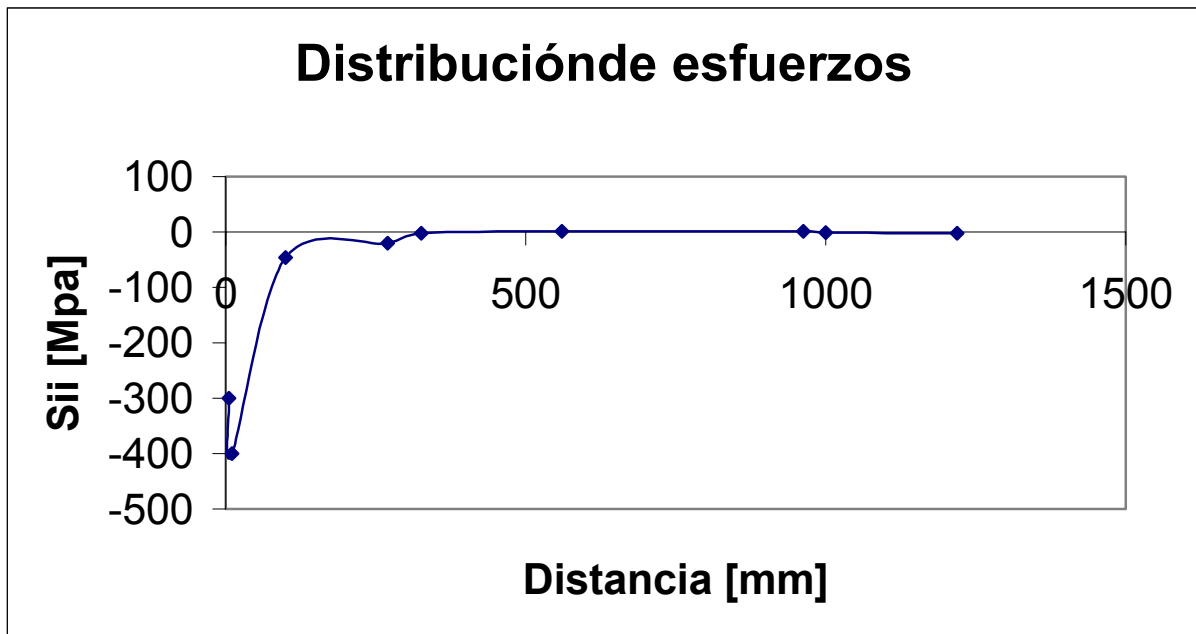
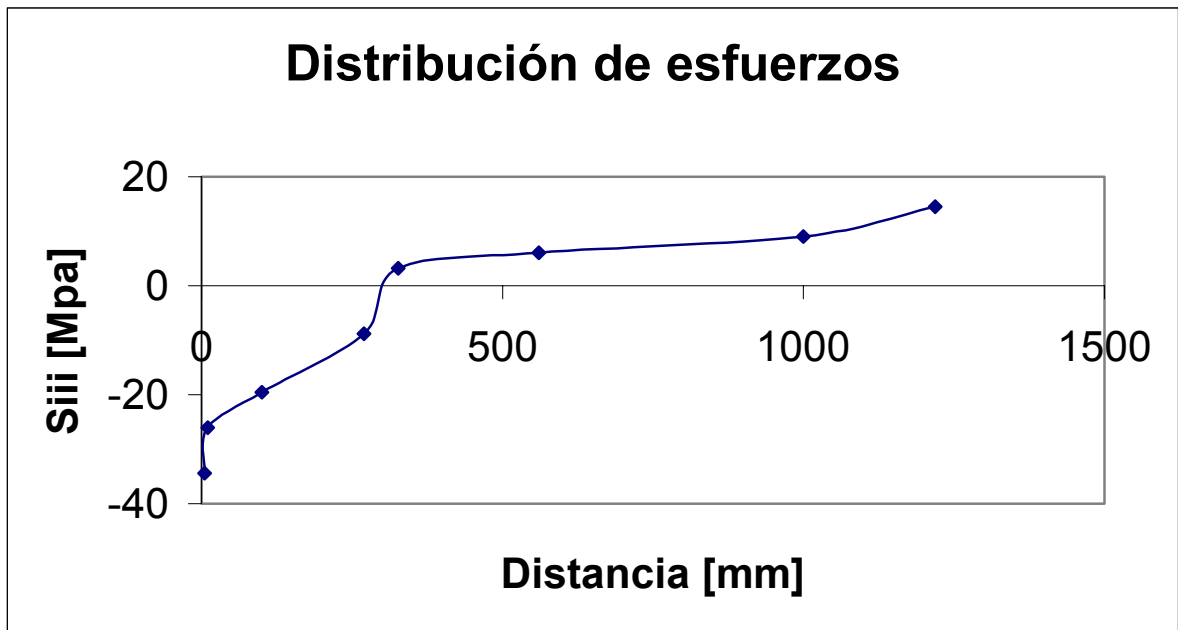
