

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CORONA DE UNA BROCA DE EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS, CON INSERTOS DE MATRIZ DE ACERO RÁPIDO, RECUBIERTA DE CARBURO DE TUNGSTENO CON NANOTUBOS DE CARBONO Y UNA CAPA EXTERNA DE DIAMANTE POLICRISTALINO SINTÉTICO”

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Pérez Z, Rodolfo E;

Reina B. Nathalie M;

Para optar al Título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, Enero de 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CORONA DE UNA BROCA DE
EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS, CON INSERTOS DE MATRIZ DE ACERO
RÁPIDO, RECUBIERTA DE CARBURO DE TUNGSTENO CON
NANOTUBOS DE CARBONO Y UNA CAPA EXTERNA DE DIAMANTE
POLICRISTALINO SINTÉTICO”**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Crisanto Villalobos.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Pérez Z, Rodolfo E;

Reina B. Nathalie M;

Para optar al Título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, Enero de 2014



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION

Caracas, 14 de marzo de 2014

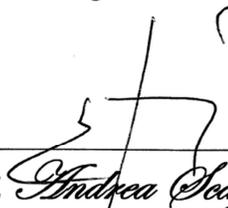
ACTA

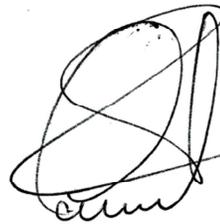
Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el (los) bachiller (es):

Pérez Rodolfo y Reina Nathalie

Titulado: “*Diseño y Construcción de la Corona de una Broca para Extracción de Núcleo, con Insertos de una Matriz de Acero Rápido, Recubierta con Carburo de Tungsteno y Nanotubos de Carbono y una Capa Externa de Diamante Policristalino Sintético*”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. *Andrea Scagni*
Jurado



Prof. *Crisanto Villalobos*
Tutor


Prof. *José G. la Riva*
Jurado



“50 años de la creación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales”

DEDICATORIA

A mis Padres y hermano, que gracias a su aporte, comprensión y paciencia me encuentro el día de hoy por lograr cumplir esta meta, ya que han sido un apoyo incondicional y que en todo momento me motivaron a ser mejor en todo momento.

A Dios, que me acompaña siempre, dándome fuerza de voluntad para seguir todos los días.

A la Universidad Central de Venezuela por otorgarnos los conocimientos éticos y académicos que permitieron formarnos como ingenieros profesionales, integrales, competentes y conscientes a los problemas que agravan a nuestra sociedad.

Al Prof. Crisanto Villalobos que supo darnos apoyo, paciencia y motivación para poder culminar esta etapa tan fundamental e importante de nuestras vidas.

A mi compañera Nathalie Reina por estar siempre atenta y por su paciencia durante la elaboración de este trabajo.

A nuestros familiares y amigos por ayudarnos y darnos el apoyo incondicional en todo nuestro recorrido universitario brindándonos alegría, optimismo y entendimiento para motivarnos en este camino.

Rodolfo E. Perez Z.

DEDICATORIA

A mis Padres y hermanas, gracias a quienes me encuentro el día de hoy por lograr cumplir esta meta, ya que han sido un apoyo incondicional y motivarme a ser mejor en todo momento.

A Dios, que me acompaña siempre.

A mi compañero Rodolfo Pérez y nuestro tutor el Prof. Crisanto Villalobos, por la paciencia y toda su ayuda.

A mis compañeros y amigos, aprendimos a convivir y a apoyarnos mutuamente, a lo largo de la vida universitaria, darnos ánimos y motivarnos mutuamente a seguir adelante.

Nathalie M. Reina B.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento, a todas aquellas personas que colocaron su granito de arena, para poder llevar a cabo la realización de este trabajo.

En primer lugar al Profesor Crisanto Villalobos, por guiarnos, educarnos y ser un apoyo incondicional. Gracias por la infinita paciencia, por el tiempo que invertiste en compartir con nosotros tus conocimientos, gracias a ti culminaremos esta etapa siendo mejores personas y profesionales.

Al personal del galpón de la Escuela de Ingeniería Mecánica, en especial al Sr. Rubén, quién fue fundamental para convertir nuestra idea en algo físico, y hacer el mejor esfuerzo para obtener un excelente resultado.

Al Prof. Scagni y equipo técnico de PLASMATEC S.A INGENIEROS, que con su apoyo y experiencia pudimos realizar con éxito este estudio.

A nuestros compañeros Oscar Hernández y Miguel Piñango, por su apoyo para poder llevar a cabo correctamente los ensayos en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

A nuestro compañero Ramsés Hernández, por su gran apoyo con el manejo de las herramientas computacionales.

Muchísimas Gracias.

Pérez Z., Rodolfo E., Reina B. Nathalie M.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CORONA DE UNA BROCA DE EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS, CON INSERTOS DE MATRIZ DE ACERO RÁPIDO, RECUBIERTA DE CARBURO DE TUNGSTENO CON NANOTUBOS DE CARBONO Y UNA CAPA EXTERNA DE DIAMANTE POLICRISTALINO SINTÉTICO.

Tutor Académico: Prof. Crisanto Villalobos. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

Año 2014, 122 p.

Palabras clave: CORONA, BROCA, NÚCLEOS, AISI H13, INSERTOS, CARBURO DE TUNGSTENO, NANOTUBOS DE CARBONO, DIAMANTE POLICRISTALINO SINTÉTICO.

El objetivo del presente Trabajo Especial de Grado fue el desarrollo del diseño y posteriormente la construcción, de una corona para brocas de extracción de núcleos. Para tal fin se estudió primeramente las características propias del territorio venezolano, que determinarían ciertos aspectos que la herramienta debía incorporar, para su funcionamiento adecuado en el país. Adicionalmente, se estudiaron también las coronas para brocas de extracción de núcleos disponibles en el mercado, ya que la herramienta debe acoplarse a una maquinaria ya existente.

Posterior al diseño de la pieza, se llevó a cabo su construcción. La misma fue sometida a ensayos tanto de desgaste como de microindentación, obteniendo como resultado un excelente desempeño ante condiciones abrasivas, además de altos valores de dureza, lo que es deseable para este tipo de herramientas, incrementando la factibilidad de su uso en la industria petrolera venezolana, reduciendo costos al hacer innecesaria la importación de las mismas.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE FIGURAS	viii
ÍNDICE TABLAS	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. OBJETIVOS	6
3.1. Objetivo General.	7
3.2. Objetivos Específicos.	7
4. MARCO TEÓRICO	8
4.1. Núcleo.	9
4.1.1. Tipos de Núcleos	10
4.2. Herramientas de corte.	11
4.3. Brocas.	12
4.3.1. Tipos de Brocas.	12
4.3.2. Brocas de extracción de Núcleos.	13
4.3.3. Tipos de corona para brocas de extracción de Núcleos.	14
4.3.4. Vías de agua para brocas de extracción de Núcleos.	17
4.4. Escala de Mohs.	19
4.5. Tipos de suelo en Venezuela.	21
4.5.1. Cuenca Occidental.	21
4.5.2. Cuenca Oriental.	22

4.6.	Teoría del desgaste.	23
4.7.	Tipos de desgaste.	26
4.7.1.	Desgaste Adhesivo.	26
4.7.2.	Desgaste Abrasivo.	28
4.7.2.	Desgaste Corrosivo.	29
4.7.2.	Desgaste Erosivo.	29
4.8.	Estudios de desgaste realizados por SANDIA.	32
4.9.	Acero Rápido.	34
4.10.	Carburo de Tungsteno.	36
4.11.	Nanotubos de Carbono.	38
4.12.	Diamante Policristalino Sintético.	40
4.13.	Termorociado.	41
4.13.1.	Principios básicos del Termorociado.	42
4.13.2.	Ventajas del Termorociado.	43
4.14.	PAPVD (Plasma Assisted Physical Vapor Deposition).	44
5.	DESARROLLO DEL DISEÑO	46
5.1.	Planteamiento del problema.	47
5.2.	Aceptación del problema.	49
5.3.	Análisis del problema.	50
5.4.	Alternativas de solución del problema.	53
5.5.	Concepción del sistema.	54
5.5.1.	Definición de parámetros para la matriz de selección.	54
5.5.2.	Selección de dimensiones.	57

5.5.3.	Selección de materiales.	58
5.6.	Construcción de la herramienta.	60
5.6.1.	Torneado.	63
5.6.2.	Fresado.	64
5.7.	Aplicación de recubrimientos.	65
5.7.1.	Termorociado por HVOF.	65
5.7.2.	Recubrimiento de PDC por PAPVD.	67
6.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	68
6.1.	Ensayo de microindentación estática.	69
6.2.	Ensayo de desgaste.	75
6.2.1.	Selección del elemento abrasivo.	77
6.2.2.	Diseño del dispositivo de montaje.	79
6.2.3.	Procedimiento de análisis de resultados.	81
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	84
7.1.	Ensayo de microindentación estática.	85
7.1.1.	Medición de la dureza del sustrato.	85
7.1.2.	Medición de la dureza del recubrimiento.	88
7.1.3.	Cálculo de la dureza intrínseca del recubrimiento.	92
7.2.	Ensayo de desgaste.	96
8.	CONCLUSIONES	113
9.	RECOMENDACIONES	116
10.	BIBLIOGRAFÍA	118
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

ÍNDICE FIGURAS

Figura 4.1.	<i>Corte transversal de una broca para extracción de núcleo con sus partes señaladas.</i>	13
Figura 4.2.	<i>Corona con recubrimiento y sin insertos.</i>	15
Figura 4.3.	<i>Corona con insertos de diamante térmicamente estable (TSD).</i>	15
Figura 4.4.	<i>Corona con insertos de Diamante Policristalino Sintético (PDC).</i>	16
Figura 4.5.	<i>Corona con insertos superficiales de Diamante.</i>	16
Figura 4.6.	<i>Brocas con vías de agua estándar.</i>	17
Figura 4.7.	<i>Brocas con vías de agua cónicas.</i>	18
Figura 4.8.	<i>Brocas con vías de agua turboanchas.</i>	18
Figura 4.9.	<i>Brocas con vías de agua de descarga frontal.</i>	19
Figura 4.10.	<i>Escala de Mohs.</i>	20
Figura 4.11.	<i>Coeficiente de adhesión en función de la dureza y el tipo de estructura cristalina. Desgaste erosivo y erosivo-corrosivo.</i>	28
Figura 4.12.	<i>Desgaste abrasivo (a) a dos cuerpos y (b) a tres cuerpos.</i>	28
Figura 4.13.	<i>Diferentes formas de actuación de partículas erosivas en la formación de: (a) micro corte y micro-arado, (b) Agrietado superficial, (c) Desplazamiento de material al borde de los cráteres de impacto (d) grietas por fatiga superficial y sub-superficiales causadas por los múltiples impactos (e) Formación de pequeñas hojuelas debido a la extrusión y forjado en los impactos y (f) Formación de pequeñas hojuelas por procesos de extrusión inversos.</i>	30

Figura 4.14.	<i>Erosión de una superficie según el ángulo de impacto (a) normal a la superficie y (b) diferente de 90°.</i>	31
Figura 4.15.	<i>Gráfica del desgaste de los cortadores (volumen) en función de la distancia de corte.</i>	33
Figura 4.16.	<i>Gráfica comparativa de varios aceros rápidos.</i>	36
Figura 4.17.	<i>Imagen de Carburo de Tungsteno en forma de polvo.</i>	37
Figura 4.18.	<i>Imagen de una punta de nanotubo realizada mediante un microscopio electrónico.</i>	39
Figura 4.19.	<i>Imagen de la microestructura del Diamante Policristalino Sintético.</i>	41
Figura 4.20.	<i>Imagen de una superficie de trabajo, antes y después del proceso de termorociado.</i>	42
Figura 4.21.	<i>Imágenes del proceso de termorociado HVOF (High Velocity Oxy-Fuel).</i>	43
Figura 4.22.	<i>Imagen del proceso de PAPVD (PLASMA ASSISTED PHYSICAL VAPOR DEPOSITION).</i>	45
Figura 5.1.	<i>Análisis de núcleos.</i>	50
Figura 5.2.	<i>Análisis de Brocas.</i>	51
Figura 5.3.	<i>Análisis de la situación de Venezuela.</i>	52
Figura 5.4.	<i>Planos iniciales de la corona, Vista planta.</i>	61
Figura 5.5.	<i>Planos iniciales de la corona, vista corte A-A y detalle.</i>	62
Figura 5.6.	<i>Torno de torrecilla horizontal marca Boehringer, de 2 m. de bancada.</i>	63
Figura 5.7.	<i>Imagen tridimensional del diseño de la corona para brocas de extracción de núcleos.</i>	64

Figura 5.8.	<i>Corona para broca de extracción de núcleos, antes de ser recubierta.</i>	65
Figura 5.9.	<i>Corona para broca de extracción de núcleos con recubrimiento de Carburo de Tungsteno a través de un Termorociado por HVOF.</i>	66
Figura 6.1.	<i>Imagen de indentación de un ensayo de microindentación.</i>	69
Figura 6.2.	<i>Probeta pulida para el ensayo de microindentación.</i>	70
Figura 6.3.	<i>Micro-durómetro Marca BUEHLER.</i>	71
Figura 6.4.	<i>Representación esquemática de las indentaciones en el sustrato.</i>	72
Figura 6.5.	<i>Representación esquemática de las indentaciones en el recubrimiento.</i>	73
Figura 6.6.	<i>Representación esquemática de las indentaciones en el recubrimiento para hallar la dureza promedio.</i>	74
Figura 6.7.	<i>Montaje del ensayo de desgaste.</i>	76
Figura 6.8.	<i>Estructura geofísica de la Cuenca de Maracaibo.</i>	77
Figura 6.9.	<i>Estructura geofísica de la Cuenca Oriental.</i>	78
Figura 6.10.	<i>Plano del dispositivo de montaje de la pieza de mármol.</i>	80
Figura 6.11.	<i>Balanza analítica marca Denver Instruments, modelo APX-200.</i>	83
Figura 7.1.	<i>Dureza del sustrato en función de la profundidad de la indentación.</i>	87
Figura 7.2.	<i>Dureza del recubrimiento de WC-Co + NT-C en función de la profundidad de la indentación.</i>	90

Figura 7.3.	<i>Gráfica de la dureza del recubrimiento de WC-Co + NT-C en función de la inversa de la diagonal promedio.</i>	94
Figura 7.4.	<i>Esquema de la división de la corona en seis probetas.</i>	96
Figura 7.5.	<i>Esquema de la división del material abrasivo.</i>	103
Figura 7.6.	<i>Gráfica de la masa de la corona para cada tiempo de ensayo.</i>	107
Figura 7.7.	<i>Gráfica de la masa desprendida por el Mármol para cada tiempo de ensayo.</i>	107
Figura 7.8.	<i>Gráfica de la masa de la corona en función de la pérdida de masa del mármol.</i>	110
Figura 7.9.	<i>Desgaste de la corona en función del material removido, para un ensayo simulativo de desgaste acumulativo, con Carbonato (Mármol Rosado), para el caso de la corona y el cortador de PDC, y arenisca, para el caso de los cortadores A, B y C, t refrigeración continua con agua para el caso de la corona y los cortados R, C y PDC, y refrigeración con aire para el cortador A.</i>	111

ÍNDICE TABLAS

Tabla 4.1.	<i>Composición química - % Promedio del acero AISI H13.</i>	35
Tabla 4.2.	<i>Normas por las cuales se rige el acero AISI H13.</i>	35
Tabla 4.3.	<i>Propiedades características del Carburo de Tungsteno.</i>	38
Tabla 5.1.	<i>Matriz de selección para la corona.</i>	55
Tabla 5.2.	<i>Matriz de selección para la configuración de vías de agua.</i>	56
Tabla 5.3.	<i>Medidas estándares del fabricante Boart Longyear, para coronas de extracción de núcleo, con recubrimiento.</i>	57
Tabla 5.4.	<i>Intervalo de composición química de un acero AISI-H13.</i>	58
Tabla 5.5.	<i>Parámetros del Termorociado por HVOF.</i>	67
Tabla 6.1.	<i>Características del Mármol Blanco.</i>	79
Tabla 7.1.	<i>Resultados de la Microindentación Estática aplicada sobre el sustrato de la muestra.</i>	86
Tabla 7.2.	<i>Resultados de la Microindentación Estática aplicada sobre el recubrimiento de WC-Co + NT-C de la muestra.</i>	89
Tabla 7.3.	<i>Resultados de la Microindentación Estática aplicada sobre el recubrimiento de WC-Co + NT-C de la muestra, a diferentes cargas.</i>	93
Tabla 7.4.	<i>Tabla de mediciones de la corona para el tiempo inicial, 0 segundos.</i>	97
Tabla 7.5.	<i>Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 30 segundos.</i>	98

Tabla 7.6.	<i>Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 60 segundos.</i>	99
Tabla 7.7.	<i>Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 300 segundos.</i>	100
Tabla 7.8.	<i>Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 600 segundos.</i>	101
Tabla 7.9.	<i>Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 1200 segundos.</i>	102
Tabla 7.10.	<i>Resultados del ensayo de alto desgaste de 30 s a 36000 s, para el material abrasivo.</i>	104
Tabla 7.11.	<i>Tabla de datos de la corona, para cada tiempo de ensayo.</i>	105
Tabla 7.12.	<i>Tabla de datos del material abrasivo, para cada tiempo de ensayo.</i>	106
Tabla 7.13.	<i>Tabla de datos de la relación de pérdida de Volumen de la corona y el mármol.</i>	109

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria de mayor importancia de nuestro país es la industria petrolera, siendo de ella que se derivan la mayoría de los ingresos económicos para nuestra nación, es por ello que cualquier trabajo de investigación que se realice en función del desarrollo de ésta, podría ser considerado un gran aporte.

Al realizar una investigación relacionada con la industria petrolera venezolana hoy en día, encontramos algunos aspectos que pueden ser considerados limitantes, es por ello que se planteó la necesidad de encontrar soluciones que ayudaran a resolver alguna de ellas. Se encontró que uno de los problemas principales es la falta de disponibilidad de equipos y herramientas para perforaciones petroleras en el mercado nacional.

Se planteó como objetivo del presente trabajo, el diseño y construcción de una corona para brocas de extracción de núcleos, siendo esta una herramienta muy usada en la industria petrolera, y que debe ser importada, ya que no son producidas en el país, lo que implica altos costos para su adquisición y por ende, incrementando los costos de perforación.

Del procedimiento de diseño y su posterior construcción, se busca obtener una herramienta cuya aplicación sea apta para las condiciones de nuestro país, en cuanto a los materiales usados, los cuales se encuentren disponibles en el mercado venezolano, y que también una geometría apta para su uso en suelos venezolanos, mostrando un desempeño adecuado y bajos costos de producción.

ANTECEDENTES

2. ANTECEDENTES

Las perforaciones exploratorias son usadas en la industria de la minería para probar los contenidos minerales de los depósitos conocidos, o de las locaciones potenciales. Mediante la extracción de un núcleo de suelo o roca, de diámetro pequeño, se pueden realizar diversos estudios, tales como análisis químicos, estudios mineralógicos y de estructuras petrológicas, entre otros.

Antes de la invención de las perforadoras portátiles, los estudios se limitaban a excavaciones manuales, que se realizaban con herramientas fabricadas con acero, y por ello había que reemplazarlas con bastante frecuencia, debido a que no poseían la dureza necesaria para la realización de este tipo de trabajos, o una resistencia al desgaste muy limitada. El procedimiento de perforación solía ser lento y engorroso, es por ello que se iniciaron estudios en esta área, con la finalidad de que se pudiera mejorar la eficiencia de las herramientas y alargar su vida útil.

Frederick Winslow Taylor (1898), descubrió que añadiendo Wolframio a un acero aleado en una proporción 18-8, aumentaba su punto de fusión desde 500 °C hasta 800 °C, lo que implicaba que se podía incrementar la velocidad de corte habitual de 10 m/min hasta 40 m/min, por ello se llamaron aceros rápidos, desde entonces fueron muy usados en herramientas de corte, debido a que poseen una buena resistencia a la temperatura y al desgaste, características idóneas en este tipo de aplicaciones.

Posteriormente, se planteó el uso de recubrimientos sobre el acero base, usando diferentes materiales y métodos para realizar dichos recubrimientos, para así lograr una dureza más elevada e incrementar la resistencia al desgaste de la herramienta.

Entre los materiales que se comenzaron a usar como recubrimiento, estaba el Carburo de Tungsteno (WC-Co), el mismo posee una dureza elevada y poca ductibilidad, características aprovechables para una herramienta de corte. También, por ser el material con la dureza más elevada que existe, lógicamente se planteó el uso del diamante como recubrimiento para este tipo de herramienta, pero al ser un material tan costoso y difícil de obtener, se comenzaron a realizar recubrimientos con Diamante Policristalino Sintético, después de su creación en la década de los 50.

Al ser creadas las primeras brocas de perforación y extracción de núcleos con coronas recubiertas de diamante, se logró extender su tiempo de vida y nacieron nuevas áreas relacionadas con la minería, también se expandieron las exploraciones minerales a locaciones remotas.

En la actualidad, la mayoría de las brocas de extracción de núcleo se fabrican con coronas de carburo de tungsteno con recubrimiento o insertos de diamante, ya sea diamante natural, policristalino de diamante (PDC) o diamante térmicamente estable (TSD), siendo así mucho más resistentes a la erosión.

El diseño y construcción de una corona de extracción de núcleos, que son objetivo del presente proyecto, se realizarán usando como matriz del inserto un acero rápido con recubrimiento de carburo de tungsteno, aplicado a través de un proceso de termo rociado (HVOF), con nanotubos de carbono, y finalmente una capa de policristalino de diamante, aplicada a través de un proceso de deposición física en fase de vapor asistida por plasma (PAPVD).

OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general.

Diseñar y fabricar una corona para brocas de extracción de núcleo, con una matriz de acero rápido H13, recubierta de Carburo de Tungsteno (WC-Co) con Nanotubos de Carbono (NTC), aplicada con la técnica de termo rociado HVOF (*High Velocity Oxy-Fuel*) y una capa externa de Diamante Policristalino Sintético (PDC), aplicada a través de un procedimiento de deposición física en fase de vapor asistida por plasma (PAPVD).

3.2. Objetivos específicos.

- Diseño de una corona de corte para una broca de extracción de núcleos, en función del análisis de cualidades de los dispositivos existentes.
- Construcción del prototipo de una corona de corte para una broca de extracción de núcleos, a partir del diseño propuesto.
- Establecer el comportamiento ante condiciones abrasivas y erosivas del prototipo desarrollado de H13-WC-Co-NTC y PDC convencional.
- Obtención de la dureza absoluta del recubrimiento para la muestra de H13-WC-Co-NTC y PDC mediante un análisis de microidentación estática.

MARCO TEÓRICO

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Núcleo.

Es una porción de roca extraída del subsuelo, cortada mediante el uso de una barrena especial, denominada broca de extracción de núcleo. Debido a que la broca es hueca en su parte central, permite recuperar una porción cilíndrica de la roca que va cortando.

Los estudios del yacimiento, intentan definir e interpretar parámetros tanto geológicos como de ingeniería (petrofísicos), y dictan el programa de análisis del núcleo. El mismo, debe integrarse con el análisis de campo y con los datos de producción, para descartar las incertidumbres del yacimiento que no pueden ser eliminadas con los registros de pozo, las pruebas de pozo, o los datos sísmicos únicamente.

El propósito que se persigue al perforar un pozo petrolero, es localizar una estructura que contenga hidrocarburos y que produzca aceite y/o gas en cantidades suficientes para recuperar el costo de perforación y terminación del pozo, de manera que se puedan obtener ganancias.

Durante el curso de la perforación, puede ser necesaria mayor información de las características litológicas y del contenido de los fluidos en las formaciones, antes de tomar la decisión de perforar el pozo y gastar sumas adicionales en la terminación del mismo, así como en materiales y servicios. Para ello se realiza la extracción lo núcleo, los cuales se utilizan principalmente para la caracterización del yacimiento, permitiendo mejores predicciones en cuanto a su explotación, así como también, para evaluar cualquier efecto perjudicial al exponer el yacimiento ante fluidos extraños y evitar o eliminar problemas de producción.

Dependiendo del enfoque que tenga un determinado proyecto, los objetivos de la extracción de núcleos serán diferentes, debe entenderse que estos en ocasiones no son los mismos para los Ingenieros de perforación, que para los Ingenieros de yacimientos, Geólogos, Petrofísicos o Analistas del núcleo. Sin embargo, la extracción del núcleo y el análisis de las muestras, son esenciales para la exploración, desarrollo, y producción dentro de la industria petrolera.

La información obtenida a partir de núcleos, proporciona muy buenos indicios a los ingenieros para mejorar la comprensión del yacimiento y la predicción de su comportamiento. Si se almacenan apropiadamente, las muestras pueden ayudar en el desarrollo de yacimiento muchos años después de que el pozo es perforado.

Del análisis de los núcleos se obtiene información sobre:

- Litología.
- Porosidad.
- Permeabilidad.
- Saturación aceite-gas y agua.
- Interfaces aceite-agua, gas-aceite.
- Rumbo y echado de las capas.

4.1.1. Tipos de núcleos.

Existen dos tipos de núcleos:

- Núcleos convencionales o de fondo de agujero: son los obtenidos mediante el corte de la roca, cuando al mismo tiempo dicho corte incrementa la longitud perforada del pozo.
- Núcleos de pared: son los que se obtienen al cortar una porción de la roca de las paredes de un pozo ya perforado y no incrementan la profundidad de la perforación.

4.2. Herramientas de corte.

Una herramienta de corte es el elemento utilizado para extraer material de una pieza o cualquier otra superficie, ya sea para llevar a cabo un proceso de mecanizado, tales como fresado, torneado, entre otros; o un proceso de perforación, en el caso de la industria petrolera, que se requiere colocar la herramienta de corte en una sarta de perforación.

Existen herramientas de corte de muchos tipos, dependiendo del tipo de máquina a usar y su aplicación, pero todas ellas funcionan a través del arranque de viruta, por lo que abarcan todas aquellas herramientas que permitan arrancar, cortar o dividir algo a través de una superficie filosa. Al haber una gran diferencia de velocidades entre dicha superficie cortante y la pieza, cuando entran en contacto, se arranca material y se desprende la viruta.

Estas herramientas de corte son de mucha utilidad, sobre todo en la industria la petrolera, de construcción, entre otras. Para ser eficientes, todas ellas deben poseer las siguientes características:

- Presentar una alta resistencia al desgaste.
- Conservar su filo aún en temperaturas muy elevadas.
- Buenas propiedades de tenacidad.
- Bajo coeficiente de fricción.
- Alta resistencia a los choques térmicos.
- Debe ser una herramienta que no necesite volverse a afilar constantemente.

