

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VIBRACIONES VERTICALES
EN LOS PRINCIPALES MODOS DE FALLA DE UNA BROCA TRICÓNICA.

ANDRÉS FELIPE SÁNCHEZ MESA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C
2017

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VIBRACIONES VERTICALES
EN LOS PRINCIPALES MODOS DE FALLA DE UNA BROCA TRICÓNICA.

ANDRÉS FELIPE SÁNCHEZ MESA

Proyecto integral de grado para optar al título de:

INGENIERO MECÁNICO

Director:
JHON FREDDY OCHOA AVENDAÑO
Ingeniero mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C
2017

Nota de aceptación

Ing. **JOHN FREDDY OCHOA AVENDAÑO**
Director del proyecto

Ing. **JUAN FELIPE GIRALDO ÁVILA**
Jurado 1

Ing. **ELIANA MESA RAMÍREZ**
Jurado 2

Bogotá, Marzo de 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la universidad y rector del claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ.

Vicerrector de desarrollo y recursos humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora académica y de postgrado

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Director de Investigaciones

Dr. ARMANDO FERNÁNDEZ CARDENAS

Decano de Ingenierías

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director programa de Ingeniería Mecánica

Dr. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL

Las directivas de la Universidad de América y el cuerpo de docentes no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Éstos corresponden únicamente al autor.

AGRADECIMIENTOS

Dios me ha dado la oportunidad de ser un hombre consiente y con valores que me llevan día a día a acercarme a mis sueños e ir cumpliendo mis metas. A la Universidad de América que me ha hecho parte de una gran familia que a diario me muestra su apoyo y sin los cuales no hubiese sido posible la construcción de este proyecto.

A las decisiones que he tomado en la vida, porque gracias a ellas me encuentro en esta posición y me siento totalmente convencido que voy por el camino correcto.

A todas las personas que de forma directa o indirecta intervinieron en mi proceso de convertirme en un ingeniero y que con sus conocimientos tratan de contribuir a mi profesión y en especial a mi vida.

A mi novia que sin su apoyo incondicional no habría podido culminar este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	19
1. GENERALIDADES	20
1.1 VIBRACIONES	20
1.1.1 Vibración determinística.	20
1.1.2 Vibración aleatoria.	20
1.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA VIBRATORIO	21
1.3 PROPAGACIÓN DE LAS VIBRACIONES	22
1.3.1 Tipos de onda	22
1.3.1.1 Ondas laterales.	23
1.3.1.2 Ondas longitudinales.	23
1.4 VIBRACIONES EN LA SARTA DE PERFORACIÓN Y BROCA	23
1.4.1 Vibraciones torsionales.	24
1.4.2 Vibraciones Laterales.	25
1.4.3 Vibraciones axiales.	26
1.4.4 Fenómenos vibratorios.	27
1.5 ANÁLISIS MODAL	28
1.5.1 Análisis de vector propio.	29
1.5.2 Análisis del vector Ritz.	29
2. CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LA BROCA	31
2.1 CARACTERIZACIÓN Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA BROCA	31
2.2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	31
2.3 GEOMETRÍA	32
2.4 VELOCIDADES DE ROTACIÓN	32
2.5 RANGO DE WOB	33
2.6 FORMACIONES PARA LA QUE FUE DISEÑADA	37
2.6.1 Formaciones medias.	37
2.6.2 Formaciones duras.	37
2.7 FLUIDOS DE PERFORACIÓN	37
2.7.1 Sistemas aire gas.	38
2.7.2 Espuma o lodos aireados.	38
2.7.3 Lodos base agua.	38
2.7.4 Lodo en emulsión de aceite.	38
2.7.5 Lodos base aceite.	39
2.8 HIDRÁULICA DE BROCAS	39
2.9 BOQUILLAS O JETS	39
2.10 CORTADORES	40
2.10.1 Ovoides.	41