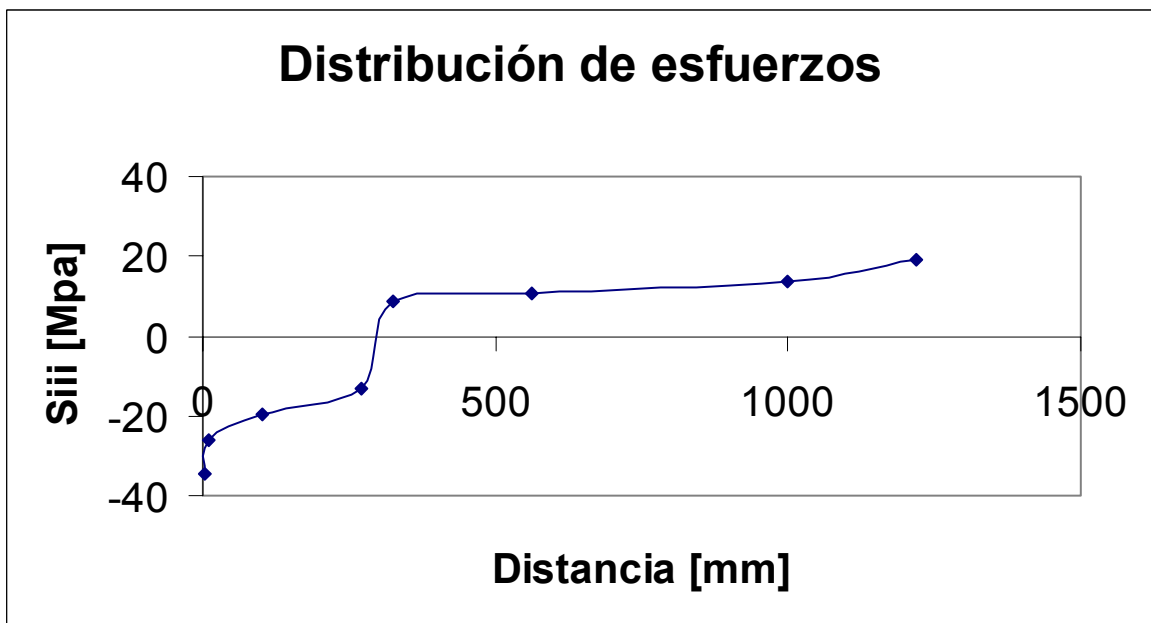