En la mayoría de los procesos industriales, de alguna manera se involucran tanto la conformación y/o el corte, sobre todo en los empleados por el sector petrolero y metal-mecánico. Para llevar a cabo dichos procesos se utiliza una gran gama de herramientas, dependiendo de las distintas aplicaciones. En el caso de industria petrolera, existe una amplia variedad de herramientas para la perforación y estudios de suelo, para poder llevar a cabo la extracción del hidrocarburo eficientemente, estas herramientas son denominadas Brocas.

4.3. Brocas.

Las brocas son herramientas de corte metálicas, que crean orificios en diversos materiales, al ser colocadas en una herramienta mecánica tal como el taladro, perforadora, entre otros. Su función principal es remover material para formar un orificio o cavidad cilíndrica.

4.3.1. Tipos de Brocas.

En el área petrolera, se usan dos tipos de brocas principalmente, que son:

- Brocas de perforación: tal como se definió anteriormente, son herramientas metálicas de corte que crean orificios cilíndricos en el suelo, para luego poder extraer hidrocarburos.
- Brocas de extracción de núcleo: son herramientas de perforación para suelos, que poseen un agujero cilíndrico en su parte central, para eliminar la roca sedimentada y permitir el paso del núcleo a través de la broca, mediante un mecanismo interno, para que posteriormente sea extraído a la superficie.

4.3.2. Brocas de extracción de núcleo.

Las brocas de extracción de núcleo constan de varios elementos internos, que permiten que el núcleo sea llevado a la superficie sin afectar su estructura, tal como se muestra en la figura 4.1.

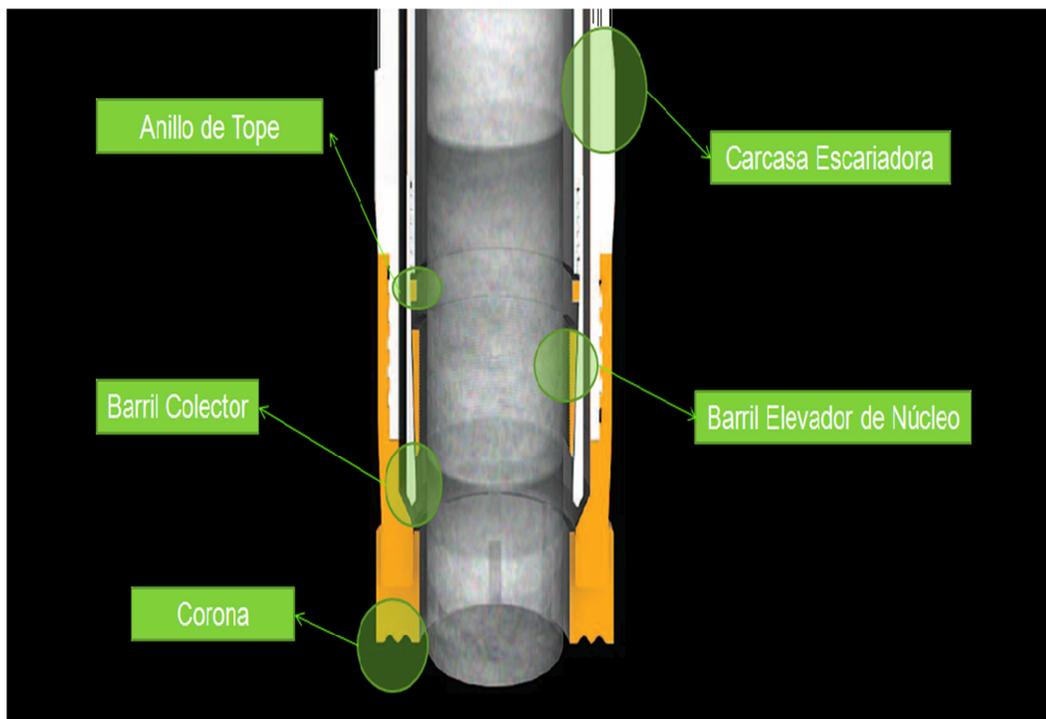


Figura 4.1. Corte transversal de una broca para extracción de núcleo con sus partes señaladas.

- Anillo de tope: es un anillo de acero endurecido, diseñado para asentar en la ranura de acoplamiento, y retener el barril elevador en el barril colector.
- Barril elevador de núcleo: es de acero endurecido, con un cuerpo cónico que se acopla a una toma cónica en el barril colector. El barril elevador de núcleo se pega contra el núcleo y lo retiene después de que se ha roto, permitiendo la recuperación de la superficie.

- Cáscara Escariadora: se utiliza para mantener un determinado diámetro del agujero mientras la sarta de perforación desciende. Adicionalmente, la cáscara escariadora ayuda a estabilizar la sarta de varillas.
- Barril colector: Se empareja con el tubo interior y encierra al barril elevador de núcleo en un zócalo cónico que controla el movimiento del elevador de núcleo.
- Corona: se une al tubo exterior de la broca y es la punta en la parte inferior de una sarta de perforación. Las coronas de extracción de núcleo están disponibles en una amplia gama de configuraciones, que están diseñadas específicamente para funcionar en diferentes condiciones de perforación.

4.3.3. Tipos de corona para brocas de extracción de núcleo.

Existe una amplia gama de configuraciones de coronas disponibles en el mercado, dependiendo condiciones de uso al cual van a estar sometidas. Dependiendo de dichas configuraciones, podemos agruparlas dentro de los siguientes tipos:

- Corona con recubrimiento y sin insertos: se fabrican con una base de metal duro y poseen un recubrimiento de diamante que funcionará como inserto. Son usadas para extraer núcleos en formaciones de suelo que van de medias a ultra-duras, y se muestra en la figura 4.2.
- Corona con insertos de diamante térmicamente estable (TSD): Son usadas para penetraciones rápidas, en formaciones rocosas suaves o medias. Se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.2. Corona con recubrimiento y sin insertos.



Figura 4.3. Corona con insertos de diamante térmicamente estable (TSD).

- Corona con insertos de Diamante Policristalino Sintético (PDC): la corona posee cortadores de PDC, que pueden ser reemplazados para extender la vida del inserto. Son usadas para formaciones suaves con altas tasas de penetración, y se muestra en la figura 4.4.



Figura 4.4. Corona con insertos de Diamante Policristalino Sintético (PDC).

- Corona con insertos superficiales de diamante: se fabrican colocando una capa de pequeños insertos de diamante natural, en una matriz de un metal duro. Las coronas pueden ser manufacturadas con perfiles de diferentes formas para ser usadas en diferentes tipos de formaciones, tal como se muestra en la figura 4.5. Este tipo de brocas generalmente son más útiles formaciones suaves.

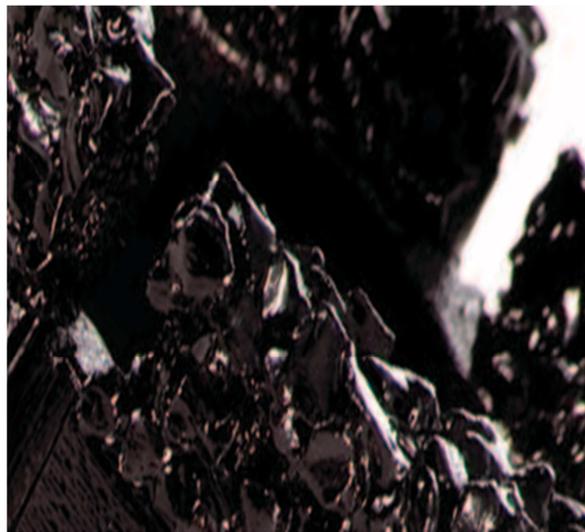


Figura 4.5. Corona con insertos superficiales de Diamante.

4.3.4. Vías de agua para brocas de extracción de núcleo.

Además del tipo de corona, existen diferentes configuraciones geométricas de las brocas para extracción de núcleo, dependiendo de sus usos y aplicaciones. En base a ello, se presentan diferentes tipos de vías de agua, las cuales son ranuras que tienen como función de hacer circular los fluidos, para poder refrigerar la corona durante la perforación.

Entre los distintos tipos de vías de agua se encuentran los siguientes:

- Brocas con vías de agua estándar: Recomendada para propósitos generales de extracción de núcleo, utilizado en brocas pequeñas de pared delgada, y se muestra en la figura 4.6.



Figura 4.6. Brocas con vías de agua estándar.

- Brocas con vías de agua cónicas: Recomendadas para aplicaciones en suelos suaves y fracturados. El efecto chorro de la forma cónica de la vía de agua, aumenta la presión y las mantiene libres de residuos, reduciendo la presión a lo largo de la cara del inserto, tal como se muestra en la figura 4.7.

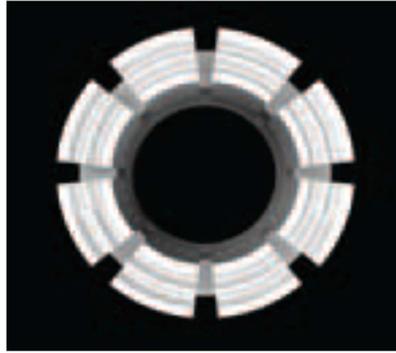


Figura 4.7. Brocas con vías de agua cónicas.

- Brocas con vías de agua turboanchas: Recomendable sobre formaciones duras y compactas. Disminuye la presión requerida sobre la broca para perforar, ya que presenta una buena evacuación de fluido y de los detritos que pudieran bloquear las vías de agua. Provee mayores tasas de penetración en formaciones duras y compactas. El efecto hidráulico del diseño, mostrado en la figura 4.8, mejora la eficiencia del lavado y controla el contacto entre el inserto y la roca. Permite un torque reducido que incrementa la tasa de penetración, por ello es recomendable cuando se está perforando a gran profundidad, debido a que la potencia de la plataforma tiende a disminuirse.

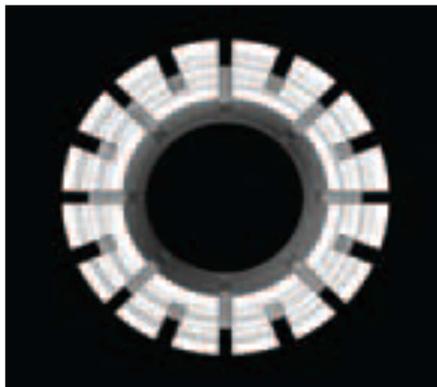


Figura 4.8. Brocas con vías de agua turboanchas.

- Brocas con vías de agua de descarga frontal: Perfil recomendado para terrenos suaves y fracturados. Minimiza el contacto del fluido con la muestra y se recomienda para perforar con triple tubo, y se muestra en la figura 4.9.

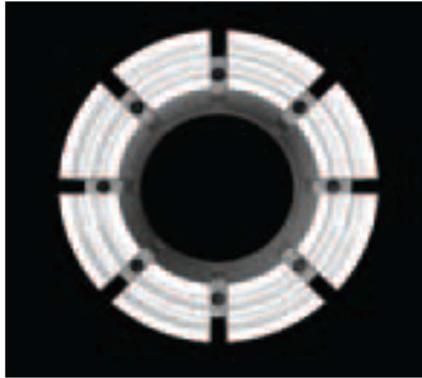


Figura 4.9. Brocas con vías de agua de descarga frontal.

4.4. Escala de Mohs.

La escala de Mohs es una relación de diez materiales ordenados en función de su dureza, de menor a mayor, como referencia de la dureza de una sustancia. La misma fue propuesta por el geólogo Friedrich Mohs en el año 1825, y se basa en el principio de que una sustancia dura puede rayar a una sustancia más blanda, pero no es posible lo contrario.

Mohs eligió diez minerales a los que atribuyó un determinado grado de dureza en su escala, empezando con el talco que recibió el número 1, y terminando con el diamante, al que asignó el número 10, tal como se muestra en la figura 4.10. Cada mineral raya a los que tienen un número inferior a él, y es rayado por los que tienen un número igual o mayor al suyo.

Dureza	Mineral	Característica	Composición química
1	Talco	Se puede rayar fácilmente con la uña	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Yeso	Se puede rayar con la uña con más dificultad	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcita	Se puede rayar con una moneda de cobre	$CaCO_3$
4	Fluorita	Se puede rayar con un cuchillo	CaF_2
5	Apatito	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo	$Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$
6	Ortoclasa	Se puede rayar con una lija de acero	$KAlSi_3O_8$
7	Cuarzo	Raya el vidrio	SiO_2
8	Topacio		$Al_2SiO_4(OH, F)_2$
9	Corindón	Zafiro y rubí son formas de corindón	Al_2O_3
10	Diamante	el mineral natural más duro	C

Figura 4.10. Escala de Mohs.

4.5. Tipos de suelo en Venezuela.

Actualmente en Venezuela, se importan la mayoría de los productos relacionados con la extracción de núcleos, haciendo que la exploración del suelo, en áreas como la minería y la extracción de petróleo, sea más costosa. Cabe acotar que en Venezuela se producen esencialmente todos los tipos de crudos existentes en el mundo (Bitumen, crudo extra pesado, pesado, mediano, liviano y condensado).

Venezuela, por estar ubicada en una zona donde coinciden varias fallas tectónicas, tiene una gran variedad de formaciones en el subsuelo, pasando por formaciones compuestas como areniscas, arcillosas, lutitas, calizas y una gran cantidad de rocas ígneas metamórficas, dependiendo del lugar del país. En el país se han identificado unos 360 campos petrolíferos, que representan más de 17.300 yacimientos de hidrocarburos en una extensión de 11,9 millones de hectáreas (13% del territorio nacional), de las cuales el 52% se encuentra en la provincia Oriental, y el resto en la Provincia Occidental.

La composición del suelo en cada una de las cuencas varía dependiendo la zona del país en que encuentra.

4.5.1. Cuenca Occidental.

Está compuesta por tres sub-cuencas principales, las cuales son:

- Cuenca de Maracaibo: Abarca toda el área circundante al Lago de Maracaibo. Las principales acumulaciones de hidrocarburos se encuentran en las areniscas de origen Deltaico del Eoceno y del Mioceno. Una tendencia general indica que los crudos más livianos y los condensados yacen en las formaciones más antiguas y profundas (Cretácico, Basamento, Paleoceno y Eoceno).

- Cuenca Barinas-Apure: Produce crudos livianos en la zona de Apure, donde los mecanismos de producción utilizados son el hidráulico y el de expansión de los fluidos y crudos livianos, en la zona de Barinas. El empuje hidráulico constituye el mecanismo de producción dominante.
- Cuenca Falcón: las acumulaciones petrolíferas ocurren en rocas del Oligomioceno. En general el petróleo de los campos ubicados al Oeste de Falcón (Tiguaje, El Mene, Hombre Pintado), y de algunos campos del Este (Mene de la Costa, Cumarebo), procede de areniscas en las áreas de La Ensenada y La Vela. La producción proviene de carbonatos y los crudos son livianos con bajo contenido de azufre y metales.

4.5.2. Cuenca Oriental.

Está compuesta por dos sub-cuencas principales, las cuales son:

- Cuenca Guárico: El intervalo productor de la sub-cuenca de Guárico, abarca la Formación Tigre y las Formaciones La Pascua, Roblecito y Chaguáramos. La producción comercial se encuentra en el área mayor de Las Mercedes, donde existen 20 acumulaciones de hidrocarburos, distribuidas en siete campos. Los crudos son de baja gravedad y alta viscosidad hacia el Sur, y los de condensado, los de gas asociado y los de gas libre hacia el Norte. En los inicios de su vida productora, los yacimientos tenían un empuje hidráulico, luego reemplazado con el tiempo, por la segregación de gas como mecanismo de producción.

- Cuenca Maturín: Las acumulaciones más importantes pertenecen a las formaciones del Terciario, principalmente a las del Oligoceno (Formación Merecure) y del Mioceno (Formaciones Oficina y Merecure). Se estima que hay más de 10.000 yacimientos probados, dentro de los cuales predomina el tipo de yacimiento pequeño, con características muy variadas de rocas y de fluidos, y donde se observan todos los tipos de mecanismos naturales de producción. Esta cuenca abarca toda la zona de Anaco, Anzoátegui, Maturín y la Faja del Orinoco.

A pesar de la variedad, en cuanto a formación del subsuelo, en Venezuela predomina el Carbonato de Calcio, el cual es un compuesto químico, de fórmula CaCO_3 , que es el componente principal de minerales y rocas como la Calcita, Aragonito, Caliza, Travertino y el Mármol. En cuanto a su dureza, está ubicado en la categoría número 3 en la escala de Mohs.

Por otra parte, por tener un basamento de rocas ígneas metamórficas a lo largo de todo el país, principalmente en el Cratón de Guayana, en el cual podemos encontrarnos con rocas con alto contenido de Cuarzo o Feldespato, la dureza en la escala de Mohs aumenta hasta 7, dependiendo de la concentración de estos minerales.

4.6. Teoría del desgaste.

Para poder indagar en temas de desgaste en materiales, se debe tener presente que todos los procesos que involucren a dos o más cuerpos y/o piezas, que se encuentren en contacto o con movimiento relativo uno respecto de otro, implica que existe un par tribológico.

La palabra Tribología proviene del término griego “*Tribos*”, que significa frotar o rozar, por lo que tribología se refiere a la ciencia que estudia las superficies que interactúan con otras superficies, o simplemente los mecanismos de fricción.

Puntualmente la tribología se centra en el estudio de tres fenómenos:

1. La fricción entre dos cuerpos.
2. El desgaste como efecto natural del fenómeno de fricción.
3. La lubricación como medio alternativo para evitar el desgaste.

Por ende, es la ciencia de los materiales, el desgaste y deterioro de material que experimenta una superficie solida por acción de otra superficie.

El desgaste, se puede decir que es el proceso de daño superficial que se produce por efecto del contacto mecánico o movimiento relativo entre dos materiales y/o piezas. Generalmente, el desgaste no ocasiona fallas violentas, la fractura repentina no es considerada una forma de desgaste, pero si podría ser tomada en cuenta para el análisis de falla por desgaste, debido a que los materiales más resistentes al desgaste, por lo general son frágiles y propensos a fracturas según **García y Redder (1998)**.

Para el caso de la industria petrolera, que es el área de enfoque del presente trabajo, el desgaste de los elementos de corte de las brocas, trae como consecuencia lo siguiente:

- Reducción de la eficiencia de operación.
- Pérdida de la potencia por fricción.
- Incremento del consumo de lubricante.
- Necesidad de reemplazo de los elementos cortantes y/o herramientas de corte.
- Necesidad de reemplazo total de la maquina.

Estas consecuencias acarrearán problemas en la producción de los pozos, y reducen la eficiencia y productividad de los mismos.

Cabe destacar que en la mayoría de los casos, la variación de la velocidad, de la carga o los cambios de ciertas condiciones, pueden influir notablemente la tasa de desgaste de una pieza determinada.

Czichos 1976, plantea una visión simplificada del problema, en el cual se consideran los factores que influyen en el desgaste, divididos en dos grupos, variables operacionales y variables estructurales.

Las variables operacionales son aquellas que se refieren a la carga aplicada, velocidad, temperatura y tipo de movimiento, mientras que las variables estructurales del sistema tribológico, son aquellas relacionadas con las propiedades volumétricas de los cuerpos en contacto, tales como las dimensiones, geometría, composición química, dureza y microestructura, aunque también se le pueden agregar las propiedades de los cuerpos en contacto, como lo es la rugosidad.

Entre los valores importantes a evaluar, en lo referente al desgaste, se tienen la tasa de desgaste y la tasa de desgaste específica, donde la tasa de desgaste es la pérdida del volumen de la superficie desgastada por unidad de distancia $\left[\frac{mm^3}{m}\right]$, y la tasa de desgaste específica, se define como la pérdida de volumen de la superficie desgastada, por unidad de distancia deslizada multiplicada por la unidad de carga normal aplicada, y se expresa en $\left[\frac{mm^3}{Nm}\right]$.

En el deslizamiento en seco, es decir, sin lubricación, la tasa de desgaste depende de la carga normal, la velocidad de deslizamiento relativo, la temperatura inicial y las propiedades térmicas, mecánicas y químicas de los materiales en contacto.

Existen muchas variables y mecanismos físicos que influyen en el desgaste de maneras distintas, por lo que no se puede hacer un modelo universal de desgaste que se pueda aplicar a todas las situaciones.

4.7. Tipos de desgaste.

Tanto en la industria petrolera como en la industria en general, se distinguen diferentes tipos de desgaste. En función de una amplia variedad de criterios se han logrado definir en cinco tipos primarios de desgaste, existen procesos en los cuales un tipo de desgaste se transforma en otro y en la mayoría de los casos diferentes tipos de desgaste actúan de manera combinada.

4.7.1. Desgaste Adhesivo.

La adhesión está asociada a la formación y posterior rompimiento, de enlaces adhesivos entre las interfaces, cuando dos superficies son colocadas en contacto íntimo. Esta conlleva además, al soldado en frío de las superficies.

Con respecto al desgaste adhesivo, el papel principal lo juega la interacción entre las superficies y su grado de limpieza, es decir, cuando el acercamiento entre los cuerpos es tal, que no se presenta ningún tipo de impurezas, suciedades o capas de óxido, el área de contacto es mayor, pudiéndose formar uniones adhesivas más resistentes.

La presencia de altas presiones localizadas en las asperezas en contacto, también contribuye al desgaste adhesivo, estas asperezas son deformadas plásticamente, permitiendo la formación de regiones soldadas localizadas. El desgaste adhesivo ocurre como resultado de la destrucción de los enlaces entre las superficies unidas, permitiendo que parte del material arrancado se transfiera a la superficie del otro, así la superficie que gana material, aumenta su rugosidad, con el agravante de que cuando el movimiento continúa, se genera desgaste abrasivo contra la otra superficie.

La tendencia a formar regiones adheridas, depende de las propiedades físicas y químicas de los materiales en contacto, al igual que de los valores de carga aplicados y las propiedades de los materiales que estén sobre las superficies, y finalmente de la rugosidad.

Generalmente el contacto entre metales es no metálico debido a la presencia de capas absorbidas, tales como óxidos. La adhesión en este caso se da por medio de enlaces débiles o fuerzas de Van Der Waals. Sin embargo, la deformación elástica o plástica de las asperezas puede provocar rompimiento de estas capas, por lo que la unión de la interface se da por medio de enlaces covalentes y metálicos, siendo los enlaces iónicos insignificantes en los metales.

Mientras la fuerza de adhesión dependa del área real de contacto, esta será influenciada por la resistencia de los materiales a la deformación plástica, por el tipo de estructura cristalina y por el número de sistemas de deslizamiento. **Sikorski (1964)**, mostró que hay una fuerte tendencia a la adhesión de acuerdo al tipo de estructura cristalina que presenten los materiales. En la figura 4.11, se muestra la dependencia del coeficiente de adhesión, en función de la dureza y el tipo de estructura cristalina presente.

El coeficiente de adhesión es definido como la relación entre la fuerza necesaria para quebrar las uniones adheridas, y la carga normal con la cual las muestras fueron inicialmente comprimidas. En la figura también se puede observar que a medida que aumenta la dureza, en general hay una disminución del coeficiente de adhesión.

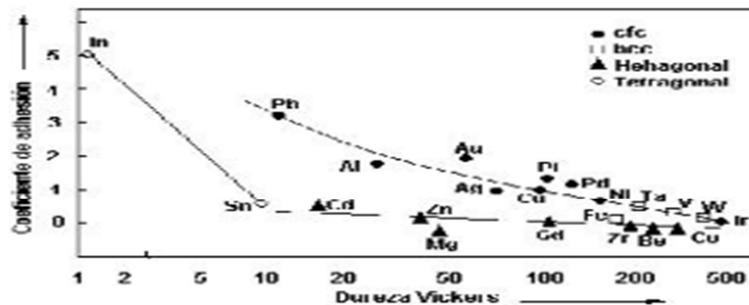


Figura 4.11. Coeficiente de adhesión en función de la dureza y el tipo de estructura cristalina. Desgaste erosivo y erosivo-corrosivo.

Las piezas de maquinaria donde está normalmente se presenta desgaste adhesivo son sistemas biela-seguidor, dados de extrusión-alambre, cola de milano-apoyo, engranajes, rodamiento-apoyo y herramientas de corte.

4.7.2. Desgaste Abrasivo.

La Norma ASTM G40-92, define el desgaste abrasivo como la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras, que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella.

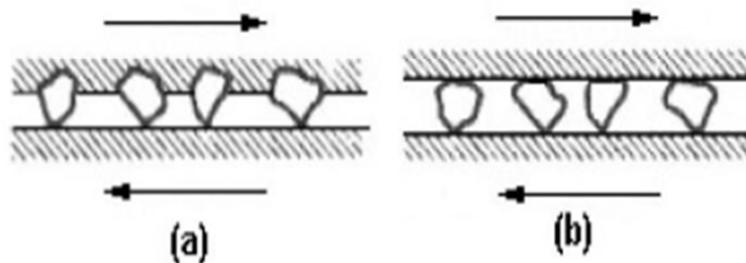


Figura 4.12. Desgaste abrasivo (a) a dos cuerpos y (b) a tres cuerpos.

Como se muestra en la figura 4.12, existen básicamente dos tipos de desgaste abrasivo, estos son:

- Desgaste abrasivo a dos cuerpos: este desgaste es causado por rugosidades duras pertenecientes a una de las superficies en contacto, haciendo que el material más duro desprenda partículas del más blando. Como ejemplo de desgaste abrasivo a dos cuerpos se tiene un taladro penetrando una roca.
- Desgaste Abrasivo a tres cuerpos: es provocado por partículas duras sueltas entre las superficies que se encuentran en movimiento relativo, un ejemplo de este tipo de desgaste abrasivo es el sufrido por las mandíbulas de una trituradora al quebrar la roca, o la presencia de partículas contaminantes en un aceite que sirve para lubricar dos superficies en contacto deslizante.

4.7.3. Desgaste Corrosivo.

La corrosión se define como la reacción superficial de muchos metales con el medio ambiente, creando una capa superficial, como por ejemplo, el óxido. Por lo general, estas películas son duras y crean una capa sobre la superficie, que puede crecer excesivamente volviéndose frágil, y por ende propensas a ser removidas, dejando el material expuesto nuevamente para que el ciclo se vuelva a repetir. Esto trae como consecuencias, que las partículas de dichas capas se conviertan en un tercer cuerpo, lo que puede llegar a producir desgaste abrasivo.

4.7.4. Desgaste Erosivo.

Según **Zum Gahr (1978)**, el desgaste erosivo se presenta en la superficie de los cuerpos, resultado del impacto de partículas sólidas, líquidas o gaseosas que los impactan. Estas partículas pueden actuar solas o de manera combinada.

La erosión afecta muchos materiales objetos de estudio de la ingeniería, especialmente elementos que componen maquinaria usada en la industria minera, y en general toda pieza que sea impactada por cualquier tipo de partícula.

Las partículas que causan el desgaste erosivo pueden encontrarse en ambientes secos o húmedos, actuando en formas muy variadas, tal como se muestra en la figura 4.13. Cuando el medio de trabajo es húmedo (por ejemplo, un medio con agua y partículas de arena), la erosión y la corrosión son fenómenos que actúan en forma sinérgica, provocando la degradación acelerada de los materiales.

