

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

ANÁLISIS DE VÍAS DE AGUA DE BROCAS DE PERFORACIÓN DIAMANTINA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecánico**, que presenta el bachiller:

GARAY GÓMEZ, HAEKEL ZÓSIMO

ASESOR: Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán

Lima, Septiembre de 2014

RESUMEN

El presente documento detalla la variación de las condiciones de trabajo que se obtiene al modificar la geometría de las vías de agua de las brocas de perforación diamantinas, las cuales son utilizadas como herramientas de corte durante los procesos de perforación.

En la primera etapa de la investigación, el análisis de la problemática se realiza mediante simulaciones numéricas, siendo el alcance la comparación de las características fluido-dinámicas del flujo de enfriamiento tanto de las brocas con vías de agua estándar (radiales), como de las brocas con las vías de agua modificada (con un ángulo de inclinación).

Posteriormente, con el objetivo de probar el desempeño de las brocas y el desgaste que se presenta en cada geometría, se realizaron ensayos experimentales (ensayos de perforación) en las instalaciones de la empresa Boyles Bros Diamantina. En esta etapa, es importante mencionar que la empresa dispuso de una máquina de perforación y de un área de sus instalaciones para el desarrollo de las pruebas experimentales.

Finalmente, según los resultados obtenidos, se logra verificar que la modificación de la geometría de vías de agua influye en el desempeño de la broca de perforación de manera positiva. En el caso de la simulación numérica se observa un desarrollo del fluido más eficiente, con vectores de velocidad de mayor magnitud y con zonas de intensidad de turbulencia más uniformes, lo cual se traduce en una mejor capacidad de enfriamiento de la broca de perforación. En cuanto a los resultados de los ensayos experimentales, se observó una reducción aproximada del desgaste de la corona de 54 % durante los primeros 25 metros de perforación, así como un menor desgaste del casquillo de acero producto de una mejor evacuación de detritos (conglomerado de partículas rocosas y partículas de la matriz de la broca).

Estos resultados demuestran que el diseño propuesto de vías de agua inclinadas es una alternativa viable con grandes beneficios, pues proporciona una mayor eficiencia en la capacidad de enfriamiento, y reduce tanto el calentamiento de la broca como la ductilidad de la matriz metálica, lo que en consecuencia permite disminuir las posibilidades de desgaste prematuro de la matriz y del casquillo de acero, lográndose mayores metrajes de perforación.


 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : ANÁLISIS DE VÍAS DE AGUA DE BROCAS DE PERFORACIÓN DIAMANTINA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA
 ÁREA : Diseño # 262
 PROPUESTO POR : Haekel Zósimo Garay Gómez
 ASESOR : Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán
 TESISTA : Haekel Zósimo Garay Gómez
 CÓDIGO : 20082069
 FECHA : 22 de Julio de 2014


DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

La broca de perforación diamantina es una herramienta con gran efectividad y flexibilidad para cortar la roca. Para su fabricación y diseño, se considera de gran importancia tanto la composición utilizada como la geometría de la misma, siendo este último punto el menos estudiado debido las condiciones de trabajo propias de la perforación.

Dentro de la geometría de la broca, las vías de agua son las de mayor importancia, pues a través de estos canales es transportado un fluido, el cual permite tanto el enfriamiento de la broca como la evacuación de partículas desprendidas durante el proceso de perforación.

Un diseño no eficiente de las vías de agua se traduce en un enfriamiento no efectivo, lo cual genera la disminución de la vida útil de la broca producto de la exposición de la matriz a altas temperaturas. Asimismo, la mala evacuación de los recortes de rocas puede provocar la obstaculización de los canales de enfriamiento o el desgaste prematuro de la broca de perforación.

En base a esto, el objetivo principal de la tesis es proponer una mejora del diseño de las vías de agua de brocas de perforación diamantina utilizando tanto la simulación numérica, como una metodología experimental.






PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**ANÁLISIS DE VÍAS DE AGUA DE BROCAS DE PERFORACIÓN DIAMANTINA
MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA**

Introducción

1. Fundamentos teóricos
2. Simulación numérica mediante ANSYS CFX
3. Metodología experimental

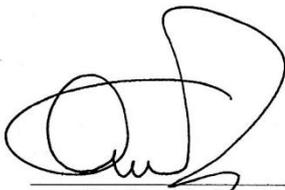
Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 100 páginas



Dr. Ing. Quino Valverde
Asesor





A mis padres y hermanos,

Por haberme apoyado en todo para que yo pudiera lograr mis sueños, por el amor incondicional y las palabras de aliento en los momentos difíciles que han sido para mí incentivos de vida, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, Dr. Ing. Quino Valverde Guzmán, por ser mi apoyo en esta etapa universitaria que culmina exitosamente.

A mis amigos, Davy Olivera Oliva, Alex Maguiña Trujillo, Pedro Flores Álvarez y Martín Cruz Alvarado, por brindarme todos sus conocimientos y experiencias profesionales, que me permitieron finalizar mi investigación de manera satisfactoria.

De igual manera, agradecer al Ing. Miguel Torres Santos y al Ing. Gastón Cruz Carlin, por brindarme las instalaciones de la empresa ESSS – Ansys Perú para desarrollar exitosamente parte del presente trabajo, siempre estaré agradecido por el conocimiento adquirido en sus instalaciones.

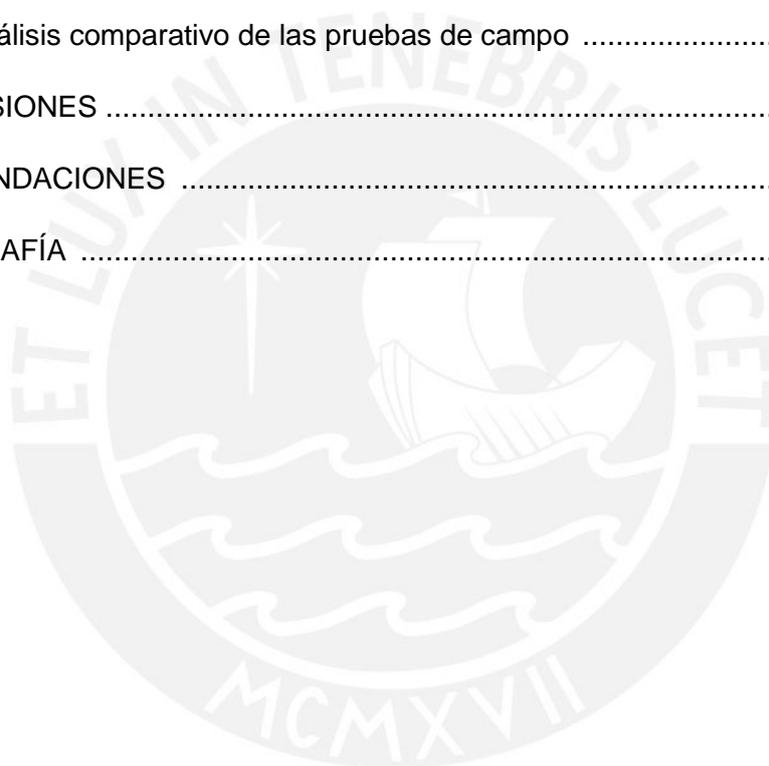
Finalmente, me gustaría agradecer a todas aquellas personas que han formado parte de mi vida profesional y personal, agradecerles por su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida; sin importar en donde estén, les agradezco por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

RESUMEN	i
APROBACIÓN DEL TEMARIO DE TESIS	ii
ÍNDICE DEL CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
1.1 Broca de perforación diamantina.....	5
1.1.1 Descripción general.....	5
1.1.2 Aplicaciones	6
1.1.3 Conceptos principales	7
1.1.3.1 Matriz de polvos y casquillo de acero	7
1.1.3.2 Canales de enfriamiento.....	7
1.1.3.3 Zona de transporte de fluido	9
1.2 Dinámica de fluidos	10
1.2.1 Tipos de fluido	10
1.2.2 Tipos de flujo	13
1.2.3 Teorema de transporte de Reynolds	16
1.2.4 Ecuaciones generales de dinámica de fluidos	17
1.2.5 Análisis de flujos turbulentos	17
1.2.5.1 Definición de turbulencia	17
1.2.5.2 Ecuación de la energía en turbulencia	18

1.2.5.3 Modelos de turbulencia	19
1.3 Simulación numérica y método de volúmenes finitos (CFD)	20
1.3.1 Definiciones	20
1.3.1.1 Simulación numérica	20
1.3.1.2 Métodos de volúmenes finitos	21
1.3.2 Fundamentos de manipulación de CFD	21
1.3.3 Implementación computacional del CFD	22
1.3.3.1 Pre-procesamiento	22
1.3.3.2 Solución	23
1.3.3.3 Post-procesamiento	23
2. SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE ANSYS CFX	25
2.1 Definición del problema	25
2.2 Pre-procesamiento	26
2.2.1 Diseño CAD del modelo	26
2.2.2 Definición del dominio	27
2.2.3 Generación de mallado	30
2.2.4 Definición de condiciones de trabajo	38
2.2.4.1 Fluido de enfriamiento	38
2.2.4.2 Parámetros de operación	38
2.2.5 Parámetros de control	39
2.3 Solución	39
2.4 Post-procesamiento	43
2.4.1 Análisis fluido-dinámico comparativo de las brocas	43

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	51
3.1 Diseño de la broca de perforación diamantina	51
3.1.1 Composición de diamantes	51
3.1.2 Composición de la matriz	52
3.2 Fabricación de las brocas de perforación diamantina	52
3.3 Ensayos de perforación	55
3.4 Análisis comparativo de las pruebas de campo	58
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	65



ÍNDICE DEL FIGURAS

Figura 1.1. Broca de perforación diamantina y corte de sección	5
Figura 1.2. Broca con canales de refrigeración obstaculizados y broca fundida	8
Figura 1.3. Trayectoria de fluido de refrigeración en el Sistema Wireline	9
Figura 1.4. Viscosidad del fluido en función de la tasa de deformación, para distintos comportamientos de la viscosidad del fluido	11
Figura 1.5. Tensión de cizallamiento en función de la tasa de deformación para distintos comportamientos de la viscosidad del fluido	12
Figura 1.6. Discretización de variables	22
Figura 2.1. Esquema simplificado para el análisis del comportamiento del fluido durante el proceso de perforación	26
Figura 2.2. Modelo geométrico de la broca con vías de agua rectas y de la broca con vías de agua inclinadas	27
Figura 2.3. Volumen de control que encierra la corona de la broca de perforación	28
Figura 2.4. Volumen de control de entrada del fluido	29
Figura 2.5. Volumen de control de salida del fluido	29
Figura 2.6. Dominio total del modelo	30
Figura 2.7. Mallado de los tres dominios de la broca de perforación de vías radiales.	31
Figura 2.8. Superficie con distribución de valores de Yplus de la broca de perforación de vías radiales (Rotational Domain)	32
Figura 2.9. Superficie con distribución de valores de Yplus del dominio de entrada en la broca de perforación de vías de agua radiales	33
Figura 2.10. Superficie con distribución de valores de Yplus del dominio de salida en la broca de perforación de vías de agua radiales	33
Figura 2.11. Mallado de los tres dominios de la broca de perforación de vías de agua inclinadas	34

Figura 2.12. Superficie con distribución de valores de Yplus de la broca de perforación de vías inclinadas (Rotational Domain)	35
Figura 2.13. Superficie con distribución de valores de Yplus del dominio de entrada en la broca de perforación de vías de agua inclinadas	35
Figura 2.14. Superficie con distribución de valores de Yplus del dominio de salida en la broca de perforación de vías de agua inclinadas	36
Figura 2.15. Estadísticas de mallado de los dominios parciales y del global de la broca de vías de agua radiales	37
Figura 2.16. Estadísticas de mallado de los dominios parciales y del global de la broca de vías de agua inclinadas	37
Figura 2.17. Gráfica de convergencia de las ecuaciones de masa y momento referentes a la broca de perforación de vías de agua radiales	41
Figura 2.18. Gráfica de convergencia de las ecuaciones de turbulencia referentes a la broca de perforación de vías de agua radiales	41
Figura 2.19. Gráfica de convergencia de las ecuaciones de masa y momento referentes a la broca de perforación de vías de agua inclinadas	42
Figura 2.20. Gráfica de convergencia de las ecuaciones de turbulencia referentes a la broca de perforación de vías de agua inclinadas	42
Figura 2.21. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua radiales en una vista isométrica	43
Figura 2.22. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua inclinadas en vista isométrica	44
Figura 2.23. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua radiales desde una vista superior	45
Figura 2.24. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua inclinadas desde una vista superior	45
Figura 2.25. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua radiales en un plano de sección	46

Figura 2.26. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua inclinadas en un plano de sección	47
Figura 2.27. Contorno de intensidad de turbulencia de la broca de perforación de vías de agua radiales en un plano de sección	48
Figura 2.28. Contorno de intensidad de turbulencia de la broca de perforación de vías de agua inclinadas en un plano de sección	49
Figura 3.1. Ensamble de una broca de perforación diamantina antes de ingresar al horno de fundición	54
Figura 3.2. Broca de perforación diamantina con vías de agua radiales y vías de agua inclinadas	54
Figura 3.3. Máquina de perforación Cs14 Atlas Copco	56
Figura 3.4. Comparación de alturas de impregnación entre una broca de perforación nueva y la broca de perforación con desgaste	58
Figura 3.5. Comparación de alturas de impregnación entre la broca de perforación de vías de agua inclinadas, con la broca de perforación de vías de agua radiales	60
Figura 3.6. Comparación de desgaste de los casquillos de acero entre las brocas con vías de agua inclinadas y vías de agua radiales	60

ÍNDICE DEL TABLAS

Tabla 1.1. Dimensiones y parámetros de operación del tamaño HO, empleados y recomendados comercialmente por los principales fabricantes de brocas	6
Tabla 1.2. Cuadro resumen para la selección de brocas de perforación según nivel de abrasividad, dureza de la formación rocosa y tipo de fractura del terreno	7
Tabla 2.1. Indicadores de calidad de malla, oblicuidad, ortogonalidad del dominio rotacional y de los dominios de entrada y salida de la broca de perforación de vías de agua radiales.....	32
Tabla 2.2. Indicadores de calidad de malla, oblicuidad, ortogonalidad del dominio rotacional y de los dominios de entrada y salida de la broca de perforación de vías de agua inclinadas	34
Tabla 2.3. Propiedades del agua	38
Tabla 2.4. Propiedades del aire	38
Tabla 2.5. Parámetros de operación considerados para el desarrollo de la simulación numérica	39
Tabla 2.6. Parámetros generales considerados para el desarrollo de la simulación numérica	40
Tabla 3.1. Codificación, serie y geometría de las brocas de perforación	56
Tabla 3.2. Parámetros de trabajo medidos durante las pruebas de perforación.....	57
Tabla 3.3. Metraje acumulado y desgaste de la broca de perforación.....	57
Tabla 3.4. Resultados obtenidos de los ensayos de perforación.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

- ρ : Densidad del fluido [Kg/m^3]
- μ : Viscosidad molecular [$\text{Kg}/\text{m}\cdot\text{s}$]
- μ_t : Viscosidad Turbulenta [m^2/s^2]
- Re : Número de Reynolds [adimensional]
- Nu : Número de Nusselt [adimensional]
- Pr : Número de Prandtl [adimensional]
- k : Conductividad térmica [$\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}$]
- τ : Tensión de cizallamiento [Pa]
- $\dot{\gamma}$: Tasa de deformación [s^{-1}]
- t : Tiempo [s]
- T : Temperatura [K]
- P : Presión [Pa]
- U : Velocidad media [m/s]
- N : Velocidad de giro [RPM]

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la necesidad de conocer las condiciones del perfil litológico y geológico del subsuelo a explotar ha generado el desarrollo de distintas tecnologías de perforación, siendo la perforación diamantina una de las más difundidas y aceptadas. Este sistema de perforación, en el cual encontramos elementos como la broca de perforación diamantina, la red de tuberías y los sistemas de izaje, permite recoger muestras de suelo en zonas con alta concentración de minerales para el posterior análisis geológico.

Este sistema de perforación diamantina está basado en la erosión (desgaste) de las formaciones geológicas, debido al efecto que genera la rotación y la presión de empuje sobre la broca diamantina. Este uso de diamantes en las brocas proporciona ventajas a la matriz de corte, como elevada dureza y resistencia al desgaste; por tal motivo, la broca diamantina es una herramienta de corte con gran efectividad y flexibilidad para cortar la roca y su aplicación abarca un amplio rango en cuanto al tipo de suelo, pues su campo de acción incluye desde rocas muy duras hasta rocas blandas, así como rocas abrasivas y no abrasivas.

Sin embargo, debido a temas relacionados con el impacto ambiental y social, la exploración minera se ha convertido en un mercado de gran competitividad, lo que en consecuencia genera que cada empresa, dentro de este sector, minimice costos y maximice la eficiencia de sus productos con el objetivo principal de mantener su presencia en el mercado y obtener proyectos de exploración. La inversión durante el desarrollo de estos proyectos es muy alta, y esto se refleja en la gran cantidad de pozos de perforación que se trabajan con el fin de generar un mapa litológico que indique el porcentaje de mineral (ley) que se puede encontrar en el yacimiento.

Debido a que la profundidad de cada pozo abarca rangos de hasta cientos de metros, se realiza el ensamblaje de una gran cantidad de tubos, los cuales permiten conectar el sistema de rotación de la máquina de perforación con la broca que se encuentra en el extremo inferior del pozo. Esto implica que si la broca presenta algún inconveniente durante la perforación, ya sea la fundición de la cara exterior de la corona, el desgaste prematuro tanto de las brocas de perforación como del casquillo de acero o la obstaculización de las vías de agua, sería necesario retirar toda la red de tuberías para realizar el cambio de broca; en consecuencia, esto generaría un incremento del tiempo

muerto de la máquina durante una jornada laboral, lo cual se reflejaría en la disminución de metraje diario. Dicho esto, una empresa que realiza proyectos de exploración minera mide su eficiencia en relación al metraje de perforación alcanzado por día, por lo que las brocas de perforación diamantinas cumplen un papel primordial.

En este punto, es importante mencionar que durante los últimos años esta tecnología de perforación ha presentado un proceso de mejora constante debido a las necesidades de rendimiento que cada proyecto minero demanda. Un cambio que ha formado parte de este proceso de evolución ha sido el sistema de perforación *Wireline*, el cual ha dejado obsoleto el método de perforación convencional. Aún más recientes son los esfuerzos para mejorar la composición de brocas, su geometría y sus características, convirtiéndose en investigaciones que han pasado a primer plano; sin embargo, los avances tecnológicos no han sido proporcionales a su difusión, ya que en la mayoría de casos, su aplicación ha sido práctica y los avances que se dieron fueron solamente a nivel empírico, y no en base a un desarrollo teórico correctamente sustentado.

Una de las razones que promueve solo un desarrollo empírico de esta herramienta es la dificultad de realizar cualquier análisis del proceso debido a las condiciones de trabajo en la que se encuentra la broca diamantina (profundidad de trabajo, consistencia del suelo, etc.). Esta disminuida investigación sobre los procesos que conforman la perforación con brocas diamantinas ubica a los investigadores en una situación nada favorable al tratar de implementar nuevos diseños o mejoras. Ya no basta con incrementar la eficiencia de la máquina de perforación o la eficiencia de los sistemas de perforación, el rendimiento que puede ofrecer la herramienta de corte (broca de perforación) ya es un punto extra a considerar, y se puede lograr analizando dos puntos muy importantes de la broca, su geometría y su composición. Durante el proceso de diseño, una de las características que se observa es la geometría de las vías de agua, la cual se complementa con el estudio de nuevas matrices (nuevas combinaciones de soldaduras de infiltración, partículas de diamante de tamaño variable y demás).

Basando la investigación en un análisis del mercado de las brocas de perforación diamantina, un punto poco analizado es el diseño de los canales de refrigeración de la broca de perforación, y si a esto se le suma la limitación de un análisis solamente empírico, la solución alterna que brinda resultados más asequibles es el análisis

basado en la simulación numérica. Ésta proporciona la ventaja de crear condiciones de trabajo y observar el comportamiento de la broca durante un proceso de perforación. Aunque cabe resaltar que este análisis se realiza en base a condiciones definidas de trabajo, sin considerar los factores externos, tales como la composición de la matriz de la broca, el tamaño de diamantes, la pericia del perforista, la calidad de terreno, la potencia de la máquina, etc.