Figura 7.12 Esfuerzos en el plano 2 con respecto a Sii.[Autor]

Como análisis final se utiliza el plano Siii, en este caso el comportamiento es similar al observado en el caso de Sii. Pero las magnitudes son mayores en la sección de tensión. La diferencias de magnitudes causadas por los concentradores de esfuerzos se aprecian y son considerables, al saber que estos esfuerzos vienen dados en Mpa. Se puede ver que la cercanía del plano 2 a las paredes del sólido generan esfuerzos mayores que para el plano 1. las Figuras 7.11 y 7.12 a continuación muestran este comportamiento.

Los esfuerzos obtenidos cerca del casing, cuando la distancia tiende a cero, son muy altos y aunque se den esas magnitudes, se debe indicar que su tendencia no es comparable con las magnitudes que se obtienen en el resto del sólido. La idea de presentar un análisis así en esta sección es tener una idea de cómo se desarrollan en el modelo los esfuerzos en función de las restricciones y de los planos en donde estén aplicadas las fuerzas externas

Figura 7.13 Esfuerzo en el plano 1 con respecto a S_{iii}. [Autor]Figura 7.14 Esfuerzo en el plano 2 con respecto a S_{iii}. [Autor]

Conclusiones

En este trabajo se hizo un análisis de los modelos de predicción de productividad de pozos bajo los parámetros de cañoneo, lo que llevó al desarrollo de un modelo basado en el método de los elementos finitos para la predicción de penetración de cargas a condiciones de fondo de pozo, con la utilización de elementos tetraédricos. En función de este estudio y del desarrollo del modelo se puede concluir que:

- Las correlaciones para definir geometría de túneles de cañoneo son limitadas y acuden a métodos que no pueden sufrir modificaciones.
- Las correlaciones para la determinación de índice de productividad son muy numerosas y se consiguen publicaciones ligadas a la mayoría de las condiciones en las que puedan estar los pozos.
- Los valores adecuados de los parámetros de cañoneo poseen dependencia directa de las condiciones del pozo, para determinar el valor de un parámetro o de varios, es necesario evaluar las condiciones del pozo como un caso aislado y tomar las decisiones pertinentes
- El valor de los parámetros de cañoneo está directamente relacionado con la cantidad de daño en la formación. Mientras más daño mas influencia tiene los parámetros de cañoneo.
- Las consideraciones que se hacen para conseguir correlaciones que simulan el comportamiento en condiciones de pozo influyen en el valor de los parámetros de cañoneo obtenidos.
- Se pudieron encontrar ciertas reglas generales al cañonear pozos pero es imprescindible la utilización de correlaciones o modelos para estimar el valor específico de los parámetros de cañoneo.
- Se logró generar un modelo para la predicción de penetración de cargas de cañoneo a condiciones de pozo.

- El modelo propuesto tiene un comportamiento similar a la realidad. Se puede observar que la longitud de penetración disminuye con el incremento de la presión que actúa sobre la formación.
- Las comparaciones con el modelo comercial que se realizaron, ratifican que el modelo propuesto predice la penetración de cargas a condiciones de pozo de manera aceptable.
- Con el número de nodos utilizado se obtienen resultados que permiten concluir que el modelo tiene un comportamiento satisfactorio, sin que esto indique que no se puedan utilizar más nodos.
- El modelo propuesto posee gran capacidad para modificar las condiciones de contorno a diferencia del modelo comercial.
- El modelo propuesto presenta una manera alternativa de predecir penetración a fondo de pozo, en función de datos de campo.
- En las condiciones de diseño del modelo, se observa un comportamiento que alienta posteriores desarrollos en la predicción de penetración de cargas a condiciones de fondo de pozo.
- Las variaciones de esfuerzo que se pueden ver en el modelo en toda la geometría permiten obtener el estado de esfuerzos en la formación cuando penetra la carga.

Recomendaciones

Para el desarrollo posterior de este trabajo y para que los resultados de éste sean de utilidad para la industria, se recomienda:

- Aumentar el número de nodos utilizado por el modelo y probar diferentes configuraciones de malla.
- Realizar deformaciones en otro tipo de materiales, como materiales poroelásticos.
- Solicitar a los fabricantes de cargas información sobre la sección dos de la prueba API de las cargas utilizadas por PDVSA.
- Realizar estudios sobre el cemento utilizado en las pruebas API, porque la información no existe.
- Utilizar un paquete de elementos finitos que posea desarrollos para impactos de proyectiles y múltiples configuraciones de materiales, para así acoplar el procesador con el paquete GID y tener mayor libertad tanto en la entrada de geometrías como en la obtención de resultados.
- Realizar estudios de las penetraciones de la cargas utilizadas por PDVSA a diferentes condiciones y comparar los resultados con las predicciones del modelo planteado o con un desarrollo posterior de éste.
- Realizar estudios sobre las magnitudes con las que impactan las cargas sobre la formación y sobre el casing.
- Desarrollar un sistema que acople las predicciones en cemento con predicciones en roca de yacimiento.
- Acoplar otros métodos numéricos, si se quiere determinar geometría o incluso flujo en las zonas dañadas.

Glosario de Términos

Ángulo de desviación: ángulo en grados hacia el cual se desvía el pozo desde la vertical.

Cañoneo Bajo Balance (Underbalance): Esta condición ocurre cuando la presión hidrostática en el pozo es más baja que la presión de la formación

Cañoneo Sobre Balance (Overbalance): La presión hidrostática en el pozo es mayor que la presión de la formación. Esta condición permite que el pozo esté estático durante la operación

Deformación: Cambio en la configuración original o volumen de un cuerpo al aplicar alguna fuerza.

Esfuerzo cortante: Componente de esfuerzo que actúa paralelo a la dirección de un plano real o imaginario dentro de un cuerpo.

Esfuerzo normal: Componente de esfuerzo que actúa perpendicular a un plano real o imaginario dentro del cuerpo.

Formación: Unidad geológica fundamental de la clasificación litográfica, integrada por capas o depósitos, con características semejantes y de la misma edad.

Fractura: Condiciones de falla por tensión. Gracias a este se establece el peso máximo del fluido, cualquier valor superior a este provoca la fractura de la formación.

Fracturación de la formación. Método de aplicar presión hidráulica a una formación de yacimiento para provocar la apertura de grietas en la roca. Método de estimulación para el incremento de la producción.

Hoyo Abierto: Pozo que no tiene revestidor.

Planos Principales: Son los tres Planos perpendiculares entre sí en un punto cualquiera de un cuerpo, donde el valor de los esfuerzos de corte es cero, solamente existen esfuerzos normales.

Permeabilidad: Capacidad que tiene un medio poroso para que un fluido pase a través de este.

Revestidor: Tubería que se coloca en un pozo para evitar que el pozo colapse. Mantiene la estabilidad del pozo.

Revoque: Masa o costra que se forma al endurecer el fluido de perforación en el proceso de flujo hacia las tuberías de producción.

Bibliografía

1. Abrams, A. “Mud Design to Minimize Rock Impairment Due to Particle Invasión”. JPT. Pags. 586-592, May 1977.
2. Aguilera, J. C. “Propiedades del Cemento”. Tesis de Grado. Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2001.
3. Amorero, G. J. “Modelo geomecánico semi-acoplado a un modelo de flujo de fluidos en medios porosos”. Tesis de Postgrado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Postgrado de Ciencias Geológicas. (Sometido a publicación)
4. Beer, F. P. Johnston, E. R. “Mecánica de Materiales”. Mc Graw Hill. México 1997.
5. Behrman, L. Brooks, J.E. Farrant S. y otros. “Técnicas de diseño de los disparos para optimizar la productividad”. Shlumberger Oilfield Review. 2000.
6. Caliste Pad, A. “Técnicas de cañoneo, colocación de tapones de cemento y cementaciones forzadas con Coiled Tubing”. Trabajo Especial de Grado. Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Maracaibo. 1997.
7. Cinco-Ley, H. Ramey, H. J., Jr., Miller, F. G. “Pseudoskin Factors for Partially Penetrating Directionally Drilled Wells”. SPE 5589. 1975.
8. Craft, B. C. Hawkins, M. F. “Applied Petroleum Reservoir Engineering”. Prentice Hall PTR. United States 1990.