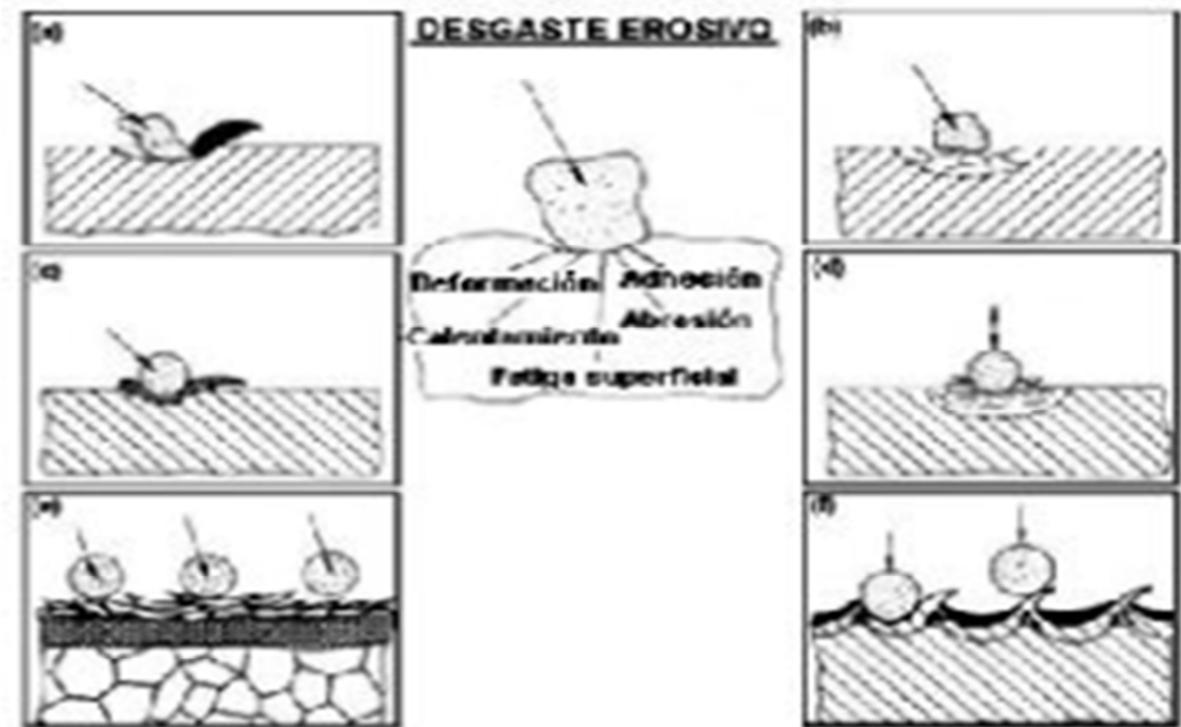


Figura 4.13. Diferentes formas de actuación de partículas erosivas en la formación de: (a) micro corte y micro-arado, (b) Agrietado superficial, (c) Desplazamiento de material al borde de los cráteres de impacto (d) grietas por fatiga superficial y sub-superficiales causadas por los múltiples impactos (e) Formación de pequeñas hojuelas debido a la extrusión y forjado en los impactos y (f) Formación de pequeñas hojuelas por procesos de extrusión inversos. [ZUM GAHR, 1978].

Para el estudio del desgaste de piezas en general, se han propuesto en los últimos años varios modelos teóricos, con estos se intenta comprender los mecanismos de remoción de material y las variables involucradas.

En otras definiciones clásicas de la erosión, se afirma que es un fenómeno por medio del cual, un material es removido de una superficie durante la acción continua de partículas duras o de fluidos que la alcanzan. Las partículas impactan las superficies a diferentes velocidades y ángulos de incidencia, donde el desgaste se da a través de diferentes mecanismos. En la figura 4.14, son presentados esquemas que muestran la forma como partículas erosivas actúan en una superficie, dependiendo del ángulo de incidencia.

Para erosión en ángulos cercanos a 90° , figura 4.14 (a), la energía de la partícula es consumida durante la deformación de la superficie, y para ángulos menores, figura 4.14 (b), esa energía es utilizada en deformar y cortar el material de la superficie.

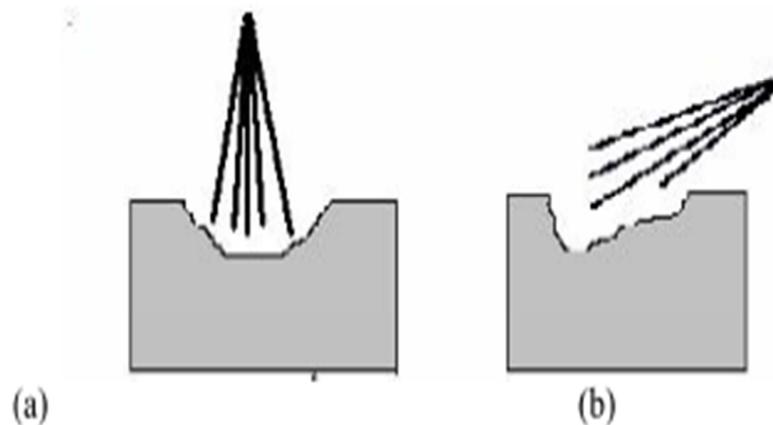


Figura 4.14. Erosión de una superficie según el ángulo de impacto (a) normal a la superficie y (b) diferente de 90° .

4.8. Estudios de desgaste realizados por SANDIA National Laboratories.

Debido a la gran variedad de procesos de desgaste, y la importancia que ellos tienen para la industria, se ha buscado reducir sus efectos, llevado a cabo un gran número de investigaciones y estudios con la intención de producir materiales más duros y resistentes al desgaste, mediante procesos que involucran tratamientos superficiales, mezclas, aleaciones y formación de nuevos compuestos.

En la actualidad, las herramientas de metal duro están siendo recubiertas con carburos, esta tecnología ha encontrado un amplio campo de aplicación en herramientas de taladrado y fresado, para mecanizar tanto fundiciones como aceros.

Han sido desarrolladas varias combinaciones de capas múltiples, con el fin de otorgar las mejores propiedades de los materiales de recubrimiento a la herramienta. El Departamento de Energía de los Estados Unidos, ha realizado estudios relacionados con el uso de recubrimientos de Diamante Policristalino Sintético (PDC) para brocas, en los Laboratorios Nacionales SANDIA, en Albuquerque, Nuevo México.

Se pudo determinar a través de diversos ensayos, en los que se realizaron cortes largos y continuos utilizando cortadores de PDC a diversos tipos de rocas, a diferentes velocidades de corte, que las brocas con recubrimientos de dicho material son óptimas para realizar perforaciones, tanto en superficies suaves como en superficies firmes y duras, también en formaciones no abrasivas.

Dichas pruebas proporcionaron datos importantes en cuanto a los mecanismos de desgaste, índices de desgaste, coeficientes de fricción entre los diferentes tipos de rocas y los cortadores, y tasas de desgaste. Es importante tomar en cuenta que un factor fundamental de dichos ensayos, fueron las condiciones de lubricación en las que se realizó cada corte.

La medición del índice de desgaste durante el ensayo se basó en el volumen de material desprendido del cortador por la distancia de corte. Durante dicho ensayo se mantuvo constante la profundidad de penetración.

La herramienta usada para la realización del ensayo fue un torno vertical, que hacía girar un bloque de piedra arenisca de 3 pies² y un espesor de 1,5 pies, los cortadores de PDC se encontraban montados en un porta herramientas, y con ellos era atravesada la roca por su parte superior. La velocidad de giro de la roca se mantuvo constante, mientras que la velocidad de corte iba disminuyendo a medida que los cortadores penetraban la roca.

La disminución del volumen del cortador fue calculada a partir del aumento de las dimensiones del desgaste plano, que fue medida usando un microscopio después de cada ensayo. Se graficaron los datos de pérdida de volumen para las distintas velocidades, dando como resultado una línea recta para los ensayos realizados en seco con lubricación líquida, tal como se observa en la figura 4.15.

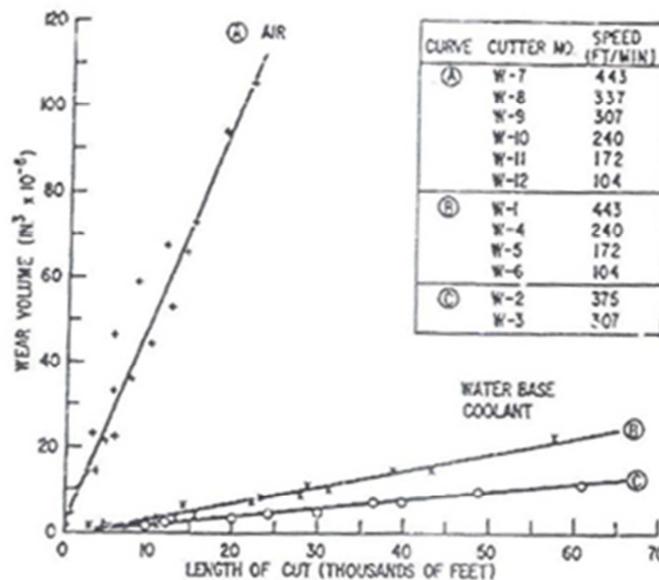


Figura 4.15. Gráfica del desgaste de los cortadores (volumen) en función de la distancia de corte.

Se observó que los mecanismos de desgaste varían dependiendo del lubricante usado durante el corte, y que son independientes a la velocidad de corte aplicada. Esto se alinea con el principio que defiende que el desgaste es proporcional a la distancia de rozamiento, siempre que el mecanismo de desgaste permanezca igual.

A través del estudio de las huellas de desgaste en los cortadores, se encontró que en los cortes realizados sin lubricante, se produjeron severos daños térmicos, entre ellos el debilitamiento del límite de grano y desprendimiento integral.

4.9. Acero Rápido.

Los aceros rápidos fueron creados por el Ingeniero Frederick Winslow Taylor en el año 1898, quién descubrió que al añadir Wolframio a un acero aleado RMS, usado normalmente en herramientas de corte, podía ser aumentado su punto de fusión, y por ende, podía ser incrementada también la velocidad de corte, de allí su nombre, aceros rápidos o de alta velocidad, HSS (High Speed Steel).

Los aceros rápidos son generalmente usados en herramientas de corte, debido a que conservan sus características mecánicas aún a temperaturas relativamente elevadas, permitiendo así grandes velocidades de corte. Son usados en herramientas tales como brocas, fresas y otras herramientas para procesos de mecanizado, también porque poseen altos niveles de dureza, así como una buena resistencia a altas temperaturas y al desgaste.

El acero rápido aleado con Tungsteno y Molibdeno, es el adecuado para las herramientas de corte en las que se requiere mantenimiento de filo, gran tenacidad con buena resistencia al desgaste y mantenimiento de dureza. Si el porcentaje de Tungsteno es superior al 18%, se denominan aceros extra-rápidos.

Entre los aceros rápidos, el de mayor aplicación en herramientas para trabajos en caliente es el acero H13. Este es un acero aleado al Cromo-Molibdeno-Vanadio, al cual se le puede atribuir una excelente tenacidad, junto con una resistencia moderada al desgaste. En las tablas 4.1 y 4.2 se pueden observar las especificaciones del acero AISI H13.

Tabla 4.1. Composición química - % Promedio del acero AISI H13.

C	Si	Cr	Mo	V
0.40	1.00	5.20	1.30	0.95

Tabla 4.2. Normas por las cuales se rige el acero AISI H13.

SAE / AISI	DIN	JIS
H13	1.2344	SKD 61

Entre las aplicaciones del acero H13, están las herramientas para extrusión de Aluminio, Latón y Magnesio, estampas y troqueles de forjado, insertos para inyección de plásticos, moldes para fundición a presión de metales ligeros, rodillos de laminación y herramientas de corte.

En la figura 4.16, podemos observar una gráfica comparativa de la tenacidad y de la resistencia al desgaste, de distintos tipos de aceros para herramientas.

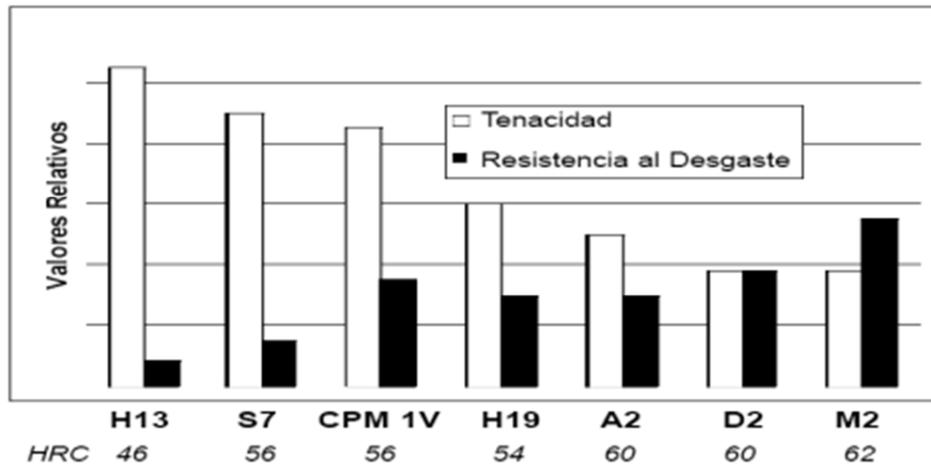


Figura 4.16. Gráfica comparativa de varios aceros rápidos.

4.10. Carburo de Tungsteno.

El carburo de tungsteno (WC-Co) es un compuesto cerámico que pertenece al grupo de los carburos: $W_3C \rightarrow W_6C$. Fue descubierto en 1897, por el químico y Premio Nobel francés Henri Moissan, quién adaptó un horno eléctrico para experimentos científicos, descubriendo varios carburos.

La microestructura del Carburo de Tungsteno es el resultado de dos fases completamente definidas, una metálica que incluye el Tungsteno y otra cerámica que incluye a los Carburos duros, es esta peculiar microestructura la que le proporciona el nombre de cerámico-metálico. Es parte de los recubrimientos metálicos conocidos como cermet, los cuales son ideales para aplicaciones en las cuales es necesaria una alta resistencia al desgaste.

Posee una dureza elevada, de esta característica recibe su otro nombre Widia, como abreviación del alemán "*Wie Diamant*" (como el diamante). Es sumamente dúctil y a su vez duro, las piezas de este material se elaboran a partir de polvo, tal como se muestra en la figura 4.17.



Figura 4.17. Imagen de Carburo de Tungsteno en forma de polvo.

Una de las grandes ventajas industriales que aporta este compuesto, es que aguanta de forma estable hasta una temperatura de 1.600 – 1.700 grados. Es empleado, sobre todo, en la elaboración de utensilios de corte para trabajar metales o el acero, también se utiliza para la construcción de piezas que requieren elevada resistencia térmica o mecánica, tales como cojinetes de ejes, entre otros.

Entre sus características más importantes está la de mantener su dureza incluso a elevadas temperaturas, y también el ser excepcionalmente resistente a la compresión, que es la fuerza dominante aplicada durante el corte.

Cuando es depositado como recubrimiento a través de un procedimiento de termorociado HVOF, muestra una excelente adhesión al material base, baja frecuencia de formación de fases frágiles y poca porosidad. En la tabla 4.3 se pueden observar las propiedades características del Carburo de Tungsteno.

Tabla 4.3. Propiedades características del Carburo de Tungsteno.

Densidad	15.8 g/cm ³
Resistencia a la presión	5300 – 7000 MPa
Dureza Vickers	1100 kgf/ mm ²
Punto de fusión	2870° C / 5198°F
Punto de ebullición	6000°C / 10832°F
Estructura cristalina	Hexagonal compacto

4.11. Nanotubos de Carbono.

Se denominan nanotubos, las estructuras tubulares cuyo diámetro es del tamaño del nanómetro, que equivale en escala a la billonésima parte de un metro:

$$1 \text{ nm} = 1 * 10^{-9}m$$

Existen nanotubos de muchos materiales, tales como el Silicio o el Nitruro de Boro, pero generalmente el término se aplica a los nanotubos de Carbono.

Los nanotubos de Carbono son una forma alotrópica del Carbono, tal como lo son el diamante, y el grafito. Su estructura es similar a varias láminas de grafito enrolladas sobre sí mismas, si estos tubos están formados por una sola lámina de grafito se denominan nanotubos monocapa o de pared simple, si se trata de nanotubos

cuya estructura se compone de una serie de tubos concéntricos, incluidos unos dentro de otros, entonces estos son llamados nanotubos multicapa.

Es el primer material conocido por la humanidad capaz, en teoría, de sustentar indefinidamente su propio peso, también la estabilidad y robustez de los enlaces entre los átomos de carbono, le proporciona la capacidad de ser la fibra más resistente que puede ser fabricada hoy en día. Por otro lado, frente a esfuerzos de deformación muy intensos son capaces de deformarse notablemente y de mantenerse en un régimen elástico. En la figura 4.18 podemos observar la imagen de la punta de un nanotubo de carbono.

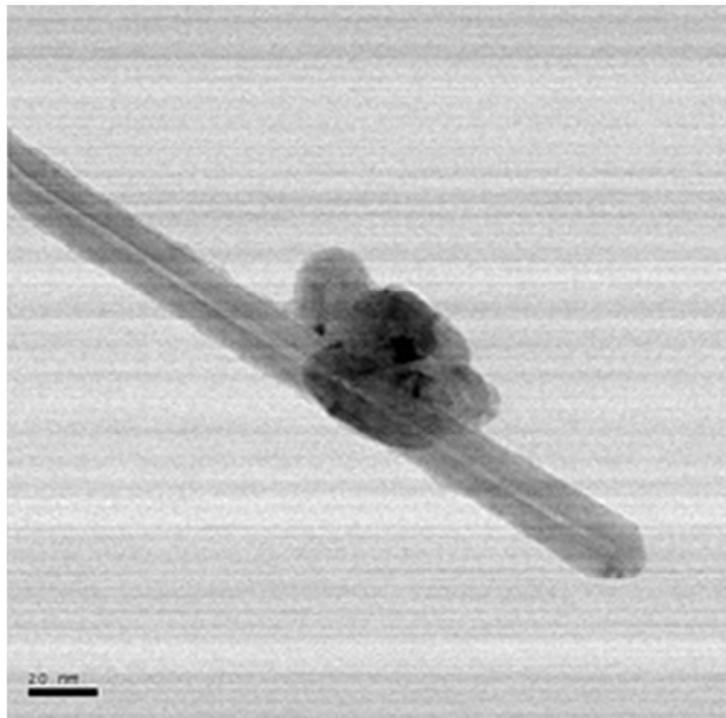


Figura 4.18. Imagen de una punta de nanotubo realizada mediante un microscopio electrónico.

4.12. Diamante Policristalino Sintético.

El Diamante Policristalino Sintético (PDC), es un compuesto de partículas de diamante sintético, los cuales son obtenidos a partir de procesos tecnológicos, a diferencia de los diamantes naturales.

Los intentos para crear diamantes artificiales o sintéticos comenzaron a partir de 1879, pero no fue hasta 1940 que se iniciaron investigaciones en Estados Unidos, Suecia y la Unión Soviética con éste fin, utilizando procesos de deposición química en fase de vapor, y procedimientos a altas presiones y temperaturas. Fue en 1953 que se reportó por primera vez la creación exitosa de diamante sintético. Estos procesos siguen dominando hoy en día la producción de diamantes sintéticos.

Los diamantes sintéticos varían de acuerdo al método usado para su manufactura, basados en su mayoría en la síntesis de alta presión y temperatura, y la deposición física o química en fase de vapor. También sus propiedades, dependerán de los detalles de los procesos de producción, y estas pueden ser inferiores o superiores a las de los diamantes naturales, algunas propiedades como la conductividad térmica y movilidad electrónica son superiores en algunos diamantes sintéticos.

Entre las características más resaltantes del Diamante Policristalino Sintético o PDC, se encuentran su elevada dureza, resistencia al rozamiento y elevada tenacidad. Por ser el material más duro que existe y, por tanto, el más resistente a la abrasión, se le da usos industriales, entre ellos el corte, perforado (brocas de perforación), abrasión (cortadores con filo de diamante), y pulido. Los diamantes son insertados en puntas de taladros u hojas de sierras, o dispersados en un polvo para su uso en lijas y aplicaciones de pulido. En la Figura 4.19 observamos la configuración de la microestructura del Diamante Policristalino Sintético.

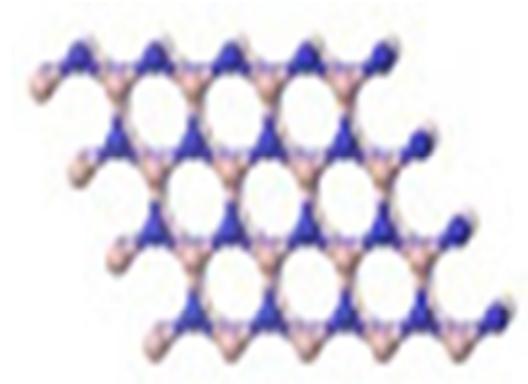


Figura 4.19. Imagen de la microestructura del Diamante Policristalino Sintético.

4.13. Termorociado.

Es un proceso de alta tecnología para la creación de recubrimientos superficiales funcionales. Consiste en la proyección de partículas metálicas o no metálicas, fundidas o semifundidas, con alta velocidad, sobre la superficie a recubrir, logrando así redimensionarla, protegerla contra el medio ambiente y/o modificar sus propiedades mecánicas, según sea el caso.

José Gregorio La Barbera Sosa (2008), en su Trabajo de Tesis Doctoral titulado “Comportamiento a la fatiga del acero SAE 1045 recubierto con Colmonoy 88 depositado por termorociado HVOF: efecto de la distancia de rociado.”, establece que el termorociado o proyección térmica, incluye todos aquellos procesos en los cuales los materiales que serán parte del recubrimiento de una determinada pieza, son parcial o totalmente fundidos, dentro o fuera de una pistola de proyección. Las partículas, ya sea que estén en estado líquido o sólido, son depositadas sobre la superficie de la pieza, apilándose y formando el recubrimiento.

Los procesos de proyección térmica se clasifican de acuerdo a la fuente de energía usada para calentar y acelerar las partículas del material a usar como recubrimiento. En el caso de la proyección térmica supersónica, la fuente de energía usada es combustible, de allí sus siglas “HVOF” (*High Velocity Oxy-Fuel*).

4.13.1. Principios básicos del Termorociado.

En una boquilla se alimenta oxígeno con un gas combustible, el cuál al quemarse, genera la temperatura necesaria para fundir el material que es alimentado en forma de polvo o alambre. Una corriente de aire lo atomiza, y parte de la energía generada por la combustión acelera las partículas, proyectándolas a velocidades superiores a la velocidad del sonido hacia la superficie de trabajo. La solidificación de las partículas forma un recubrimiento, adhiriéndose al substrato y conformando así un recubrimiento denso con una dureza generalmente superior a la del material base, tal como se muestra en la Figura 4.20.

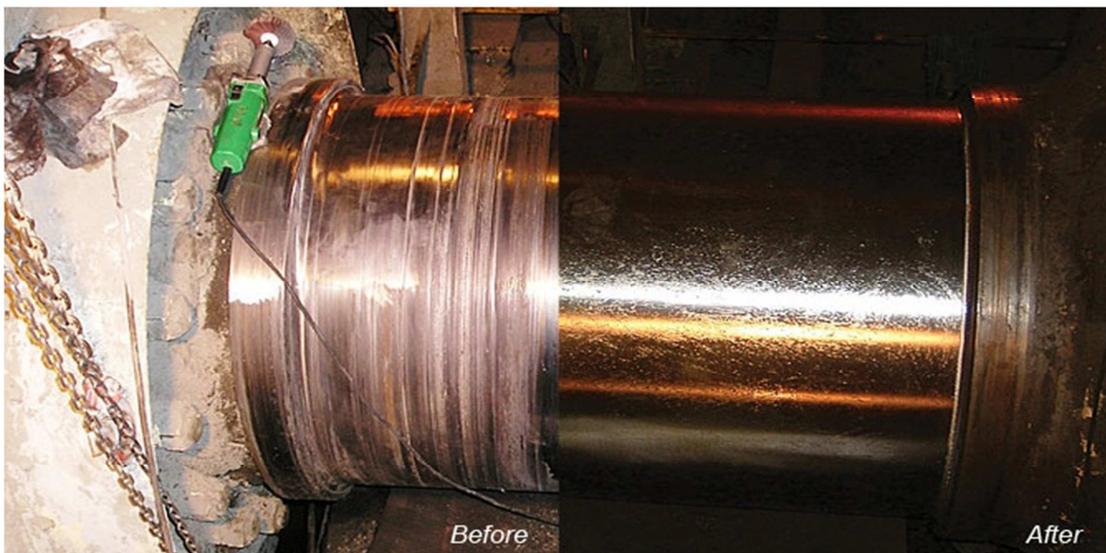


Figura 4.20. Imagen de una superficie de trabajo, antes y después del proceso de termorociado.

4.13.2. Ventajas del Termorociado.

- El recubrimiento aumenta la resistencia al desgaste, ya sea por abrasión, cavitación o erosión.
- Incrementa la resistencia a la corrosión por agentes agresivos como ácidos, gases sulfurosos y solventes.
- Mejora las propiedades mecánicas del material base.

El termorociado se puede considerar un proceso a baja temperatura, debido a que no sobrepasa los 200 °C durante la deposición del recubrimiento, eliminándose así las deformaciones y los cambios en la microestructura del material base, tal como se observa en la figura 4.21.

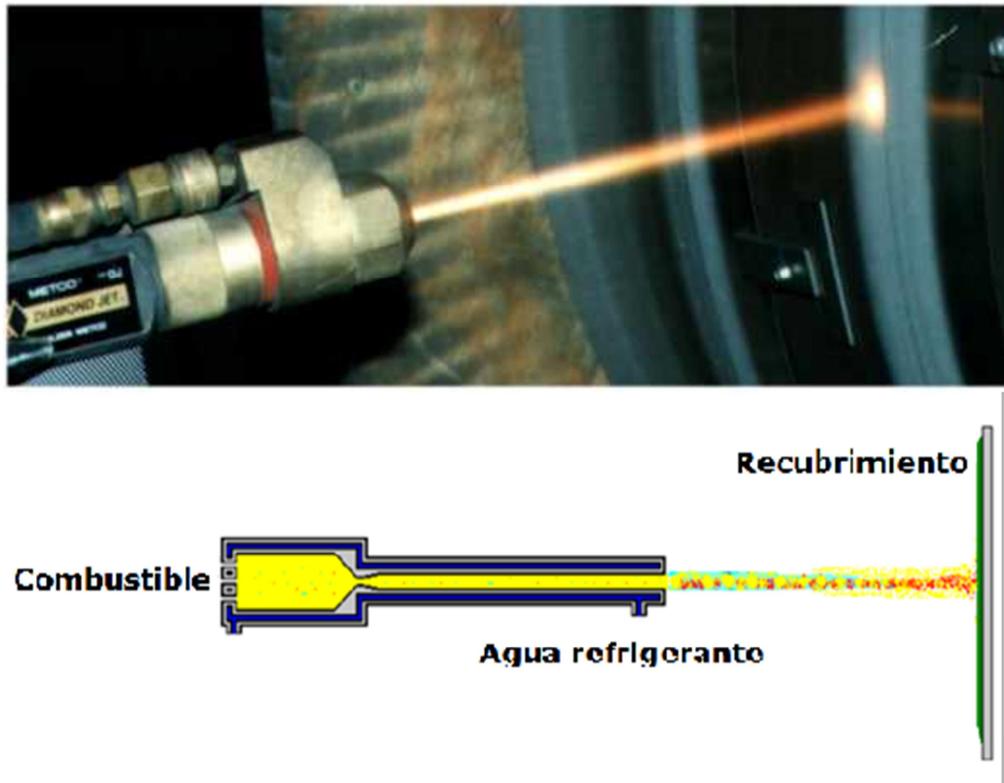


Figura 4.21. Imágenes del proceso de termorociado HVOF (High Velocity Oxy-Fuel).