Por otro lado, con el objetivo de reducir el campo de estudio, esta investigación se centra en el análisis de ciertas características de las brocas de perforación, como son: la efectividad de su flujo de enfriamiento (se toma en cuenta puntos como la intensidad de turbulencia generada dentro de las vías de agua y la distribución de sus vectores de velocidad), y la eficacia de la evacuación de detritos (partículas rocosas desprendidas durante el proceso de corte que pueden generar la obstaculización de las vías de agua durante el trabajo de perforación) en base a los vectores de velocidad a la salida de las vías de agua.

Para el desarrollo de esta etapa de la investigación, la simulación numérica se desarrollará con el software ANSYS CFX, y se basará en una metodología de investigación consistente en la interacción de dominios rotacionales y dominios estáticos [1]. Esta metodología, que fue validada para tanques agitadores, plantea que al dominio generado alrededor del cuerpo sólido, se le asigne el valor de la velocidad de giro del cuerpo, convirtiéndolo en un dominio rotatorio, el cual mediante el uso de interfaces comunicará el comportamiento rotacional del fluido a los dominios estáticos.

Se debe recalcar que el planteamiento de ambos modelos es similar; sin embargo, en el caso de los tanques agitadores, el impeler genera la rotación de un volumen determinado e invariable en el tiempo, mientras que en el caso de la broca de perforación, el volumen de control presenta un caudal de ingreso y un caudal de salida, parámetros considerados y adicionados con el uso del software ANSYS CFX.

Adicionalmente, se muestran resultados y observaciones en base a ensayos experimentales de brocas con los mismos diseños de vías de agua que fueron evaluadas en la simulación. Estas serán evaluadas en una máquina de prueba de perforación, lo cual nos brinda la posibilidad de controlar parámetros que en una exploración minera serían difíciles de manejar por motivos externos. Al ser evaluadas bajo igualdad de parámetros, estas pruebas nos permiten obtener conclusiones y realizar comparaciones en base a su desempeño.

Posteriormente, en base a los parámetros analizados, se presentan los resultados de la comparación, y se plantea como propuesta aquella broca de perforación cuya geometría de vía de agua permita prolongar el tiempo de vida de la broca de perforación mediante una mejorada canalización del fluido refrigerante, lo cual a su vez incluye una mejor transferencia de calor en las superficies involucradas y una mejor evacuación de los detritos (partículas desprendidas durante la perforación).

Objetivos

Objetivo general:

- Proponer una mejora del diseño de las vías de agua de brocas de perforación diamantina utilizando tanto la simulación numérica por el método de volúmenes finitos con el software ANSYS 14.5 como una metodología experimental.

Objetivos específicos:

- Simular numéricamente el comportamiento del fluido refrigerante mediante un análisis de CFD (Computational Fluid Dynamics), considerando los parámetros de perforación de la broca diamantina.
- Realizar los ensayos experimentales de brocas de perforación diamantina con distintas geometrías de vías de agua.
- Consolidar los resultados de las simulaciones numéricas con los ensayos experimentales en una propuesta de geometría de agua con mejor rendimiento en los procesos de perforación.

Capítulo 1

FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 Broca de perforación diamantina

1.1.1 Descripción general

Desde el punto de vista de la pulvimetalurgia, las brocas diamantadas son estudiadas como un material de dos fases (diamantes inmersos en una matriz). Esta matriz, a su vez, también es un material de dos fases, compuesta por una matriz de polvos metálicos y refuerzos de partículas, como sucede en las brocas fabricadas mediante procesos de infiltración. Por ejemplo, en la gran mayoría de las brocas, constituyen parte de la matriz de polvos metálicos, aquellos polvos matriceros de metal duro (Carburo de tungsteno) y soldadura (Cobre, Plata, Níquel, etc) [2].

Las diferentes combinaciones de cantidad y tipos de polvos metálicos, como cantidad y tamaño de diamantes, da como resultado diferentes tipos de brocas, y cada una de estas recomendadas para un determinado tipo de suelo a perforar (suelos duros, extra-duros, abrasivos, no abrasivos, blandos o suaves). En la siguiente figura se puede observar una broca de perforación diamantina, y un corte de sección que permite visualizar las partes principales que la conforman.

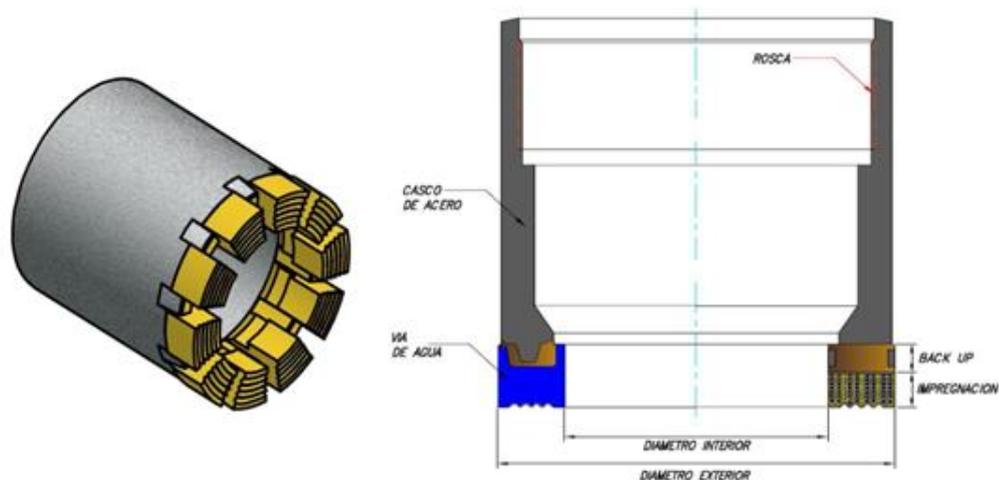


Figura 1.1. Broca de perforación diamantina y corte de sección. (De izquierda a derecha).¹

¹ BOYLES BROS DIAMANTINA; Presentación de brocas: 2013

Para el trabajo de investigación, se considera una broca diamantina impregnada de tamaño HO de 12mm. A continuación, en la tabla 1.1 se observan las dimensiones geométricas de mayor importancia en la broca, así como los parámetros nominales que se utilizan durante los trabajos de perforación de campo. Cabe recalcar que estos son los parámetros utilizados en la configuración de las posteriores simulaciones.

Tabla 1.1. Dimensiones y parámetros de operación del tamaño HO, empleados y recomendados comercialmente por los principales fabricantes de brocas. [Boart Long Year; Fordia; Diamantina Christensen Mining Products].

Denominación	GEOMETRÍA		PARÁMETROS DE OPERACIÓN				
	Diámetro Exterior (mm)	Diámetro Interior (mm)	Velocidad de giro (RPM)	Fluido de enfriamiento (l/min.)	Fuerza sobre la broca (N)	Penetración de la broca (mm/min.)	
						200 RPI	250 RPI
HO	95,58	63,5	1000	24,0-45,0	18000-36000	127,0	101,6
			600			76,2	61,0
			400			50,8	40,6

1.1.2 Aplicaciones

Las brocas de perforación diamantina sirven como herramientas de corte durante la perforación de pozos, los cuales permiten realizar el análisis geológico de zonas litológicas con alta concentración de minerales, y sobre los que se quiere llevar a cabo un proceso de explotación minera.

Debido a la composición diamantada de estas brocas, su aplicación se plantea para la perforación de suelos con diversos grados de dureza. Es importante mencionar que para la evaluación de la dureza de la roca, se trabaja según la escala de dureza de Mohs, la cual hace referencia a una relación de 10 minerales ordenados de menor a mayor (del 1 al 10, siendo el 10 el más duro), que consiste en que el mineral con mayor dureza raya al mineral más blando. Usando esta escala, se ha observado que los perfiles litológicos generalmente trabajados en los proyectos de perforación poseen un grado de dureza que pertenece al rango de 2 a 8 Mohs.

A continuación, en la tabla 1.2, se detallan una serie de características de la formación rocosa, las cuales son utilizadas como referencia para la selección adecuada de la broca de perforación.

Tabla 1.2. Cuadro resumen para la selección de brocas de perforación según nivel de abrasividad, dureza de la formación rocosa y tipo de fractura del terreno. [Boart Long Year].

Características de la formación rocosa			Brocas estándar
Abrasividad	Dureza (Mohs)	Fractura del terreno	
Extremadamente abrasivo	< 3	Altamente fracturada, fallas y derrumbes	Serie 2
Abrasiva		Fracturada	Serie 3 o 4A
Abrasiva	3 – 4,5	Ligero fracturamiento	Serie 6B
Moderadamente abrasiva		Sólida a levemente fracturada	Serie 7 o 7B
Poca abrasiva	4,5 - 6	Sólida a levemente fracturada	Serie 8B o 8C
No abrasiva		Sólida a levemente fracturada	Serie 9C o 9D
No abrasiva	6 - 7	Compacta	Serie 11

1.1.3 Conceptos principales

1.1.3.1 Matriz de polvos y casquillo de acero

La matriz de polvos es la encargada de la sujeción de los diamantes y su característica principal es la resistencia al desgaste de la broca, la cual tiene que ser compatible con la formación y las condiciones del pozo perforado; es decir, a medida que se realiza la perforación del pozo, la matriz de la broca tiene que ir desgastándose, con el objetivo de dejar expuestos los diamantes para que el proceso de corte se realice satisfactoriamente.

Por otro lado, el casquillo de acero, también conocido como *Blank*, es considerado como el cuerpo de la broca, el cual por métodos de infiltración y fundición de aleación metálicas es unido a la matriz de polvos compactados (corona de la broca), para formar en conjunto la broca de perforación diamantina.

1.1.2.2 Canales de enfriamiento

Son conocidos también con el nombre de vías de agua y generalmente son ranuras radiales. El buen desempeño de estas ranuras resulta vital para lograr un buen trabajo de perforación. Estos canales de enfriamiento han sido predispuestos como parte de la geometría de la broca de perforación, con el objetivo principal de conseguir medios de evacuación que permitan el transporte de algún fluido de refrigeración o de algún otro

fluido. Por ejemplo, es muy común el uso de una mezcla de agua con bentonita (partículas sólidas que permiten solidificar las paredes de los pozos que están siendo perforados).

Asimismo, su distribución en la broca nos permite controlar la evacuación de las partículas en suspensión (detritos) que son atrapadas por el fluido refrigerante y que son la causa del desprendimiento de partículas por el contacto directo de la broca con la roca. Este conglomerado de partículas en suspensión pueden agruparse en sólidos de mayor magnitud e ir acumulándose en las ranuras de refrigeración, lo cual trae como consecuencia la disminución de flujo evacuado y el incremento de presión de bombeo por el estancamiento del fluido. Por consiguiente, al ya no existir una circulación continua de fluido, el fluido que logró evacuar se estanca y se deposita en el área anular a la salida de la broca. Esto puede ocasionar que el casquillo de acero de la broca, que está rotando a altas velocidades, comience a desgastarse prematuramente debido a las partículas asentadas (mezcla de partículas de roca y partículas de la matriz de sujeción), o que se genere un calentamiento excesivo de la corona por falta de flujo de enfriamiento de la broca. Este último problema es el de mayor repercusión, pues provocará que la matriz de sujeción ceda con mayor facilidad (incremento de ductilidad de la matriz), disminuyendo la capacidad de fijación de los diamantes.

A continuación, en la figura 1.2 se muestran las consecuencias de un mal desempeño de los canales de enfriamiento durante los procesos de perforación de campo.



Figura 1.2. Broca con canales de refrigeración obstaculizados y broca fundida.

(De izquierda a derecha)

1.1.2.2 Zona de transporte del fluido

El fluido refrigerante es bombeado a través de la red de tuberías que se encuentra ensamblada y tendida a lo largo de la profundidad del pozo perforado. En su tramo final de recorrido atraviesa el sistema utilizado para el izaje de las muestras de perforación, y posteriormente atraviesa una cavidad anular, comprendida entre la tubería interior y la tubería exterior.

Como se puede observar en la figura 1.3., en la parte inferior (correspondiente a la zona de trabajo de la broca de perforación), el fluido atraviesa las vías de agua y es evacuado a través del área anular, comprendida entre la tubería exterior y la matriz de roca sólida.

Es importante mencionar que para el análisis de la tesis, se toma en cuenta una distancia aproximada de 5 metros, la cual comprende este último tramo de cavidad anular.

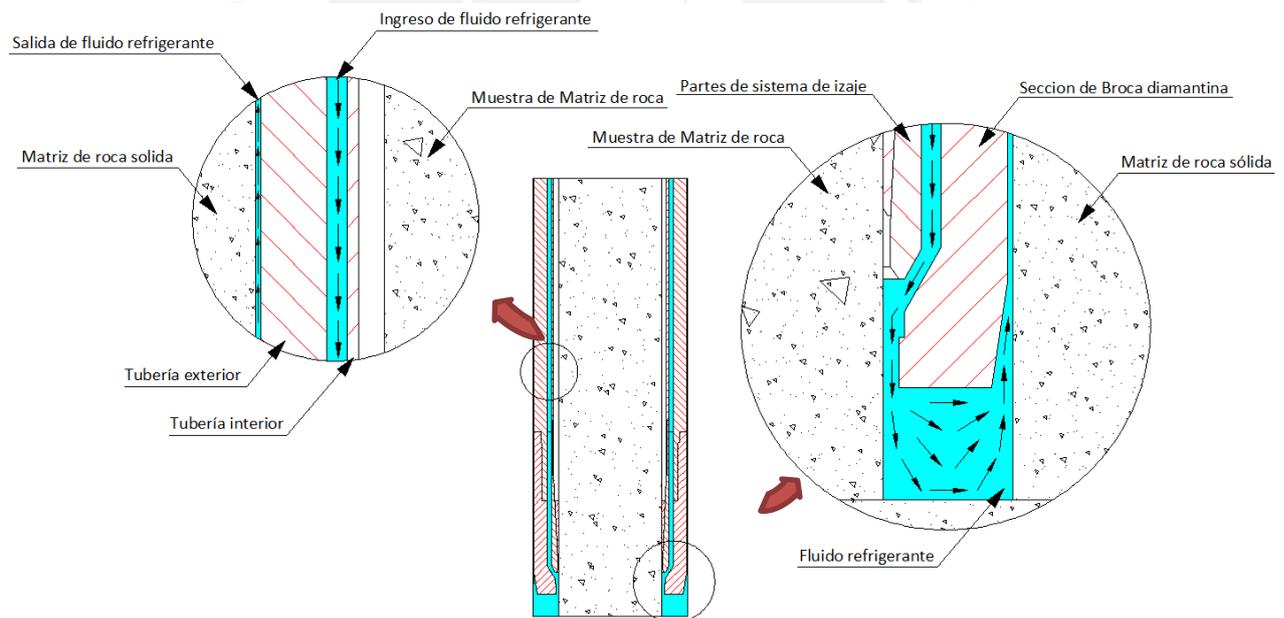


Figura 1.3. Trayectoria de fluido de refrigeración en el Sistema Wireline.

1.2 Dinámica de fluidos

1.2.1 Tipos de fluido

Existen diversos tipos de fluido aplicados a distintos trabajos de ingeniería, siendo estos clasificados por la relación entre su tensión de cizallamiento y su tasa de deformación. A continuación se mencionarán los tipos de mayor difusión:

➤ **Fluido newtoniano:**

Son conocidos porque su viscosidad es independiente a su tasa de deformación. Por consiguiente, su curva de tensión de cizallamiento y tasa de deformación tiene un comportamiento lineal. Son considerados fluidos newtonianos el agua, el aire, la gasolina y algunos aceites minerales [3].

➤ **Fluido no newtoniano:**

Son aquellos que no obedecen la ley de viscosidad de newton; es decir, la tensión de cizallamiento no es directamente proporcional a la tasa de deformación [3]. Este tipo de fluido es el comúnmente utilizado en las operaciones de perforación tanto petrolera como geológica, pues se conoce que la viscosidad de los mismos depende de la tasa de deformación aplicada sobre ellos [4].

Se puede analizar este tipo de fluido mediante el planteamiento del modelo de fluido newtoniano generalizado, en el cual se considera la viscosidad como una función de la tasa de deformación:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

En donde:

τ = Tensión de cizallamiento en la dirección axial,

$\dot{\gamma}$ = Tasa de deformación en la dirección axial,

η = Viscosidad aparente del fluido

A partir de esta relación, se pueden obtener otros tipos de fluido como el fluido plástico de Bingham, dilatante y pseudoplástico [4].

A continuación, en la figura 1.4 se puede observar una gráfica comparativa en el cual se representa claramente las diferencias entre cada tipo de fluido.

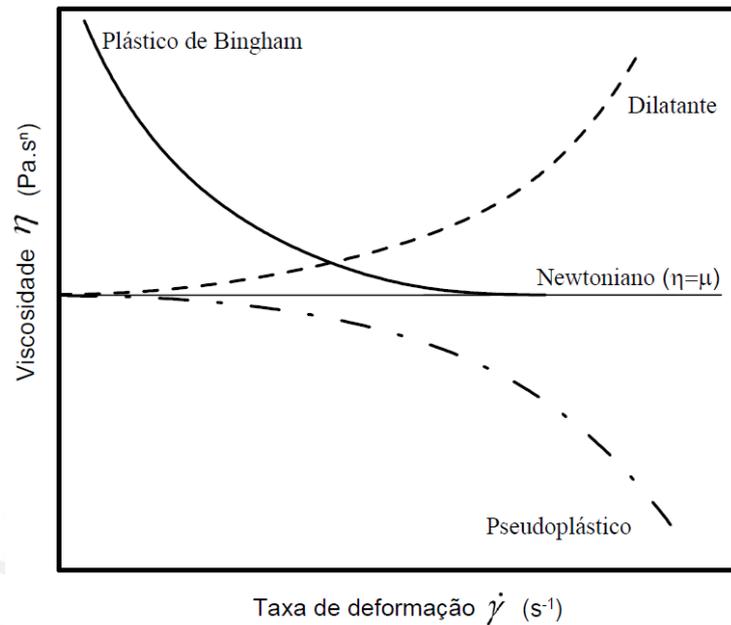


Figura 1.4. Viscosidad del fluido en función de la tasa de deformación, para distintos comportamientos de la viscosidad del fluido.²

En la figura se observa que la viscosidad de un fluido newtoniano es constante con la tasa de deformación; sin embargo, para un fluido de Bingham la viscosidad decrece con el aumento de la tasa de deformación hasta obtener un comportamiento similar al fluido newtoniano para altas tasas. Este fluido plástico de Bingham representa el tipo más sencillo dentro de aquellos llamados fluidos viscoplásticos. Estos fluidos poseen una tensión límite de flujo, a partir de la cual el fluido se comporta como un fluido newtoniano, y debajo de la cual la viscosidad es tan alta que el fluido fluye difícilmente.

Caso contrario, para los fluidos dilatante y pseudoplástico a bajas tasas de deformación, el comportamiento es similar al del fluido newtoniano, mientras que a altas tasas de deformación la viscosidad aumenta para el fluido dilatante y se reduce para el fluido pseudoplástico.

² MERHY DE OLIVEIRA, Gabriel. *Modelagem de propagação de pressão no reinício do escoamento de fluidos de perfuração não gelificados*. Universidade tecnológica federal do Paraná, Curitiba, 2011.

A continuación, en la figura 1.5 se pueden observar las curvas de tensión de cizallamiento y tasa de deformación de estos tipos de fluido.