2.10.2 Cónicos.	41
2.10.3 Biselados	41
2.11 COJINETES	41
2.11.1 Cojinetes de rodillos.	42
2.11.2 Cojinetes de fricción o journey.	42
2.12 CARGAS EN LOS COJINETES	43
2.13 METALURGIA DE LOS MATERIALES DE FABRICACIÓN DE LAS PARTES DE LA BROCA	44
3. FALLAS	46
3.1 CLASIFICACIÓN DE FALLAS	47
3.1.1 Sub clasificación según las consecuencias.	47
3.1.2 Etapas generales de una falla.	49
3.2 MODOS DE FALLA	50
3.2.1 Falla por fractura.	52
3.2.2 Falla por desgaste.	52
3.2.3 Falla por corrosión.	53
3.2.4 Falla por deformación.	54
3.2.5 Falla por vibración.	55
3.2.6 Modos de fallas de los elementos mecánicos.	55
3.2.7 Modo de falla en rodamientos.	56
3.3 SELECCIÓN DE FALLAS	56
3.3.1 Fractura de dientes (Broken Teeth - BT).	56
3.3.2 Cono fracturado (Broken cone – BC).	57
3.3.3 Pérdida del diente (Lost Teeth - LT).	58
4. SIMULACIONES	59
4.1 DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LOS CORTADORES Y CUERPOS DE LA BROCA	60
4.1.1 Geometría.	61
4.1.2 Discretización de la sarta.	64
4.2 SIMULACIÓN SARTA	66
4.2.2 Análisis modal.	66
4.2.3 Análisis transiente	69
4.2.4 Resultado transiente.	71
4.3 SIMULACIÓN BROCA	71
4.3.2 Materiales de la broca.	72
4.3.3 Discretización de la broca.	73
4.3.4 Condiciones de contorno.	74
4.3.5 Resultados.	75
4.4 DELAMINACIÓN DEL CORTADOR	79
4.5 SIMULACIÓN DINÁMICA EN CORTADOR	80
4.5.2 Geometría.	81
4.5.3 Discretización.	82
4.5.4 Condiciones de borde.	82

4.5.5 Resultados.	84
5 CONCLUSIONES	85
6 RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFIA	87

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Elementos de un sistema vibratorio	
21	
Figura 2. Sistemas vibratorios	10
Figura 3. Tipos de ondas elásticas	23
Figura 4. Vibración torsional	24
Figura 5. Vibración lateral	25
Figura 6. Vibración axial	27
Figura 7. Fenómenos vibratorios	28
Figura 8. Análisis modal de una viga fija	29
Figura 9. Broca tricónica	32
Figura 10. Velocidad de penetración vs velocidad de rotación	33
Figura 11. Fractura de la roca	34
Figura 12. Efecto del empuje sobre la velocidad de penetración	35
Figura 13. Ubicación de boquillas	40
Figura 14. Tipos de insertos	41
Figura 15. Cojinete de rodillos	42
Figura 16. Cojinete de fricción o journey	43
Figura 17. Perno piloto	43
Figura 18. Distribución de cargas en cojinetes	44
Figura 19. Relación entre análisis de falla y la ingeniería forense	46
Figura 20. Sub clasificación de fallas	48
Figura 21. Etapas de una falla	49
Figura 22. Clasificación de fallas	50
Figura 23. Relación entre fuente, modos y mecanismo de falla	51
Figura 24. Modos de falla básicos de los elementos mecánicos	51
Figura 25. Falla por fractura (cono roto)	52
Figura 26. Falla por desgaste (Desgaste de cortador)	53
Figura 27. Falla por corrosión	54
Figura 28. Falla por deformación	55
Figura 29. Broken Teeth	57
Figura 30. Broken cone	57
Figura 31. Lost Teeth	58
Figura 32. Metodología	59
Figura 33. Sarta (Método matriz de movilidad)	61
Figura 34. Diámetro sarta (método matriz de movilidad)	62
Figura 35. Sistema resorte - amortiguador (inferior)	64
Figura 36. Sistema resorte - amortiguador (superior)	64
Figura 37. Discretización de la sarta	65
Figura 38. Ortogonalidad de la malla	65
Figura 39. Oblicuidad de la malla	66
Figura 40. Puntos de restricción (modal)	66