4.14. PAPVD (Plasma Assisted Physical Vapor Deposition).

Crisanto Villalobos (2012), en su Trabajo de Tesis Doctoral titulado “Evaluación del comportamiento a la fatiga de un acero estructural recubierto con depósitos tipo multicapa obtenidos por PAPVD”, plantea que el procedimiento de Deposición Física en Fase Vapor Asistida por Plasma, PAPVD por sus siglas en inglés, consiste en un reactor, que no es más que un espacio confinado donde ocurre una reacción, y que funciona como autoclave debido a que se controlan la presión y la temperatura. Dentro de este, se genera un vacío ultra-alto con la finalidad de que solo existan allí las especies a incorporar al sustrato.

Debido a que el recubrimiento del inserto será de diamante policristalino sintético, debe ser incorporado al reactor algún gas reductor del que se puedan extraer los átomos de Carbono, tales como metano, o propano o alcanfor, entre otros.

Con un cañón de electrones se dispara sobre el gas dentro del reactor, para ionizarlo y llevarlo al estado de plasma, y que de esta manera adquiera un comportamiento colectivo, propio de dicho estado de la materia. Posteriormente se hace pasar un potencial negativo a través de la pieza a recubrir, de manera que las cargas positivas del Carbono en el plasma, migren hacia la pieza, y el carbono quede incorporado a ella, formándose el recubrimiento. Dependiendo de la frecuencia del potencial negativo que se hace pasar a través de la pieza, se verá modificada la estructura de los átomos de Carbono del recubrimiento, en este caso se busca que tome una estructura de diamante, tal como es la del PDC.

En la figura 4.22, podemos observar una representación gráfica del procedimiento de PAPVD dentro de un reactor.

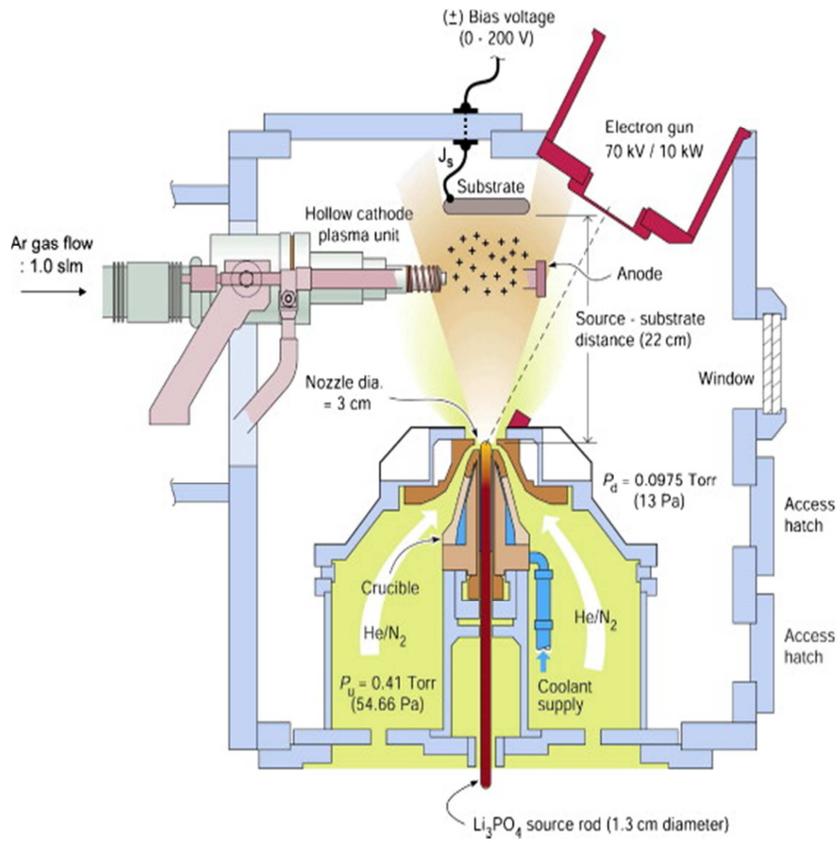


Figura 4.22. Imagen del proceso de PAPVD (PLASMA ASSISTED PHYSICAL VAPOR DEPOSITION).

DESARROLLO DEL DISEÑO

5. DESARROLLO DEL DISEÑO

Se realizó un procedimiento de diseño, a partir del cual se obtendría la solución más eficiente a una necesidad específica, tal como lo es la extracción de núcleos en Venezuela, con tecnología desarrollada en el país.

5.1. Planteamiento del problema.

Venezuela actualmente se encuentra en el segundo puesto de países con reservas probadas de crudo explotable, en catorceavo lugar dentro de los países productores de petróleo, en noveno lugar en reservas probadas de gas natural y en el vigesimoséptimo lugar de países productores de gas natural, según “*The World Fact Book*” publicado por la C.I.A. en el 2011.

Ahora, siendo un país productor de petróleo y gas natural, que cuenta con altas reservas de los mismos, se presenta la necesidad imperativa de generar menor cantidad de costos, y maximizar la eficiencia en cuanto a la perforación y estudios previos, como lo es la extracción de núcleos, para así poder generar mayores ganancias para el país.

La información de los núcleos, obtenida de muestras de rocas recuperadas en una formación de interés, la cual juega un papel vital en los programas de exploración, operaciones de completación y reacondicionamiento de pozos, así como en la evaluación de yacimientos. Estos datos son proporcionados por el análisis de núcleos, e indican una evidencia positiva de la presencia de petróleo, la capacidad del yacimiento de almacenar de los fluidos (porosidad), y la capacidad y distribución del flujo (permeabilidad) esperado. Las saturaciones residuales de los fluidos permiten la interpretación de la producción probable de petróleo, gas o agua.

El análisis de núcleos es parte muy importante del programa general de evaluación de un yacimiento, pues facilita la evaluación directa de sus propiedades y provee bases para la calibración de otras herramientas de evaluación, tal como los perfiles. No se le puede tomar núcleos a todos los pozos porque tal operación es costosa, sin embargo, los planes iniciales para el desarrollo de un yacimiento deben tomar en cuenta la extracción de núcleos en un número razonable de pozos. Estos deben seleccionarse de manera que cubran un área representativa del yacimiento.

Es lamentable que en Venezuela no exista tecnología nacional para producir las coronas de corte, que son parte fundamental de las herramientas utilizadas para la extracción de núcleos de los pozos.

En muchos casos, la reposición de componentes cortantes desgastados es fundamental para la operación y subsistencia de las herramientas. Por ejemplo, el desgaste de las brocas genera pérdidas económicas, debido a paradas no programadas, disminución de la eficiencia en la perforación y problemas en la obtención del repuesto original desgastado. Estas coronas representan el 70% del valor comercial de la herramienta y el consumo de estas representa el 5% del costo de la operación de producción del pozo, es por ello que Venezuela está latente en la necesidad de tener un proveedor, capaz de fabricar con materia prima venezolana, todas las herramientas relacionadas con la extracción de núcleo.

Es imperante que en el país se desarrollen los elementos cortantes, que sean capaces de cumplir con las demandas de las condiciones de servicio, manteniendo bajos costos, pero principalmente, sustituir los materiales y herramientas para la extracción de núcleo, que actualmente PDVSA y empresas mixtas, dedicadas a esta actividad, importan, ya que esto implica dependencia de tecnología extranjera y mayores costos de producción. De ello surge la idea de plantear una solución al problema.

5.2. Aceptación del problema.

Para la aceptación del problema y llevar a cabo un procedimiento, en aras de encontrar una solución adecuada al mismo, se debe dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Tenemos las habilidades necesarias?

Si, al ser estudiantes del último semestre de Ingeniería Mecánica, consideramos que poseemos los conocimientos necesarios para enfrentarnos al problema planteado y encontrar una solución adecuada para el mismo, en base a una actividad integradora dirigida por los principios básicos del diseño conceptual.

- ¿Tenemos la motivación necesaria?

Si, ya que sería nuestro primer reto como Ingenieros Mecánicos, llevar a cabo este trabajo de Diseño Conceptual, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestra carrera universitaria, por lo tanto existe gran motivación de convertirlo en un logro.

5.3. Análisis del problema.

Para poder llegar a una solución, inicialmente debía ser analizado a fondo el problema, es decir, conocer el dispositivo a diseñar en su totalidad, tal como se describe en los mapas conceptuales, descritos en las figuras 5.1 y 5.2.

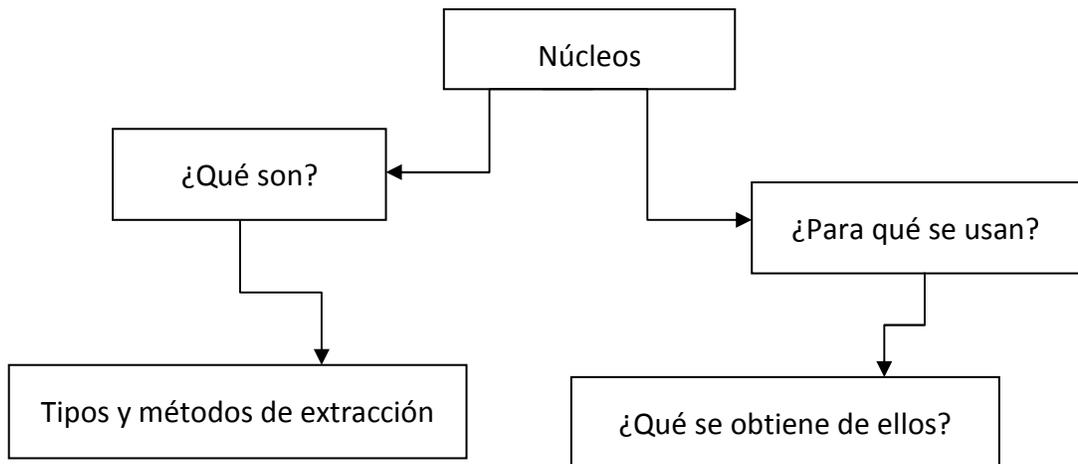


Figura 5.1. Análisis de núcleos.

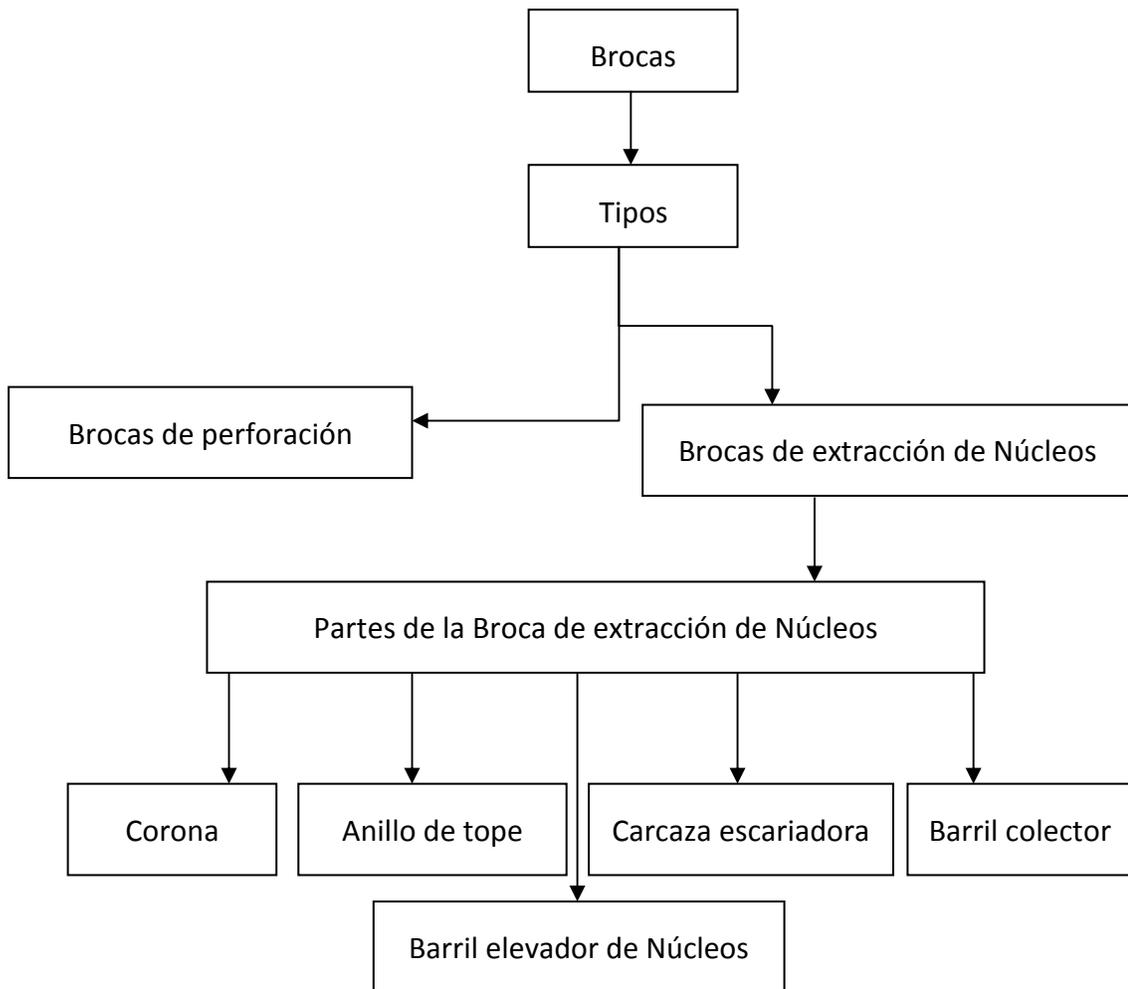


Figura 5.2. Análisis de Brocas.

La configuración de cada uno de estos elementos de la Broca de extracción de Núcleos, se muestra en la figura 4.1 del Marco Teórico.

También se consideró de gran importancia, analizar los elementos que son relevantes dentro del procedimiento de extracción de núcleos, pero aplicados a nuestro país, tal como se describe en el mapa conceptual mostrado en la figura 5.3.

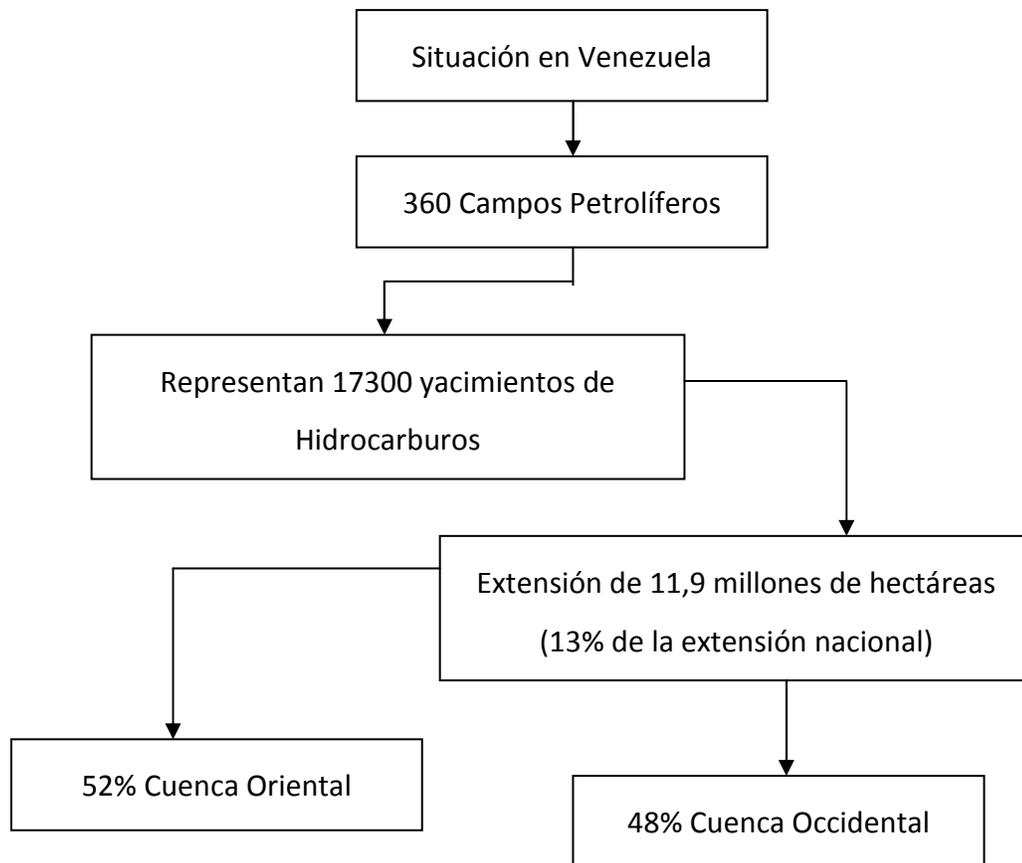


Figura 5.3. Análisis de la situación de Venezuela.

La configuración final de la pieza, debía tomar en cuenta ciertas características, de manera de lograr un mejor funcionamiento, ante las condiciones de uso que tendría la corona en el territorio nacional. Al tener un suelo que presenta formaciones de dureza media alta, moderadamente abrasiva y parcialmente fracturada, dependiendo de la zona del país, la dureza puede variar de 3 a 7 en la escala de Mohs.

5.4. Alternativas de solución del problema.

Al momento de estudiar las alternativas de solución al problema, debían ser tomadas en cuenta las opciones disponibles en el mercado actualmente, ya que por ser la corona para brocas de extracción de núcleos, un elemento que debe acoplarse en principio a una maquinaria ya existente, esto determinaría de por sí algunos detalles del diseño.

Explorando las opciones disponibles en el mercado internacional, fueron evaluadas diferentes brocas y configuraciones de diseño que debían ser tomadas en cuenta, tomando como referencia diversos manuales y catálogos de empresas que distribuyen este tipo de herramientas, tal como son: Boart Longyear, Diamantina Christensen, Smith Bits, Krham, Drilling Handbook (SANDIA), entre otras.

Después de una extensa revisión de las brocas disponibles en el mercado, ubicamos las coronas más comunes entre los fabricantes y seleccionamos cuatro tipos para hacerles una evaluación más extensa: con recubrimiento y sin insertos, coronas con insertos de diamante térmicamente estables, coronas con insertos de PDC y coronas con insertos de diamante natural.

Igualmente se realizó el mismo procedimiento para la configuración las vías de agua de la broca, para lo que encontramos una gama mucho más amplia, pero fue seleccionada la misma cantidad de modelos, para evaluar más exhaustivamente: vías de agua Standard, vías de agua Cónicas, vías de Agua Turboanchas y vías de agua de descarga frontal.

5.5. Concepción del Sistema.

Una vez estudiados los diferentes tipos y configuraciones de brocas disponibles en el mercado, definimos que las principales características a tomar en cuenta son:

- Tipo corona.
- Tipo de superficie a perforar.
- Configuración de vías de agua.
- Tiempo de vida.
- Mantenimiento.
- Costo de la corona.

Para realizar un estudio comparativo de dichas características, se llevaron a cabo matrices de selección, mostradas en las tablas 5.1 y 5.2.

5.5.1. Definición de parámetros para la matriz de selección.

Para cada una de las características seleccionadas, se asignó una ponderación del 1 al 5, dependiendo de la relevancia de dicha característica para el diseño final, siendo el número 1 de menor importancia y el número 5 de mayor importancia. Luego fueron asignadas calificaciones adicionales del 1 al 10, a cada una de las características, siendo el 1 el menos favorable y el 10 el más favorable.

Tabla 5.1. Matriz de selección para la corona.

Matriz de Selección para la Corona									
Características	Valor	Corona con Insertos TSD		Corona con Insertos PDC		Corona con Recubrimiento sin Insertos		Corona con Insertos de TSD	
	1-5	Valor Unitario	Total	Valor Unitario	Total	Valor Unitario	Total	Valor Unitario	Total
Tipo de Perforación	5	5	25	2	10	10	50	2	10
Velocidad de Perforación	2	7	14	7	14	7	14	7	14
Profundidad de trabajo	2	6	12	5	10	8	16	4	8
Tiempo de vida	4	7	28	9	36	4	16	8	32
Mantenimiento	4	1	4	3	12	10	40	4	16
Costo de la corona	5	5	25	5	25	8	40	1	5
			108		107		176		85

Tabla 5.2. Matriz de selección para la configuración de vías de agua.

Matriz de Selección para las Vías de Agua									
Características	Valor	Standard		Cónicas		Turboanchas		Descarga Frontal	
	1 - 5	Valor Unitario	Total	Valor Unitario	Total	Valor Unitario	Total	Valor Unitario	Total
Tipo de formación	5	6	30	2	10	10	50	2	10
Velocidad de Perforación	2	6	12	6	12	9	18	6	12
Profundidad de perforación	2	6	12	3	6	8	16	4	8
Capacidad de eliminación de residuos	5	6	30	8	40	7	35	9	45
Tiempo de vida	4	6	24	8	32	9	36	6	24
			108		100		155		99

En base a la matriz de selección aplicada, se definió como tipo de corona a tomar como referencia para la solución del problema, la corona con recubrimiento y sin insertos, y la configuración de vías de agua turboanchas.

5.5.2. Selección de dimensiones.

En la tabla 5.3, se pueden observar diferentes medidas estándares de un fabricante, para el tipo de corona con recubrimiento sin insertos, a usar como base para el diseño, de acuerdo a los resultados obtenidos a partir de la matriz de selección. Dicha corona se encuentra dentro de la serie 7 en el catálogo presentado, que tiene aplicación en formaciones con altas concentraciones de Carbonato de Calcio, y también puede aplicarse a formaciones más duras, que puede contener Cuarzita. La altura de la corona seleccionada según la tabla, fue de 30 mm, con 6 vías de agua turboanchas, de un tamaño de diseño de 0,125".

Tabla 5.3. Medidas estándares del fabricante Boart Longyear, para coronas de extracción de núcleo, con recubrimiento.

Descripción	Serie	Medida	Altura de la Corona	Opción de Vía de Agua	Tamaño de Vía de Agua
BIT AGM 02 S C6 6@125	2	S	25mm		6@125
BIT AGM 42 S C6 6@125	4	S	25mm		6@125
BIT AGM 6 S 9mm 6@125	6	S 5	30mm		6@12
BIT AGM 6 R 9mm EX 6@125	6	R	30mm	EX	6@125
6 S 9mm 8@155	6	S	30mm		8@155
BIT AGM 7 S 9mm 6@125	7	S	30mm		6@125
BIT AGM 7 S 9mm EX 6@125	7	S	30mm	EX	6@125
08ABR -R 25mm Staged	08ABR	-R	25mm		Staged
BIT AGM 8 S 9mm 6@125	8	S	30mm		6@125
BIT AGM 08COM S 9mm 8@094	08COM	S	30mm		8@094
08COM S 9mm 6@125	08COM	S	30mm		6@125
BIT AGM 9 -R 25mm Staged	9	-R	25mm		Staged
9 S 9mm 6@125	9	S	30mm		6@125
BIT AGM 09COM S 12mm 6@125	09COM	S	45mm		6@125
BIT AGM 10 S 12mm 6@125	10	S	45mm		6@125

5.5.3. Selección de materiales.

Para la selección del material, se analizaron los aceros disponibles en el mercado nacional, para determinar cuáles presentaban una elevada resistencia para trabajos en caliente, así como también una dureza relativamente alta, ya que posteriormente sería sometido a un procedimiento de termorociado (HVOF) y a una deposición de un recubrimiento tipo diamante por un proceso de PAPVD. Fue seleccionado como material base el acero AISI-H13, cuya composición se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Intervalo de composición química de un acero AISI-H13.

RANGO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA ACERO AISI H13							
C	Si	Cr	Mo	V	Mn	S	P
0,32 - 0,45	0,8 - 1,2	4,75 - 5,50	1,10 - 1,75	0,8 - 1,2	0,2 -0,5	0,03 (Max)	0,03 (Max)

La razón principal por la que fue seleccionado este material, son sus propiedades mecánicas. El acero AISI H13 provee un buen balance de tenacidad, alta resistencia a la formación de grietas causadas por el choque térmico y resistencia al revenido, junto con una resistencia al desgaste moderada.

Como se puede observar en la figura 4.16, aunque su dureza no es la más alta entre los aceros usados para herramientas, su tenacidad, que es la capacidad que tiene un material de absorber energía debido a un impacto y la capacidad de operación en caliente, hacen de éste material el más apto para las condiciones de trabajo a las que estará sometido durante la perforación para extracción de núcleos, ya que sabemos que durante esta operación se genera una atmosfera altamente corrosiva.

Su composición química también contribuye de cierto modo, ya que el porcentaje de Cromo del material mantiene la estabilidad química del mismo, por otra parte el porcentaje de Molibdeno contenido juega un papel vital en el desempeño cuando esté sometido a altas temperaturas, ya que proporciona la estabilidad térmica ante estas condiciones.

Otro aspecto muy importante, el cual es desfavorable, es que este acero posee un grado de resistencia al desgaste moderado en comparación con los otros aceros con los que se compara, pero esto no tendrá mayor importancia, ya que una vez mecanizada la pieza con acero AISI H13 como material base, se depositarán sobre él los dos recubrimientos, mejorará sustancialmente esta propiedad.

En cuanto a los materiales a ser usados para el recubrimiento, para el termorociado, se seleccionó el Carburo de Tungsteno, por ser uno de los materiales más duros que existen el mercado, sumamente dúctil y con una alta resistencia al trabajo en caliente, adicionalmente, posee alta resistencia a la compresión y excelente capacidad de adhesión al sustrato, siendo todas estas características deseables para el tipo de pieza que se está diseñando.