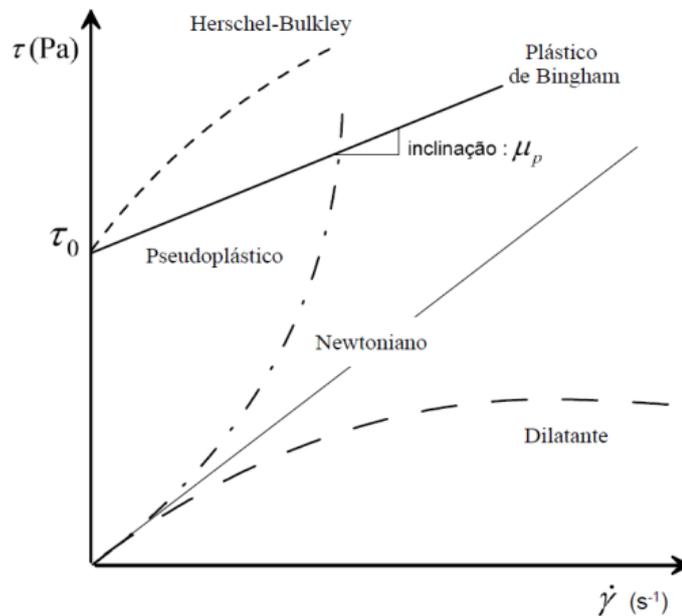


Figura 1.5. Tensión de cizallamiento en función de la tasa de deformación, para distintos comportamientos de la viscosidad del fluido.³

Como se puede observar en la figura, para el fluido de Bingham se considera como referencia la tensión límite de flujo, a partir de la cual su comportamiento es lineal como la del fluido newtoniano y bajo de la cual se observa que la viscosidad es tan alta que no es posible el flujo del fluido. Caso contrario, el fluido conocido como Herschel-Bulkley posee un comportamiento no lineal superada la tensión límite de flujo, y bajo de la cual no es posible lograr el flujo del fluido.

Cabe resaltar la importancia de estos tipos de fluidos, pues muchos de los fluidos utilizados en procesos de perforación forman parte del grupo de fluidos plásticos de Bingham, debido al comportamiento newtoniano a altas tasas de deformación y a su tensión límite de flujo. Sin embargo, ya que este estudio es una investigación preliminar, se plantea el uso de un fluido newtoniano como es el caso del agua.

³ MERHY DE OLIVEIRA, Gabriel. *Modelagem de propagação de pressão no reinício do escoamento de fluidos de perfuração não gelificados*. Universidade tecnológica federal do Paraná, Curitiba, 2011.

1.2.2 Tipos de flujo

A continuación, se observa y describe los tipos de flujo con mayor difusión, de acuerdo a diversos criterios de clasificación y según diferentes características. Es importante mencionar que el uso de cada tipo dependerá de los alcances y de las necesidades del estudio a realizar.

➤ **Flujo unidireccional:**

Es una simplificación en la cual las propiedades y características de un fluido son expresadas en función de una sola coordenada espacial y de tiempo; es decir, se desprecian los cambios de magnitud de la velocidad en la sección transversal a la dirección del flujo [5].

➤ **Flujo bidimensional:**

Implica la condición de que las propiedades y características del fluido están en función de dos coordenadas cartesianas (x , y) y del tiempo; por lo tanto, existe la misma configuración del flujo en los planos normales a la coordenada z [5].

➤ **Flujo tridimensional:**

Este flujo depende de las tres coordenadas espaciales y del tiempo. Es un flujo complicado desde el punto de vista matemático; sin embargo, es aquel que proporciona mayor información del desarrollo del mismo [5].

➤ **Flujo permanente:**

Es conocido también como flujo estacionario. Se considera que todas las propiedades y características del flujo son independientes del tiempo; es decir, las variaciones de las propiedades con respecto a su valor medio son despreciables (densidad, presión, temperatura). Este tipo de flujo es el más sencillo de analizar, pues no se considera la variable del tiempo en el desarrollo de las ecuaciones de movimiento [5].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial t} = 0$$

➤ **Flujo no permanente:**

Es también llamado flujo no estacionario, o transitorio. En este flujo las propiedades y características del fluido cambiarán de un punto a otro dentro de su región de desarrollo [5].

➤ **Flujo incompresible:**

Implica el desarrollo de un fluido cuyas propiedades de densidad y peso específico de un punto a otro, dentro de un campo de flujo, presentan una variación despreciable. En consecuencia, las propiedades del fluido son consideradas constantes; es decir: [5].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

➤ **Flujo compresible:**

Es aquel flujo característico en el cual los cambios de volumen son demasiado grandes, por lo cual las variaciones de densidad son significativas; es decir: [5].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = Cte$$

➤ **Flujo uniforme:**

Es un tipo de flujo poco común, en el cual el vector velocidad tiene igual magnitud y dirección en cualquier punto del flujo; es decir, no se crea un gradiente de velocidad en ningún punto del espacio recorrido por el fluido [5].

$$\frac{\partial v}{\partial s} = 0$$

➤ **Flujo no uniforme:**

Este tipo de fluido, contrario a las características presentadas por el flujo uniforme, es comúnmente encontrado en regiones próximas a las superficies sólidas debido a los efectos viscosos del fluido [5].

➤ **Flujo irrotacional:**

Esta condición implica que la velocidad angular respecto de tres ejes perpendiculares entre sí se anulan para cualquier partícula del fluido en una región determinada; es decir, implica un fluido no viscoso (fluido ideal). Sin embargo, en un fluido real, existen tensiones cortantes que se generan en el fluido, y que son una consecuencia de la viscosidad. Para fluidos con baja viscosidad, el flujo irrotacional permanecerá, mientras no exista la presencia de un gradiente de velocidad elevado. Una característica de este tipo de fluidos es la ausencia de regiones con vórtices inmersos en ellas [5].

➤ **Flujo rotacional:**

Para la generación de un flujo rotacional, que se encuentra inicialmente en condiciones de flujo irrotacional, se requerirá de la acción de tensiones cortantes sobre la partícula del fluido. Esto es, principalmente, debido a que sin importar cuán baja sea la viscosidad del fluido, los fluidos tienden a pegarse a la superficie de los sólidos con los cuales tiene contacto, generando un gradiente de velocidades y tensiones cortantes elevadas [5].

➤ **Flujo turbulento:**

En este tipo de flujo, las partículas se mueven de manera aleatoria y errática, sin seguir un orden establecido. En este tipo de flujo, los esfuerzos cortantes tienden a ser elevados y se puede describir de esta manera:

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$$

Entre algunos factores que contribuyen a la generación de flujos turbulentos, tenemos los siguientes [3]:

- Alta rugosidad superficial de la superficie de contacto con el fluido, especialmente en las zonas con grandes velocidades.
- Si la superficie es calentada, esta generará una fuente de energía, la cual será transmitida al fluido y en consecuencia se producirá la transición a flujo turbulento.

➤ **Flujo laminar:**

Es definido como un tipo de flujo bien ordenado, en el cual las capas de fluido se deslizan unas sobre otras. Aunque posee movimientos moleculares irregulares, macroscópicamente, sigue un patrón establecido. Por debajo del número de Reynolds crítico, la cantidad de amortiguamiento proporcionado por la viscosidad del fluido, es suficiente para compensar los efectos de cualquier perturbación y por ende se consigue un flujo ordenado [3].

Considerando lo anterior, el comportamiento de un fluido dentro de una tubería como es el caso de la presente investigación, se rige bajo los siguientes rangos.

Régimen laminar: $Re \leq 2000$

Régimen transitorio: $2000 \leq Re \leq 4000$

Régimen turbulento: $Re \geq 4000$

1.2.3 Teorema de transporte de Reynolds

Para comprender este teorema, inicialmente se deben plantear conceptos básicos como son las propiedades intensivas y extensivas. Las propiedades intensivas son aquellas en las cuales las propiedades del fluido son independientes de la cantidad de materia involucrada (temperatura, presión, velocidad, volumen específico, etc), mientras que las propiedades extensivas son aquellas cuyos valores son proporcionales a la cantidad de masa que describe (masa, volumen, etc) [6].

En base a lo mencionado, se plantea lo siguiente:

$$\Phi = \int_0^{\Omega_{CM}} \rho \phi d\Omega$$

Según lo cual, si ϕ es cualquier propiedad intensiva (para conservación de masa, $\phi = 1$; para conservación de momento, $\phi = v$), entonces la correspondiente propiedad extensiva puede ser denotada por Φ , siendo Ω el volumen ocupado por la masa de control (CM) y ρ la masa por unidad de volumen (densidad) [6].

Utilizando esta expresión, se puede plantear un teorema general para describir la ecuación de conservación para un volumen de control, también conocido como teorema de transporte de Reynolds. Este se muestra a continuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\Omega_{CM}} \rho \phi d\Omega = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\Omega_{CV}} \rho \phi d\Omega + \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{S_{CV}} \rho \phi (\mathbf{v} - \mathbf{vb}) \cdot \boldsymbol{\eta} dS$$

Donde Ω_{CV} es el volumen de control, S_{CV} es la superficie que envuelve el volumen de control, $\boldsymbol{\eta}$ es el vector ortogonal unitario perpendicular a la S_{CV} y con dirección hacia el exterior, \mathbf{v} es la velocidad del fluido y \mathbf{vb} es la velocidad con la que se mueve la superficie del volumen de control [6].

En términos generales, este teorema establece que la variación de la propiedad extensiva dentro de una masa de control es igual a la variación de esta propiedad dentro del volumen de control más el flujo neto que atraviesa la superficie de control (límites del volumen de control) [6].

1.2.4 Ecuaciones generales de dinámica de fluidos

Las ecuaciones que describen un fluido en movimiento se pueden deducir de la ley de conservación de la masa, y de la ley de conservación de la cantidad de movimiento. Aplicando estas leyes de conservación a un elemento de fluido, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes. Simplificadas para un fluido incompresible son:

$$\text{Continuidad:} \quad \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

$$\text{Cantidad de movimiento:} \quad \rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v}$$

Donde ρ es la densidad, μ es la viscosidad del fluido y \vec{v} es vector velocidad [3].

Así, mediante la solución de estas ecuaciones, es posible hallar la velocidad del fluido y la presión en cualquier punto del dominio estudiado. Sin embargo, cabe recalcar que estas son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que sólo pueden ser resueltas analíticamente en problemas con geometría y condiciones de contorno sencillas.

Incluso en estos casos, la solución que se obtiene de manera analítica es la del flujo laminar, mientras que por lo general hay que contar con otro factor: la turbulencia, que hace que el flujo real difiera considerablemente de la solución laminar.

En base a lo expuesto, se puede deducir que para poder obtener la solución de un caso turbulento complejo, estas ecuaciones deben de ser resueltas por métodos numéricos, mediante un análisis computacional y utilizando modelos de turbulencia.

1.2.5 Análisis de flujos turbulentos

1.2.5.1 Definición de turbulencia

La turbulencia es un comportamiento intrínseco a la mayoría de flujos que encuentran alguna aplicación en la industria. Aunque no existe una definición exacta, se pueden observar algunas características comunes de flujos turbulentos, como son:

- Irregularidad: Los flujos turbulentos son caóticos, aleatorios, y se encuentran formados por innumerables torbellinos de diversos tamaños. Los de mayor escala están definidos por la geometría que los gobierna, y los de menor escala son disipados a energía interna por esfuerzos viscosos [7].
- Difusividad: La característica caótica del flujo turbulento, logra que el intercambio de energía se intensifique, y que en consecuencia el régimen de transferencia de calor incremente (mayor difusividad) [7].
- Altos números de Reynolds: Estos flujos turbulentos se presentan a altos números de Reynolds. La transición de flujo laminar a turbulento en tuberías tiene lugar a $Re \geq 2300$ [7].
- Tridimensional: Los flujos turbulentos son siempre tridimensionales [7].
- Disipación: Los flujos turbulentos son disipativos, el cual es un fenómeno denominado “Cascada de Energía”. Esto significa que la transferencia de energía se produce desde los torbellinos de mayor escala hacia los torbellinos de menor escala; es decir, desde los torbellinos de mayor tamaño hacia los de menor tamaño [7].

1.2.5.2 Ecuación de la energía en turbulencia

Además de lo expuesto, se debe de considerar que en un análisis fluido-dinámico de flujo estacionario, las ecuaciones de mecánica de fluidos son resueltas para las propiedades medias de las variables en el tiempo, y la forma de las ecuaciones depende del modelo de turbulencia utilizado para la modelación del problema.

Para un correcto análisis de turbulencia, a las ecuaciones de mecánica de fluidos que describen el movimiento de un flujo incompresible, se le deben de introducir variables que representen la fluctuación de los fluidos. Estas ecuaciones resultan similares a las de Navier-Stokes, con la diferencia de que consideran, además, un término denominado tensor de esfuerzos aparentes de Reynolds. Para poder predecir cómo van a variar las propiedades medias del fluido, es necesario predecir cómo van a variar los 6 esfuerzos de Reynolds que conforman el tensor de esfuerzos de Reynolds. Estos 6 esfuerzos de Reynolds representan 6 ecuaciones, las cuales a su vez incluyen más de 10 incógnitas. Por lo cual, la única manera de encontrar una solución a esta generación de incógnitas, es introduciendo algún modelo de turbulencia [7].

1.2.5.3 Modelos de turbulencia

En la actualidad existen dos grandes familias de modelos de turbulencia, los cuales son los que presentan mayor aplicación en el campo de análisis de flujos turbulentos. El RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) que realiza el análisis aproximando los esfuerzos aparentes de Reynolds para el caso de flujos incompresibles, y el LES (Large Eddy Simulation) que se enfoca en un análisis de los torbellinos o vórtices que se generan en flujos turbulentos (específicamente se centra en los torbellinos de mayor tamaño, pues los de menor escala son despreciados) [7]

Dentro del RANS, existen los modelos de primer orden, los cuales se evalúan según el número de ecuaciones diferenciales a resolver para encontrar el valor de la viscosidad turbulenta (0 ecuaciones - modelo de longitud de mezcla de Prandtl, 1 ecuación - modelo de Spallart Allmaras, 2 ecuaciones – modelo $k-\varepsilon$). Por otro lado, los modelos del RANS de segundo orden, utilizan las ecuaciones de evolución del flujo para aproximar los esfuerzos de Reynolds (*Algebraic Reynold Stress Model - ARS*), o para aproximar los términos de las ecuaciones de evolución de los esfuerzos de Reynolds (*Reynold Stress Transport Model - RST*). [7]

A continuación, se hará una breve descripción de los modelos más utilizados en la actualidad, y que aproximan los problemas de ingeniería con una mayor precisión:

- **Modelo $k-\varepsilon$ (k -épsilon) standard**

Este modelo es el más difundido en la industria por las facilidades que presenta a la hora de evaluar flujos complejos. Aunque tiene sus limitaciones, se considera que en términos generales es un modelo robusto que se caracteriza por ofrecer precisión y estabilidad numérica. Sin embargo, se debe de considerar que debido a sus limitaciones, es difícilmente aplicable a las siguientes situaciones [8]:

- Flujos con separación de capa límite
- Caudales sobre superficies curvas
- Caudales con rotación de fluidos
- Flujos con cambios repentinos de velocidad

- **Modelo $k-\omega$ (k -omega) y el modelo *Shear Stress Transport (SST)***

Este modelo se basa en estimar la viscosidad cinemática turbulenta en función de la energía cinética asociada a las fluctuaciones turbulentas (k) y de la tasa de

disipación de energía cinética turbulenta específica (ω). Esta última variable también se puede conocer como vorticidad. En este modelo, se asume que las fluctuaciones de presión inducidas por los torbellinos turbulentos transmiten la energía cinética turbulenta desde una zona de mayor intensidad turbulenta hacia una zona de menor intensidad, mostrándose como un fenómeno difusivo [7]

Básicamente, este modelo fue diseñado para evaluar situaciones aerodinámicas, y lograr un alcance de la vorticidad generada por el desprendimiento de la capa límite en los alrededores del ala del avión.

Posteriormente, debido a las limitaciones que presentaba el modelo $k-\omega$, se desarrolló el modelo SST, el cual fue diseñado para predecir de manera muy precisa la separación del flujo respecto de la superficie, bajo la aplicación de presiones. Por tales motivos, se considera que el modelo SST, es el más recomendable para aquellos análisis, en los cuales el desarrollo del flujo con respecto a una superficie lisa es de gran importancia.

Cabe recalcar que estos modelos están basados en la hipótesis de que la cantidad de movimiento es intercambiada por los torbellinos como lo es el intercambio de cantidad de movimiento entre moléculas, lo cual no es cierto. Los torbellinos generados durante la turbulencia no son entidades aisladas e interactúan continuamente entre ellos, mientras que las moléculas son entidades aisladas e interactúan intermitentemente. A esta hipótesis se le conoce como aproximación de Bousinessq [7].

1.3 Simulación numérica y método de volúmenes finitos (CFD)

1.3.1 Definiciones

1.3.1.1 Simulación numérica

Debido a la gran complejidad de algunos problemas de ingeniería, los cuales en muchos casos se simplifican mediante hipótesis que son solo aplicables a determinadas geometrías, condiciones de contorno, e incluso a sistemas de cargas muy particulares, se hace necesario la aplicación de la simulación numérica que le permite al usuario aproximar su modelo, y lograr un análisis y diseño con un alto grado de sofisticación y precisión.

Sin embargo, a pesar de que la simulación numérica es una poderosa herramienta, no deja de ser un procedimiento aproximado, por lo cual se debe de tener un especial

cuidado durante su utilización. Esto implica que el usuario posea cierta experiencia, nociones básicas y sentido común para controlar una serie de factores como la discretización del campo de estudio, la configuración de las condiciones de contorno, la inclusión correcta en el modelo de las propiedades físicas del material, entre otros [9].

1.3.1.2 Método de los volúmenes finitos

Es una técnica computacional basada en un procedimiento de aproximación de los problemas de ingeniería, los cuales son reducidos a ecuaciones diferenciales o a expresiones equivalentes simplificadas con un número de variables dependientes y parámetros bien definidos dentro de un dominio o campo.

Dependiendo del tipo de problema a evaluar, se pueden manejar variables de desplazamiento físico, de temperatura, de transferencia de calor, de velocidad de fluido y demás.

1.3.2 Fundamentos de manipulación de CFD

El método de volúmenes finitos constituye una aproximación del dominio o contorno del problema, representado mediante el ensamble de una subdivisión de elementos, los cuales están interconectados en uniones específicas y se denominan nodos o puntos de unión.

Debido a que las variables dependientes, también conocidas como variable de campo (presión, temperatura y velocidad) en un estudio de fluido-dinámica no se conocen, se asume que la variación de estas variables pueda ser aproximada en cada nodo, por medio de una función. A través de la resolución de estas funciones o ecuaciones de campo, se puede llegar a conocer el valor aproximado de la variable en un determinado nodo, lo cual nos permite definir a la variable de campo en la extensión de todo el dominio. [10]

Cabe recalcar que la unión de estos puntos, nos permite elaborar un dominio continuo a lo largo de todas las fronteras, y que la función o ecuación de campo es igualmente aplicable para cada punto dentro del dominio.

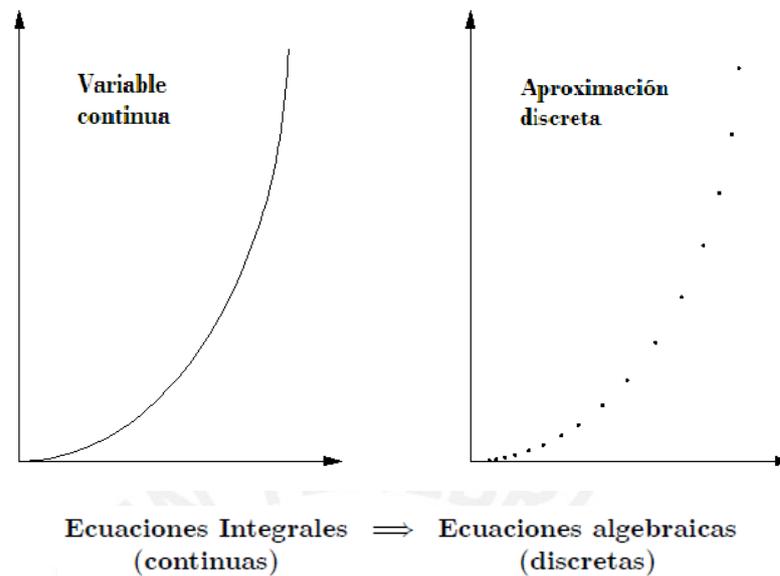


Figura 1.6. Discretización de variables ⁴

1.3.3 Implementación computacional de CFD

Para poder desarrollar un análisis de CFD, se pueden consolidar una serie de pasos que nos permitirá realizar un estudio aproximado del problema.