9. Cvetkovic, B. Economides, M. J., Omrcen, B. y Longaric, B. "Production from Heavy Gas Condensate Reservoirs". SPE 20968. 1990.
10. Dourtoyne, Jr. A. T., Millheim Kith, K., Chenever, M. E., Young, Jr. S. S. "Applied Drilling Engineering". SPE Petroleum Engineering Series V. 2. 2da. Edición. Texas Richardson, 1991.
11. Durelli, A. J. "Applied stress analysis". Prentice-Hall. India 1970
12. Economides, M. J. Hill, D.A. Ehlig-Economides, C. "Petroleum production system". Prentice Hall. Petroleum Engineering Series. 1994.
13. "FloSystem User Documentation". Version 3.6e. Edinburgh Petroleum Services LTD. Octubre 2001.
14. Frick, T. P., y Economides, M. J. "Horizontal Well Damage Characterization and Removal". SPE 21795. 1991.
15. Fussel, D. D. "Single-Well Performance Predictions for Gas Condensate Reservoirs". JPT. Pags. 860-870. Julio 1973.
16. Hassen, B. R. "New Technique Estimates Drilling Fluid Filtrate Invasion". SPE 8791. 1980.
17. Hawkins, M. F., Jr. "A Note on the Skin Effect". Trans. AIME 207. Pags. 356-357. 1956.
18. Karakas, M. Tariq, S.M. "Semianalytical Productivity Models for Perforated Completion". SPE 18247. 1991.

19. King, G. E., Anderson, A. , y Bingham, M. “A Field Study of Underbalance Pressures Necessary to Obtain Clean Perforations Using Tubing-Conveyed Perforating”. SPE 14321. 1985.
20. Krueger, R. F. “An Overview of Formation Damage and Well Productivity in Oilfield Operations”. JPT. Pags. 131-152. Febrero 1986.
21. Locke, S. “An advance Method for Predicting the Productivity Ratio of a Perforated Well”. JPT. Diciembre 1981.
22. Lopez, A. Peñar, B. “Diseño Óptimo de Completación utilizando la Técnica de Cañoneo de Bajo balance y alta Densidad Bloque V Campo Centro”. Tesis de grado. Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Maracaibo. 1995.
23. Ott, R. E. Bell, W. T. Harrigan, J. W. Golian, T. G. “Simple Method Predicts Downhole Shaped Charge”. SPE 27424. 1993.
24. Pineda, F. Tapia, D. “Caracterización Estadística de las Técnicas de cañoneo, Estimulación y Pesca en los trabajos de Rehabilitación de Pozo de Edad Mioceno en el Lago de Maracaibo”. Informe de Pasantías. Maracaibo. Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Petróleo. 2001.
25. Popov, E. P. “Introducción a la mecánica de sólidos”. Editorial Limusa. México 1990.
26. Reddy, J. N. “An introduction to the finite element Method”. Mc Graw Hill. United States. 1984.
27. Tariq, S. M. “Supplement to SPE 18247, Semianalytical Productivity Models for Perforated Completions”. SPE 21477. Abril 11 de 1990.

28. Timoshenko, S. MacCullough, G. H. "Elements of Strength of Materials". Tercera Edición. Junio 1949.
29. Zienkiewicz, O. C. "El método de los Elementos Finitos". Editorial Reverte S.A. Barcelona (España). 1979.

Direcciones en Internet

- www.inlab.com.ar
- www.Titancompletion.com
- www.corelab.com
- www.bakerhughes.com
- www.spe.org
- www.owentools.com
- www.glossary.oilfield.slb.com

La información fue obtenida entre el 01-9-02 y el 30-11-02.