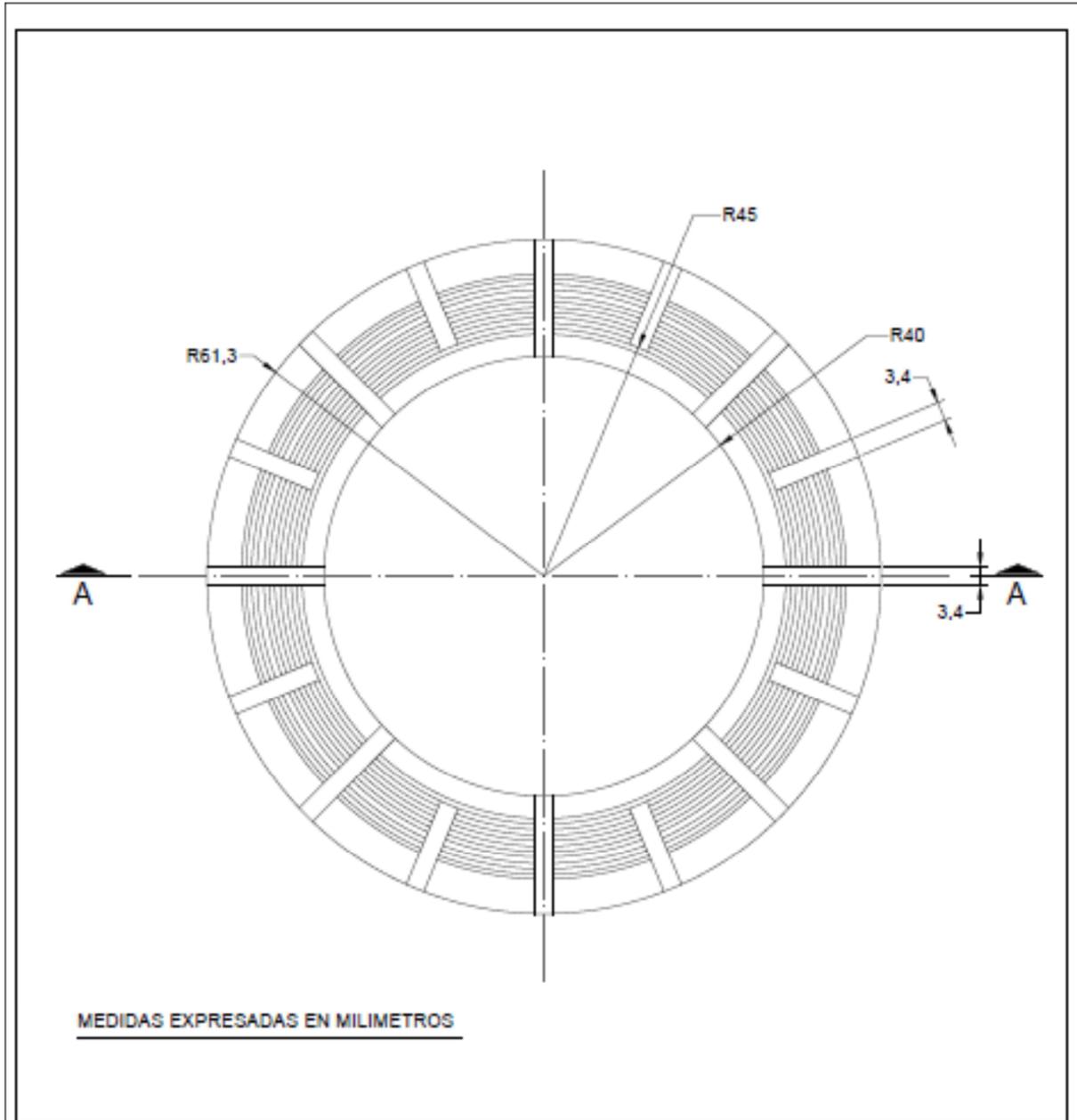
Se añadieron Nanotubos de Carbono al Carburo de Tungsteno, con la finalidad de incrementar la dureza del recubrimiento, debido a que estos contribuyen a que se generen uniones más fuertes entre las partículas de WC.

Entre otras propiedades que pueden mejorar a causa de la presencia de los Nanotubos de Carbono en el recubrimiento, está el incremento del módulo de elasticidad, lo que implica un mejor comportamiento elástico del material, además de un aumento de la tenacidad de fractura, debido a la fuerza de los enlaces, dificultando la propagación de grietas.

Alineado con la selección de corona realizada inicialmente, en la que se usaría el recubrimiento como inserto, se decidió aplicar un segundo recubrimiento de Diamante Policristalino Sintético, por ser este material el más duro que existe en el mercado, y así mejorar aún más las propiedades mecánicas de la herramienta, actuando dicho recubrimiento como un inserto.

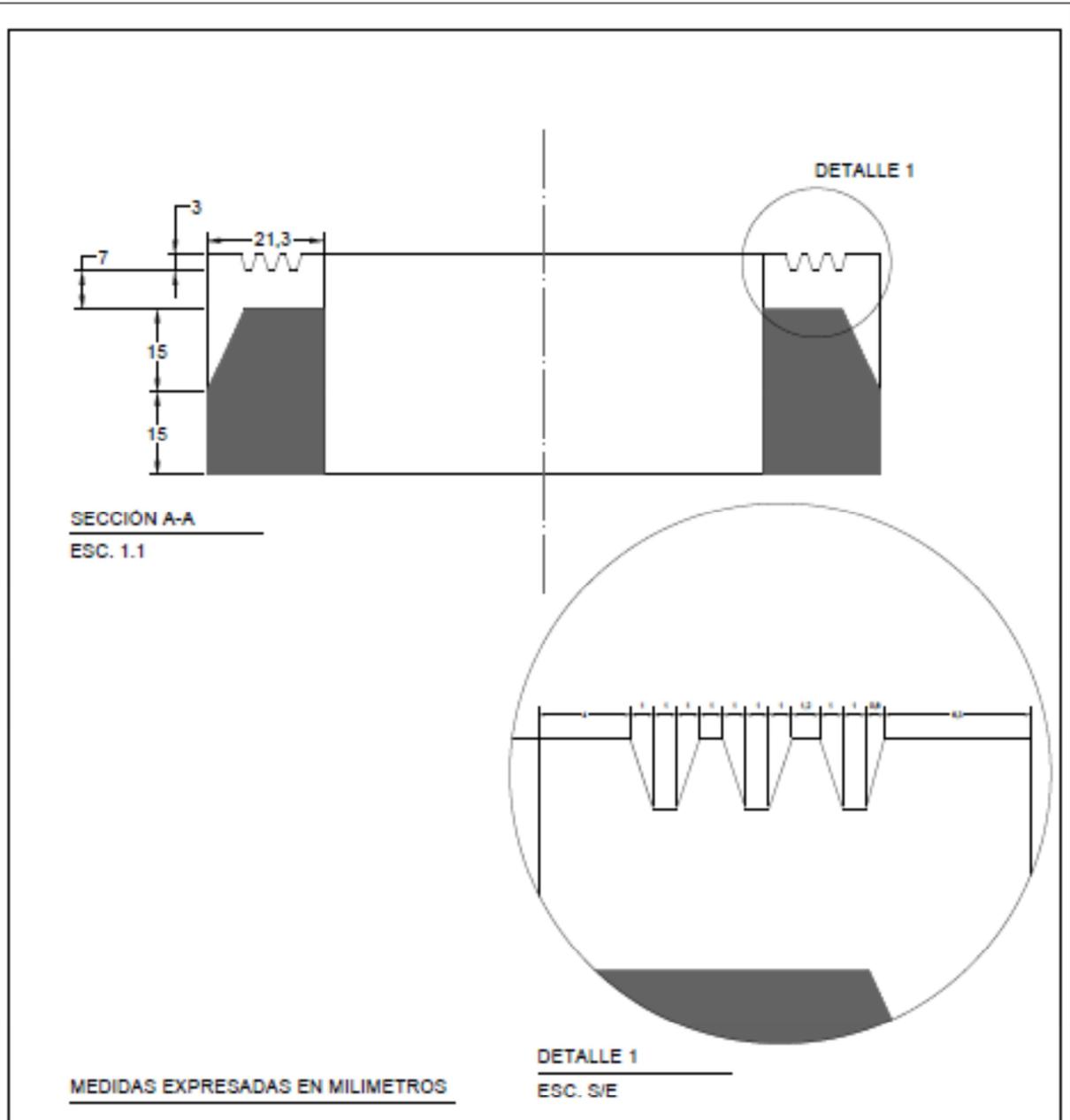
5.6. Construcción de la herramienta.

Después de adquirir el tocho de Acero AISI H13, fue llevado al galpón de la escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, donde fue sometido a un proceso de mecanizado, tal como se muestra en las figuras 5.4 y 5.5, con la finalidad de llevarlo a la geometría y a las dimensiones, contempladas en el diseño.



Diseñado por: Rodolfo Pérez Nathalie Reina	Revisado por: Crisantos Villalobos	Aprobado por: Andrea Scagni Alberto Pertuz	Dibujado por: Rodolfo Pérez	Diseñado por: Rodolfo Pérez Nathalie Reina	Fecha: Noviembre 2013
TÍTULO PLANOS TESIS RODOLFO PÉREZ Y NATHALIE REINA.			Plano: VISTA PLANTA CORONA	Plano no.: 01/03	
			Escala: 1:1		

Figura 5.4. Planos iniciales de la corona, Vista planta.



Diseñado por: Rodolfo Pérez Nathalie Reina	Revisado por: Crisantos Villalobos	Aprobado por: Andrea Scagni Alberto Pertuz	Dibujado por: Rodolfo Pérez	Diseñado por: Rodolfo Pérez Nathalie Reina	Fecha: Noviembre 2013
TÍTULO: PLANOS TESIS RODOLFO PÉREZ Y NATHALIE REINA.			Plano: CORTE A-A, DETALLE	Plano no.:	
			Escala: EN EL PLANO	02/03	

Figura 5.5. Planos iniciales de la corona, vista corte A-A y detalle.

5.6.1. Torneado.

Fue utilizado un torno de torrecilla horizontal marca Boehringer, de 2 m de bancada, mostrado en la figura 5.6, ubicado en el galpón de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV. Se buscaba crear un cilindro hueco, característico del cuerpo de las coronas para brocas de extracción de núcleo, de manera que los sedimentos puedan ir ascendiendo en el orificio central de éste.



Figura 5.6. Torno de torrecilla horizontal marca Boehringer, de 2 m. de bancada.

El tocho cilíndrico tenía unas dimensiones originales de 125 mm de diámetro y 40 mm de altura, el mismo fue torneado en el exterior, con una velocidad de giro, de 180 RPM para el desbaste y 355 RPM para el refrentado, y así llevarlo al diámetro externo de la corona diseñada que es de 122,6 mm.

Para lograr crear el orificio interno de la pieza, cuyo diámetro es de 85 mm., también se aplicó un procedimiento de torneado, iniciando desde el centro, hasta llevarlo a la dimensión requerida con el mismo torno, a 180 RPM para el desbaste y 355 RPM para el refrentado.

5.6.2. Fresado.

Una vez que estuvo listo el cilindro hueco, se debían crear las vías de agua, así como también los canales de la parte superior de la corona, tal como se muestra en la figura 5.7, las cuales permitirán una mejor penetración y salida de los sedimentos al momento de la perforación para la extracción de núcleos.

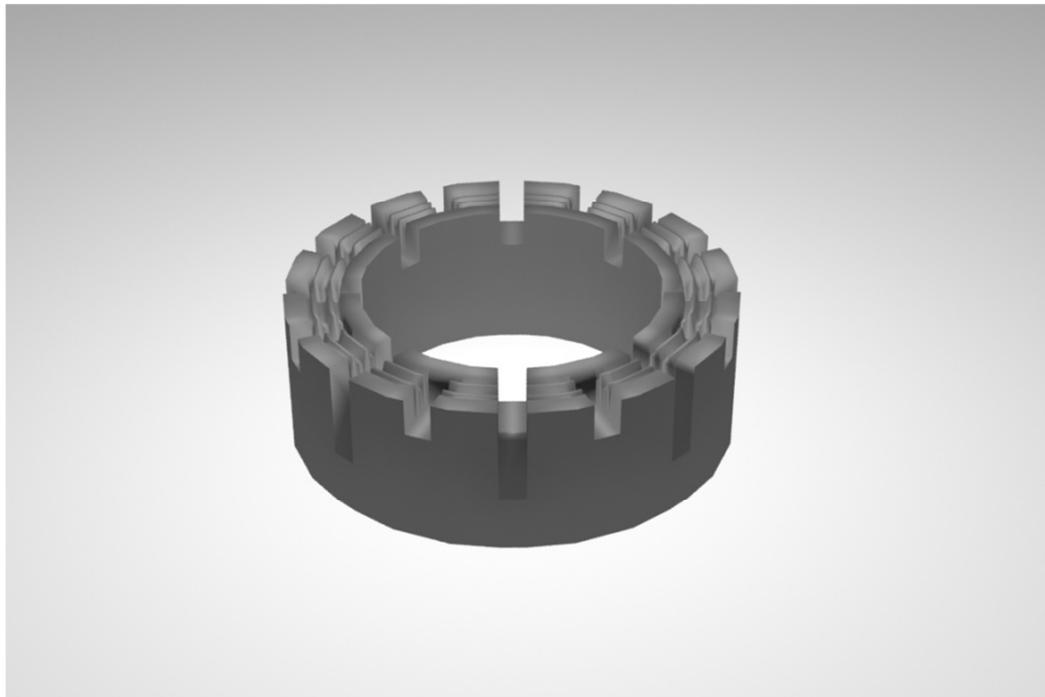


Figura 5.7. Imagen tridimensional del diseño de la corona para brocas de extracción de núcleos.

Para la creación de los canales de la parte superior de la corona y de las vías de agua laterales, fue utilizada la máquina de fresado universal marca REMAC, que se encuentra ubicada en el galpón de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV.

Se utilizó una fresa de HSS de ¼", y un disco de HSS de 80x2/0x22mm. En la figura 5.8, se observa la pieza después de completarse el proceso de fresado.



Figura 5.8. Corona para broca de extracción de núcleos, antes de ser recubierta.

5.7. Aplicación de recubrimientos.

5.7.1. Termorociado por HVOF.

El primer recubrimiento suministrado a la corona fue el de Carburo de Tungsteno, a través de un procedimiento de Termorociado por *High Velocity Oxy-Fuel* (HVOF), el mismo fue aplicado en la Empresa PLASMATEC INGENIEROS C.A. mediante un granallado, de manera que el recubrimiento presentara una buena adhesión a la pieza.

Inicialmente, se llevo a cabo la mezcla de materiales que formarían parte del recubrimiento en un molino de bolas, los mismos se encontraban en forma de polvos y la proporción fue de WC-Co+0,5% Nanotubos de Carbono, por un periodo de 36 horas en el molino para garantizar la homogeneidad de la mezcla, y posteriormente del recubrimiento, que después de aplicado, presentó un espesor de aproximadamente 500 micras, tal como se observa en la figura 5.9.



Figura 5.9. Corona para broca de extracción de núcleos con recubrimiento de Carburo de Tungsteno a través de un Termorociado por HVOF.

Los parámetros utilizados para el proceso de Termorociado por HVOF, fueron los normalizados por la empresa para este tipo de procedimientos, y se reflejan en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Parámetros del Termorociado por HVOF.

<i>Distancia de rociado</i>	300 mm
<i>Ángulo de rociado</i>	90°
<i>Flujo de Combustible</i>	25,8 l/h
<i>Flujo de Oxígeno</i>	80 l/h
<i>Velocidad de alimentación del polvo</i>	100 gr/min

5.7.2. Recubrimiento de PCD por PAPVD.

Posterior al recubrimiento de Carburo de Tungsteno, se aplicó a la corona un recubrimiento de Diamante Policristalino Sintético (PDC), a través de un procedimiento de Deposición Física en Fase Vapor Asistida por Plasma, PAPVD (*Plasma Assisted Physical Vapor Deposition*).

Para la aplicación del mismo, la pieza fue enviada a Inglaterra, donde se encuentra ubicada la empresa TEERCOATING C.A., quienes se especializan en este tipo de recubrimientos realizados a través del procedimiento de PAPVD.

El recubrimiento de Diamante Policristalino Sintético (PDC), presentó un espesor final sobre la pieza de 4 micras.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1. Ensayo de microindentación estática.

El propósito del ensayo de dureza por microindentación, es estudiar la dureza compuesta en áreas a nivel de meso-escala y así evaluar la homogeneidad de un material.

En el ensayo de microindentación se imprime, con un indentador de diamante de geometría específica, una huella en la superficie de la muestra, tal como se evidencia en la figura 6.1, aplicando una carga conocida. El número de dureza se obtiene entonces, dividiendo la fuerza aplicada entre un valor aproximado del área de la huella.

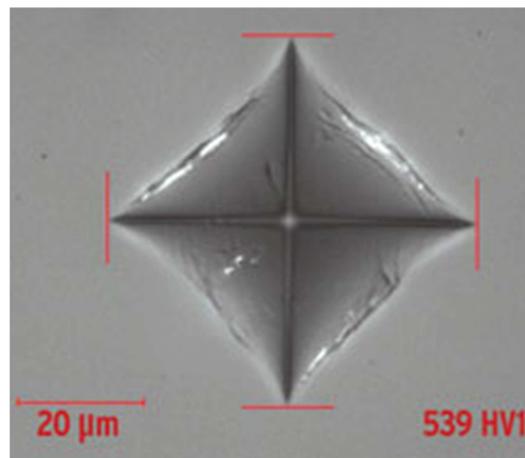


Figura 6.1. Imagen de indentación de un ensayo de microindentación.

Los dos métodos más comunes de ensayo de dureza por microindentación son los ensayos Vickers y Knoop, obteniendo números de dureza en dos escalas diferentes.

Para llevar a cabo el ensayo de microindentación, se cortaron dos pedazos de la corona, los mismos fueron pulidos en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, con la pulidora marca Buehler, modelo MetaServ 300, manteniendo la velocidad de giro en 500 RPM, y usando papeles de lija cada vez más finos a medida que avanzaba el procedimiento de pulido, hasta conseguir una superficie especular en la probeta, tal como se muestra en la figura 6.2, con la finalidad de poder observar con claridad la indentación.



Figura 6.2. Probeta pulida para el ensayo de microindentación.

Para el proceso de indentación, fue usado el Micro-durómetro marca BUEHLER, también ubicado en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, que se muestra en la figura 6.3. El mismo permite definir parámetros para la indentación tales como la carga y el tiempo, y posteriormente muestra las longitudes aproximadas de cada diagonal de la huella obtenida.



Figura 6.3. Micro-durómetro Marca BUEHLER.

Con la finalidad de determinar la dureza, y adicionalmente evaluar la homogeneidad del material para verificar que no se hayan visto afectadas las propiedades mecánicas del material base de la corona, en este caso el Acero H13, como consecuencia de los procesos de mecanizado y de aplicación de los recubrimiento de WC-Co-NTC mediante el Termorociado, se realizaron 25 indentaciones con una carga constante de 300 g, especificado en la norma ASTM E-384, con un tiempo de indentación de 5 segundos, tomando como marco de referencia, la escala de dureza Vickers, tal como se muestra en la figura 6.4. Posteriormente se midieron las diagonales de cada indentación realizada, y obtener el valor de dureza Vickers en la zona indentada.



Figura 6.4. Representación esquemática de las indentaciones en el sustrato.

Luego para verificar que las propiedades mecánicas del recubrimiento de H13-WC-Co-NTC, termorociado al sustrato, no se hayan visto afectadas por la aplicación del recubrimiento de PDC por el procedimiento de PAPVD, se procedió de la misma manera y se indentó 15 veces, con una carga constante de 300 gr y una duración de 20 segundos, en una zona específica del recubrimiento de WC-Co-NTC, tal como se muestra en la figura 6.5, y se midieron igualmente las diagonales para determinar la dureza Vickers de cada indentación y así comprobar la homogeneidad del recubrimiento.

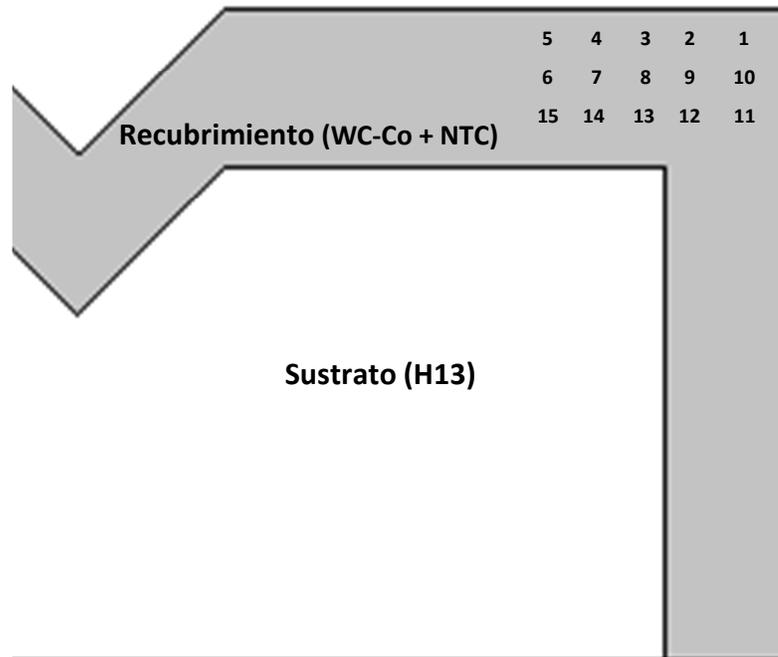


Figura 6.5. Representación esquemática de las indentaciones en el recubrimiento.

Posteriormente, para tratar de establecer si existe algún efecto asociado al tamaño de la huella, y así estimar la dureza del recubrimiento de WC-Co-NTC, se indentó nuevamente 15 veces a lo largo de todo el recubrimiento, tal como se muestra en la figura 6.6, pero ahora variando las cargas y la cantidad de indentaciones por carga. Las cargas aplicadas fueron 10 gr, 50 gr, 100 gr, 300 gr y 1 kg, y se realizaron 3 indentaciones por carga, con un tiempo de aplicación de carga de 10 segundos cada una. De igual manera se midieron las diagonales, para obtener el valor de la dureza Vickers para cada una de las indentaciones.

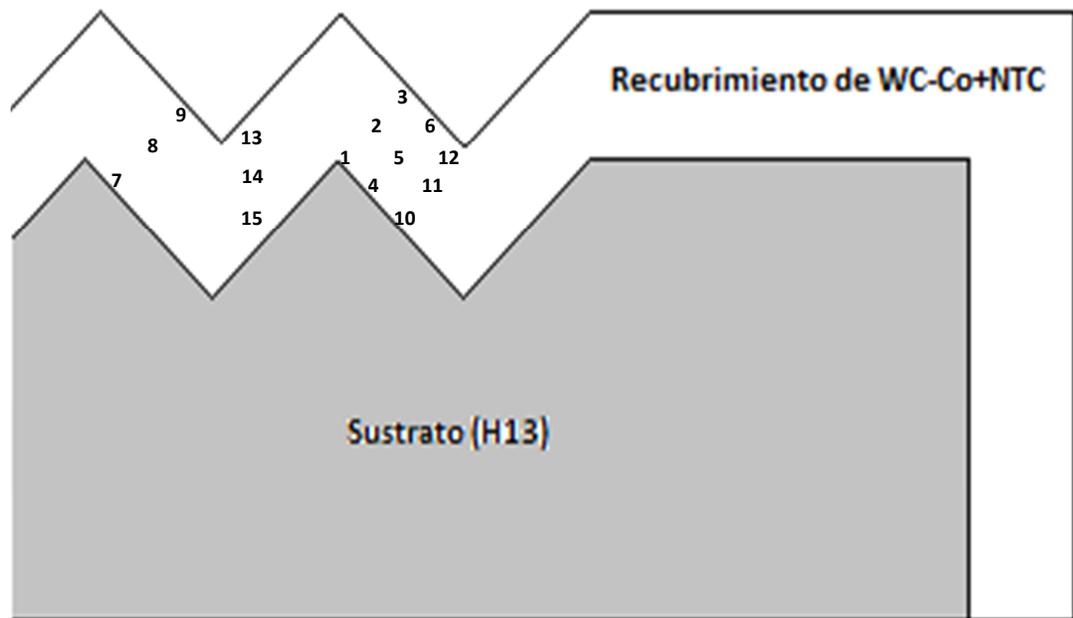


Figura 6.6. Representación esquemática de las indentaciones en el recubrimiento para hallar la dureza promedio.

6.2. Ensayo de desgaste.

Este ensayo simulativo no estandarizado, está basado en las pruebas realizadas por SANDIA National Laboratories (**Finger J., Glowka D., 1989**). En vista de que no contábamos con los equipos utilizados por dicho laboratorio, surgió la necesidad reestructurar el ensayo, para poder llevarlo a cabo con los equipos disponibles en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, manteniendo la finalidad del mismo, que es cuantificar el desgaste sufrido por la pieza bajo condiciones abrasivas.

Para el ensayo se utilizó un torno de torrecilla horizontal, de 2 m de bancada, marca Boehringer, ubicado en el galpón de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Se hizo girar la corona a una velocidad de rotación de 228 RPM, y en el carro del torno se colocó el elemento abrasivo sobre un dispositivo que lo sujetaba, el cual tenía una velocidad de avance constante de 0,5 mm/min, durante diferentes tiempos, determinados para cada ensayo, los cuales tuvieron una duración de 30 s, 1 min, 5 min, 10 min, 20 min, 40min, 1 hr, 2 hr, 10 hr y 20 hr respectivamente.

En la figura 6.7 se puede observar el montaje del ensayo. Adicionalmente, se incluyó una lubricación constante, aplicada mediante un chorro continuo sobre el área de contacto entre la corona y el elemento abrasivo.

Para dicho ensayo la medición que se consideró de mayor importancia fue la de la tasa de desgaste, es decir, el volumen de material desprendido tanto de la corona como del elemento abrasivo.



Figura 6.7. Montaje del ensayo de desgaste.

Para asegurar que durante todos los ensayos se mantuviese un mismo sistema tribológico, se definieron ciertos parámetros, basados en la bibliografía especializada, como es el caso del ángulo de desprendimiento principal, la velocidad de rotación de la corona y la velocidad de avance del carro portátil al que iba fijado el elemento abrasivo.

El método utilizado para la cuantificación del desgaste sufrido por parte de los agentes presentes en el par tribológico, fue la medición de la geometría, tanto de la corona como del elemento abrasivo, antes y después de cada ensayo. Posteriormente, mediante el uso de programas computarizados, se realizó una representación exacta en 3D de la pieza, con la finalidad de calcular el volumen después de cada ensayo, y obtener las curvas de desgaste para cada uno.

En resumen, el ensayo se realizó con lubricación constante a base de agua, proyectada directamente sobre el área de contacto entre la corona y el elemento abrasivo, a velocidad de rotación fija de 228 RPM, un ángulo de incidencia de 90° y una velocidad avance de 0,5 mm/min. Las únicas variables fueron los diferentes tiempos utilizados para cada ensayo, para la evaluación de la remoción de los materiales tanto del cortador como de la pieza del material abrasivo seleccionado.