1.3.3.1 Pre – procesamiento

En esta etapa se manejan todos los parámetros que permitirán que la resolución del modelo simplificado sea coherente, a continuación se indican algunos puntos a seguir:

- Formular el problema y las simplificaciones a tomar en consideración.
- Definir el dominio geométrico del problema.
- Definir los parámetros para la generación del mallado (tamaño de elemento, tipo de elemento, etc). Estos parámetros influyen mucho en el tiempo computacional utilizado por la computadora para el desarrollo del análisis del modelo.
- Definir si el problema será resuelto bajo la aplicación de fluido monofásico, bifásico, o multi-fásicos. En el caso de esta investigación, también se deben de definir los modelos de turbulencia utilizados para la modelación del problema.
- Se especifican las propiedades de los fluidos considerados para el desarrollo del modelo (viscosidad, densidad, propiedades térmicas, etc).

⁴ HUTTON, David; Fundamentals of Finite Element Analysis, McGraw – Hill, First edition, New York, 2004

- Formular las condiciones de contorno bajo las cuales se desarrollará el modelo y fijar los valores de presión, velocidad, temperatura, etc.
- Introducir las condiciones iniciales para que el proceso iterativo comience desde un valor configurado por el usuario.

La etapa de pre-procesamiento depende mucho de lo que se requiera evaluar, las condiciones variarán dependiendo de si es un análisis de fuerzas, de flujos, de distribución de concentraciones, de turbulencia, de transferencia de calor, etc.

1.3.3.2 Solución

Durante esta etapa, las ecuaciones algebraicas consideradas para la resolución del modelo son desarrolladas, analizándose estas ecuaciones para todos los nodos del dominio. Es un proceso iterativo que se detiene hasta lograr la convergencia de las variables a un valor constante o hasta cumplir con el límite de iteraciones considerado para la resolución del modelo.

Esta solución dependerá mucho de cómo será planteado el problema, si será un dominio estacionario o un dominio transitorio. En el primer caso, para cada nodo se encontrará un valor promedio, mientras que en el segundo caso, el valor encontrado será único para cada nodo en una determinada escala de tiempo. Asimismo, esta consideración influye mucho en el tiempo computacional utilizado para la resolución del problema. En general, para la modelización de problemas transitorios, se utilizan técnicas de reducción del tiempo computacional, como por ejemplo, la consideración de solo una sección del dominio geométrico del problema.

1.3.3.3 Post – Procesamiento

Dentro de esta etapa se procesan los resultados obtenidos por el software, el cual ha resuelto las ecuaciones algebraicas para cada variable de campo y en todos los nodos del dominio geométrico. Asimismo, en esta etapa se puede realizar la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, para poder visualizar de manera más didáctica los resultados obtenidos.

Dentro de algunas de las acciones que se pueden realizar en esta etapa se encuentran las siguientes [1]:

- Representación de las variables dentro de un rango de valores determinado.
- Representación vectorial y escalar de las variables de campo.

- Representación animada de las variables de campo en el tiempo, si el análisis es transitorio.
- Representación de las corrientes de flujo desarrolladas dentro de un dominio geométrico.
- Representación de temperaturas sobre un sólido o sobre un volumen, dentro de un rango de valores o en la totalidad del volumen analizado.

Después de realizar el tratamiento de los resultados obtenidos, se procede a realizar un análisis ingenieril, para verificar que los resultados proporcionan una aproximación razonable de la realidad.



Capítulo 2

SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE ANSYS CFX

2.1. Definición del problema

La presente tesis consiste en proponer las bases para la simulación del fluido dentro de las cavidades internas de la tubería en el tramo final de la red de tuberías, así como a través de los canales de refrigeración de la broca de perforación diamantina. Una de las consideraciones principales de la investigación es el planteamiento del problema en régimen estacionario con la aplicación del software ANSYS CFX, versión 14.5. A continuación se muestran algunos parámetros y puntos adicionales tomados en cuenta en el desarrollo del problema:

- Se considera un espacio de 1 mm entre la corona de la broca y la roca trabajada (en la operación en campo, no existe tal espacio entre estos cuerpos – el fluido evacua a través de los canales de enfriamiento).
- Se considera solo un tramo de 0,5 m de la red de tuberías (tramo más profundo), para el desarrollo del fluido dentro de las áreas anulares.
- Se utiliza un sentido de rotación horario (vista de planta), pues las máquinas de perforación y las uniones roscadas de la red de tuberías han sido diseñadas para trabajar bajo estas condiciones.
- Se considera un fluido bifásico incompresible, con el agua como fluido continuo y el aire como partículas dispersas.
- Los parámetros de operación considerados para la simulación son los parámetros utilizados durante una operación en campo. Estos parámetros se muestran en la tabla 4.
- Se asume un proceso isotérmico, a una temperatura de 25°C y presión atmosférica al ingreso. Asimismo, se considera una presión de empuje sobre el fluido para poder evacuarlo correctamente, esta presión será representada como una presión de vacío de 350 PSI.

En base a todos los puntos mencionados, se planteó un esquema simplificado del modelo a estudiar, el cual se muestra a continuación:

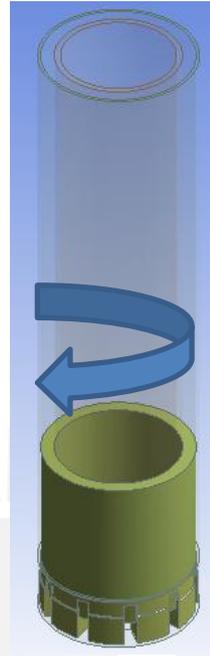


Figura 2.1. Esquema simplificado para el análisis del comportamiento del fluido durante el proceso de perforación.

Es importante mencionar que aun cuando la máquina de perforación puede trabajar con dos sentidos de rotación, el sentido anti-horario (vista de planta) solo es utilizado en el caso extremo de que la broca se atasque durante el proceso de perforación, siendo una maniobra de riesgo, pues ocasiona el desajuste de las roscas que unen la red de tuberías. Asimismo, la inclinación de los canales de enfriamiento se plantea tomando como referencia el diseño de las bombas centrífugas con álabes curvados hacia atrás ($\beta < 90$), el cual es una de las condiciones fundamentales para el buen rendimiento de la bomba centrífuga.

2.2 Pre – procesamiento

2.2.1 Diseño CAD del modelo

Para el desarrollo de esta investigación, se consideraron dos modelos de brocas con dimensiones generales iguales, con la diferencia específica en la geometría de sus vías de agua. El primer modelo tiene como base las dimensiones reales de una broca de perforación diamantina de tamaño H, con canales de enfriamiento radiales (una de las brocas de mayor comercialización en el mercado de exploración minera). Mientras que el segundo modelo, es también una broca de perforación diamantina de tamaño H, pero con las vías de agua con un ángulo de inclinación.

Los modelos pueden ser realizados en cualquier software de modelación 3D (Solidworks, Autodesk Inventor, SpaceClaim, Design Modeler, etc) dependiendo de las habilidades del usuario. Los modelos utilizados en esta tesis fueron realizados con el software Solidworks, y posteriormente se utilizó el software de modelamiento Design Modeler (DM) para eliminar los defectos del modelo, reparar aristas y preparar el modelo para la simulación.

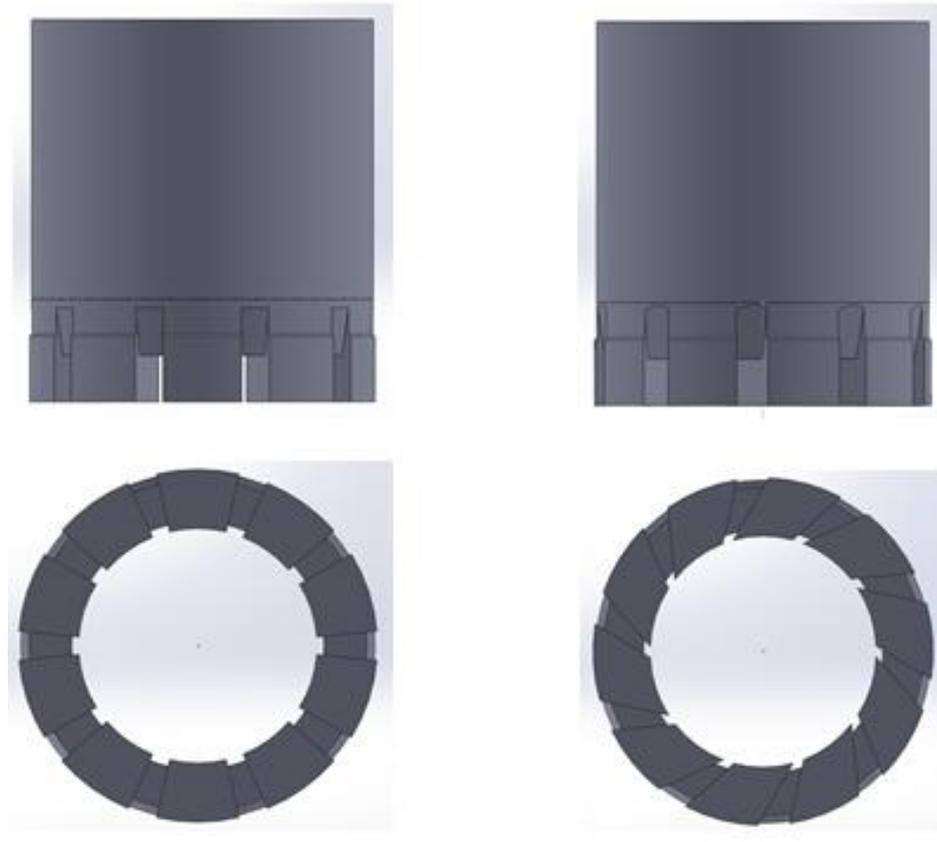


Figura 2.2. Modelo geométrico de la broca con vías de agua radiales y de la broca con vías de agua inclinadas (De izquierda a derecha) – Ver anexo 1 y anexo 2.

2.2.2 Definición del dominio

Para facilitar el análisis, se procedió a dividir el dominio geométrico en tres subdominios. El primer subdominio es el volumen que comprende la entrada del fluido, en el cual se desarrolla antes de atravesar los canales de enfriamiento. El segundo subdominio es el volumen que encierra la corona de la broca, en la cual se encuentran los canales de enfriamiento. Finalmente, el tercer subdominio es el volumen que comprende la salida del fluido, después de atravesar los canales de enfriamiento.

Para modelar el dominio que encierra la corona de la broca con los canales de enfriamiento se utilizaron las geometrías CAD de la broca de perforación. Para realizar este procedimiento, en el software DM se generó un volumen cilíndrico que encierre la corona, y por medio de la herramienta de sustracción se retiró el volumen negativo de la geometría de la broca, para solo quedar el volumen en el cual se desarrollará el fluido.

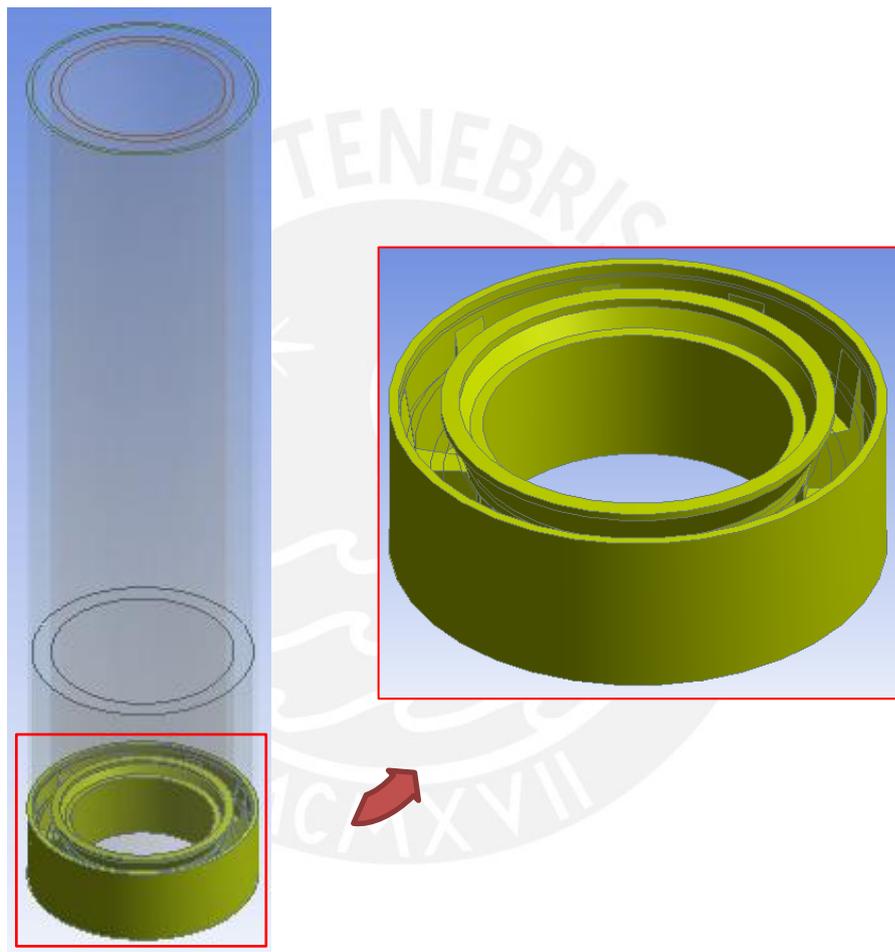


Figura 2.3. Volumen de control que encierra la corona de la broca de perforación.

Para la obtención de los otros subdominios se procedió de igual manera. En primer lugar se generó una superficie cilíndrica que encierre al cuerpo de la broca y a la tubería, y posteriormente se procedió a sustraer ambas geometrías para obtener tanto el volumen negativo del dominio de entrada como el de salida. Cabe resaltar que todos los subdominios poseen el mismo origen de coordenadas.

Los dominios mostrados a continuación fueron considerados para ayudar a que el fluido se desarrolle antes de que ingrese a los canales de refrigeración en el caso del

dominio de entrada, mientras que el dominio de salida nos permite simular los vectores de velocidad a la salida de los canales de refrigeración.

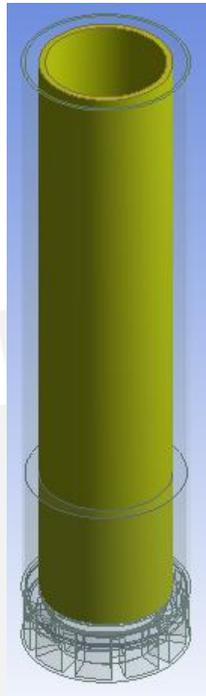


Figura 2.4. Volumen de control de entrada del fluido.

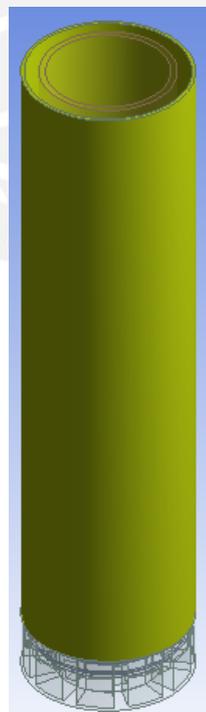


Figura 2.5. Volumen de control de salida del fluido

Finalmente, se obtiene el CAD de todo el dominio (3 subdominios), el cual consiste en el volumen negativo a través del cual se desarrollará el fluido bifásico.

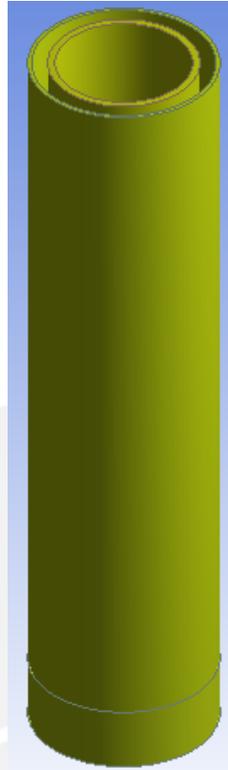


Figura 2.6. Dominio total del modelo.

2.2.3 Generación del mallado

En esta etapa del pre-procesamiento, se realizó el mallado de los volúmenes por separado, pues las densidades del mallado que se requerían eran distintas. En el caso del volumen que rodea la corona de la broca, este necesita una malla más densa para poder realizar un estudio más aproximado del comportamiento del fluido dentro de las vías de agua. En el caso de los volúmenes de entrada y salida, no es necesaria una malla muy densa pues estos volúmenes solo permitirán el desarrollo del fluido a la entrada y a la salida de la corona de la broca de perforación.

Para poder verificar la calidad de la malla, se tuvieron en cuenta algunas variables tales como la calidad del elemento (element quality), la oblicuidad (skewness), la ortogonalidad (orthogonality), y el Yplus. Esta última variable es utilizada en ANSYS CFX para indicar la ubicación del primer vértice adyacente a la pared, lo cual ayuda a definir la calidad de malla en las superficies en las que se genera un perfil de capa límite.

En general, estos indicadores deben de cumplir con ciertos valores para que la calidad de malla sea considerada aceptable. Según esto, en un rango de 0 a 1, los indicadores de calidad de elemento y de ortogonalidad deben de ser lo más cercanos a 1, mientras que el indicador de oblicuidad debe de ser lo más cercano a 0. En el caso del Yplus, para estudios de turbulencia en donde se necesita aproximar el perfil de la capa límite se recomienda valores entre 0 y 50.

En base a estas observaciones, se realiza el mallado de los tres dominios de la broca de perforación diamantina de vías de agua radiales, el cual se muestra en la figura 2.7. Se observa que los elementos utilizados tanto para el mallado del dominio de entrada como el de salida son elementos hexaédricos, mientras que para el dominio rotacional se utilizan elementos tetraédricos.

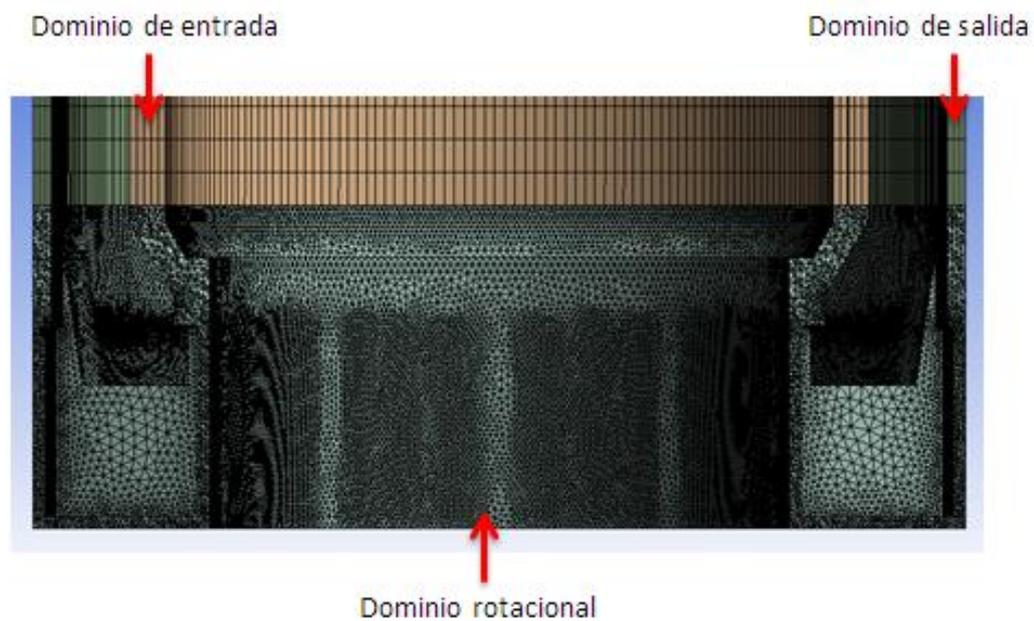


Figura 2.7. Mallado de los tres dominios de la broca de perforación de vías radiales.

Cabe recalcar que el dominio rotacional presenta una malla más densa, pues una mayor cantidad de nodos permite una mejor descripción del fluido a través de las vías de agua. En la tabla 2.1 se muestran los valores promedio, mínimo y máximo de la calidad de elemento, la ortogonalidad, y la oblicuidad referentes a la broca de perforación de vías de agua radiales, cuyos valores verifican que la calidad de malla es buena.