Anexos

Tabla A-1. Constantes para el cálculo de “skin” de cañoneo parcial. [7]

Tabla A-1

Skin de Cañoneos Parciales				$(h_D = 100)^a$		
θ°	h_D	z_w/h	h_w/h	$s_{\theta+c}$	s_c	s_θ
0	100	0.95	0.1	20.810	20.810	0
15				20.385	20.810	-0.425
30				18.948	20.810	-1.861
45				16.510	20.810	-4.299
60				12.662	20.810	-8.147
75				6.735	20.810	-14.074
0	100	0.8	0.1	15.809	15.809	0
15				15.449	15.809	-0.36
30				14.185	15.809	-1.623
45				12.127	15.809	-3.682
60				8.944	15.809	-6.864
75				4.214	15.809	-11.594
0	100	0.6	0.1	15.257	15.257	0
15				14.898	15.257	-0.359
30				13.636	15.257	-1.621
45				11.583	15.257	-3.674
60				8.415	15.257	-6.842
75				3.739	15.257	-11.517
0	100	0.5	0.1	15.213	15.213	0
15				14.854	15.213	-0.359
30				13.592	15.213	-1.620
45				11.540	15.213	-3.673
60				8.372	15.213	-6.841
75				3.699	15.213	-11.514
0	100	0.875	0.25	8.641	8.641	0
15				8.359	8.641	-0.282
30				7.487	8.641	-1.154
45				5.968	8.641	-2.673
60				3.717	8.641	-4.924
75				0.464	8.641	-8.177
0	100	0.75	0.25	7.002	7.002	0
15				6.750	7.002	-0.251
30				5.969	7.002	-1.032
45				4.613	7.002	-2.388
60				2.629	7.002	-4.372
75				-0.203	7.002	-7.206
0	100	0.6	0.25	6.658	6.658	0
15				6.403	6.658	-0.249
30				5.633	6.658	-1.024
45				4.290	6.658	-2.447
60				2.337	6.658	-4.32
75				0.418	6.658	-7.076
0	100	0.5	0.25	6.611	6.611	0
15				6.361	6.611	-0.249
30				5.587	6.611	-1.023

Tabla A-2. Constantes para el cálculo de “skin” de cañoneo parcial. [7]

Tabla A-2

Skin de Cañoneos Parciales				$(h_D = 100)^a$		
θ°	h_D	z_w/h	h_w/h	$s_{\theta+c}$	s_c	s_θ
45				4.245	6.611	-2.365
60				2.295	6.611	-4.315
75				-0.451	6.611	-7.062
0	100	0.75	0.5	3.067	3.067	0
15				2.878	3.067	-0.189
30				2.308	3.067	-0.759
45				1.338	3.067	-1.729
60				-0.082	3.067	-3.150
75				-2.119	3.067	-5.187
0	100	0.6	0.5	2.430	2.430	0
15				2.254	2.430	-0.176
30				1.730	2.430	-0.700
45				0.838	2.430	-1.592
60				-0.466	2.430	-2.897
75				-2.341	2.430	-4.772
0	100	0.5	0.5	2.369	2.369	0
15				2.149	2.369	-0.175
30				1.672	2.369	-0.697
45				0.785	2.369	-1.584
60				-0.509	2.369	-2.879
75				-2.368	2.369	-4.738
0	100	0.625	0.75	0.924	0.924	0
15				0.778	0.924	-0.145
30				0.337	0.924	-0.587
45				-0.411	0.924	-1.336
60				-1.507	0.924	-2.432
75				-3.099	0.924	-4.024
0	100	0.5	0.75	0.694	0.694	0
15				0.554	0.694	-0.139
30				0.134	0.694	-0.560
45				-0.581	0.694	-1.275
60				-1.632	0.694	-2.326
75				-3.170	0.694	-3.864
0	100	0.5	1	0	0	0
15				-0.128	0	-0.128
30				-0.517	0	-0.517
45				-1.178	0	-1.178
60				-2.149	0	-2.149
75				-3.577	0	-3.577

Tabla A-3. Constantes para el cálculo de “skin” de cañoneo parcial. [7]