Figura 41. Aplicación de cargas (respuesta armónica)	67
Figura 42. . Desplazamiento axial de la sarta (respuesta armónica)	68
Figura 43. Velocidad axial de la sarta (respuesta armónica)	69
Figura 44. Condiciones de frontera de la sarta	70
Figura 45. Fuerza transiente	70
Figura 46. Desplazamiento de la broca dependiendo de la carga aplicada	71
Figura 47. Broca tricónica 3d	72
Figura 48. Simplificación broca	73
Figura 49. Discretización broca	73
Figura 50. Condiciones de borde de la broca	75
Figura 51. Esfuerzos von mises (1)	76
Figura 52. Esfuerzos von mises (2)	77
Figura 53. Esfuerzo von mises máximo	78
Figura 54. Desplazamiento de la broca	79
Figura 55. Delaminación del cortador	80
Figura 56. Geometría (Análisis dinámico)	81
Figura 57. Malla (Análisis dinámico)	82
Figura 58. Condiciones de borde (1)	83
Figura 59. Condiciones de borde (2)	83
Figura 60. Esfuerzo von mises	84

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. fuerza mínima de empuje según el tipo de roca	36
Cuadro 2. fuerza de empuje máxima según el diámetro de perforación	37
Cuadro 3. materiales usados en la fabricación de piezas en brocas tricónicas	45
Cuadro 4. propiedades de la caliza	63
Cuadro 5. convergencia de malla para análisis modal	67
Cuadro 6. materiales y propiedades mecánicas de la broca	72
Cuadro 7. convergencia de malla	76

LISTA DE ABREVIATURAS

WOB: Peso sobre la broca
RPM: Revoluciones por minuto
FEM: Método de elementos finitos
Lbf: Libra fuerza
Psi: Libre sobre pulgada cuadrada
Kg: Kilogramo
MPa: Mega pascales
TCI: Inserto de carburo de tungsteno
ROP: Tasa de penetración
K: Constante de resorte
R: Constante de amortiguamiento
CAD: Diseño asistido por computadora

GLOSARIO

BHA: parte inferior de la sarta de perforación, que consiste en la broca, un motor de lodo, estabilizadores, la columna de perforación pesada, etc.

BIT BOUNCE: fenómeno vibratorio que genera saltos en la broca producto de las vibraciones axiales.

BROCA TRICÓNICA: herramienta de corte usada en la perforación rotatoria, se encuentra localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación y es usada para triturar o cortar la formación en el proceso de perforación.

PERFORACIÓN: proceso mediante el cual es utilizada una herramienta de corte para triturar la superficie de un material.

TRANSIENTE: se refiere a la evaluación de una propiedad con respecto al tiempo
SARTA DE PERFORACIÓN: conjunto de tuberías de acero que se unen para formar un tubo desde la broca hasta la plataforma de perforación.

VIBRACIÓN: oscilación o movimiento repetitivo de un cuerpo sobre una posición de equilibrio.

WOB (*Weight On Bit*): expresión que hace referencia a la cantidad de fuerza que se le aplica sobre la broca.

RESUMEN

Para describir las causas de los principales modos de falla presentes en las brocas tricónicas debido a vibraciones verticales, esta investigación planteó un modelo computacional por el método de elementos finitos que se desarrolla por medio de una metodología que incluye desde el análisis modal hasta el análisis dinámico, con el fin de encontrar los esfuerzos sufridos en la broca debido a las vibraciones verticales. El enfoque se da debido a que este tipo de brocas presenta mayor probabilidad de afectación por vibraciones axiales; además se analiza la interacción broca – formación, teniendo en cuenta la presencia de los fluidos de perforación y las propiedades mecánicas de la formación para el entendimiento del fenómeno vibratorio.