6.2.1. Selección del elemento abrasivo.

Para la selección del material abrasivo, se tomo en cuenta la estratificación general de los suelos venezolanos, específicamente la estructura geofísica de las cuencas petrolíferas, como se puede observar en las figuras 6.8 y 6.9. Las condiciones de operación para trabajar en un determinado tipo de suelo, inciden directamente en la configuración de la coronas para perforación, por lo que es de suma importancia la selección adecuada de este tipo de elementos abrasivos.

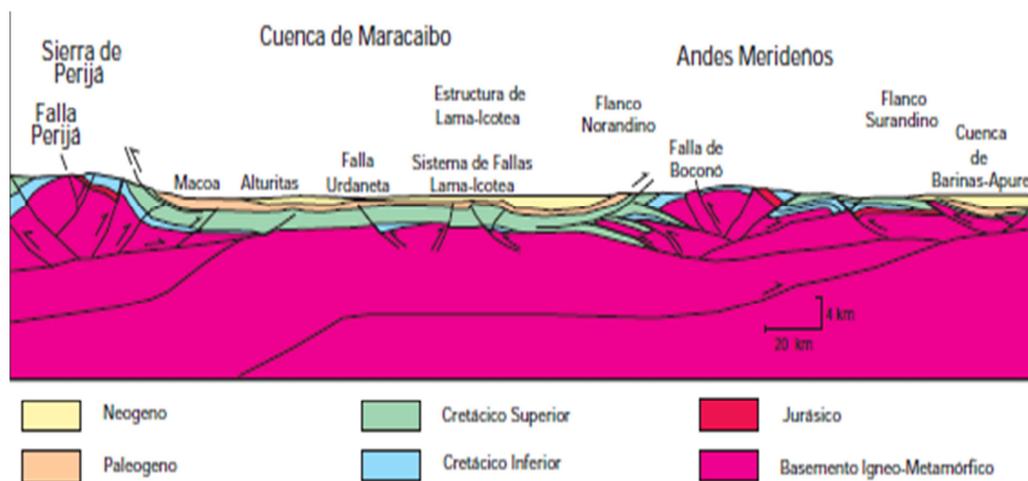


Figura 6.8. Estructura geofísica de la Cuenca de Maracaibo.

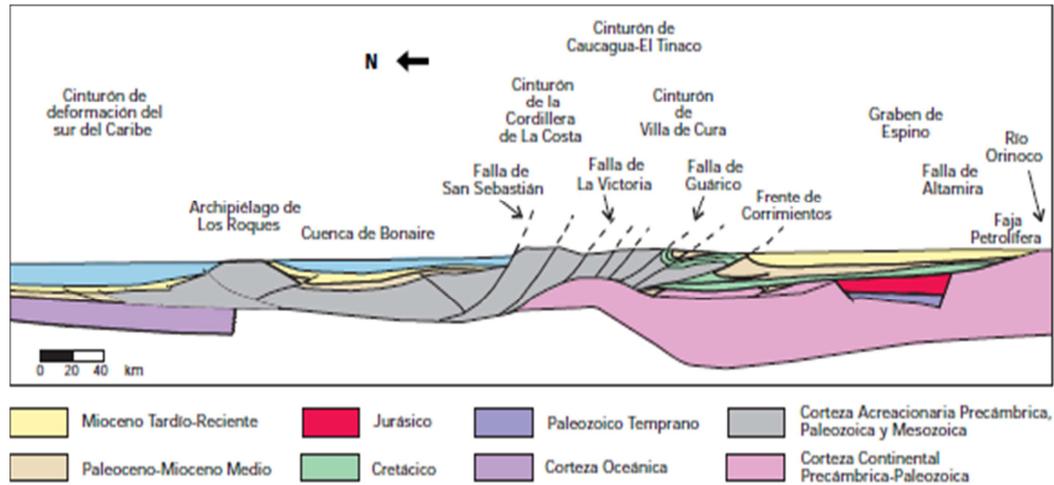


Figura 6.9. Estructura geofísica de la Cuenca Oriental.

El suelo venezolano está principalmente compuesto por Carbonato de Calcio, además de materiales como el Cuarzo, el Feldespato y la Caliza, entre otros. La dureza del suelo va a depender de la concentración de dichos materiales, y puede variar de 3 a 7 en la escala de Mohs.

Un material cuyas propiedades de desgaste se asemejan en algunos aspectos a la estructura geofísica de las cuencas petrolíferas de Venezuela, es el Mármol blanco, ya que en su composición predomina el CaCO_3 , acompañado de una gran diversidad de otros minerales (mica, silicatos magnésicos, grafito, óxidos de hierros, etc.). La selección de este tipo de mármol (**Bland R. y Pessier R., 2001**), en base a sus propiedades características, implicaría una semejanza a las condiciones reales de operatividad para una broca de extracción de núcleos, en proceso de perforación.

En la tabla 6.1, se enumeran las propiedades características del elemento abrasivo, seleccionado para llevar a cabo el ensayo de desgaste.

Tabla 6.1. Características del Mármol Blanco.

Densidad aparente	Entre 2,6 y 2,85 g/cm^3
Densidad real	Entre 2,7 y 2,9 g/cm^3
Dureza en la escala de Mohs	De 3 a 4
Resistencia a la compresión	Entre 400 y 1800 Kgf/cm^2
Resistencia a la tracción	Entre 100 y 360 Kgf/cm^2
Absorción de agua en peso	Entre 0,2 y 0,7%

6.2.2. Diseño del dispositivo de montaje.

Debido a que no contamos con una maquina especializada para el ensayo de alto desgaste, adaptamos el ensayo a un torno de torrecilla horizontal, manteniendo la finalidad del mismo.

Se presentó la necesidad de fabricar un dispositivo, que funcionara como base para sujetar la pieza del elemento abrasivo al carro portátil y mantuviera un ángulo de ataque de con respecto a la corona, de 90° , a medida que el carro portátil del torno avanza.

El dispositivo se realizo con excedentes de acero estructural, encontrados en el galpón de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV. Se utilizo una lámina de acero, a la cual se le soldaron 3 láminas de acero de menor tamaño, y sobre estas láminas se soldaron tres ángulos, dispuestos como se observa en la figura 6.10, para garantizar que la pieza de mármol se mantuviese fija, una vez que entrara en contacto con la corona.

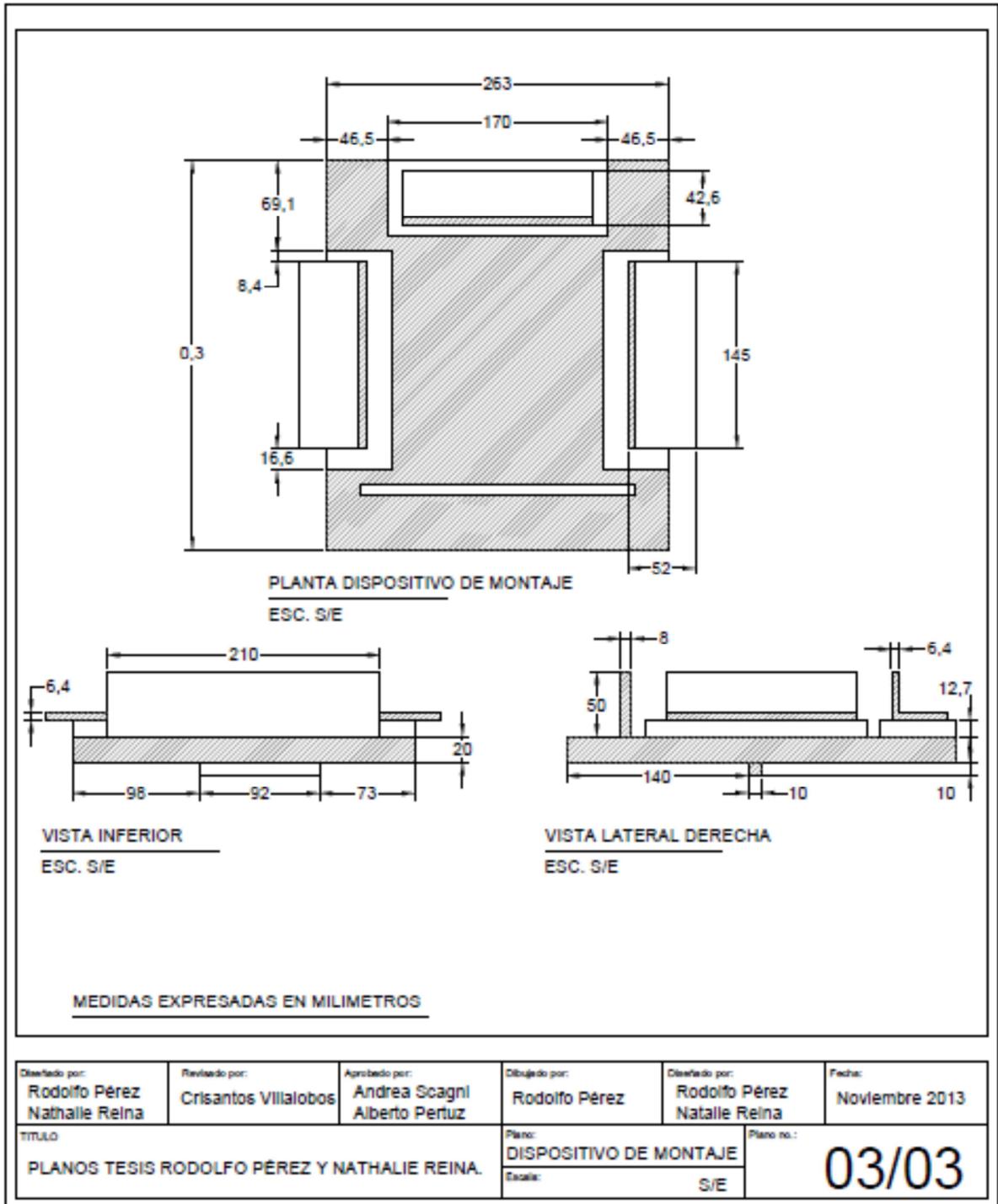


Figura 6.10. Plano del dispositivo de montaje de la pieza de mármol.

En la parte posterior de la lámina de acero se soldó una barra del mismo material, para poder fijar el dispositivo al carro portátil. Esta barra fue asegurada mediante tres tornillos ubicados en el porta-herramienta, logrando que el dispositivo se mantuviese fijo cuando la corona hiciera contacto con la pieza de mármol. El dispositivo fue diseñado para que fuese lo suficientemente robusto, de manera que pudiese resistir los esfuerzos a los que sería sometido durante los ensayos, una vez ensamblado.

6.2.3. Procedimiento de análisis de resultados.

Para reportar los resultados del ensayo de alto desgaste, es necesario cuantificar la pérdida del material removido, tanto de la corona como de la pieza de mármol, por ende se realizaron dibujos en 3D de la pieza después de cada uno de los ensayos, mediante el uso de programas computarizados, para así obtener las variaciones del volumen de la misma.

A partir de la siguiente ecuación, se obtiene el valor de la pérdida de volumen de la corona:

$$\Delta Vc [mm^3] = Vc_i [mm^3] - Vc_{i+1} [mm^3] \quad (6.1)$$

A partir de la siguiente ecuación, se obtiene el valor de la pérdida de volumen de la pieza de mármol:

$$\Delta Vm [mm^3] = Vm_{i+1} [mm^3] - Vm_i [mm^3] \quad (6.2)$$

Donde:

- $\Delta Vc [mm^3]$: Pérdida de volumen de la corona debido al ensayo.
- $Vc_i [mm^3]$: Volumen de la corona para el tiempo i (antes del ensayo).
- $Vc_{i+1} [mm^3]$: Volumen de la corona para el tiempo $i+1$ (después del ensayo).
- $\Delta Vm [mm^3]$: Pérdida de volumen de la pieza de mármol debido al ensayo.

- $Vm_i [mm^3]$: Volumen de la huella dejada por la corona en la pieza de mármol para el tiempo i .
- $Vc_{i+1} [mm^3]$: Volumen de la huella dejada por la corona sobre la pieza de mármol para el tiempo $i+1$.

De los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones 6.1 y 6.2, son usados posteriormente para calcular el índice de pérdida de volumen (IPV), a través de la siguiente ecuación:

$$IPV = \frac{\Delta Vc [mm^3]}{\Delta Vm [mm^3]} \quad (6.3)$$

Donde:

- IPV= Índice de pérdida de volumen.
- $\Delta Vc [mm^3]$: Pérdida de volumen de la corona debido al ensayo.
- $\Delta Vm [mm^3]$: Pérdida de volumen de la pieza de mármol debido al ensayo.

Una vez hallado el índice de pérdida de volumen, se procede a calcular el índice de pérdida de masa, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$IPM = IPV * \frac{\delta c}{\delta m} \quad (6.4)$$

Donde:

- IPM: Índice de Pérdida de Masa.
- δc : Densidad de la corona.
- δm : Densidad del mármol.

Para calcular la densidad real de la corona, tomamos una de las probetas obtenidas a partir de un corte realizado a la corona original, y se determinó su volumen usando el método de Arquímedes, mientras que su masa se halló pesando la misma probeta en una balanza analítica, ubicada en el laboratorio de Tribología de la Escuela de Ingeniería de Metalurgia de la UCV, marca Denver Instruments, modelo APX-200, mostrado en la figura 6.11. Y mediante el uso de la siguiente ecuación, se determinó la densidad del material en conjunto de la corona.

$$\delta_c = \frac{m_c [g]}{V_c [cm^3]} \quad 6.5$$

Donde:

- m_c : masa de la corona.
- V_c : Volumen de la corona.
- δ_c : Densidad de la corona.



Figura 6.11. Balanza analítica marca Denver Instruments, modelo APX-200.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Ensayo de microindentación estática.

7.1.1. Medición de la dureza del sustrato.

En la tabla 7.1 se muestran los valores de dureza obtenidos para la primera etapa de la evaluación, en la que se realizaron las indentaciones sobre la superficie del sustrato, tal como se especificó en el esquema de indentaciones presentado en la metodología experimental.

Los valores mostrados en la tabla son los siguientes:

- # de Indentación: Número dado a la indentación, según su ubicación, de acuerdo al esquema mostrado en la figura 6.4.
- Valor HV: Valor de la dureza Vickers, expresado en $[Kgf/mm^2]$.
- D1: Valor de la diagonal 1.
- D2: Valor de la diagonal 2.
- D pro: Valor de la diagonal promedio.

Tabla 7.1. Resultados de la Microindentación Estática aplicada sobre el sustrato de la muestra.

Resultados de dureza sobre el Sustrato				
# de Indentación	Valor HV	D1	D2	D pro
1	337,5	40,3	40,9	40,6
2	300,9	43	43	43
3	277,9	44,5	45,1	44,8
4	274,7	44,6	45,1	44,85
5	286,1	43,5	44,7	44,1
6	250,8	46,2	48,2	47,2
7	240	47,1	49,2	48,15
8	255,6	46,3	47	46,65
9	255,7	45,5	47,8	46,65
10	268,7	45,4	45,6	45,5
11	232,2	48,9	49,8	49,35
12	229,6	49,6	5,6	27,6
13	217	49,8	51,5	50,65
14	214,7	50,1	51,7	50,9
15	222	49,7	50,5	50,1
16	214	49,8	52,3	51,05
17	216,4	50,8	50,6	50,7
18	229,4	49,3	49,2	49,25
19	214,7	50,3	51,5	50,9
20	209,3	51,3	51,6	51,45
21	207,7	50,6	52,9	51,75
22	198,4	52,3	53,6	52,95
23	195,9	53,5	53,3	53,4
24	213,5	50,6	51,5	51,05
25	228,4	49,9	48,6	49,25
Promedio	239,644	48,116	47,232	47,674

En la figura 7.1, se muestra la gráfica obtenida a partir de los resultados del ensayo de Microindentación Vickers, representándose los valores de dureza [Kgf/mm²], en función de la profundidad de la indentación en el sustrato de acero AISI H13 en relación a la superficie, siendo el número 1 el más cercano al recubrimiento, el número 5 el más lejano a este. Por otro lado, el número de serie se refiere a las indentaciones que se realizaron en una misma línea vertical, pero a diferentes profundidades.

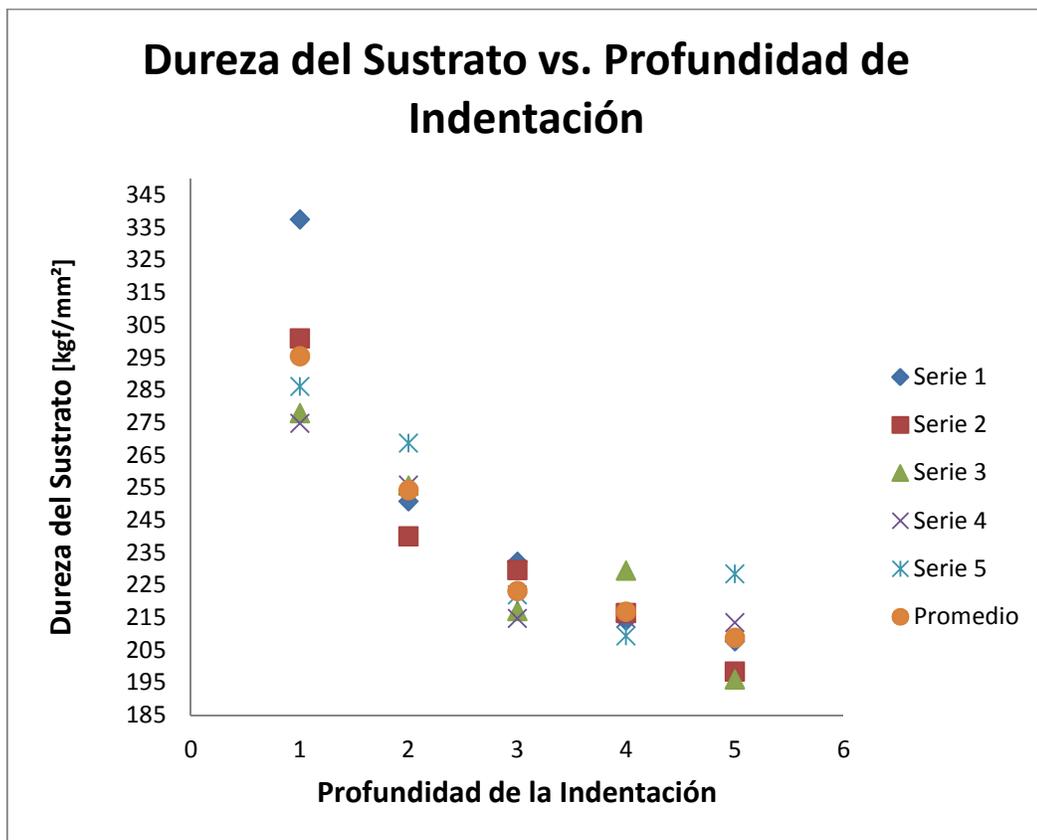


Figura 7.1. Dureza del sustrato en función de la profundidad de la indentación.

Al analizar la gráfica, se puede observar que a medida que nos alejamos del recubrimiento, la dureza va disminuyendo y se va haciendo constante. En base a esto, se puede decir que la aplicación del recubrimiento de WC-Co + NT-C por HVOF, tuvo un efecto sobre la dureza del sustrato, debido a que en el momento del impacto entre las partículas de WC-Co + NT-C con la superficie, se produjo una deformación plástica en el acero, generando así, un incremento la dureza del material, a medida que nos acercamos a la superficie localmente.

7.1.2. Medición de la dureza del recubrimiento de WC-Co + NT-C.

En la tabla 7.2, se muestran los valores de dureza obtenidos para la segunda etapa de la evaluación, en la que se realizaron las indentaciones sobre la superficie del recubrimiento de WC-Co + NT-C, tal como se especificó en el esquema de indentaciones presentado en la metodología experimental.

Los valores mostrados en la tabla son los siguientes:

- # de Indentación: Número dado a la indentación, según su ubicación, de acuerdo al esquema mostrado en la figura 6.5.
- Valor HV: Valor de la dureza Vickers, expresado en $[Kgf/mm^2]$.
- D1: Valor de la diagonal 1.
- D2: Valor de la diagonal 2.
- D pro: Valor de la diagonal promedio.
- $1/D$ pro: Inversa de la diagonal promedio

Tabla 7.2. Resultados de la Microindentación Estática aplicada sobre el recubrimiento de WC-Co + NT-C de la muestra.

Resultados de dureza sobre el Recubrimiento					
# de Indentación	H Vickers	D1	D2	D pro	1/D pro
1	900,9	24,9	24,8	24,85	0,0402
2	839	24,8	26,7	25,75	0,0388
3	845,6	25,4	25,9	25,65	0,039
4	865,7	25,4	25,3	25,35	0,0394
5	845,6	25,6	25,7	25,65	0,039
6	973,9	23,3	24,5	23,9	0,0418
7	908,2	25,3	25,3	25,3	0,0395
8	900,9	23,2	23,2	23,2	0,0431
9	908,2	25,3	25,3	25,3	0,0395
10	969,9	24,3	24,3	24,3	0,0412
11	973,9	23,6	23,6	23,6	0,0424
12	998,9	23,4	23,8	23,6	0,0424
13	953,9	24,4	24,4	24,4	0,041
14	909,1	24,4	24,7	24,55	0,0407
15	1094	23,1	23,1	23,1	0,0433
Promedio	925,8467	24,4267	24,7067	24,5667	0,0408

En la figura 7.2, se muestra la gráfica obtenida a partir de los resultados del ensayo de Microindentación Vickers, representándose los valores de dureza [Kgf/mm²], en función de la profundidad de la indentación en el recubrimiento de WC-Co + NT-C, siendo el número 1 el más lejano al sustrato, y el número 3 el más cercano a este. Por otro lado, el número de serie se refiere a las indentaciones que se realizaron sobre una misma línea vertical.

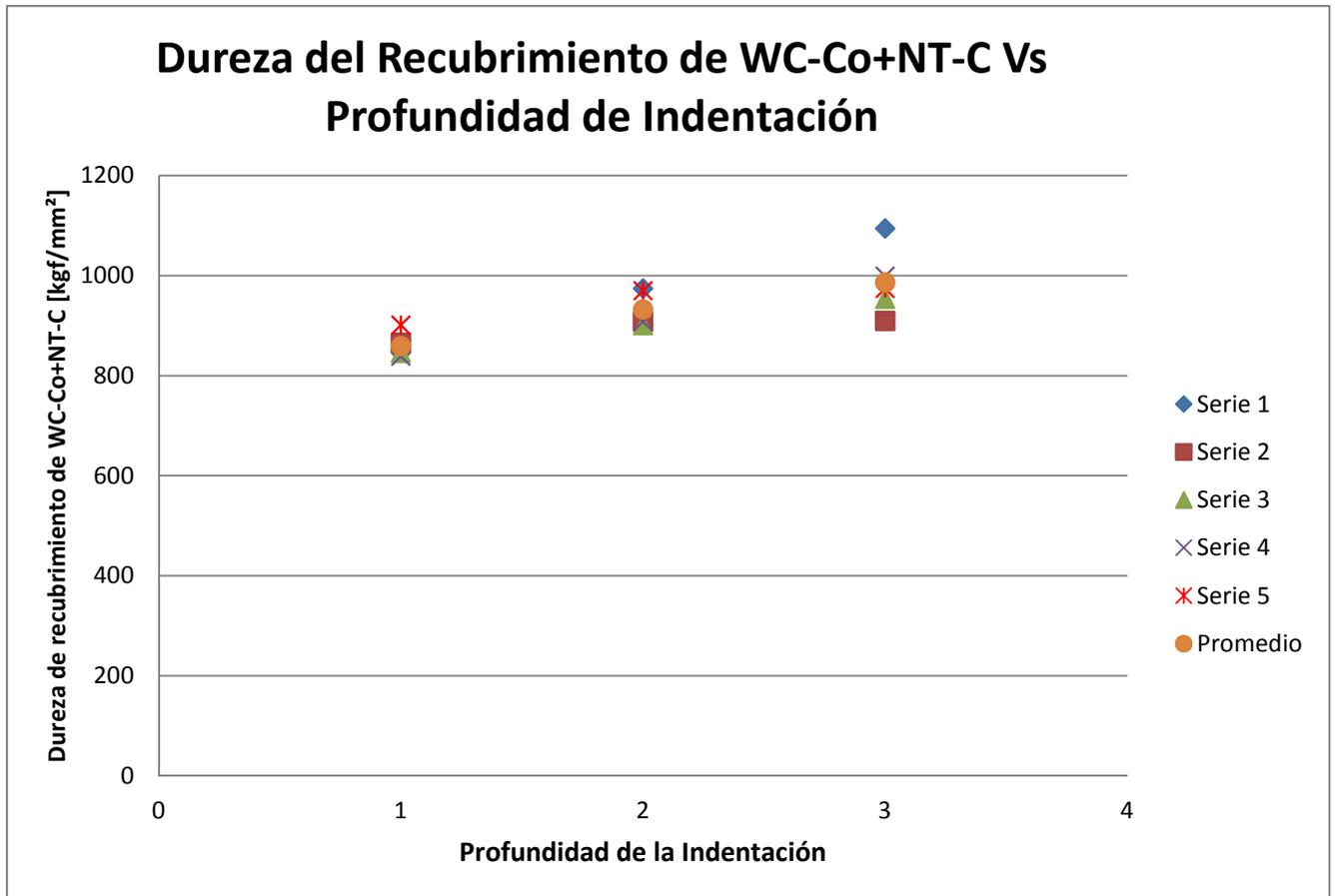


Figura 7.2. Dureza del recubrimiento de WC-Co + NT-C en función de la profundidad de la indentación.

A partir del análisis de la gráfica, se puede decir que el recubrimiento de Carburo de Tungsteno y Nanotubos de Carbono es relativamente homogéneo por zonas, observándose valores más altos para las indentaciones más cercanas al sustrato, variando ligeramente con la profundidad. Este comportamiento puede estar asociado a algún evento que propicie la fase descarburizada (W_2C), de mayor dureza y mayor fragilidad.

La presencia de Nanotubos de Carbono en el recubrimiento ayuda a la homogeneidad del recubrimiento debido a varios factores. Uno de ellos es que al agregar NTC se generan uniones mas fuertes entre las partículas de WC aumentando su dureza. También la heterogeneidad en el tamaño de partícula, debido al proceso de molienda, influye en la en la calidad del recubrimiento debido al proceso de deposición. Otro factor es la disminución del tamaño de la partícula, la cual juega un papel fundamental en la resistencia mecánica debido a que se produce mayor densificación de los recubrimientos por su integración en la fase aglomerante. Por último se puede acotar, que la presencia de Nanotubos de Carbono también aumenta el modulo de elasticidad, haciendo que se mantengan firmes ante cualquier tipo de esfuerzo y de llegarse a deformar drásticamente vuelven a su forma original, manteniendo uniforme todo el recubrimiento.