Tabla A-3						
Skin de Cañoneos Parciales						
$(h_D = 1000)^a$						
θ°	h_D	z_w/h	h_w/h	$s_{\theta+c}$	s_c	s_θ
0	1000	0.95	0.1	41.521	41.521	0
15				40.343	41.521	-1.178
30				36.798	41.521	-4.722
45				30.844	41.521	-10.677
60				22.334	41.521	-19.187
75				10.755	41.521	-30.766
0	1000	0.8	0.1	35.840	35.840	0
15				34.744	35.840	-1.095
30				31.457	35.840	-4.382
45				25.973	35.840	-9.867
60				18.261	35.840	-17.599
75				8.003	35.840	-27.837
0	1000	0.6	0.1	35.290	35.290	0
15				34.195	35.290	-1.095
30				30.910	35.290	-4.380
45				25.430	35.290	-9.860
60				17.710	35.290	-17.580
75				7.522	35.290	-27.768
0	1000	0.5	0.1	35.246	35.246	0
15				34.151	35.246	-1.095
30				30.866	35.246	-4.380
45				25.386	35.246	-9.860
60				17.667	35.246	-17.579
75				7.481	35.246	-27.765
0	1000	0.875	0.25	15.733	15.733	0
15				15.136	15.733	-0.597
30				13.344	15.733	-2.389
45				10.366	15.733	-5.367
60				6.183	15.733	-9.550
75				0.632	15.733	-15.101
0	1000	0.75	0.25	14.040	14.040	0
15				13.471	14.040	-0.569
30				11.770	14.040	-2.270
45				8.959	14.040	-5.081
60				5.047	14.040	-8.993
75				-0.069	14.040	-14.109
0	1000	0.6	0.25	13.701	13.701	0
15				13.133	13.701	-0.568
30				11.437	13.701	-2.264
45				8.638	13.701	-5.063

Tabla A-4. Constantes para el cálculo de “skin” de cañoneo parcial. [7]

Tabla A-4

Skin de Cañoneos Parciales ($h_D = 1000$)^a

θ°	h_D	z_w/h	h_w/h	$s_{\theta+c}$	s_c	s_θ
60	1000	0.5	0.25	4.753	13.701	-8.948
75				-0.288	13.701	-13.989
0				13.655	13.655	0
15				13.087	13.655	-0.568
30				11.391	13.655	-2.264
45	8.593	13.655	-5.062			
60	4.711	13.655	-8.944			
75	-0.321	13.655	-13.976			
0	1000	0.75	0.5	5.467	5.467	0
15				5.119	5.467	-0.348
30				4.080	5.467	-1.387
45				2.363	5.467	-3.104
60				-0.031	5.467	-5.498
75	-3.203	5.467	-8.670			
0	1000	0.6	0.5	4.837	4.837	0
15				4.502	4.837	-0.335
30				3.503	4.837	-1.334
45				1.858	4.837	-2.979
60				-0.424	4.837	-5.261
75	-0.431	4.837	-8.268			
0	1000	0.5	0.5	4.777	4.777	0
15				4.443	4.777	-0.334
30				3.446	4.777	-1.331
45				1.806	4.777	-2.971
60				-0.467	4.777	-5.244
75	-3.458	4.777	-8.235			
0	1000	0.625	0.75	1.735	1.735	0
15				1.483	1.735	-0.252
30				0.731	1.735	-1.004
45				-0.512	1.735	-2.247
60				-2.253	1.735	-3.988
75	-4.595	1.735	-6.330			
0	1000	0.5	0.75	1.508	1.508	0
15				1.262	1.508	-0.246
30				0.528	1.508	-0.980
45				-0.683	1.508	-2.191
60				-2.380	1.508	-3.888
75	-4.665	1.508	-6.173			
0	1000	0.5	1	0	0	0
15				-0.206	0	-0.206
30				-0.824	0	-0.824
45				-1.850	0	-1.850
60				-3.298	0	-3.298
75	-5.282	0	-5.282			

Anexo A-5. Tabla API para la carga 4 5/8 utilizada en el modelo. Se muestran las condiciones de la prueba en la parte superior y los resultados de la sección 1, los resultados de la sección 2 no están incluidos.[1]