Tabla 2.1. Indicadores de calidad de malla, oblicuidad, ortogonalidad del dominio rotacional y de los dominios de entrada y salida de la broca de perforación de vías de agua radiales.

	Broca de vías de agua radiales								
	Skewness (Oblicuidad)			Orthogonality			Element Quality		
	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.	Prom.	Min.	Max.
Dominio de salida	0,0549	0,0365	0,2476	0,9963	0,9331	0,9984	0,9121	0,0826	0,9766
Dominio de entrada	0,1039	0,0414	0,1583	0,9867	0,9706	0,9981	0,9201	0,2780	0,9867
Dominio rotacional	0,2332	0,0324	0,8800	0,8542	0,1589	0,9978	0,8334	0,1367	0,9932

Asimismo, se muestran las figuras 2.8, 2.9 y 2.10, que permiten verificar los valores de Yplus obtenidos para cada dominio.

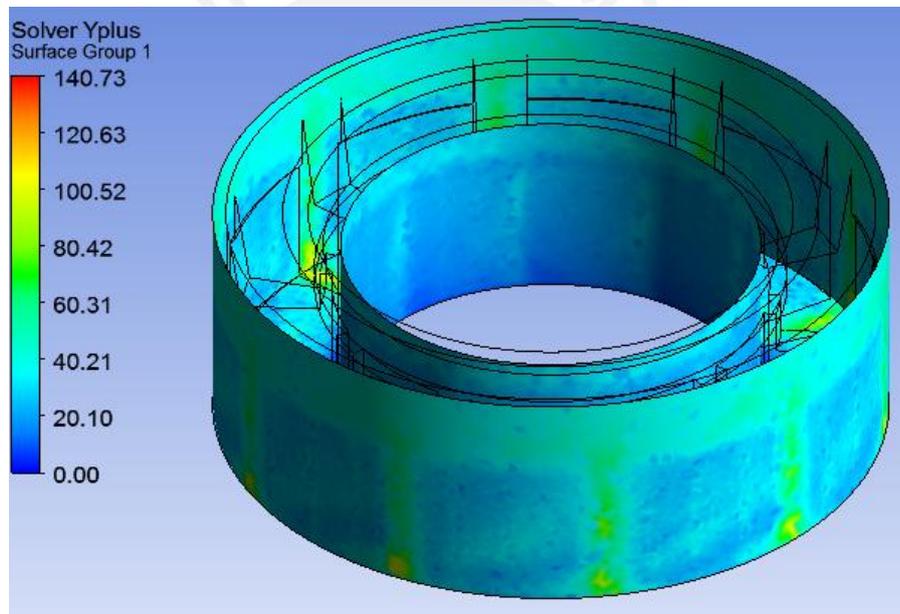


Figura 2.8. Superficie con distribución de valores de Yplus de la broca de perforación de vías radiales (Rotational Domain).

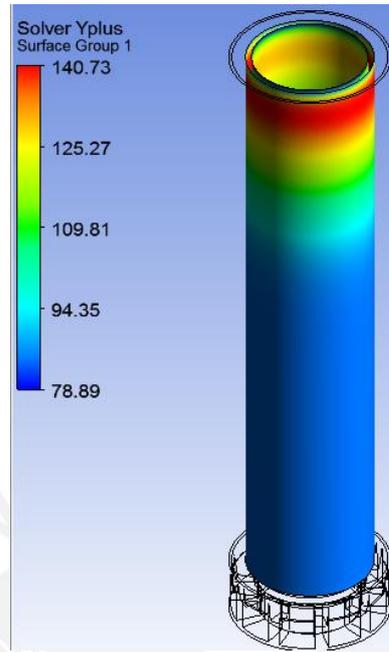


Figura 2.9. Superficie con distribución de valores de Yplus del dominio de entrada en la broca de perforación de vías de agua radiales.

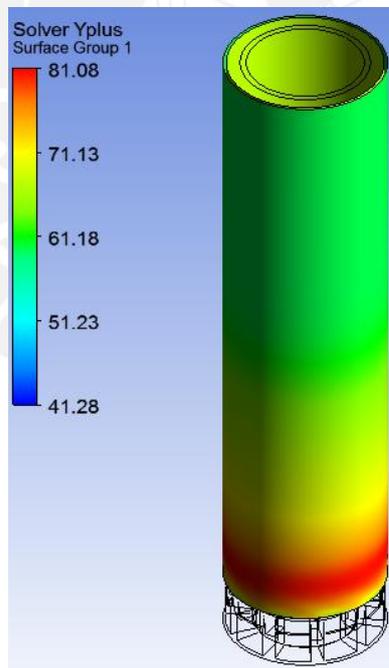


Figura 2.10. Superficie con distribución de valores de Yplus del dominio de salida en la broca de perforación de vías de agua radiales.

Bajo el mismo procedimiento, se realiza el mallado de los tres dominios de la broca de perforación diamantina de vías de agua inclinadas, el cual se muestra a continuación.

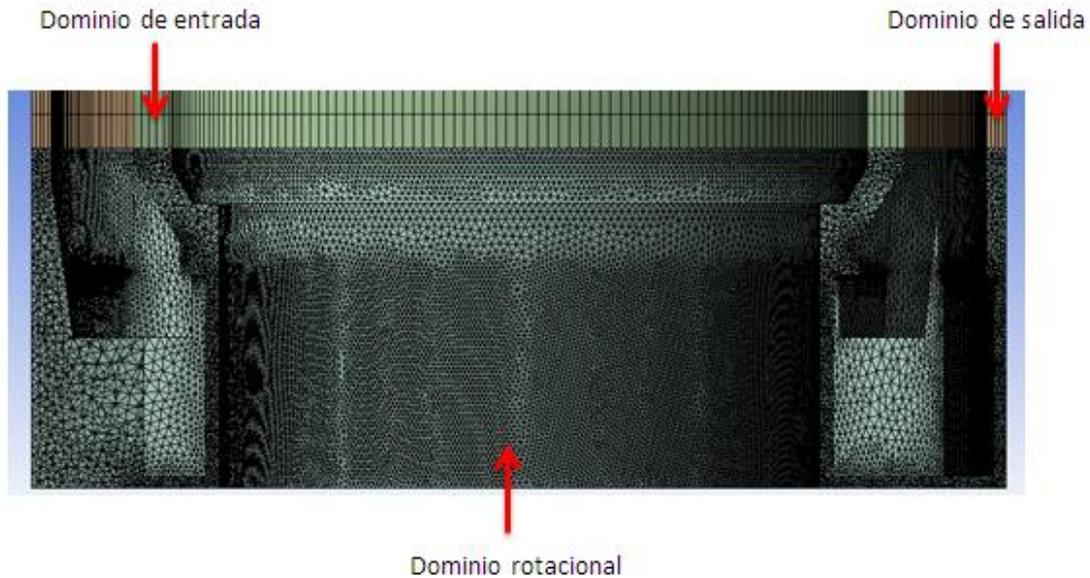


Figura 2.11. Mallado de los tres dominios de la broca de perforación de vías de agua inclinadas. Asimismo, en la tabla 2.2 se muestran los valores promedio, mínimo y máximo de la calidad de elemento, la ortogonalidad, y la oblicuidad referentes a la broca de perforación de vías de agua radiales, cuyos valores verifican que la calidad de malla es buena.

Tabla 2.2. Indicadores de calidad de malla, oblicuidad, ortogonalidad del dominio rotacional y de los dominios de entrada y salida de la broca de perforación de vías de agua inclinadas.

	Broca de vías de agua inclinadas								
	Skewness			Orthogonality			Element Quality		
	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max
Dominio de entrada	0,2090	0,0000	0,8968	0,9958	0,9756	0,9974	0,8284	0,2741	0,3057
Dominio de salida	0,0205	0,0017	0,0542	0,9994	0,9966	1,0000	0,8951	0,0830	0,0953
Dominio rotacional	0,2339	0,0234	0,8968	0,8538	0,1870	0,9977	0,8329	0,1681	0,9951

Al igual que en el mallado de las vías de agua radiales, los valores de Yplus obtenidos para cada dominio se verifican y se muestran en las figuras 2.12, 2.13, y 2.14.

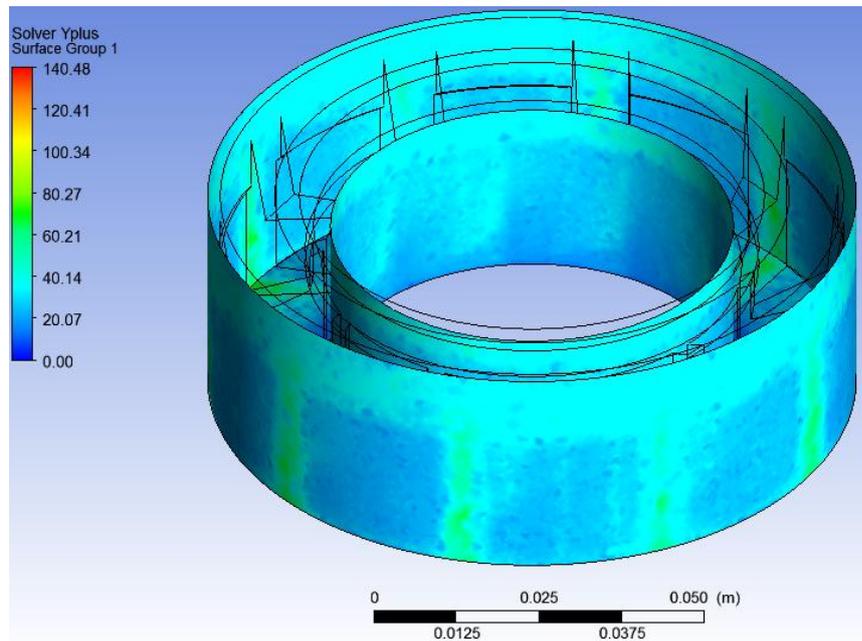


Figura 2.12. Superficie con distribución de valores de Yplus de la broca de perforación de vías inclinadas (Rotational Domain)

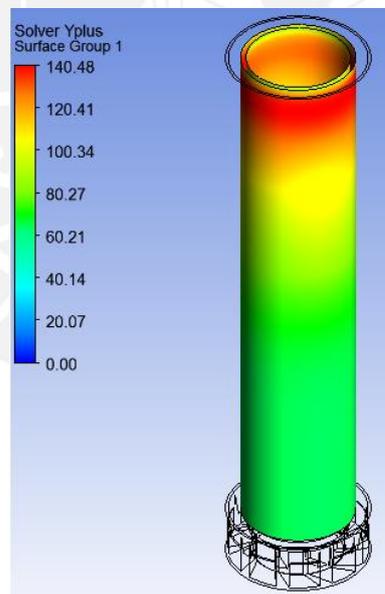


Figura 2.13. Superficie con distribución de valores de Yplus del dominio de entrada en la broca de perforación de vías de agua inclinadas.

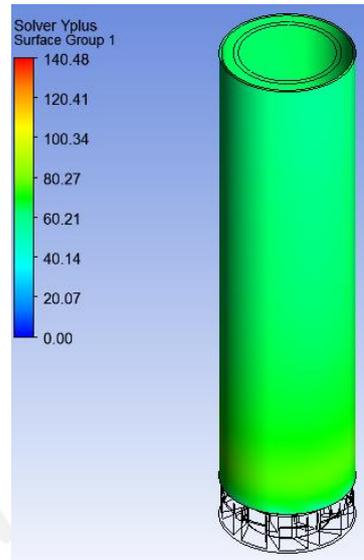


Figura 2.14. Superficie con distribución de valores de Yplus del dominio de salida en la broca de perforación de vías de agua inclinadas.

Como se puede observar en los parámetros de mallado de ambas geometrías, se ha logrado una mallado con una calidad bastante aceptable, ya que se logra cumplir con lo recomendado por la bibliografía de ANSYS 14.5. Cabe recalcar, que para la calidad de la malla se consideró un valor de Yplus dentro del rango de [0 a 40] para el dominio rotatorio, pues este es el dominio de interés dentro de la investigación. Para los dominios de entrada y de salida, en los cuales solo se desarrolla el fluido, y que a su vez no son dominios de mayor interés dentro de la simulación se ha considerado aceptable trabajar con un valor de Yplus dentro del rango de [50 a 100].

En algunos casos, tanto en el dominio rotatorio como en los dominios de entrada y de salida, encontramos puntos o áreas de superficie que se encuentran fuera del rango, lo cual nos indica que el mallado puede ser refinado para lograr mayor exactitud en los valores encontrados.

Para garantizar el mallado de la simulación, a continuación se muestra el cuadro de las estadísticas del mallado de todos los dominios, en el cual los índices de relación de aspecto promedio, oblicuidad promedio y ortogonalidad promedio son señalados como muy buenos (OK).

Mesh Statistics										
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio			
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum			
Domain Entrada	77.5	OK		1	OK		5	OK		
Domain Salida	71.7	OK		1	OK		10	OK		
Rotational Body	36.6	ok		26	!		9	OK		
Global	36.6	ok		26	!		10	OK		
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	
Domain Entrada	0	0	100	0	0	100	0	0	100	
Domain Salida	0	0	100	0	0	100	0	0	100	
Rotational Body	0	<1	100	<1	1	99	0	0	100	
Global	0	<1	100	<1	<1	100	0	0	100	

Figura 2.15. Estadísticas de mallado de los dominios parciales y del global de la broca de vías de agua radiales.

Mesh Statistics										
Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio			
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum			
Rotational Domain	35.9	ok		16	ok		9	OK		
Stationary Domain Ent	79.6	OK		1	OK		5	OK		
Stationary Domain Sal	85.7	OK		1	OK		9	OK		
Global	35.9	ok		16	ok		9	OK		
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	
Rotational Domain	0	<1	100	0	1	99	0	0	100	
Stationary Domain Ent	0	0	100	0	0	100	0	0	100	
Stationary Domain Sal	0	0	100	0	0	100	0	0	100	
Global	0	<1	100	0	<1	100	0	0	100	

Figura 2.16. Estadísticas de mallado de los dominios parciales y del global de la broca de vías de agua inclinadas.

2.2.4 Definición de condiciones de trabajo

2.2.4.1 Fluido de enfriamiento

Debido a que el problema real precisa del análisis de un fluido multifásico, se plantea como aproximación la interacción de dos fluidos (fluido bifásico), los cuales son el agua y el aire. El aire, como partículas dispersas, representa la generación de burbujas como consecuencia de la generación de torbellinos durante la rotación de la broca de perforación; mientras que el agua, como fluido continuo, representa el fluido que se encarga del enfriamiento de la broca de perforación, así como de la evacuación de detritos. Las propiedades de los fluidos serán consideradas en condiciones estándar. A continuación, las tablas 2.3 y 2.4 muestran las consideraciones respecto a cada fluido.

Tabla 2.3. Propiedades del agua

Fluido	Grupo de material	Estado termodinámico	Propiedades			Estado de referencia	
			Densidad (kg / m ³)	Masa molar (kg / K-mol)	Viscosidad dinámica (kg / m*s)	Presión de referencia (atm)	Temperatura de referencia (°C)
Agua	Sustancia pura	Líquido	997,0	18,02	8,899E-04	1	25

Tabla 2.4. Propiedades del aire

Fluido	Grupo de material	Estado termodinámico	Propiedades			Estado de referencia	
			Densidad (kg / m ³)	Masa molar (kg / K-mol)	Viscosidad dinámica (kg / m*s)	Presión de referencia (atm)	Temperatura de referencia (°C)
Aire	Sustancia pura	Gaseoso	1,185	28,96	1,831E-05	1	25

2.2.4.2 Parámetros de operación

Para el desarrollo de la simulación en la presente tesis se consideraron los parámetros de operación nominales de una broca durante un trabajo de perforación en campo. Los parámetros considerados para definir el comportamiento del fluido dentro del dominio geométrico en su totalidad son los siguientes: la velocidad de rotación de la broca, el sentido de rotación de la broca, la presión de empuje del fluido de enfriamiento, y la

velocidad de entrada del fluido de enfriamiento. A continuación, se muestra la tabla 2.5, en la cual se puede visualizar los parámetros considerados:

Tabla 2.5. Parámetros de operación considerados para el desarrollo de la simulación numérica

Parámetros de operación considerados				
Caudal de entrada del fluido	Área en la entrada de la broca	Velocidad de entrada del fluido	Presión de empuje sobre el fluido	Velocidad de rotación de la broca
gal/min (l/min)	m ²	m/s	PSI	RPM
6,4 (24)	5,79E-04	0,68	350	1000

Nota: Se consideró para el caudal de entrada el mínimo valor del rango (24 l/min), por ser este valor utilizado con mayor frecuencia como parámetro nominal durante los procesos de perforación.

2.2.5 Parámetros de control

El proceso iterativo se puede controlar mediante la fijación de algunos criterios como el número máximo de iteraciones, la discretización del tiempo, el residuo objetivo (residuo mínimo resultante de la ponderación de errores en las ecuaciones – RMS mínimo para alcanzar la convergencia de las variables analizadas), etc.

En la presente tesis, se consideraron los siguientes parámetros de simulación: un número máximo de 500 iteraciones (a través de las cuales los valores de las ecuaciones de conservación de masa y momento son estabilizados en el tiempo), un residuo objetivo (residual target) de 1.E-04, y un factor de escala de tiempo de 1.

2.3 Solución

Para la resolución de la simulación del comportamiento fluido-dinámico de la broca de perforación diamantina, se consideraron las siguientes condiciones y parámetros, los cuales son detallados en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Parámetros generales considerados para el desarrollo de la simulación numérica

Característica	Descripción
Tipo de fluido (bifásico)	Agua: Incompresible, Continuo, Newtoniano
	Aire: Compresible, Partículas dispersas, Newtoniano
Tipo de flujo	Turbulento
Tipo de régimen	Estacionario
Modelo multifásico	Homogéneo
Fuerza Gravitacional	Si
Tipo de modelamiento de turbulencia	SST
Velocidad de Fluido	0,68 m/s
Velocidad de giro	1000 RPM
Proceso de transferencia de calor	Isotérmico (25°C)
Presión de referencia	1 atm
Presión de empuje	350 PSI
Coeficiente de tensión superficial	0.072 N m ⁻¹
Condición de paredes	Sin deslizamiento
Método de resolución de ecuaciones	Método de volúmenes finitos
Escala de tiempo físico	1 s
Número de elementos (broca de vías radiales)	3314467
Número de elementos (broca de vías modificadas)	3305193
Método de conexión de malla	GGI
Tipo de elementos	Tetraédricos, hexaédricos

Como se puede observar a continuación, ambas simulaciones mostraron convergencia en todos los parámetros, y aunque en algunos valores no se alcanzó el residual target de 1.E-04, se consideró suficiente obtener un residual target muy aproximado al valor configurado.

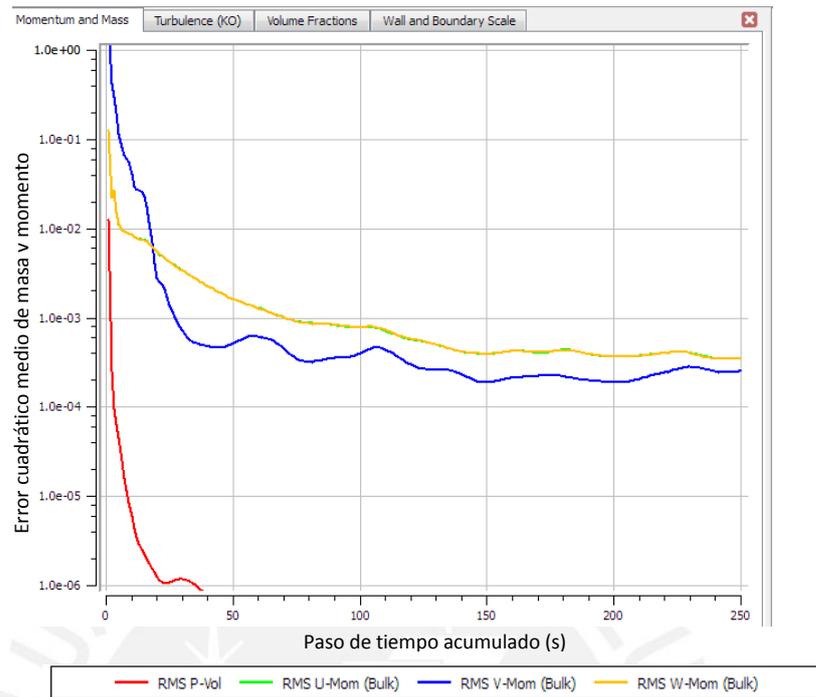


Figura 2.17. Gráfica de convergencia de las ecuaciones de masa y momento referentes a la broca de perforación de vías de agua radiales.