Adicional a la presencia de Nanotubos de Carbono, la homogeneidad puede ser resultado de la adecuada selección de los parámetros para el proceso de Termorociado, así como también una correcta de aplicación del mismo, por parte de PLASMATEC Ingenieros C.A. Por último, se puede inferir que otro factor que pudo haber contribuido, fueron las altas presiones y temperaturas a la cual fue sometido dentro del reactor, al momento de la aplicación de recubrimiento del Diamante Policristalino Sintético mediante el proceso del PAPVD.

7.1.3. Cálculo de la dureza intrínseca del recubrimiento de WC-Co + NT-C.

Para la obtención de la dureza intrínseca del recubrimiento, se utilizaron los datos de dureza compuesta obtenida a diferentes cargas, 10 gr, 50 gr, 100 gr, 300 gr y 1 kg respectivamente, a lo largo del espesor del recubrimiento.

Para obtener mejores resultados, se recurrió a un método analítico para evaluar la dureza, el cual es el método planteado por **Thomas (1987)**, en el se toma en cuenta el llamado efecto de tamaño de indentación ISE por sus siglas en *inglés (Indentation Size Effect)*, con este método se busca encontrar un valor de dureza absoluta o verdadera, independiente de la carga aplicada. Si bien es un método simple y básico, es bastante efectivo y se tiene la seguridad de que se obtienen resultados subestimados de dureza.

Los resultados obtenidos a partir de este ensayo, se presentan en la tabla 7.3, donde:

- # de Indentación: Número dado a la indentación, según su ubicación, de acuerdo al esquema mostrado en la figura 6.6.
- Valor HV: Valor de la dureza Vickers, expresado en $[Kgf/mm^2]$.
- D1: Valor de la diagonal 1.
- D2: Valor de la diagonal 2.
- D pro: Valor de la diagonal promedio.
- $1/D$ pro: Inversa de la diagonal promedio
- Carga: Valor de la carga aplicada para la indentación, expresado en $[gr]$.

Tabla 7.3. Resultados de la Microindentación Estática aplicada sobre el recubrimiento de WC-Co + NT-C de la muestra, a diferentes cargas.

Resultados del ensayo de Dureza sobre el recubrimiento de WC-Co + NT-C						
# de Indentación	Valor HV	D1	D2	Carga [gr]	D pro	1/D pro
1	1076,7	4,3	4	10	4,15	0,2410
2	1103,2	3,8	4,4	10	4,1	0,2439
3	1051,2	4,1	4,3	10	4,2	0,2381
4	849,1	10,4	10,5	50	10,45	0,0957
5	794,9	10,6	11	50	10,8	0,0926
6	766,3	10,7	11,3	50	11	0,0909
7	757,1	15,7	15,6	100	15,65	0,0639
8	802,6	15,2	15,2	100	15,2	0,0658
9	1025,1	13,9	13	100	13,45	0,0743
10	897,3	24,8	25	300	24,9	0,0402
11	957,8	23,5	24,7	300	24,1	0,0415
12	1033,6	22,8	23,6	300	23,2	0,0431
13	942,8	44,1	44,6	1000	44,35	0,0225
14	1005,3	42,2	43,7	1000	42,95	0,0233
15	953,5	44,6	43,6	1000	44,1	0,0227

Una vez obtenidos los resultados, se graficaron los valores de dureza Vickers en función del valor del inverso de la diagonal promedio, tal como se muestra en la figura 7.3, omitiendo los valores de dureza más bajo y más alto, para así obtener un valor para la dureza absoluta mucho más preciso.

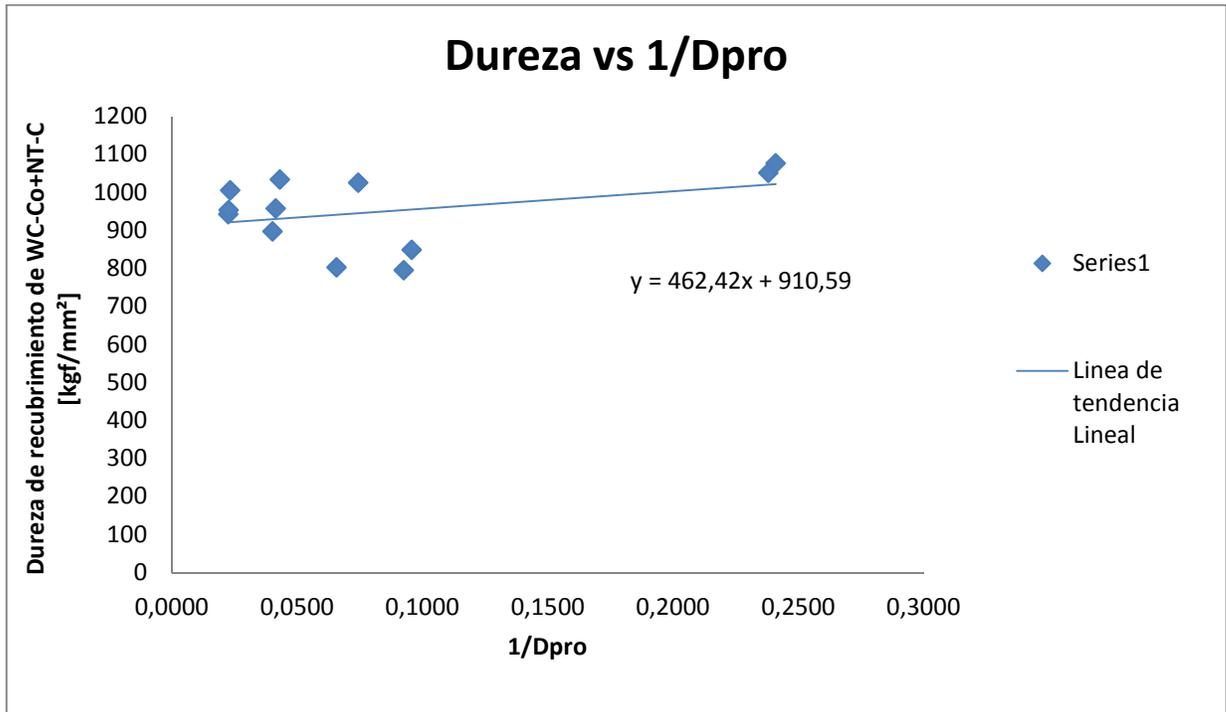


Figura 7.3. Gráfica de la dureza del recubrimiento de WC-Co + NT-C en función de la inversa de la diagonal promedio.

Este nivel de dispersión de datos, puede ser resultado de que en el momento de realizar la indentación durante el ensayo, cada indentación cae de manera aleatoria pudiendo así encontrar zonas blandas y duras de la muestra, dichas zonas son producto de la naturaleza bifásica, en la que cada fase posee propiedades mecánicas distintas, en este caso la dureza, debido a que se pueden encontrar zonas más blandas con mayor concentración de Co, así como también zonas duras, en las que existe una mayor concentración de WC.

Después de obtener la gráfica, se trazó una curva de tendencia lineal, en la se encontró el punto de intersección con el eje de las ordenadas, para obtener el valor de la dureza absoluta (Thomas 1987), la siguiente ecuación (7.1), muestra la expresión algebraica de la recta de mejor tendencia.

$$Hv = 462,4 \left(\frac{1}{d}\right) + 910,5 \quad (7.1)$$

Se puede apreciar que el valor absoluto de dureza es de 910,5 kgf/mm², con una desviación estándar de 95,74 kgf/mm².

Si comparamos este valor con los resultados obtenidos por **Soler y Henríquez (2013)**, en su trabajo especial de grado, nos damos cuenta que son muy similares en las muestras de WC-Co + NT-C, con una diferencia de 4,88 kgf/mm². Por lo que podemos inferir que la corona no tuvo ningún cambio significativo en sus propiedades mecánicas, al ser introducido en el reactor al momento de hacerle el recubrimiento de diamante policristalino sintético mediante el proceso de PAPVD.

Luego si comparamos el valor de dureza intrínseco obtenido con el valor obtenido por Soler-Henríquez en las muestras de WC-Co sin Nanotubos de Carbono, se puede observar que el porcentaje de mejora es de 25,28%. De ello se puede afirmar que existe una mejora sustancial, en comparación a las coronas que actualmente son utilizadas.

7.2. Ensayo de desgaste.

Para el ensayo de desgaste, se procedió a dividir la corona en 6 probetas, tal como se muestra en la figura 7.4, para registrar las medidas de cada una de ellas por separado para cada tiempo.



Figura 7.4. Esquema de la división de la corona en seis probetas.

A su vez, cada probeta se dividió en dos partes iguales, siendo el lado izquierdo de cada probeta el (A) y el derecho el (B).

Los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas, siguiendo el esquema descrito, se muestran en las siguientes tablas tipo (tablas 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9), para los tiempos de ensayo de la corona.

Tabla 7.4. Tabla de mediciones de la corona para el tiempo inicial, 0 segundos.

Medidas a tomar [mm]	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
	Valor tiempo 0 s					
Diámetro ext. - Diámetro int. (A)	21,5	21,49	21,47	21,59	21,48	21,38
Diámetro ext. - Diámetro int. (B)	21,49	21,64	21,53	21,59	21,46	21,49
Altura Radio externo (A)	39,79	39,78	39,68	39,76	39,65	39,74
Altura Radio interno (A)	39,86	39,86	39,74	39,74	39	39,81
Altura Radio externo (B)	39,81	39,64	39,76	39	39	39,76
Altura Radio interno (B)	39,93	39,76	39	39,72	39,75	39,82
Ancho de vía de agua en radio externo	3,48	3,05	3,3	3,37	3,1	3,20
Ancho de vía de agua en radio interno	3,37	2,99	3,3	3,36	3,08	3,06
Ancho de vía de agua central en radio externo	3,45	3,42	3,48	3,52	3,09	2,90
Ancho de vía de agua central en radio interno	2,94	2,98	2,94	3,1	3,13	3,38
Profundidad de vía de agua radio externo	26,69	26,27	25,36	26,96	26,18	26,18
Profundidad de vía de agua radio medio	9,57	9,73	9	9	9,6	9,90
Profundidad de vía de agua radio interno	9,43	9,77	9	9	9,68	9,85
Profundidad de vía de agua central	9,83	9,81	9,69	9	9,65	9
Distancia Radio Interno-Pico 1	4	4	4	4,22	4,42	4,32
Distancia Radio Interno-Pico 2	6,8	7,16	7,31	7,41	7,2	7,26
Distancia Radio Interno-Pico 3	11,06	11,26	11,26	11,21	10,85	10,85
Distancia Radio Interno-Pico 4	15,52	15,38	15,96	15,66	15,22	15,26
Distancia Radio Interno-Base Valle 1	5,15	5,01	5	5,12	5	5,01
Distancia Radio Interno-Base Valle 2	8,61	8,5	8,5	8,49	8,52	8,32
Distancia Radio Interno-Base Valle 3	12,67	12,69	12,72	12,76	12,76	12,76
Profundidad Valle 1	1,88	1,24	2	1,39	1,78	1,50
Profundidad Valle 2	1,88	1,83	2,06	2	2	2,31
Profundidad Valle 3	1,88	2	2,46	2	2,1	2,13

Tabla 7.5. Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 30 segundos.

Medidas a tomar [mm]	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
	Valor tiempo 30 s					
Diámetro ext. - Diámetro int. (A)	21,44	21,47	21,61	21,65	21,51	21,39
Diámetro ext. - Diámetro int. (B)	21,55	21,61	21,58	21,52	21,39	21,42
Altura Radio externo (A)	39	39,74	39,72	39,57	39	39,79
Altura Radio interno (A)	39,85	39,81	39,75	39,78	39	39
Altura Radio externo (B)	39,83	39,85	39,74	39,65	39,71	39
Altura Radio interno (B)	39,93	39,76	39,76	39,72	39	39,82
Ancho de vía de agua en radio externo	3,51	3,18	3,32	3,4	3,2	3,26
Ancho de vía de agua en radio interno	3,25	3,06	3,32	3,26	3,07	3,10
Ancho de vía de agua central en radio externo	3,46	3,39	3,43	3,4	3,6	3,40
Ancho de vía de agua central en radio interno	2,9	3,37	3,12	3,02	3,21	3,10
Profundidad de vía de agua radio externo	26,38	26,45	25,4	26,79	26	26,14
Profundidad de vía de agua radio medio	9,58	9	9,67	9,5	9,65	9,83
Profundidad de vía de agua radio interno	9,42	9	9,1	9,33	9,6	9
Profundidad de vía de agua central	9	9,6	9,5	9	9,4	9,68
Distancia Radio Interno-Pico 1	4	3,96	4	4	4,04	4,13
Distancia Radio Interno-Pico 2	7,1	6,94	6,91	7,16	7,06	7,12
Distancia Radio Interno-Pico 3	10,83	10,78	10,93	10,95	10,65	10,60
Distancia Radio Interno-Pico 4	15,09	15,06	15,38	15,38	15,42	15,16
Distancia Radio Interno-Base Valle 1	5	5,15	5,12	5	5,08	5,05
Distancia Radio Interno-Base Valle 2	8,44	8	8	8	8	8,32
Distancia Radio Interno-Base Valle 3	12,67	12,7	12,51	12,57	12,84	12,77
Profundidad Valle 1	1,45	1,46	1,48	1,27	1,37	1,42
Profundidad Valle 2	1,93	1,78	1,71	1,72	1,86	1,95
Profundidad Valle 3	2	2	2	2	2,04	2,04

Tabla 7.6. Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 60 segundos.

Medidas a tomar [mm]	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
	Valor tiempo 60 s					
Diámetro ext. - Diámetro int. (A)	21,39	21,46	21,5	21,57	21,48	21,37
Diámetro ext. - Diámetro int. (B)	21,42	21,47	21,55	21,53	21,39	21,42
Altura Radio externo (A)	39,74	39	39,65	39	39	39,74
Altura Radio interno (A)	39,82	39,82	39,74	39,69	39	39,79
Altura Radio externo (B)	39	39,69	39,72	39	39,69	39,74
Altura Radio interno (B)	39,92	39,76	39	39	39	39,82
Ancho de vía de agua en radio externo	3,5	3,21	3,28	3,4	3,22	3,27
Ancho de vía de agua en radio interno	3,32	3	3,24	3,42	2,98	2,97
Ancho de vía de agua central en radio externo	3,3	3,47	3,31	3,39	3,58	3,35
Ancho de vía de agua central en radio interno	2,99	3,3	2,99	3,02	3	3,07
Profundidad de vía de agua radio externo	26,34	26,38	25,52	26,85	25,66	26,17
Profundidad de vía de agua radio medio	9	9	9,59	9,24	9,66	9,89
Profundidad de vía de agua radio interno	9,31	9,76	9,61	9,57	9	9,89
Profundidad de vía de agua central	9	9	9,5	9,41	9	9,64
Distancia Radio Interno-Pico 1	4,05	4,03	4,01	4	4,3	4,20
Distancia Radio Interno-Pico 2	7,35	7,02	7,3	7,24	7,13	7,17
Distancia Radio Interno-Pico 3	10,67	10,82	10,84	11,11	10,84	10,77
Distancia Radio Interno-Pico 4	15,45	14,85	15,02	15,54	15,34	15,19
Distancia Radio Interno-Base Valle 1	4,97	5	5,12	5,12	4	4,99
Distancia Radio Interno-Base Valle 2	8	8,36	8,52	8,52	8,4	8
Distancia Radio Interno-Base Valle 3	12,69	12,6	12,73	12,76	12,78	12,70
Profundidad Valle 1	1,39	1,31	1,52	1,24	1,51	1,43
Profundidad Valle 2	1,83	1,87	2,04	1,89	1,94	1,85
Profundidad Valle 3	2,16	2,19	2,29	2,02	1,96	2,13

Tabla 7.7. Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 300 segundos.

Medidas a tomar [mm]	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
	Valor tiempo 300 s					
Diámetro ext. - Diámetro int. (A)	21,36	21,47	21,5	21,55	21,51	21,43
Diámetro ext. - Diámetro int. (B)	21,48	21,48	21,5	21,54	21,53	21,48
Altura Radio externo (A)	39,75	39	39,71	39	39	39
Altura Radio interno (A)	39,85	39,81	39,71	39,72	39,78	39
Altura Radio externo (B)	39,81	39,69	39	39,67	39	39,79
Altura Radio interno (B)	39	39,69	39,81	39,72	39	39,81
Ancho de vía de agua en radio externo	3,57	3,22	3,27	3,36	3,22	3,31
Ancho de vía de agua en radio interno	3,39	3,02	3,29	3,39	3,1	3,18
Ancho de vía de agua central en radio externo	3,46	3,57	3,37	3,36	3,69	3,38
Ancho de vía de agua central en radio interno	3,01	3,18	3,17	2,89	3,12	2,95
Profundidad de vía de agua radio externo	26,37	26,23	25,49	26,84	26,19	26,08
Profundidad de vía de agua radio medio	9	9,67	9,67	9,49	9,68	9,91
Profundidad de vía de agua radio interno	9,43	9,73	9,5	9,44	9,52	9,91
Profundidad de vía de agua central	9,74	9,65	9,41	9,42	9,69	9,65
Distancia Radio Interno-Pico 1	3,95	4,18	4,08	4,16	4,25	4
Distancia Radio Interno-Pico 2	6,96	6,92	7,21	7,06	7,12	7,13
Distancia Radio Interno-Pico 3	10,71	10,95	11,11	10,98	10,88	10,72
Distancia Radio Interno-Pico 4	15,11	15,04	15,26	15,34	15,38	15,18
Distancia Radio Interno-Base Valle 1	4,93	5	5,08	5	4	4,99
Distancia Radio Interno-Base Valle 2	8,25	8	8,49	8,48	8,42	8
Distancia Radio Interno-Base Valle 3	12,63	12,66	12,63	12,8	12,85	12,69
Profundidad Valle 1	1,27	1,39	1,63	1,23	1,65	1,40
Profundidad Valle 2	1,89	1,86	1,8	1,81	1,83	1,93
Profundidad Valle 3	2,19	2,14	2	2,09	2,16	2

Tabla 7.8. Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 600 segundos.

Medidas a tomar [mm]	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
	Valor tiempo 600 s					
Diámetro ext. - Diámetro int. (A)	21,32	21,48	21,5	21,53	21,54	21,35
Diámetro ext. - Diámetro int. (B)	21,55	21,49	21,53	21,55	21,37	21,45
Altura Radio externo (A)	39,76	39	39,78	39	39	39,70
Altura Radio interno (A)	39,88	39,79	39,67	39,75	39,75	39,01
Altura Radio externo (B)	39,82	39,69	39,71	39,65	39,63	39,75
Altura Radio interno (B)	39,85	39,7	39,82	39,72	39	39,79
Ancho de vía de agua en radio externo	3,65	3,23	3,26	3,31	3,22	3,26
Ancho de vía de agua en radio interno	3,4	3,04	3,26	3,35	3,05	3,14
Ancho de vía de agua central en radio externo	3,46	3,59	3,44	3,42	3,62	3,34
Ancho de vía de agua central en radio interno	3,03	3,03	3,09	2,92	3,27	2,98
Profundidad de vía de agua radio externo	26,4	26,34	25,45	26,82	26,15	26,16
Profundidad de vía de agua radio medio	9	9,65	9,77	9,52	9,67	9,93
Profundidad de vía de agua radio interno	9,38	9,69	9,46	9,37	9,57	9,93
Profundidad de vía de agua central	9,76	9,66	9,49	9,43	9,55	9,66
Distancia Radio Interno-Pico 1	3,92	4,16	4,06	4,06	4,28	4,05
Distancia Radio Interno-Pico 2	6,97	6,99	7,09	7,13	7,1	7,18
Distancia Radio Interno-Pico 3	10,76	10,91	11,04	11,01	10,83	10,65
Distancia Radio Interno-Pico 4	15,48	15,28	15,36	15,39	15,43	15,16
Distancia Radio Interno-Base Valle 1	4,98	5	5,03	5,05	4	4,99
Distancia Radio Interno-Base Valle 2	8,56	8,45	8,45	8,53	8,44	8
Distancia Radio Interno-Base Valle 3	12,65	12,73	12,5	12,85	12,83	12,67
Profundidad Valle 1	1,32	1,49	1,76	1,21	1,58	1,46
Profundidad Valle 2	1,86	1,84	1,75	1,71	1,89	1,93
Profundidad Valle 3	2,22	2,07	2,33	2,07	2,11	2,03

Tabla 7.9. Tabla de mediciones de la corona para el tiempo de ensayo 1200 segundos.

Medidas a tomar [mm]	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6
	Valor tiempo 1200 s					
Diámetro ext. - Diámetro int. (A)	21,34	21,45	21,5	21,59	21,46	21,29
Diámetro ext. - Diámetro int. (B)	21,49	21,51	21,59	21,57	21,45	21,49
Altura Radio externo (A)	39,78	39	39,72	39	39	39,71
Altura Radio interno (A)	39,84	39,75	39,69	39,71	39,09	39,73
Altura Radio externo (B)	39,84	39,69	39,73	39,61	39,69	39,67
Altura Radio interno (B)	39,85	39,72	39,74	39,72	39	39,75
Ancho de vía de agua en radio externo	3,51	3,25	3,34	3,32	3,22	3,26
Ancho de vía de agua en radio interno	3,32	3,01	3,32	3,37	3,03	3,06
Ancho de vía de agua central en radio externo	3,46	3,53	3,38	3,54	3,48	3,26
Ancho de vía de agua central en radio interno	2,97	3,13	3,03	2,98	3,17	3,04
Profundidad de vía de agua radio externo	26,36	26,26	25,47	26,78	26,17	26,12
Profundidad de vía de agua radio medio	9	9,61	9,77	9,58	9,65	9,87
Profundidad de vía de agua radio interno	9,38	9,71	9,48	9,23	9,67	9,97
Profundidad de vía de agua central	9,8	9,68	9,55	9,45	9,67	9,68
Distancia Radio Interno-Pico 1	3,96	4,12	4,02	4,16	4,34	4,15
Distancia Radio Interno-Pico 2	6,99	7,13	7,05	7,27	7,16	7,28
Distancia Radio Interno-Pico 3	10,86	10,83	10,99	11,07	10,73	10,71
Distancia Radio Interno-Pico 4	15,32	15,26	15,56	15,49	15,33	15,33
Distancia Radio Interno-Base Valle 1	5,08	5	5,13	5,15	4	4,99
Distancia Radio Interno-Base Valle 2	8,48	8,35	8,47	8,53	8,48	8,00
Distancia Radio Interno-Base Valle 3	12,69	12,67	12,64	12,75	12,79	12,73
Profundidad Valle 1	1,42	1,39	1,92	1,27	1,64	1,48
Profundidad Valle 2	1,88	1,8	1,95	1,91	2,01	1,93
Profundidad Valle 3	2,08	2,03	2,39	2,03	2,01	2,09

Por otro lado, para el material abrasivo, se dividió en cuatro partes iguales, tal como se muestra en a figura 7.5, y se midió después de cada ensayo, obteniendo los resultados expuestos en las tablas 7.10 y 7.11.

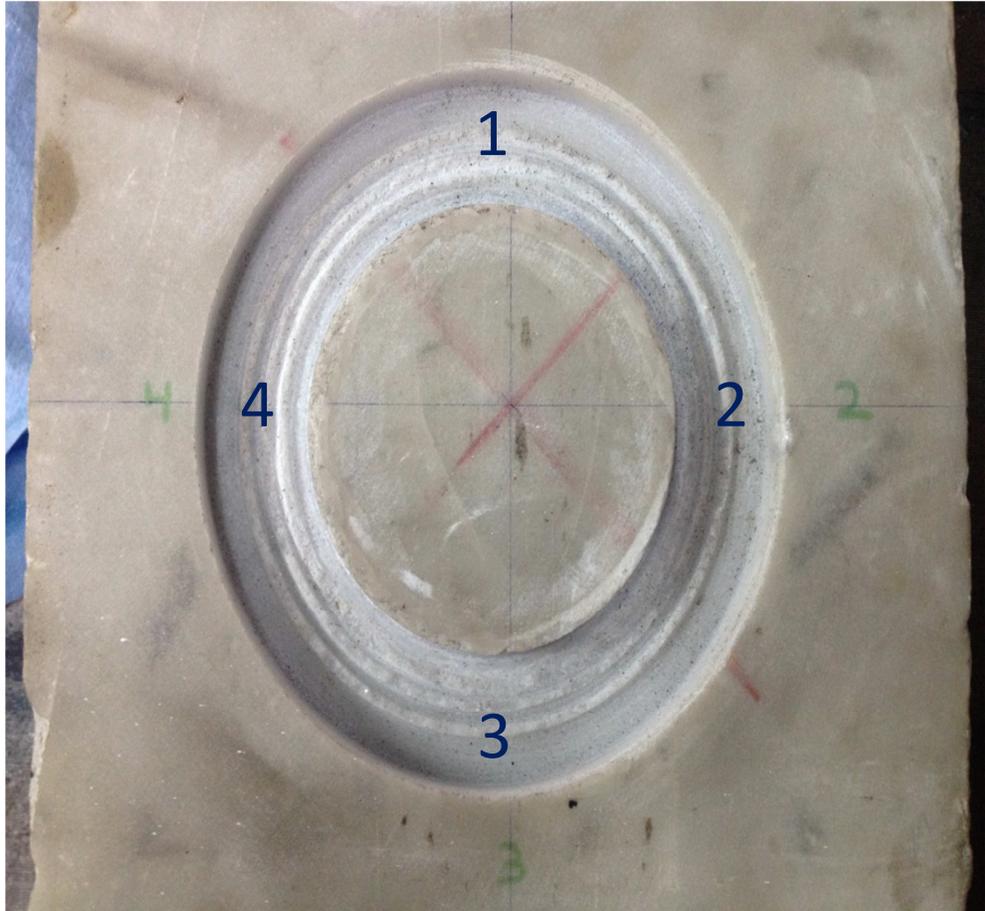


Figura 7.5. Esquema de la división del material abrasivo.

Tabla 7.10. Resultados del ensayo de alto desgaste de 30 s a 36000 s, para el material abrasivo.