De este modo, los resultados de la investigación validan la información obtenida mediante revisión bibliográfica en cuanto a que el desplazamiento axial se encuentra entre los valores de la literatura, además se corrobora la hipótesis de que la carga aplicada en la superficie y el desplazamiento en la broca son variables inversamente proporcionales.

Palabras claves: Modelo, broca tricónica, vibraciones axiales, simulación computacional.

INTRODUCCIÓN

En el campo petrolero la perforación es fundamental pues permite hallar la existencia de petróleo en el subsuelo y de esta se derivan una serie de procesos productivos y lucrativos para las organizaciones. De este modo la perforación, al ser uno de los procesos más relevantes, presenta inquietudes entre las organizaciones involucradas que buscan hacer cada vez más eficiente la operación garantizando calidad y buscando reducción de costos; teniendo como *origen* las vibraciones en el proceso de perforación, esta problemática genera a su vez fallas prematuras en las herramientas de corte. Esta problemática deriva la *importancia* de este estudio.

En este sentido, el *objetivo* general de este trabajo es: determinar las causas de los principales modos de falla presentes en las brocas tricónicas debido a vibraciones verticales; para el cumplimiento de este objetivo, es necesario plantear una serie de objetivos específicos como:

- la determinación mediante revisión bibliográfica de las condiciones de operación de una broca tricónica
- la selección de los principales modos de falla en brocas tricónicas consecuencia de vibraciones verticales
- la realización de un análisis mediante herramientas computacionales y teóricas de los modos de falla seleccionados, determinando sus causas durante la operación de la broca

Así mismo, el *alcance* de este proyecto permite encontrar los esfuerzos generados en la broca debido a las vibraciones verticales, con *limitantes* que se consideran a partir de suposiciones y datos que se encuentren en revisiones bibliográficas. Sumado a lo anterior las simulaciones se realizan con el software Ansys.

La *metodología* planteada se compone de una serie de análisis que permiten encontrar los esfuerzos en las brocas producto de las vibraciones verticales. En primer lugar se realiza un análisis modal donde se pretende encontrar la frecuencia de resonancia de la sarta según el estudio realizado “The Effect of Surface and Downhole Boundary Conditions on the Vibration of Drillstrings”¹, seguido de un análisis armónico cuyo fin es determinar las velocidades y desplazamientos que puede llegar a tener el conjunto de sarta y broca debido a las vibraciones basándose en el artículo “”² y a partir de esto realizar un análisis dinámico y estático de la broca, para conocer los esfuerzos a los que se encuentra sometida a causa del fenómeno vibratorio.

¹ CLAYER, F., et al. The Effect of Surface and Downhole Boundary Conditions on the Vibration of Drillstrings

² KAPITANIAK, Marcin, et al. Unveiling complexity of drill–string vibrations: Experiments and modelling. En: International Journal of Mechanical Sciences. 10. vol. 101–102, p. 320

Dentro de la metodología se utilizaron dos sistemas resorte – amortiguador: uno para la parte superior de la sarta y otro para la parte inferior. Así dependiendo el sistema que se encuentre en contacto con la formación, el resorte emula la elasticidad de la roca a medida que la broca empuja contra ella y el amortiguador representa los mecanismos de pérdida de energía relacionada con la fractura y el desplazamiento de la roca y cortadores de la broca.

Gracias al *alcance* y resultados de la investigación, esta se puede tomar como base para futuros análisis en el ámbito de las vibraciones verticales en perforación, pues en la actualidad se carece de análisis de este tipo de vibraciones.

JUSTIFICACIÓN

Las vibraciones en el proceso de perforación de un pozo de petróleo, son una de las causas de daños inesperados en componentes de la sarta de perforación, BHA y brocas durante la operación.

Así en el caso específico de las brocas tricónicas y sus típicas vibraciones verticales, se producen fenómenos de fatiga superficial, desgaste y desprendimiento de los cortadores, daños en los rodamientos, fracturas del cuerpo de la broca o sus conos y otra serie de fenómenos que afecta la correcta operación de la herramienta.