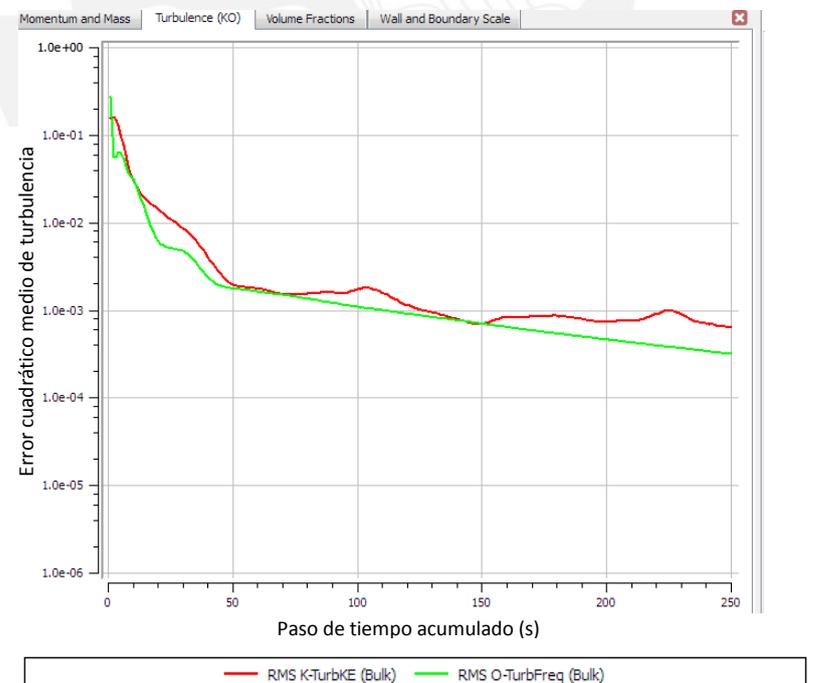


Figura 2.18. Gráfica de convergencia de las ecuaciones de turbulencia referentes a la broca de perforación de vías de agua radiales.

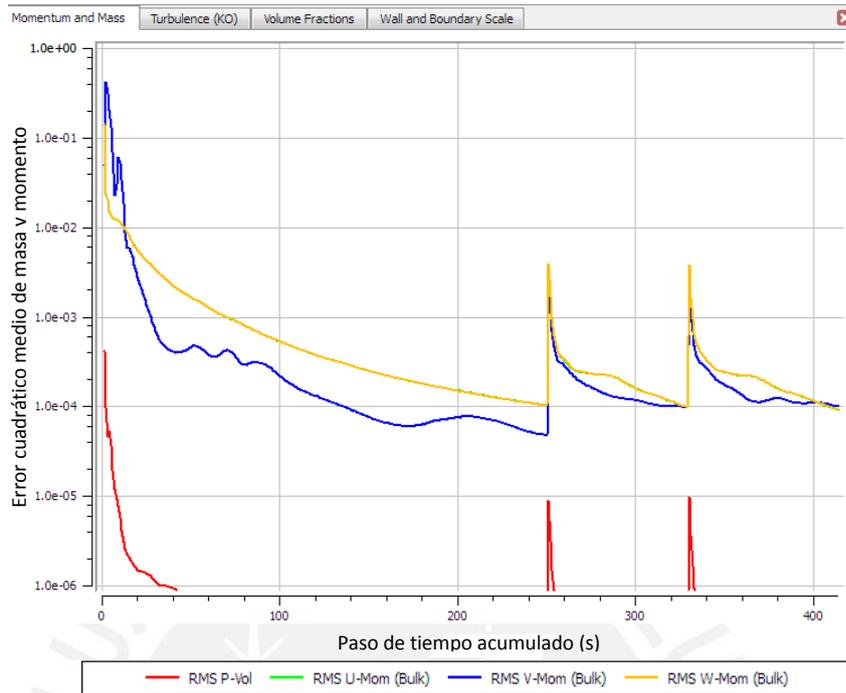


Figura 2.19. Gráfica de convergencia de las ecuaciones de masa y momento referentes a la broca de perforación de vías de agua inclinadas.

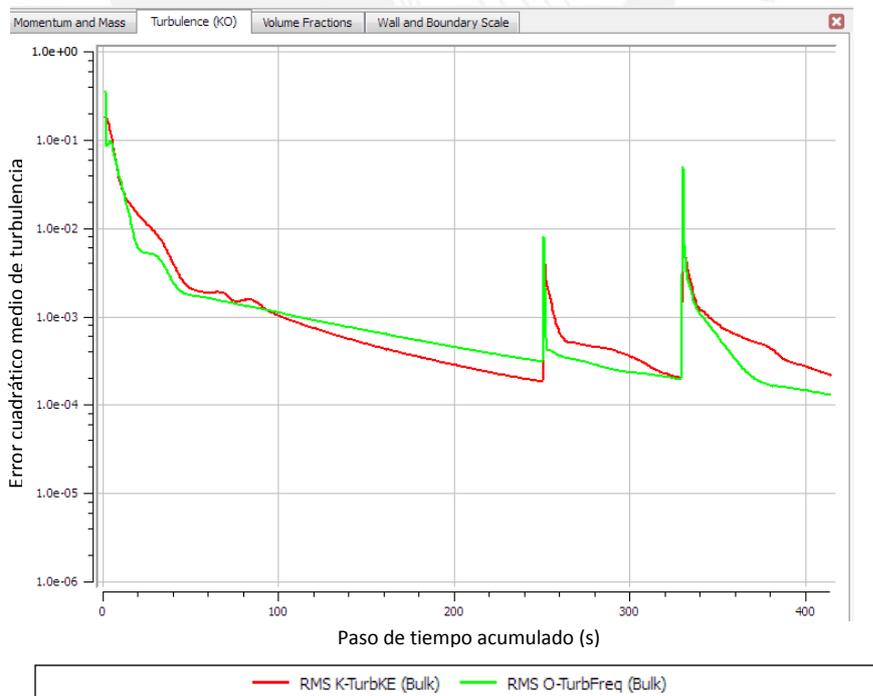


Figura 2.20. Gráfica de convergencia de las ecuaciones de turbulencia referentes a la broca de perforación de vías de agua inclinadas.

2.4 Post-procesamiento

En los incisos anteriores se han detallado el modelo simplificado propuesto, el mallado de los dominios, y los parámetros de la simulación numérica de la broca de perforación diamantina, tanto de vías de agua radiales como de vías de agua inclinadas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la simulación numérica de ambas brocas de perforación, en relación a las principales características del flujo (vectores de velocidad y zonas de turbulencia).

2.4.1 Análisis fluido-dinámico comparativo de las brocas

En las figuras que se muestran a continuación se representan las distribuciones de los vectores de velocidad en las brocas de perforación con vías de aguas tanto radiales como inclinadas. Como se mencionó anteriormente, la zona de mayor interés es la corona de la broca, pues en ésta se encuentran distribuidas las vías de agua.

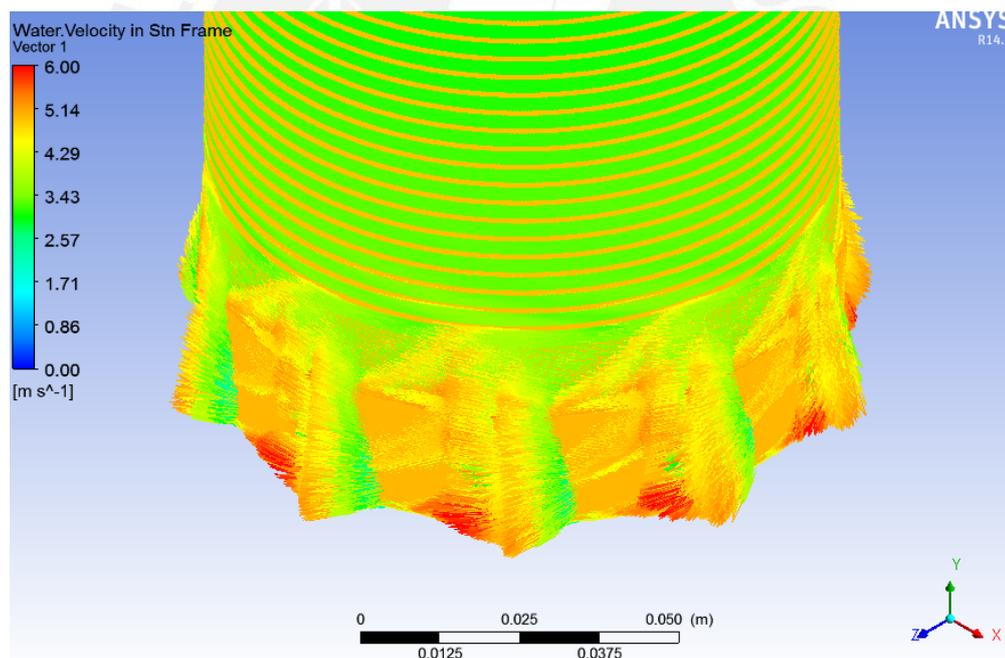


Figura 2.21. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua radiales en una vista isométrica

Como se observa en la figura 2.21, los vectores de velocidad muestran una salida tangencial a la cara externa de la broca. Asimismo, se observa que los vectores de velocidad poseen una mayor magnitud en la parte inferior de las vías de agua de la broca de perforación (cara de contacto entre la corona y la roca). Cabe decir que las

magnitudes de los vectores de velocidad a la salida de las vías de agua se encuentran, en mayor proporción, dentro del rango de [5.14 – 6] m/s.

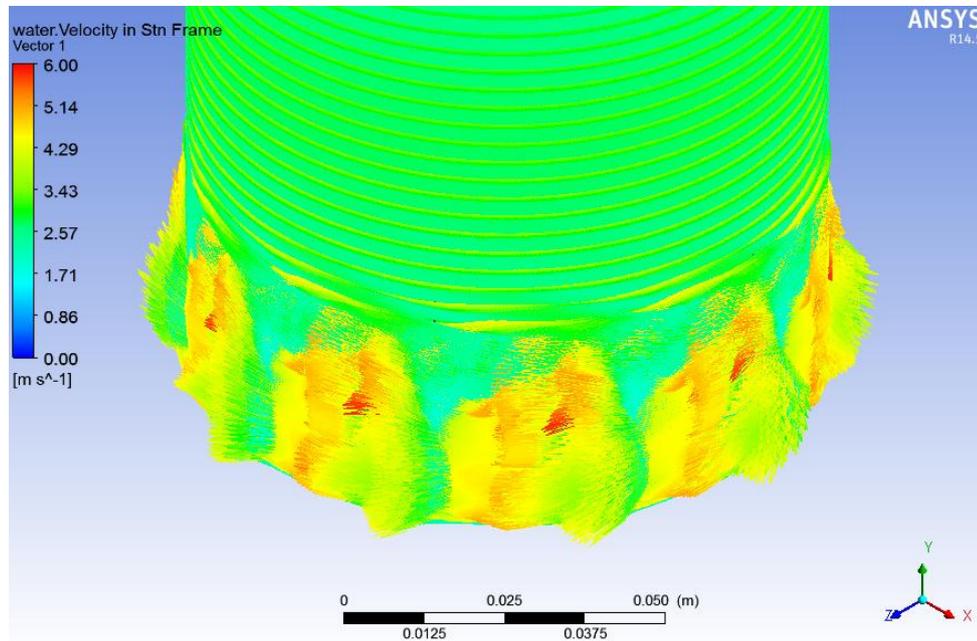


Figura 2.22. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua inclinadas en vista isométrica

En la figura 2.22, se puede observar claramente una diferencia en la distribución de los vectores de velocidad a la salida de las vías de agua. Se observa un comportamiento y distribución de los vectores mucho más desordenado, y al parecer con magnitudes menores. Estos valores se encuentran dentro del rango de [4,29 – 6] m/s, siendo más predominantes las magnitudes cercanas a 4,29 m/s. Además, a diferencia del caso anterior, se puede observar que los vectores de velocidad con mayor magnitud se encuentran en la parte superior de las vías de agua.

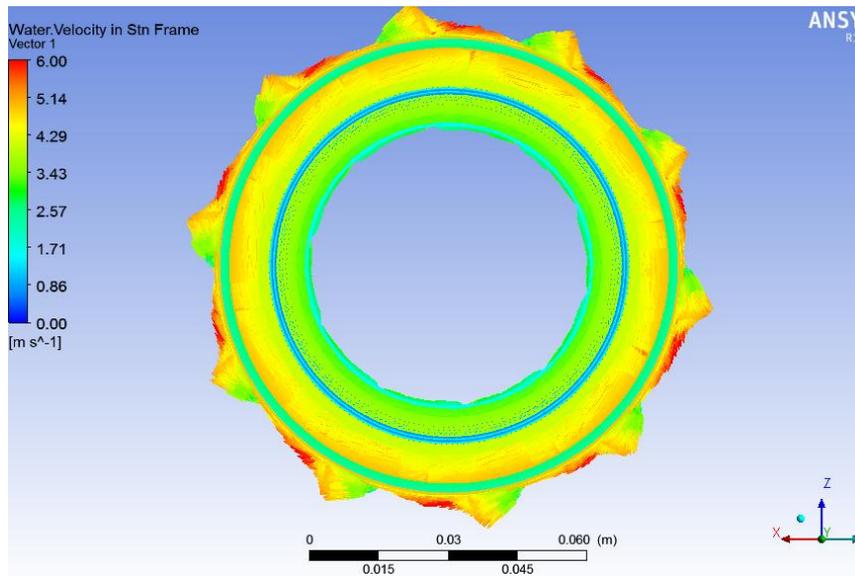


Figura 2.23. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua radiales desde una vista superior.

En la figura 2.23, desde una vista de planta, se observa la distribución de los vectores de velocidad dentro de las vías de agua radiales. Se muestra que los vectores de mayor magnitud solo se encuentran a la salida de la broca y que dentro de las vías de agua se obtienen valores entre [2,57 – 5,14] m/s. Como se mencionó anteriormente, en la broca de vías radiales se observa una distribución de los vectores de velocidad más ordenada.

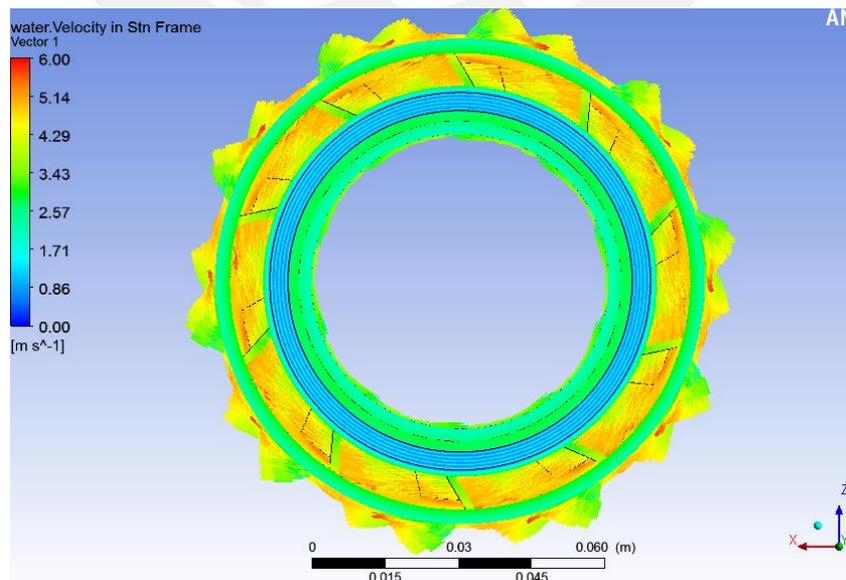


Figura 2.24. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua inclinadas desde una vista superior.

En la figura 2.24 se observa la vista de planta de la broca de perforación diamantina de vías de agua inclinadas, y se muestra que la magnitud de los vectores de velocidad dentro de las vías de agua inclinadas es mayor en comparación a la magnitud de los vectores de velocidad dentro de las vías de agua radiales. Estos vectores de velocidad dentro de las vías de agua inclinadas se encuentran dentro del rango de [3,43 – 6] m/s. Asimismo, se muestra que existe una diferencia notable en la distribución de los vectores a la salida de las vías de agua inclinadas, con una tendencia más desordenada.

A continuación, se muestran las distribuciones de los vectores de velocidad respecto a los planos medios de las vías de agua, tanto para el caso de las vías de agua radiales como para el caso de las vías de agua inclinadas. A través de estos cortes, se puede conocer con mayor precisión el comportamiento de los vectores de velocidad a la salida de las vías de agua, y la intensidad de turbulencia que se genera dentro de las mismas.

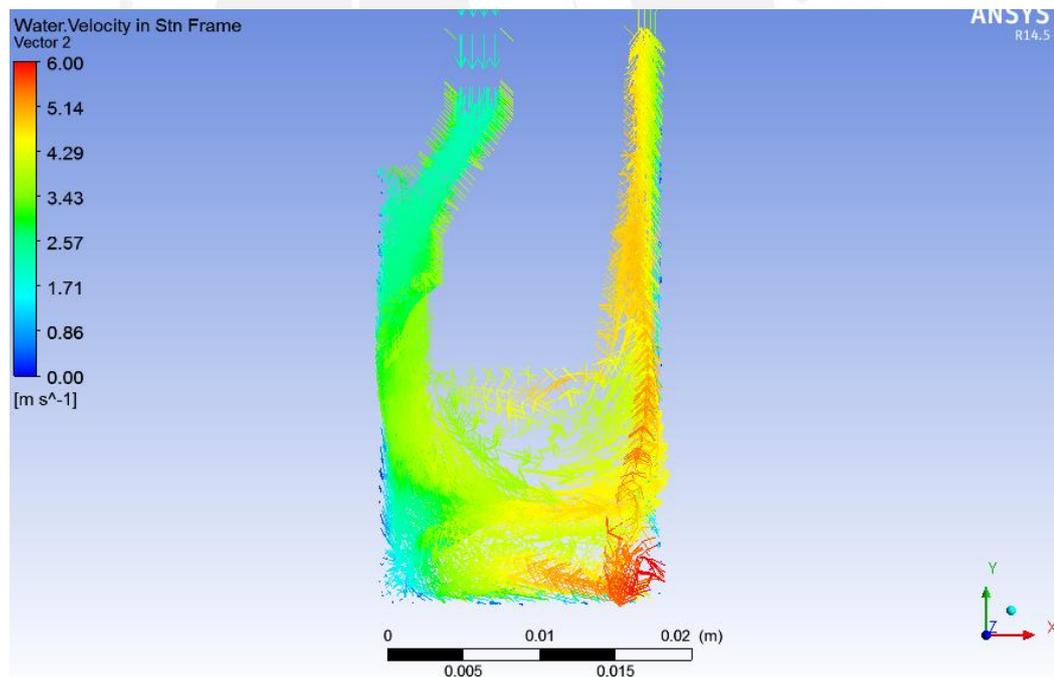


Figura 2.25. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua radiales en un plano de sección (plano medio de la vía de agua radiales)

En la figura 2.25 se muestra el plano medio de una vía de agua de vías radiales. Como se puede observar, los vectores de velocidad dentro de las ranuras de enfriamiento se encuentran en un rango de valores entre [1,71 – 4,29] m/s. De acuerdo a la figura, los

vectores de velocidad a la salida de las vías de agua radiales se dividen en dos direcciones, una que direcciona el fluido de manera ascendente y otra que direcciona el flujo hacia abajo y genera una contracorriente. Asimismo, son estos últimos vectores de velocidad con dirección descendente los que poseen las mayores magnitudes de los vectores de velocidad (aproximadamente 6 m/s), mientras que la magnitud de los vectores de velocidad que tienen dirección ascendente solo alcanza los 5,14 m/s como valor máximo.