Tabla de resultados del material abrasivo para el ensayo de alto desgaste											
Posición	Valor [mm]	Tiempos de ensayo [s]									
		30	60	300	600	1200	2400	3600	7200	18000	36000
1	D int.	101,46	100,84	100,51	100,52	100,55	100,61	100,71	100,54	100,64	100,83
	D ext.	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9
	h	0,99	2,37	8,49	16,052	31,652	62,852	94,052	187,652	468,452	936,452
	D ext. - D int.	21,44	22,06	22,39	22,38	22,35	22,29	22,19	22,36	22,26	22,07
2	D int.	100,22	100,22	100,47	100,43	100,31	100,2	100,28	100,33	100,23	100,31
	D ext.	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9
	h	1,67	3,33	8,61	19,8576	39,7152	79,4304	119,1456	238,2912	595,728	1191,45
	D ext. - D int.	22,68	22,68	22,43	22,47	22,59	22,7	22,62	22,57	22,67	22,59
3	D int.	99,81	99,7	99,54	99,34	99,44	99,73	99,42	99,65	99,63	99,58
	D ext.	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9
	h	2,61	3,5	9,15	16,371	30,771	59,571	88,371	174,771	433,971	865,971
	D ext. - D int.	23,09	23,2	23,36	23,56	23,46	23,17	23,48	23,25	23,27	23,32
4	D int.	100,23	99,48	100,43	100,42	100,39	100,14	100,08	100,03	100,13	100,15
	D ext.	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9	122,9
	h	1,54	2	8,48	16,2	31,8	63	94,2	187,8	468,6	936,6
	D ext. - D int.	22,67	23,42	22,47	22,48	22,51	22,76	22,82	22,87	22,77	22,75
Volumen Final [mm³]		6755,79	11194,1	34482,25	68090,52	133188,88	263464,81	394225,9	784982,54	1956882,87	3900893,65

Usando los datos de las tablas, fueron realizadas representaciones en 3D de la corona, a través de las herramienta computacional Inventor, y obteniendo a partir de este, el volumen de la pieza para cada tiempo de ensayo. Dichos valores se reportan en la tabla 7.11, con los que posteriormente fue calculado el desgaste volumétrico, que sufrió la corona.

Tabla 7.11. Tabla de datos de la corona, para cada tiempo de ensayo.

Tiempo de Ensayo [s]	Tiempo acumulado [s]	Volumen de la Corona [mm³]	Masa de la corona [gr]	Masa desprendido [gr]
0	0	260189,45	2227,71	0
30	30	259215,89	2219,38	8,33
60	90	258127,98	2210,06	9,3145
300	390	258112,08	2209,93	0,1361
600	990	258296,4202	2211,51	-1,5783
1200	2190	258229,5932	2210,93	0,5721
2400	4590	258167,3093	2210,4	0,5332
3600	8190	258118,572	2209,98	0,4172
7200	15390	258065,4772	2209,53	0,4545
18000	33390	258000,2843	2208,97	0,5581
36000	69390	257938,7151	2208,44	0,5271

Adicionalmente, se calculó el volumen de la pieza de mármol para cada tiempo de ensayo, y fueron reportados los valores en la tabla 7.12. Una vez obtenido el volumen de la corona y del material abrasivo se multiplico por la densidad del material y se obtuvo el valor de masa respectivamente.

Tabla 7.12. Tabla de datos del material abrasivo, para cada tiempo de ensayo.

Tiempo [s]	Tiempo acumulado [s]	Volumen desprendido Acumulado [mm ³]	Masa desgastada del mármol [gr]
0	0	0	0
30	30	6755,79	18,24
60	90	11194,10	30,22
300	390	34482,25	93,1
600	990	68090,52	183,84
1200	2190	133188,88	359,61
2400	4590	263464,81	711,35
3600	8190	394225,9	1064,4
7200	15390	784982,54	2119,45
18000	33390	1956882,87	5283,58
36000	69390	3900893,65	10532,41

A partir de los datos mostrados en las tablas anteriores, se obtuvieron las gráficas mostradas en las figuras 7.6 y 7.7, que representan la masa de la corona y la masa desprendida del material abrasivo en función del tiempo acumulado, respectivamente.

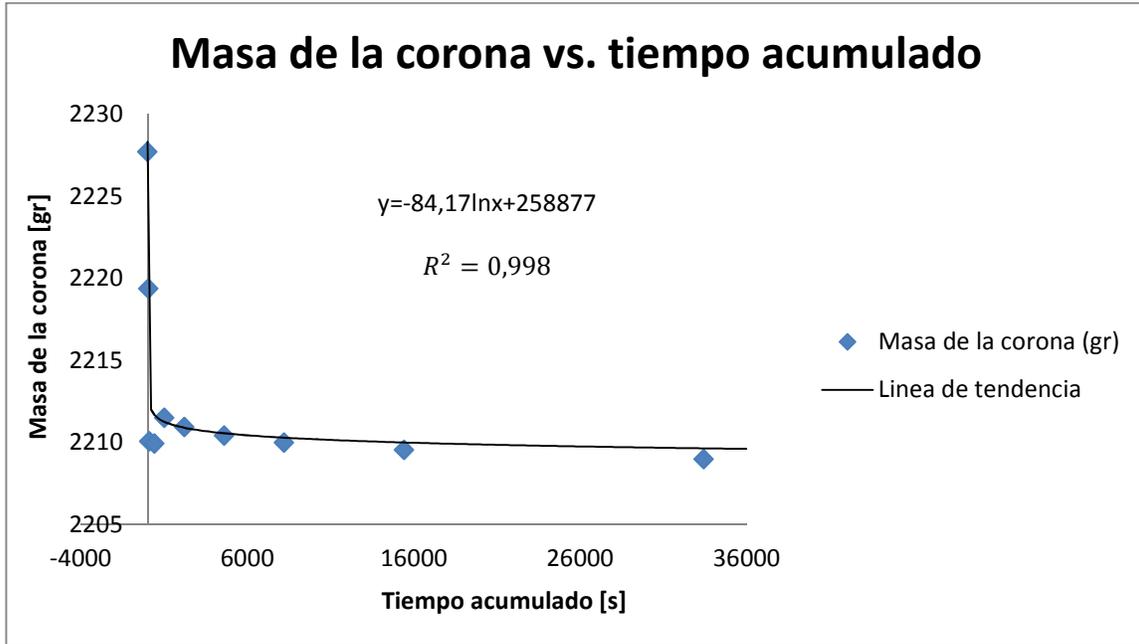


Figura 7.6. Gráfica de la masa de la corona para cada tiempo de ensayo.

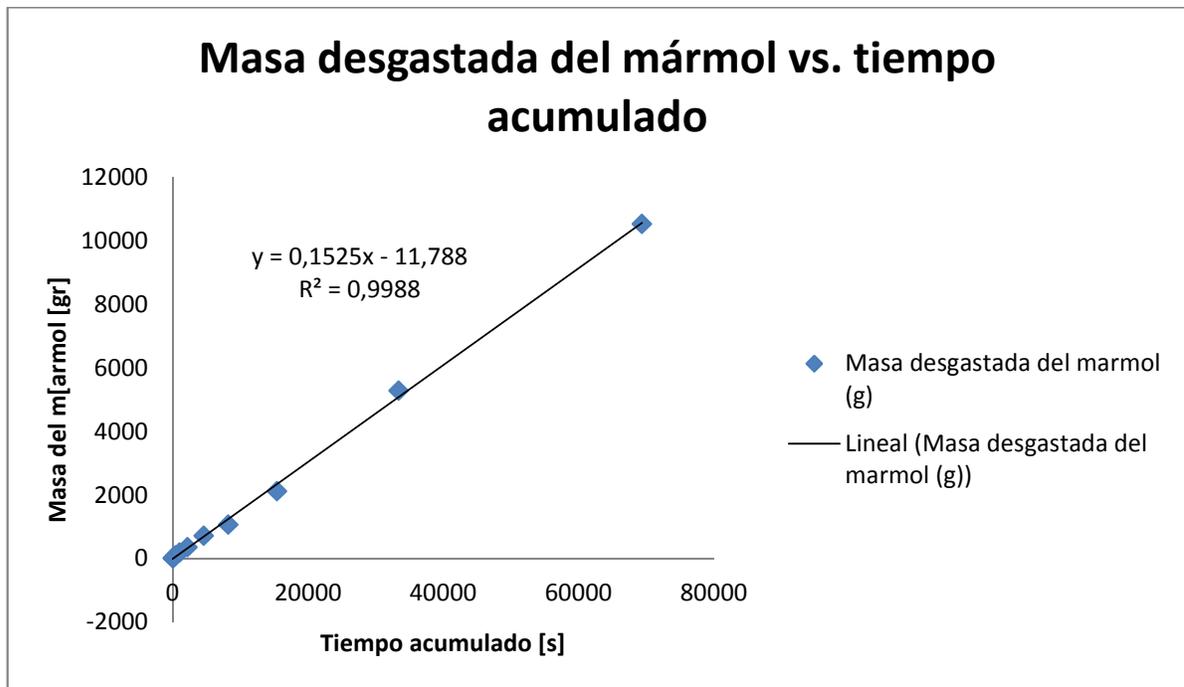


Figura 7.7. Gráfica de la masa desprendida por el Mármol para cada tiempo de ensayo.

De la gráfica de la masa de la corona contra el tiempo de ensayo acumulado (figura 7.6) podemos afirmar que en los primeros segundos de ensayo ocurre un desgaste violento, en el que se pierden 17,6501 gr, esto puede ser producto de la rugosidad inicial del elemento abrasivo, además se puede acotar, según el trabajo especial de grado de **Azuaje y Rondón (2007)**, que la carencia de bisel en los bordes superiores de la corona, incrementan los esfuerzos sobre la zona de contacto, lo que pudo haber generado la pérdida violenta de material.

Posteriormente, su masa aumentó debido a que cierta cantidad de mármol se fue adhiriendo a la corona, y luego se observa cómo la misma iba perdiendo masa muy lentamente, tendiendo a una línea asintótica hacia un valor constante que del orden de los 2200gr. Esto último sugiere que la corona, a partir de cierto tiempo de perforación, entra en un régimen de desgaste constante, en el cual se vuelve más eficiente y su desgaste es menor.

Además se debe acotar que, en ninguno de los ensayos la pérdida volumétrica es únicamente de la corona ya que siempre va a existir el fenómeno de adherencia del elemento abrasivo, en este caso el mármol, sobre la corona. Pero a medida que pasa el tiempo podemos observar que la pérdida de masa de la corona se vuelve relativamente constante, por lo que podemos decir que el fenómeno de adhesión se reduce considerablemente, haciendo posible la predicción del tiempo de vida útil de la herramienta.

Ahora analizando la gráfica del material abrasivo (figura 7.7) podemos observar, que desde el primer ensayo se tiene una tendencia potencial, y que el desgaste experimentado siempre es mucho mayor que el experimenta la corona. El objetivo para una herramienta de corte, es desprender la mayor cantidad de material del elemento abrasivo, y en base a los resultados del ensayo presentados en la gráfica anterior, la corona muestra un buen desempeño, con respecto al material desgastado del elemento abrasivo.

A partir de la variación de volumen presentada tanto en la corona como en el mármol, se obtuvieron el Índice de Pérdida de Volumen (IPV) y el Índice de Pérdida de Masa (IPM), usando las ecuaciones 6.3 y 6.4, cuyos resultados se presentan en la tabla 7.13. En base a los resultados obtenidos, se generó la gráfica mostrada en la figura 7.8, donde podemos observar la relación de pérdida de masa de la corona en función de la pérdida de masa del mármol durante el tiempo de ensayo.

Tabla 7.13. Tabla de datos de la relación de pérdida de Volumen de la corona y el mármol.

Tiempo acumulado	Volumen desprendido acumulado de la corona [mm³]	Volumen desprendido Acumulado del mármol [mm³]	IPV	IPM
0	0	0	0	0
30	973,56	6755,79	0,1441	0,4570
90	2061,47	11194,10	0,1842	0,3082
300	2077,37	34482,25	0,0602	0,0015
600	1893,02	68090,52	0,0278	-0,0086
1200	1959,85	133188,88	0,0147	0,0016
2400	2022,14	263464,81	0,0077	0,0002
3600	2070,87	394225,9	0,0053	0,0001
7200	2123,97	784982,54	0,0027	4,6022E-05
18000	2189,16	1956882,87	0,0011	2,2456E-05
36000	2250,73	3900893,65	0,0006	1,0585E-05

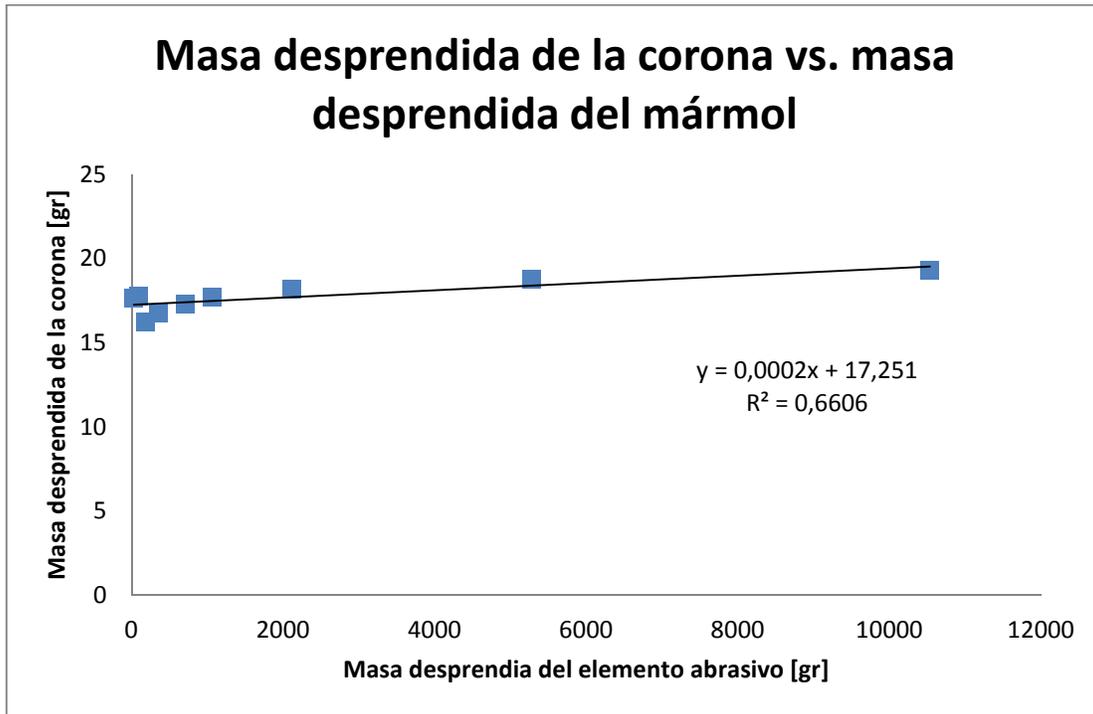


Figura 7.8. Gráfica de la masa de la corona en función de la pérdida de masa del mármol.

Se puede afirmar que la herramienta de corte presentará mayor eficiencia, a medida que esta tenga la capacidad de generar un mayor desprendimiento de masa en el elemento abrasivo, sin que se observe un desprendimiento de masa importante en ella. Esto también se evidencia en el valor del IPM, ya que a medida que este tiende, la eficiencia de la corona es más alta.

Del análisis de la gráfica presentada la figura 7.8, y de los valores de IPM reportados en la tabla 7.13, podemos afirmar que la corona diseñada presenta una alta eficiencia, ya que el desgaste de la misma es bastante bajo en comparación con el desgaste que sufre el mármol, y los valores obtenidos del IPM, son bastante cercanos a cero.

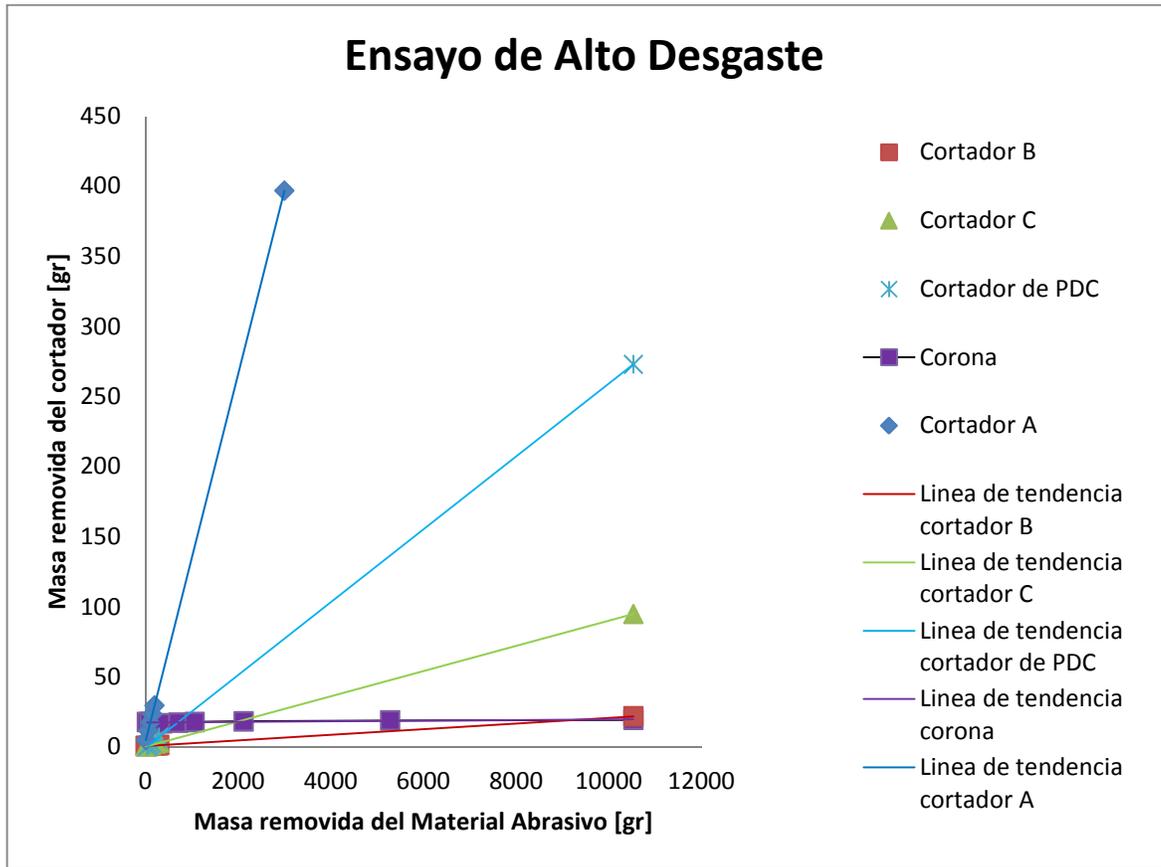


Figura 7.9. Desgaste de la corona en función del material removido, para un ensayo simulativo de desgaste acumulativo, con Carbonato (Mármol Rosado) para el caso de la corona y el cortador de PDC, y arenisca para el caso de los cortadores A, B y C, y refrigeración continua con agua para el caso de la corona y los cortadores B, C, y PDC, y refrigeración con aire para el cortador A.

En la figura 7.9, se muestra una gráfica comparativa de la masa desprendida del cortador contra la masa desprendida por el material abrasivo para un ensayo simulativo de desgaste, entre los valores obtenidos en este trabajo (Corona) contra los valores obtenidos por Azuaje L. y Rondón L., en su Trabajo especial de Grado del 2007 (Cortador de PDC), y los valores obtenidos por SANDIA National Laboratories (Cortadores A, B y C). Se debe tomar en cuenta que para el ensayo del cortador A se utilizó lubricación con aire y para los ensayos de los cortadores B, C, PDC y la corona, se uso lubricación a base de agua.

Si analizamos la figura antes descrita, el comportamiento de la corona y lo comparamos con el comportamiento de los demás cortadores de la figura antes descrita, podemos observar que para el caso del cortador de PDC, el cortador B y el cortador C, las pendientes son similares, en base a lo que se puede afirmar que los valores obtenidos en este trabajo se encuentran dentro del rango esperado.

La diferencia entre los resultados obtenidos a partir de los ensayos desarrollados por cada una de las tres partes, se debe a que para el ensayo de SANDIA se utilizó como elemento abrasivo una formación rocosa con menor dureza (arenisca) y para el caso de los otros dos ensayos se usó mármol (Carbonato de Calcio) como elemento abrasivo. La otra diferencia apreciable entre los ensayos es que para este trabajo se utilizó, una corona la cual es de mayor dimensión en relación a los cortadores usados para los otros ensayos, por lo que los valores de desgaste son mayores.

Es de importancia destacar, que la pendiente de la gráfica obtenida para la corona, es considerablemente menor a la del cortador de PDC, por lo que se puede inferir que la corona presentará una eficiencia superior y un mejor desempeño con respecto a los otros cortadores, que asemejan a las coronas que actualmente se encuentran en el mercado.

CONCLUSIONES

8. CONCLUSIONES

- La aplicación del recubrimiento de WC-Co + NT-C por HVOF, tuvo un efecto sobre la dureza del sustrato, debido a que en el momento del impacto entre las partículas de WC-Co + NT-C con la superficie del mismo, se produjo una deformación plástica, que trajo como consecuencia un incremento en la dureza del material, a medida que nos acercamos la superficie del sustrato.
- La presencia de Nanotubos de Carbono en el recubrimiento propicia la homogeneidad del recubrimiento, aumentando la fuerza de los enlaces entre las partículas de WC. Adicionalmente, aumenta el modulo de elasticidad.
- Los parámetros utilizados para el proceso de termorociado, así como la correcta aplicación del recubrimiento, son fundamentales para la homogeneidad del mismo, lo que implicará un mejor desempeño, esto queda evidenciado en la calidad del recubrimiento aquí evaluado.
- Las altas presiones y temperaturas a la cual fue sometida la corona dentro del reactor, al momento de la aplicación de recubrimiento del Diamante Policristalino Sintético mediante el proceso del PAPVD, pueden haber influenciado en la homogeneidad del material.
- La dureza del recubrimiento de WC-Co + NTC, no se vio afectada por el proceso de aplicación del recubrimiento de PDC por PAPVD.
- A partir de cierto tiempo de perforación, la corona entra en un régimen de desgaste constante, siendo más eficiente y presentando un menor desgaste.

- De los valores de IPM reportados, se puede afirmar que la corona diseñada presenta una alta eficiencia, ya que el desgaste de la misma es considerablemente más bajo en comparación con el desgaste que sufre el material abrasivo.
- El diseño de la corona presentado en este trabajo, demostró una mayor eficiencia y mejor desempeño que las coronas de para extracción de núcleo con insertos de PDC convencionales.

RECOMENDACIONES

9. RECOMENDACIONES

- Plantear otras soluciones para el problema, diseñando coronas para brocas de extracción de núcleos con diferentes configuraciones y materiales, para llevar a cabo un estudio comparativo entre las diferentes herramientas.
- Desarrollar diseños de coronas para brocas de extracción de núcleos, que sean aplicables para otras variedades de suelos.
- Realizar un estudio de las características micro-estructurales de la corona, para obtener una mejor visión de su desempeño.
- Llevar a cabo un estudio de difracción de rayos X, para identificar las fases presentes, y poder cuantificar el valor del índice de descarburización aproximado, si es que este existe.
- Para futuros trabajos, se sugiere que durante el ensayo de alto desgaste, se mida la masa desprendida o en su defecto el volumen desprendido; tanto de la corona como del material abrasivo.
- Realizar un estudio de factibilidad de producción en masa de la herramienta, para uso en la industria petrolera venezolana.

BIBLIOGRAFÍA

10. BIBLIOGRAFÍA

1. Arenas F., Castro G, Rodríguez M. y Scagni A. (2001), “Microestructura de materiales compuestos WC-Co/Ni-W-Cr recubiertos por HVOF”, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Caracas.
2. ASTM E-384. (2007). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.
3. Azuaje L. y Rondón L. (2007), “Estudio de la factibilidad técnica para la sustitución de herramientas de PDC/WC-Co por insertos de HSS Nitrurado Iónicamente y recubierto con película de DLC”. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Caracas.
4. Bourgoyne A, Chenevert M., Millheim K y Young F. (1984), “Applied Drilling Engineering”. Society of Petroleum Engineers, Texas, U.S.A.
5. Burr B., Dillard S., Drake E., Ivie B., Ivie C., Smith R., Watson G. (2001). “Bordes Cortantes”, Oil Field Review, Houston, Texas, U.S.A.
6. Chivavibul P., Wanatabe M., Kuroda S., Kawanita J., Komatsu M, Sato K., Kitamura J. (2010), “Effect of Powder Characteristics on Properties of warm-sprayed WC-Co coating”, Journal of Thermal Spray Technology.
7. De La Vergne J. (2003). “Hard Rock Miners Handbook”, Capítulo: Exploration Geology and Ore Reserves, página 7. McIntosh Engineering, Canada.

8. Ferrara, S. y Pérez, R. (2001), “Evaluación de la resistencia al desgaste de un recubrimiento depositado por rociado térmico (HVOF)”, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Caracas.
9. Ferrara, S., Gil, L., Pérez, R y Rodríguez M. (2009), “Desgaste de recubrimientos WC-Co-NiCrBSi tratados térmicamente”, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Caracas.
10. Finger J. y Glowka D. (1989), “PDC Bit Research at Sandia National Laboratories”, New Mexico, U.S.A.
11. Henríquez A. y Soler A. (2013), “Estudio de la tenacidad de fractura en recubrimientos microestructurados mejorados con Nanotubos de Carbono obtenidos por proyección de HVOF en Acero AISI 1020”. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Caracas.
12. Karpiola K. (2004), “High temperature oxidation of metal, alloy and cermet powder in HVOF spraying process”. Helsinki University of Technology Publication in Materials Science and Metallurgy, Finlandia.
13. La Barbera J.G. (2008), “Comportamiento a la fatiga del acero SAE 1045 recubierto con Colmonoy 88 depositado por termo rociado HVOF: Efecto de la distancia de rociado”, Trabajo de Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Caracas.
14. Méndez Baamonde J. (2006), Petrología. Análisis de núcleos. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Caracas.

15. Milani R. (1997), "Diseño para nuestra realidad". Ediciones de la Universidad Simón Bolívar, Equinoccio, Caracas.
16. Puchi Cabrera, E. (2002), "A new model for the computation of the composite hardness of coated systems. Surface and Coatings Technology".
17. Puchi Cabrera, E. (2004), "Computation of composite hardness of coated systems. Surface Engineering".
18. Villalobos C. (2012), "Evaluación del comportamiento a la fatiga de un acero estructural recubierto con depósitos tipo multicapa obtenidos por PAPVD", Trabajo de Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Caracas.
19. Wise J. *et al.* (2004), "Effects of Design and Processing Parameters on Performance of PDC Drag Cutters for Hard-Rock Drilling".
20. Woodman R., Klotz D., Dowding R. (2005), "Evaluation of a dry ball-milling technique as metal for mixing boron carbide and carbon nanotube powders". Ceramics International.
21. Zhang F. Shen J., Sun J. (2004), "Processing and properties of carbon nanotubes nano WC-Co composites". Materials Science and Engineering.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

11. REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. Aceros SISA, Catálogo de características del Acero H13 [en línea]. Consultado Octubre 2013. Disponible en www.sisa1.com.mx/pdf/AceroSISAH13.pdf
2. Boart Longyear. Catálogo de brocas y productos [en línea], consultado noviembre 2013. Disponible en www.boartlongyear.com,
3. U. S. A. Central Intelligence Agency. Libro de los hechos Del mundo, “The World Fact Book” [en línea]. Consultado octubre 2013. Disponible en www.cia.gov/library/publucations/the-world-factbook.