Mediante una aproximación al análisis de fallas, basada en la aplicación de métodos numéricos y teóricos, es posible tener una visión más científica de las causas que producen los diferentes fenómenos mecánicos que ocurren y cómo éstos conllevan a la presencia de daños en las herramientas de perforación. En concordancia con esto se plantea por medio de éste proyecto, realizar un análisis de las condiciones de operación de la broca, particularmente en régimen de vibraciones verticales, para describir los principales mecanismos de falla y de ésta manera contribuir desde la academia al mejoramiento continuo de las operaciones de campo del sector de los hidrocarburos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Describir las causas de los principales modos de falla presentes en las brocas tricónicas debido a vibraciones verticales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar mediante revisión bibliográfica las condiciones de operación de una broca tricónica.
- Seleccionar los principales modos de falla en brocas tricónicas consecuencia de vibraciones verticales.
- Realizar un análisis mediante herramientas computacionales y teóricas de los modos de falla seleccionados, determinando sus causas durante la operación de la broca.

1. GENERALIDADES

En el presente capítulo se realiza una revisión y muestra de los diferentes tipos de vibraciones presentes en las herramientas durante la perforación de pozos; a su vez las causas y consecuencias de las fallas en la herramienta haciendo énfasis en las vibraciones axiales o salto de la barrena (bit bounce). Sumado a lo anterior se describe la interacción entre la broca y la formación, considerando el tipo de formación rocosa, los modelos mediante elementos finitos y por último las vibraciones de la herramienta.

1.1 VIBRACIONES

De acuerdo con CEDRO, Y. & DONALD, J. S, se denomina vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio).³

Ciertamente algunas veces las vibraciones pequeñas e insignificantes pueden hacer excitar las frecuencias de resonancia de algunas partes estructurales y amplificarlas, causando mayores vibraciones y fuentes de ruido.

Para precisar no se debe confundir una vibración con una oscilación, ya que esta última se considera como un movimiento repetitivo alrededor de una posición de equilibrio; cuando se habla de una posición de equilibrio se refiere a que la fuerza que actúa sobre el cuerpo sea cero. La oscilación por su parte no necesariamente involucra deformaciones internas del cuerpo a diferencia de las vibraciones⁴

Por su parte CEDRO, Y. & DONALD, J. S dicen: “Una vibración es una fluctuación del movimiento de un sistema que se encuentra en estado de equilibrio”, además indican que existen dos tipos de vibraciones como lo son la vibración determinística y la vibración aleatoria.

1.1.1 Vibración determinística. Es un tipo de vibración que se puede caracterizar de manera precisa, por ejemplo, la vibración generada por una unidad de bombeo.

1.1.2 Vibración aleatoria. Este tipo de vibración solo puede ser analizada estadísticamente, por ejemplo, el atascamiento intermitente de una unidad de bombeo.