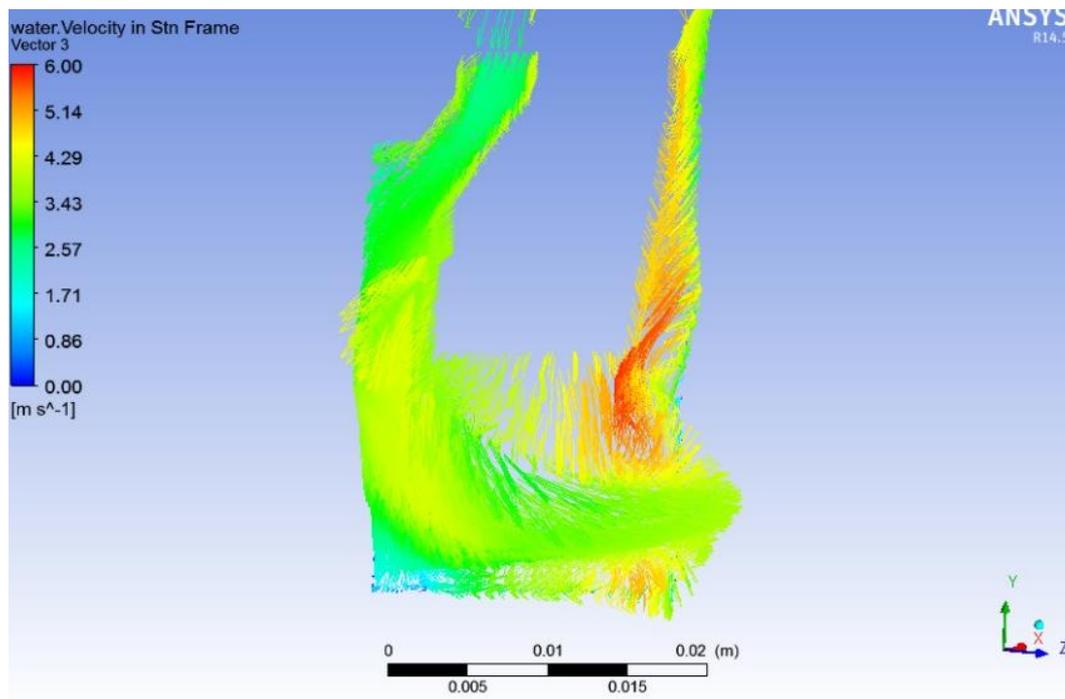


Figura 2.26. Distribución de vectores de velocidad de la broca de perforación de vías de agua inclinadas en un plano de sección (plano medio de la vía de agua inclinadas)

Como se puede observar claramente en la figura 2.26, los vectores de velocidad presentan una densidad mucho mayor en la parte central de las vías de agua inclinadas. Las magnitudes de estos valores se encuentran dentro del rango de [3,43 – 5,14] m/s, los cuales son mayores en comparación a las magnitudes de los vectores de velocidad dentro de las vías radiales. Asimismo, se observa que a la salida de las vías de agua inclinadas, el flujo se divide en dos direcciones como en el caso anterior, con la diferencia que los vectores de velocidad que direccionan el fluido hacia abajo son de menor magnitud y en mucho menor proporción que en el caso de las vías radiales. Mientras que los vectores de velocidad que direccionan el fluido de manera

ascendente poseen mayor magnitud (aproximadamente 6 m/s), proporcionando una evacuación más efectiva del flujo.

Cabe recalcar que a comparación de la distribución de vectores de velocidad dentro de las vías radiales, la distribución de vectores de velocidad obtenidos dentro de las vías inclinadas proporciona un comportamiento con mayor tendencia turbulenta, por la mayor magnitud de sus valores y por el desarrollo de la contracorriente que promueve el movimiento del fluido con dirección ascendente.

Para el análisis de la turbulencia en ambas brocas, se plantea la siguiente premisa: Con mayor número de Reynolds (mayor intensidad de turbulencia), mayor número de Nusselt y en consecuencia mayor coeficiente convectivo. Al incrementar el coeficiente convectivo, la transferencia de flujo de calor entre broca y fluido será mayor, lo cual proporcionará una mayor capacidad de enfriamiento.

Considerar para este análisis las siguientes expresiones matemáticas:

$Nu = 0.0296 * Re^{0.8} * Pr^{1/3}$; donde Nu es el número de Nusselt, y Pr es constante.

$\alpha = \frac{Nu * K}{D}$; donde α es el coeficiente convectivo, K es la conductividad térmica y D es el diámetro interno de la tubería.

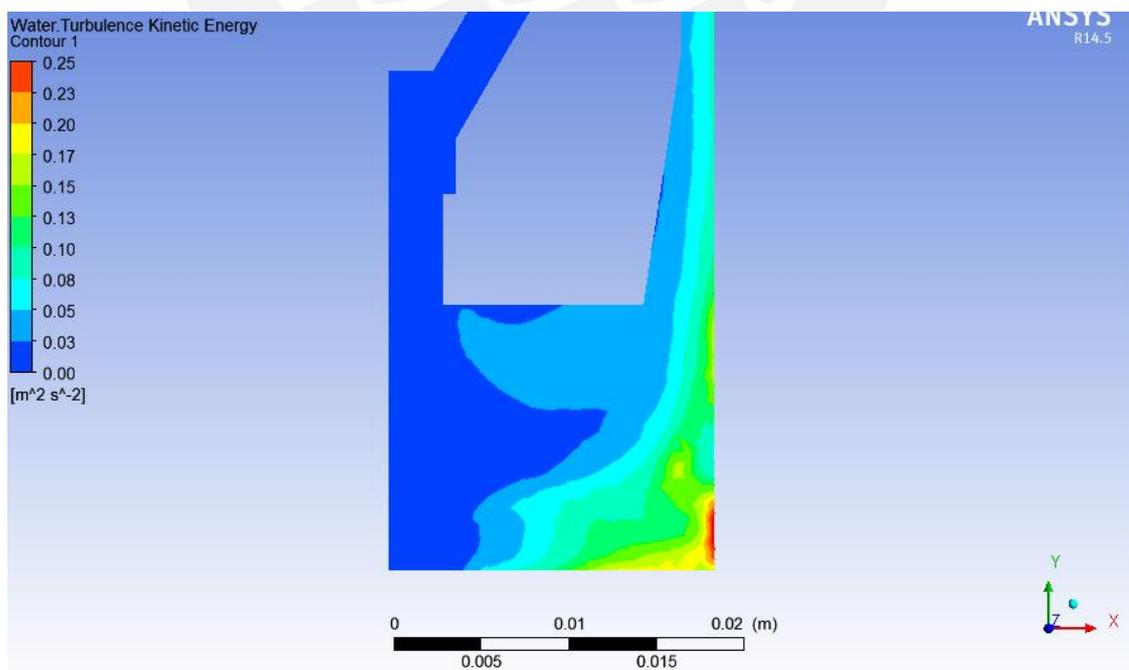


Figura 2.27. Contorno de intensidad de turbulencia de la broca de perforación de vías de agua radiales en un plano de sección (plano medio de la vía de agua radiales)

En la figura 2.27 se encuentran graficados los contornos de la energía cinética turbulenta, el cual es un parámetro que representa la variación en las fluctuaciones de velocidad, que se puede traducir como una medida de la intensidad de turbulencia. Mientras más próximos sean estos valores a 1, mayor será la intensidad de turbulencia medida.

Como se puede observar en la figura 2.27, la zona de mayor intensidad de turbulencia se encuentra en la parte inferior de la corona, próxima a la cara externa. Cabe decir que esta intensidad de turbulencia se encuentra muy relacionada a la contracorriente que se observó en la distribución de los vectores de velocidad de las vías de agua radiales. Sin embargo, no se obtienen similares valores de intensidad de turbulencia en la zona central de la vía de agua, en la cual se observa una reducción considerable.

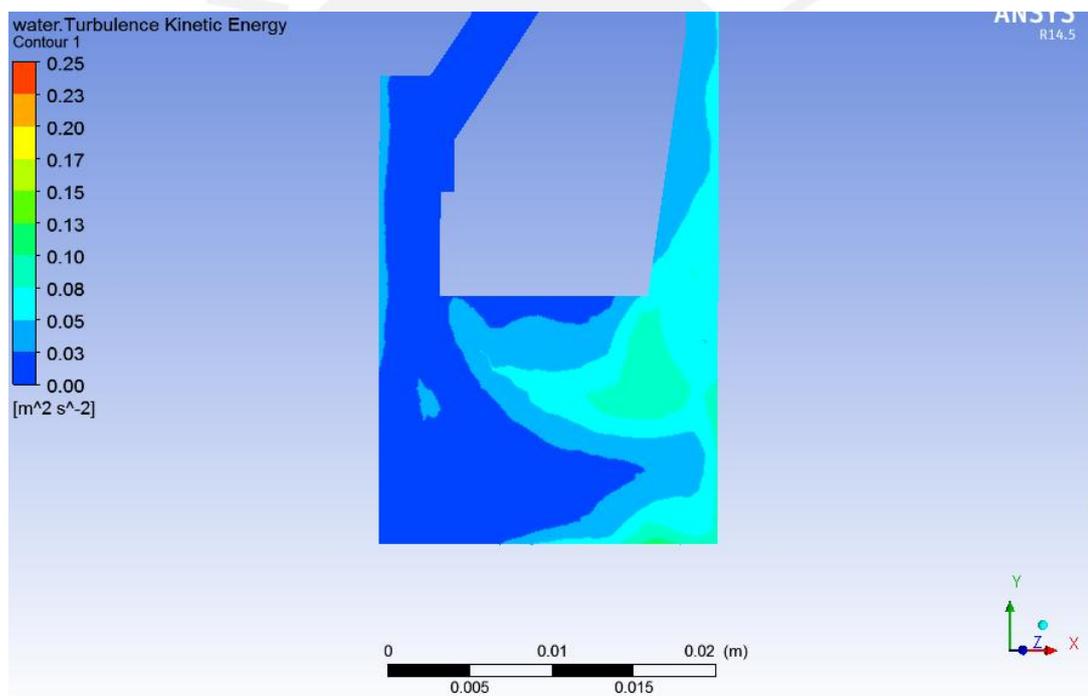


Figura 2.28. Contorno de intensidad de turbulencia de la broca de perforación de vías de agua inclinadas en un plano de sección (plano medio de la vía de agua inclinadas)

En la figura 2.28 se observan los contornos de energía cinética turbulenta desarrollados dentro de las vías de agua inclinadas de la broca de perforación diamantina. Claramente, se muestra que la intensidad turbulenta es menor en comparación a los contornos desarrollados dentro de las vías de agua radiales; sin embargo, en el segundo caso, la intensidad turbulenta está limitada solo a la cara inferior externa de la corona, mientras que en el caso de las vías de agua inclinadas,

se muestra que esta intensidad turbulenta ha sufrido un traslado hacia la zona central de las vías de agua.

Aunque la intensidad desarrollada en estas vías de agua en la cara inferior externa no llega a igualar la intensidad alcanzada en el caso de las vías de agua radiales, se tiene que resaltar que en el centro de las vías de agua inclinadas se logra un incremento de la intensidad turbulenta. Esto indica que si bien, con la modificación propuesta de la geometría no se logra aumentar la intensidad turbulenta en toda la vía de agua, el traslado de los puntos con mayor intensidad turbulenta hacia el centro de la broca permite considerar un enfriamiento mucho más uniforme de la broca.



Capítulo 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con el objetivo de reforzar la propuesta de vías de agua inclinadas, se llevaron a cabo pruebas experimentales, las cuales fueron desarrolladas dentro de los locales de la empresa Boyles Bros Diamantina S.A. Se fabricaron brocas de perforación tanto con las vías de agua radiales como con las vías de agua inclinadas, considerando en todas ellas la misma combinación de materiales para su composición.

Debido a que los resultados de la simulación numérica muestran cómo se desarrolla el fluido en el interior de los canales de enfriamiento y cómo, a través de indicadores, esta modificación afecta el desgaste de la broca de perforación, esta metodología experimental se utiliza como herramienta complementaria y permite visualizar físicamente los efectos de la modificación del diseño en las brocas de perforación

Asimismo, tomando como base la simulación, la cantidad de muestras fabricadas se reduce, pues no se hace necesario una cantidad numerosa de pruebas de campo para poder llegar a una conclusión.

3.1 Diseño de la broca de perforación diamantina

La composición de la broca nos permite obtener distintas propiedades mecánicas, para que éstas proporcionen una eficiente capacidad de perforación dependiendo del tipo de terreno o roca. Algunos parámetros que se consideraron para la fabricación de la broca, son los detallados a continuación:

3.1.1 Composición de diamantes

Para una eficiente fabricación de las brocas de perforación, se debe de conocer las características de cada componente, pues cada uno de ellos posee una función específica dentro de la composición total. A continuación se detallará la influencia de los diamantes:

Tipo de diamante: Para poder seleccionar el tipo de diamante a emplear se consideró, principalmente, el tipo de terreno a perforar. Como regla general se plantea que mientras mayor sea la dureza del terreno, más resistente al impacto tendrá que ser el diamante.

Tamaño de diamante: Las partículas de diamante de tamaños pequeños presentan una mayor resistencia a la compresión e impacto y por lo tanto son recomendadas para el trabajo de terrenos duros. Por otro lado, los diamantes grandes son capaces de realizar el proceso de corte más efectivamente, debido a su tamaño y permiten una mejor limpieza de las partículas abrasivas de la superficie de la broca debido a que generan una mayor separación entre la matriz de la broca y la superficie de la roca.

Concentración: Emplear concentraciones de diamante altas requiere que la máquina de perforación tenga la potencia necesaria para distribuirla en un mayor número de cristales; de lo contrario, la penetración del diamante en la roca y la cantidad de material desprendido serán muy pequeños. Una menor concentración ocasiona que sobre cada diamante se aplique mayor carga, lo que generará que estos diamantes se quiebren o desprendan prematuramente. Además, debido a la protección que brindan los diamantes al material que los sostiene durante el proceso de corte, el empleo de una mayor concentración de diamantes ocasiona la disminución del desgaste de este material y por lo tanto una mayor vida útil de la herramienta.

3.1.2 Composición de la matriz

Para poder diseñar la matriz se tiene que considerar que la resistencia al desgaste sea compatible con la abrasividad del terreno que se está perforando, permitiendo que las partículas de diamante se expongan adecuadamente. En términos generales, una matriz de tungsteno se emplea generalmente para trabajar con terrenos como el concreto o arena; mientras que, por el otro lado, matrices de cobre son empleadas para trabajar terrenos muy poco abrasivos como cerámicos, vidrios y algunos metales [2].

Generalmente, durante el proceso de perforación, una roca dura y densa desprende partículas finas, ocasionando un desgaste bajo o moderado en la matriz; mientras que, al trabajar rocas cuyos desprendimientos son granos más grandes y arenosos, se producen ambientes más abrasivos durante el proceso de corte.

3.2 Fabricación de las brocas de perforación diamantina

Debido a la dificultad de realizar procesos de mecanizado por arranque de material para obtener el producto final, lo cual se debe principalmente por la presencia tanto de diamantes como de partículas metálicas con alta dureza como el tungsteno; la

fabricación de estas herramientas se lleva a cabo mediante el empleo de procesos de pulvimetalurgia.

Considerando que la broca de perforación investigada es una broca de perforación de diamantes impregnados, existen dos posibles caminos para la fabricación de la misma (presión en caliente e infiltración), los cuales van a depender de la densidad de la matriz que se requiera conseguir.

En el proceso de presión en caliente, se pueden alcanzar niveles de porosidad bastante bajos o nulos al deformar las partículas del polvo metálico mediante aplicación de fuerzas de compactación a altas temperaturas; sin embargo, debido a la simultaneidad de calentamiento y presión del polvo metálico, este proceso requiere de equipos bastante más caros y complejos que aquellos empleados en la infiltración; por lo que su uso se justifica sólo cuando el incremento en las propiedades o rendimiento del producto final son significativas. En el caso de la infiltración, una masa en estado líquido penetra a través de los poros de una fase sólida debido al efecto de las fuerzas de capilaridad presentes en este sistema. El empleo de procesos de infiltración, permite alcanzar densidades teóricas en materiales compuestos sin la necesidad de compactación a altas presiones o procesos subsecuentes, y además proporciona facilidad para fabricación de materiales compuestos con un cierto control de la distribución de fases que permite obtener una microestructura más uniforme [2].

Debido a que el proceso de infiltración es el proceso estándar de trabajo que se maneja dentro de Boyles Bros Diamantina, este fue el método escogido para la fabricación de las brocas de perforación. Una vez definido el proceso a utilizar, se procederá a detallar los puntos más importantes siguiendo el orden de fabricación de la broca:

1. Fabricación de moldes de grafito.
2. Pre-fabricación de cascos de acero.
3. Selección de polvos metálicos, aleación metálica infiltrante y diamantes de acuerdo al terreno a perforar.
4. Inspección y pesado de los elementos mencionados en el punto anterior.
5. Mezclado de las partículas metálicas con los diamantes y montaje en los moldes de grafito.
6. Ensamblaje del molde montado con el casco de acero y colocación de aleación metálica en el ensamble.

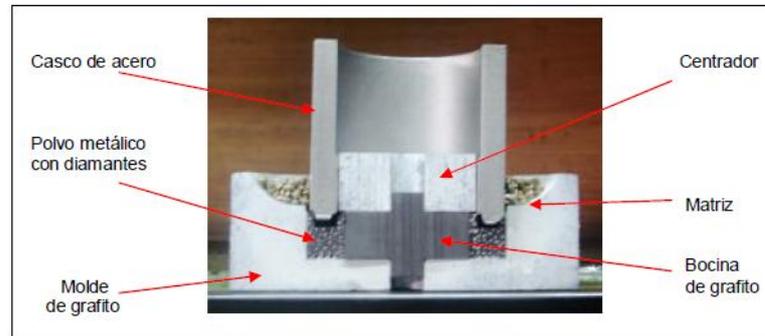


Figura 3.1. Ensamble de una broca de perforación diamantina antes de ingresar al horno de fundición.⁵

7. Fundición del ensamble.
8. Desmolde y limpieza de la broca fundida.
9. Mecanizado de acabado y roscado de la broca.
10. Limpieza, pintado, marcado y etiquetado de la broca.

Se fabricaron un total de diez brocas de perforación, de las cuales cinco fueron fabricadas con las vías de agua estándar, y las otras cinco con el diseño de vías de agua inclinadas. En este punto, cabe resaltar que el costo de materia prima de cada broca supera los 250 dólares, por lo cual la cantidad de muestras fabricadas estuvo limitada por el costo designado a la fabricación.

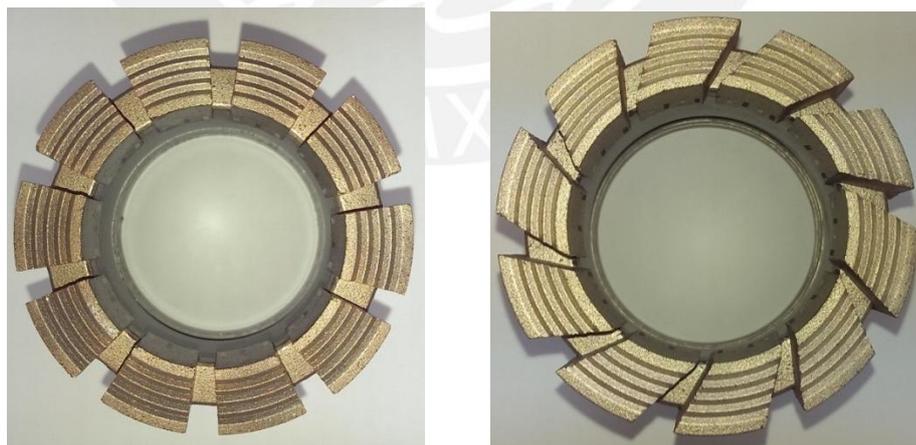


Figura 3.2. Broca de perforación diamantina con vías de agua radiales y vías de agua inclinadas. (De izquierda a derecha)

⁵ RIOS PEREZ, Carlos Alfredo. *Metodología de caracterización de un material compuesto de matriz metálica con partículas de refuerzo*. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2005.

3.3 Ensayos de perforación

Para poder hacer efectiva la recopilación de datos durante los ensayos de perforación, se utilizó una máquina de perforación vertical de prueba (Cs14 Atlas Copco), la cual se encuentra ubicada dentro de las instalaciones de la empresa Boyles Bros Diamantina. Una de las ventajas principales durante esta etapa de pruebas, fue la facilidad otorgada por la empresa para realizar las perforaciones tanto con las brocas de perforación diamantina con modificación de vías de agua como con las brocas de perforación estándar, ya que esta máquina es utilizada para verificar los parámetros de trabajo de las brocas, y utilizada también ocasionalmente para probar brocas con composiciones nuevas.

Una vez fabricadas las brocas de perforación con vías de agua estándar y vías de agua inclinadas, las cuales fueron debidamente membretadas para el correcto seguimiento de las muestras, se procedió a probarlas en la máquina de perforación, para evaluar su desempeño bajo parámetros de trabajo controlados.

Para una correcta evaluación de la muestra, esta se diseñó bajo las mismas características de composición (mismo tamaño de diamantes, misma concentración de diamantes, así como misma mezcla de polvos metálicos y metales infiltrantes). Asimismo, se tiene que considerar que solo fue modificada la geometría de las vías de agua, con el fin de tener una comparación bastante aceptable entre las brocas con vías de agua, radiales e inclinadas.

Además de las nociones consideradas para el diseño, se realizaron inducciones para los perforistas con el objetivo de controlar, en lo posible, los factores externos tales como la manipulación de la máquina de perforación, la presión de bombeo del líquido de enfriamiento, la velocidad de rotación, la presión de retención, etc. Asimismo, durante todo el proceso de perforación se verificó continuamente la calidad del terreno, su dureza y su consistencia (abrasivo, no abrasivo, fragmentado, compacto).



Figura 3.3. Máquina de perforación Cs14 Atlas Copco

A continuación, en la tabla 3.1 se detallan los códigos de las brocas utilizadas, la geometría de vías de agua a la que hace referencia cada código, así como la serie de la broca utilizada para realizar los ensayos de perforación.

Tabla 3.1. Codificación, serie y geometría de las brocas de perforación

Ref.	Serie	Geometría
TP465	UP 9+	Radiales
TP466	UP 9+	Radiales
TP467	UP 9+	Radiales
TP468	UP 9+	Radiales
TP469	UP 9+	Radiales
TP470	UP 9+	Inclinadas
TP471	UP 9+	Inclinadas
TP472	UP 9+	Inclinadas
TP473	UP 9+	Inclinadas
TP474	UP 9+	Inclinadas

En la tabla 3.2 se detallan los parámetros medidos durante cada prueba de perforación. Estas mediciones son un promedio aproximado de las mediciones realizadas durante las jornadas de trabajo. Durante este proceso de prueba, se intercalaron las brocas con vías radiales e inclinadas, de tal manera que el resultado obtenido no sea afectado por condiciones externas (profundidad de pozo, calidad del suelo, etc). Cabe recalcar que para que los resultados sean válidos se realizó un seguimiento al control de parámetros durante las pruebas de perforación, esto con el

fin de lograr que todas las brocas sean evaluadas bajo parámetros con valores uniformes.

Tabla 3.2. Parámetros de trabajo medidos durante las pruebas de perforación

Ref.	Terreno	Avance (in/min)	Velocidad de rotación (rpm)	Presión de rotación (psi)	Presión de empuje (psi)	Presión de retención (psi)	Presión de Lodos (psi)
TP465	6 -7 Mohs Compacto	3,5	950	3700	200	1200	350
TP470	6 -7 Mohs Compacto	3,8	925	3800	200	1200	350
TP466	6 -7 Mohs Compacto	3,3	925	3750	150	1300	350
TP471	6 -7 Mohs Compacto	3,1	975	3700	150	1300	375
TP467	6 -7 Mohs Compacto	3,4	1000	3700	200	1200	375
TP472	6 -7 Mohs Compacto	3,5	1000	3750	200	1200	300
TP468	6 -7 Mohs Compacto	3,3	1000	3750	200	1250	300
TP473	6 -7 Mohs Compacto	3,8	950	3700	200	1200	350
TP469	6 -7 Mohs Compacto	3,5	975	3700	200	1200	350
TP474	6 -7 Mohs Compacto	3,4	950	3700	200	1250	350

Finalmente, en la tabla 3.3, se detallan los resultados obtenidos. Se muestra la profundidad del pozo a la cual fue realizada la prueba de perforación, el metraje alcanzado por las brocas y el desgaste de la misma. Se debe considerar que para lograr una comparación válida de las brocas, se evaluó el desgaste alcanzado durante 25 metros de perforación (metraje aproximado).

Tabla 3.3. Metraje acumulado y desgaste de la broca de perforación

Ref.	Fondo (m)	Acumulado (m)	Desgaste (mm)
TP465	225,0	25,4	1,4
TP470	250,4	26,5	0,6
TP466	276,9	24,1	1,4
TP471	301,0	27,0	0,5
TP467	328,0	25,6	1,7
TP472	353,6	24,9	0,8
TP468	378,5	26,2	1,6
TP473	404,7	25,5	0,7
TP469	430,2	24,3	1,7
TP474	454,5	26,1	0,9

Asimismo, en base a los resultados de la tabla 3.3, es importante mencionar que el nivel de profundidad del pozo no modificó el desgaste generado en las brocas de perforación tanto de vías de agua inclinadas como de vías de agua radiales.

En esta etapa, para obtener los valores del desgaste, se consideró la altura de impregnación inicial y la altura de impregnación después de perforar los 25 metros. Este proceso de medición se detalla a continuación.

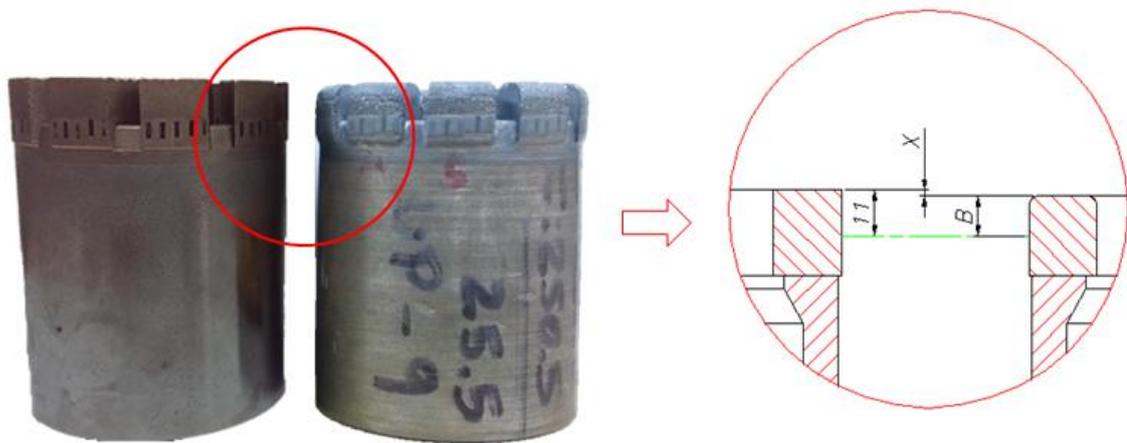


Figura 3.4. Comparación de alturas de impregnación entre una broca de perforación nueva y la broca de perforación con desgaste (de izquierda a derecha).

Como se puede observar en la figura 3.4, el valor de 11 mm hace referencia a la altura de impregnación de la broca de perforación, la cual es una mezcla de polvos metálicos y partículas de diamantes.

Después de realizado el ensayo de perforación, se observa una disminución de esta altura de impregnación, valor al cual se hace referencia con la letra B. Para efectuar la medición de este valor se utiliza un vernier, el cual cumple con el rango de precisión requerido. Se toma como nivel de referencia el punto más bajo de la altura de impregnación, pues este es el que no ha sufrido desgaste y se extiende la quijada de la regleta hasta la cara de la corona que ha estado en contacto directo con la roca.

Finalmente, la diferencia de estas dos alturas es el valor de desgaste presentado en la broca y se representa con la letra X.

3.4 Análisis comparativo de las pruebas de campo

Para realizar el análisis de las brocas de perforación, se tiene que resaltar que durante el diseño de las brocas de perforación y durante los ensayos de perforación de campo

se consideraron las mismas condiciones tanto de composición de la broca como de parámetros de perforación.

A continuación se muestra la tabla 3.4, en la cual se consideran los principales valores utilizados para la comparación de la broca de perforación.

Tabla 3.4. Resultados obtenidos de los ensayos de perforación

Ref.	Geometría	Área de la cara de la corona (in ²)	Volumen total de matriz impregnada (in ³)	Altura de desgaste (in)	Volumen de impregnación desgastado (in ³)	Porcentaje de desgaste (%)
TP465	Radiales	4,6321	2,0153	0,0551	0,2553	12,67
TP470	Inclinadas	4,6934	2,0306	0,0236	0,1109	5,46
TP466	Radiales	4,6321	2,0153	0,0531	0,2462	12,22
TP471	Inclinadas	4,6934	2,0306	0,0197	0,0924	4,55
TP467	Radiales	4,6321	2,0153	0,0669	0,3100	15,38
TP472	Inclinadas	4,6934	2,0306	0,0315	0,1478	7,28
TP468	Radiales	4,6321	2,0153	0,0630	0,2918	14,48
TP473	Inclinadas	4,6934	2,0306	0,0276	0,1293	6,37
TP469	Radiales	4,6321	2,0153	0,0669	0,3100	15,38
TP474	Inclinadas	4,6934	2,0306	0,0354	0,1663	8,19

Como se puede observar, claramente existe un cambio al modificar la geometría de las vías de agua, el cual se ve representado por la reducción del desgaste de la altura de impregnación de la broca de perforación.

Cabe recalcar que para la comparación se consideró una diferencia porcentual aproximada de 1,3 % con relación a las áreas de la cara de la corona, la cual se encuentra en contacto directo con la roca. Asimismo, la diferencia porcentual aproximada del volumen de impregnación fue de 0,75 %. Bajo estas consideraciones se puede observar que la comparación entre las brocas tanto con vías de agua estándar y vías de agua inclinadas, es válida.

Tal como se muestra en la tabla 9, el desgaste promedio aproximado de la broca de perforación con vías de agua estándar es de 14,03 %, mientras que el desgaste aproximado de la broca de perforación con vías de agua inclinadas es de 6,37 %. Es importante mencionar que estos valores de desgaste se obtuvieron durante un proceso de perforación de 25 metros aproximadamente. Con respecto a este punto, es

obvio que las brocas de perforación durante procesos de perforación de pozos pueden llegar a perforar entre 200 a 300 metros, por lo cual el volumen desgastado será mucho mayor, y posiblemente la diferencia de alturas de desgaste será mayor mientras más metraje se alcance con la broca de perforación.

Basándonos en las mediciones realizadas, se puede observar que la broca con vías de agua inclinadas presenta una reducción de desgaste de 54,57 % con respecto a la broca de perforación con vías de agua estándar bajo un metraje de 25 metros.



Figura 3.5. Comparación de alturas de impregnación entre la broca de perforación de vías de agua inclinadas, con la broca de perforación de vías de agua radiales (de izquierda a derecha)

Adicionalmente, como se puede observar en la figura 3.5, el casquillo de acero se encuentra menos desgastado en la broca de vías de agua inclinadas que en la broca de vías de agua radiales, por lo cual esto representa un indicador relacionado a la capacidad de evacuación del fluido (flujo de agua más detritos) de una broca con respecto a la otra; es decir, en la broca de vías de agua inclinadas se desarrolló una mejor evacuación del fluido, en consecuencia los detritos (partículas de roca desprendida y partículas de matriz de diamante) no se acumularon en la salida de las vías de agua tanto como en las salidas de las vías de agua radiales.



Figura 3.6. Comparación de desgaste de los casquillos de acero entre las brocas con vías de agua inclinadas y vías de agua radiales (de izquierda a derecha).

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de tesis se propuso la modificación de la geometría de los canales de enfriamiento (vías de agua) de las brocas de perforación diamantina. A continuación, en base a los procedimientos realizados y a los resultados obtenidos, se detallan las siguientes conclusiones:

- El presente trabajo propone un procedimiento válido para la comparación de las geometrías de las brocas de perforación diamantina bajo condiciones de flujo estacionario, flujo incompresible bifásico (agua con partículas de aire dispersas), y condiciones de trabajo estándar mediante el software ANSYS CFX versión 14.5.
- Los resultados de los ensayos experimentales respaldan los valores obtenidos mediante simulación numérica. Muchos de los indicadores observados en la simulación numérica proporcionan una explicación válida para el desgaste de las brocas obtenido durante las pruebas de perforación.
- Al comparar los resultados obtenidos en la simulación numérica se observa que las vías de agua estándar no proporcionan una evacuación del fluido tan buena como la que proporcionan las vías de agua inclinadas. Esto se debe a que la velocidad de salida del fluido en la primera no es tan alta como la velocidad de salida del fluido en las vías de agua inclinadas (5,14 m/s y 6 m/s respectivamente).
- Basándonos en la conclusión anterior, se plantea que el caudal de salida en las vías de agua estándar es menor que el caudal de salida en las vías de agua inclinadas. Y se observa, además, que en las vías de agua estándar se genera gran cantidad de contracorriente, mientras en las vías de agua inclinadas esta contracorriente es muy reducida, lo cual implica que los detritos sean evacuados con mayor facilidad utilizando la geometría de vías de agua inclinadas que utilizando las estándar.
- El mejor desempeño de la broca de vías de agua inclinadas, según la simulación numérica, permite explicar las causas del porqué una broca presenta un casquillo de acero más desgastado que la otra después de los ensayos experimentales. Como se mencionó, la broca estándar presenta menor eficacia en relación a la evacuación de detritos; esto implica que estos detritos se acumulan a la salida de las vías de agua estándar, lo cual junto con

la alta rotación de la broca genera un entorno abrasivo que trae como consecuencia el desgaste prematuro del casquillo de acero.

- Al comparar los resultados obtenidos de la energía cinética turbulenta, en la simulación numérica, se observa que las brocas de vías de agua inclinadas presentan un comportamiento turbulento más uniforme dentro de las ranuras en comparación con las vías de agua estándar. Como se pueden observar en la figura 36, la zona de mayor intensidad turbulenta en las vías de agua estándar se encuentra ubicada en la parte inferior externa de la corona de la broca, mientras que en la figura 37, que presenta el caso de las vías de agua inclinadas, la zona de mayor intensidad turbulenta se encuentra ubicada aproximadamente en el medio de las ranuras de enfriamiento.

Es importante recalcar que aun cuando se presente mayor intensidad turbulenta en las vías de agua estándar, esta turbulencia no está concentrada uniformemente dentro de la ranura. Se puede observar en las figuras respectivas, que en el centro de las ranuras, las brocas con vías de agua modificadas presenta mayor intensidad de turbulencia en comparación a las brocas con vías de agua estándar ($0,1$ y $0,05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ respectivamente)

- Como la broca con vías de agua inclinadas posee una turbulencia más uniforme y vectores de velocidad con mayor magnitud dentro de la ranura de la broca, se deduce que el valor del coeficiente convectivo entre la broca y el fluido será mayor.

Esto implica que la mayor tasa de transferencia de calor entre el fluido y el cuerpo permitirá que la matriz de la broca sea enfriada con mayor efectividad, lo cual evita que la matriz compuesta de polvos de diamantes y polvos metálicos tienda a incrementar su ductilidad.

En general, el incremento de la ductilidad de la matriz por causa del calentamiento de la broca genera que las partículas de diamantes se desprendan con mayor facilidad, pues al dilatarse la matriz permite una mayor deformación de las cavidades que contienen los diamantes.

- La reducción del grado de ductilidad de la matriz de polvos metálicos y polvos de diamante, mediante un enfriamiento más uniforme de la broca de perforación, permite que las partículas de diamante no se desprendan fácilmente. Ya que la broca con vías inclinadas nos permite enfriar la corona de la broca de manera más eficiente, durante el proceso de perforación es lógico

que los diamantes se mantengan arraigados a la matriz por mayor tiempo. Esto implica que el desgaste de la broca sea menor, pues los diamantes no se desprenderán con facilidad y se lograra un proceso de corte más prolongado.

- Al comparar las brocas después de las pruebas de perforación se observó que las que fueron diseñadas con vías de agua inclinadas presentaron menos desgaste de la corona. Las brocas de perforación con vías de agua inclinadas presentaron un desgaste porcentual promedio de 6,37%, mientras que el desgaste porcentual promedio de las brocas con vías de agua estándar fue de 14,03%. Esto implica un desgaste reducido de 54,57% solo durante los 25 primeros metros de perforación.
- Un menor desgaste de la broca permite mayores metrajes de perforación, lo cual implica una reducción en el tiempo muerto de la máquina, pues el intercambio de brocas usadas y nuevas se realizará con menor frecuencia dentro de una jornada laboral, lo cual en consecuencia proporciona mayor eficiencia durante la perforación de pozos.

RECOMENDACIONES

El presente trabajo de tesis nos proporciona las bases para la realización de temas futuros de investigación o temas relacionados. Para futuros análisis, se recomienda estudiar, simular y ensayar algunos de los siguientes puntos:

- Realizar el análisis de transferencia de calor mediante simulación numérica, al aplicar una fuente de calor en la base de la corona de la broca de perforación para simular el calor por fricción que se genera durante el contacto de la broca con la roca.
- Realizar la simulación del desgaste y/o deformación de la matriz de la broca con el objetivo de conocer los modos de deformación de la matriz debido al desprendimiento de los diamantes.
- Realizar la simulación numérica de la broca de perforación en estado transitorio para conocer el desarrollo fluido-dinámico en un rango de tiempo.
- Realizar la simulación numérica de la broca de perforación con otro tipo de fluido como los fluidos gelificados, no gelificados, compresibles, etc.
- Optimizar el mallado de los dominios para conseguir valores con mayor aproximación, así como para lograr la independencia del mallado, lo cual proporcionará mismos resultados sin importar que tan denso sea el mallado.
- Optimizar la geometría de las vías de agua inclinadas (ángulo de inclinación, ancho de la ranura, etc), de tal manera que se logre incrementar la intensidad de turbulencia dentro de la ranura de enfriamiento.
- Complementar el diseño de la geometría con el diseño de la composición de la matriz de la broca de perforación. El desgaste de la broca también depende en gran medida del tipo de materiales utilizados para la fabricación de la broca.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] HUERTO BUJAICO, Hebert. *Simulación numérica de un tanque agitador con impulsor de paletas planas 45° mediante ANSYS CFX*. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2013.
- [2] RIOS PEREZ, Carlos Alfredo. *Metodología de caracterización de un material compuesto de matriz metálica con partículas de refuerzo*. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2005.
- [3] ÇENGEL, Yunus y John CIMBALA. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill, 1ª Edición, México D.F., 2006.
- [4] MERHY DE OLIVEIRA, Gabriel. *Modelagem de propagação de pressão no reinício do escoamento de fluidos de perfuração não gelificados*. Universidade tecnológica federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- [5] SHAMES, Irving. *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill, 3ª Edición, Colombia, 1995.
- [6] PERIĆ, Milovan y Joel FERZIGER. *Computational Methods for fluid Dynamics*. Springer-Verlag, 3a Edición, 2002.
- [7] MARTIN ORTEGA, Elena. *Flujos turbulentos*. ETSI Industriales. Universidad de Vigo, 2010.
- [8] PEREZ COSAVALENTE, Carlos. *Estudio fluido-dinámico de un agitador mecánico con impulsor curvo tripala de flujo axial mediante simulación numérica usando ANSYS 14.5*. Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2013.
- [9] DA FONSECA LOPES, Zeferino. *El método de los elementos finitos: una introducción*. Fondo Editorial Biblioteca URU. Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela, 2011.
- [10] SINGIRESU, Rau. *The finite element method in engineering*. Elsevier Science & Technology Books, 4a Edición, 2004.