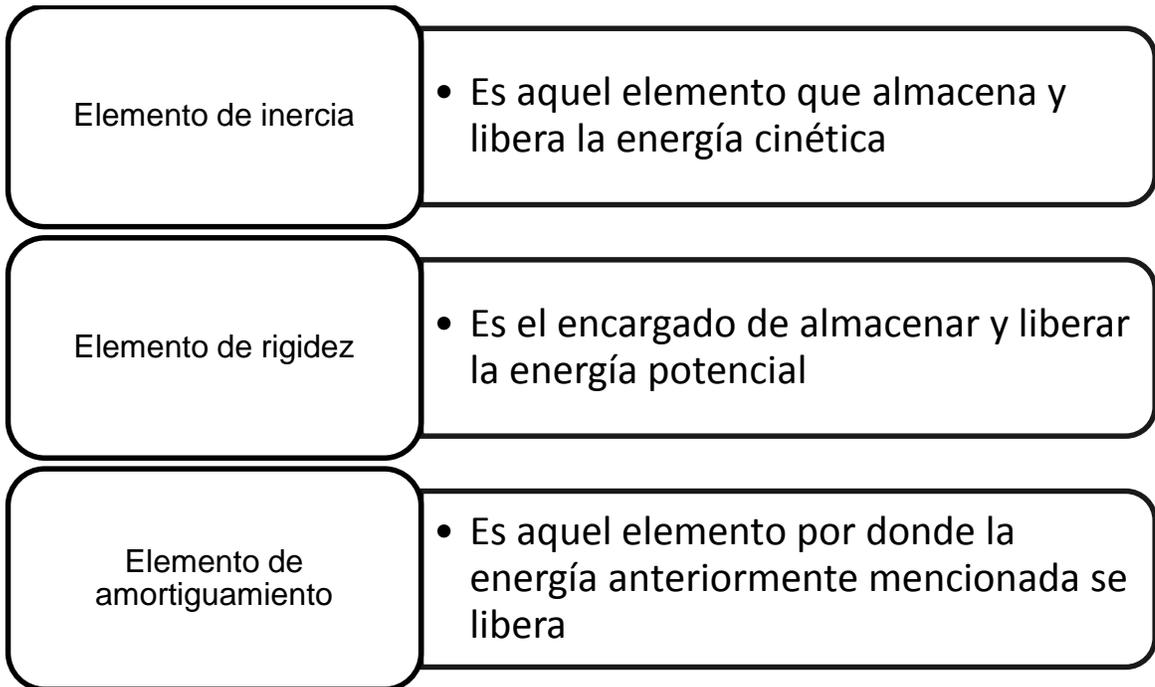
³ CEDRO, Y. y DONALD, J. S. Vibración En La Sarta De Perforación. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010a. p. 13-14

⁴ BRIONES LUNA, Cesar, Alejandro y LEON HIDALGO, Ruddy, Katherine. Estudio De La Eficiencia De Las Brocas Usadas En Las Operaciones De Perforación En La Formación Tiyuyacu, En Pozos Del Campo Sacha. Quito.: Escuela Politécnica Nacional., 2015. p. 36.

1.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA VIBRATORIO

Un sistema vibratorio está constituido por tres elementos que se explican en la Figura 1:

Figura 1. Elementos de un sistema vibratorio

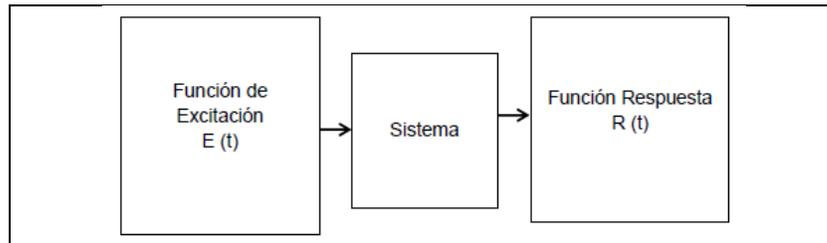


Fuente. Estudio De La Relación Entre Los Diferentes Niveles De Shocks y Vibraciones Con El Perfil Del Pozo, Ensamble De Fondo, Formación y Litología Observados Durante La Perforación De Los Pozos Petroleros En La Cuenca Oriente Del Ecuador. Quito, Ecuador, 2008, P 7

Además de los elementos mencionados, es relevante considerar las fuerzas y momentos que se le aplican externamente, así como las alteraciones externas que provienen de desplazamientos y velocidades iniciales; dado que la energía o excitación presente en los cuerpos (elementos en los cuales la energía se mueve o se transporta) está en forma de fuerzas o de momentos y la respuesta correspondiente del elemento está en forma de desplazamientos, velocidades o en aceleraciones, como denota Mayacela⁵ y se puede ilustrar en la Figura 2.

⁵ MAYACELA GUADALUPE, Carlos Javier. Estudio de la relación entre los diferentes niveles de shocks y vibraciones con el perfil del pozo, ensamblaje de fondo, formación y litología observados durante la perforación de los pozos petroleros en la Cuenca Oriente del Ecuador. Trabajo de grado. Quito: Universidad Tecnológica de Equinoccial. Facultad Ciencias de la Ingeniería, 2014. P. 8.

Figura 2. Sistemas vibratorios



Fuente. (Estudio De La Relación Entre Los Diferentes Niveles De Shoscks y Vibraciones Con El Perfil Del Pozo, Ensambe De Fondo, Formación y Litología Observados Durante La Perforación De Los Pozos Petróleros En La Cuenca Oriente Del Ecuador. Quito, Ecuador, 2008)

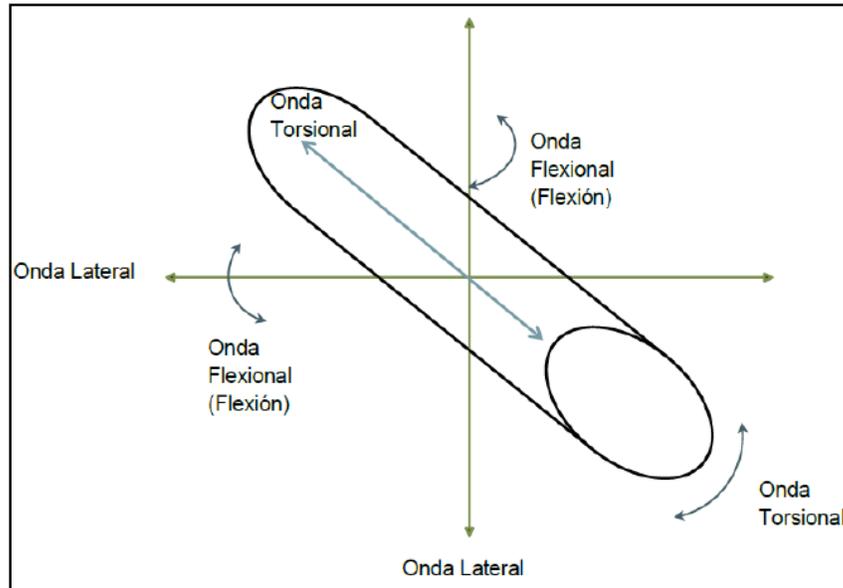
1.3 PROPAGACIÓN DE LAS VIBRACIONES

Con respecto a la propagación de las vibraciones, ésta se realiza mediante ondas, y con base en lo presentado por Chesher la forma en la cual una vibración viaja a través de un sistema es conocida como onda de propagación. Cuando una fuerza externa está afectando un cuerpo elástico en la vida real, el cuerpo no reacciona instantáneamente en la totalidad de su longitud. El punto debajo de la fuerza reacciona primero y seguido, las secciones justo debajo a la sección previa a la reacción y así sucesivamente. Esta serie de reacciones en cadena son llamadas propagación de onda, porque se propagan a través del cuerpo en un periodo de tiempo a una velocidad específica⁶.

1.3.1 Tipos de onda. La figura 3 ilustra los tipos de ondas que se encuentran en los problemas físicos, que se explican detalladamente a continuación:

⁶ CHESHER, Steven William, et al. (04). Society of Petroleum Engineers, 2010.

Figura 3. Tipos de ondas elásticas



Fuente. SPE. Petroleum Engineering Handbook, 2006

1.3.1.1 Ondas laterales. Con relación a este tipo de ondas, también son llamadas ondas de cizalla, transversales, distorsionales y torsionales. El movimiento de las partículas es perpendicular al movimiento de las ondas, este tipo de ondas en el aire pueden llegar a viajar a una velocidad aproximada de 3170 m/s⁷.

1.3.1.2 Ondas longitudinales. Son llamadas también de compresión/tensión, de dilatación, no rotacionales y axiales. Se generan cuando existe una fuerza que empuje el medio elástico y como reacción a esta habrá un movimiento paralelo en el movimiento de las ondas; por lo general este tipo de onda en el aire tiene una velocidad aproximada de 5121 m/s⁸.

1.4 VIBRACIONES EN LA SARTA DE PERFORACIÓN Y BROCA

Las vibraciones en una perforación son inevitables; así, la constante aparición de estas y sus consecuencias sobre el proceso de perforación dependen del diseño de la parte inferior de la sarta de perforación, de la formación rocosa perforada y en mayor medida de los parámetros de operación, es decir, el peso o empuje sobre la broca (WOB) y la velocidad de rotación de la sarta y de la broca.⁹

⁷ MUSIC, Andres. Diagnostico Y Optimización De Disparos En Desarrollo Horizontal. Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2007.

⁸ Ibid, p 20

⁹ NAVARRO LÓPEZ, Eva M. y SUAREZ, R. Vibraciones Mecánicas en una Sarta de Perforación : Problemas de Control. En: Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial. vol. 2, p. 43-54

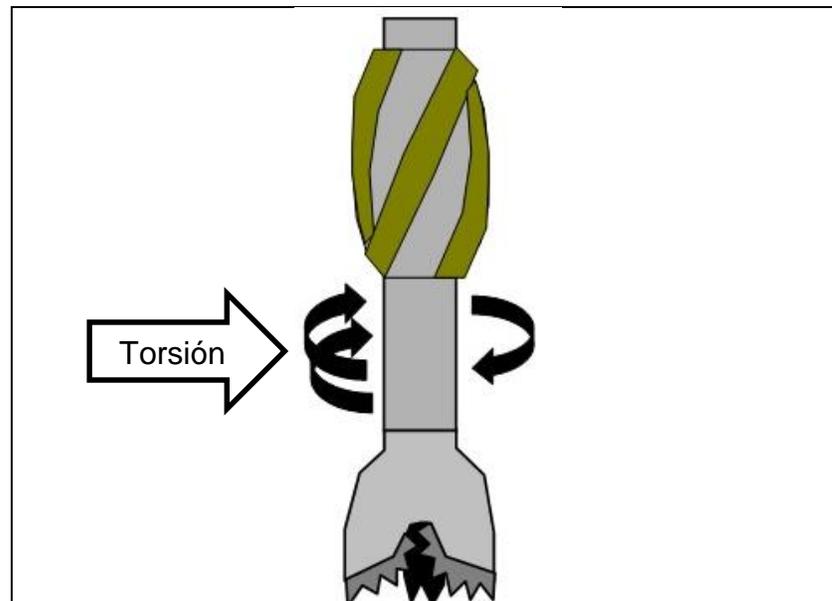
Los factores más importantes en el proceso de perforación son los siguientes:

- Peso o empuje sobre la barrena (WOB)
- Velocidad de rotación (RPM)
- Gasto de lodo
- Fricción contra las paredes del agujero

Adicionalmente, cuando se presentan las vibraciones, el sistema hace que tienda al equilibrio, es decir, todo tiende a igualarse, por este sentido la energía se libera mediante movimientos.

1.4.1 Vibraciones torsionales. La vibración torsional, como se aprecia en la figura 4, se produce cuando hay una disminución de la rotación en el fondo del pozo, a causa de que la fricción de resistencia de la broca con la pared del pozo supera el torque aplicado¹⁰.

Figura 4. Vibración torsional



Fuente. CEDRO, Y. y DONALD, J. S. Vibración En La Sarta De Perforación. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010a. p. 15

De acuerdo con lo presentado en la figura 4, se producen ondas que viajan desde la broca hasta la superficie y vuelven a su origen, lo cual se constituye en la principal causa de que la broca de perforación rote de manera irregular haciendo que la eficiencia de la perforación disminuya y a su vez se presenten fallas en las

¹⁰ JIMENEZ DE, la Cruz y DOMINGUEZ CARDONA, John Edinson. Analisis De Fallas Y Errores En Los Procedimientos De Control De Pozos En Situaciones Anormales Durante La Perforacion. 2011. p. 53-54

conexiones de la tubería. Este tipo de fenómeno ocurre en el 50% de las operaciones de perforación¹¹.

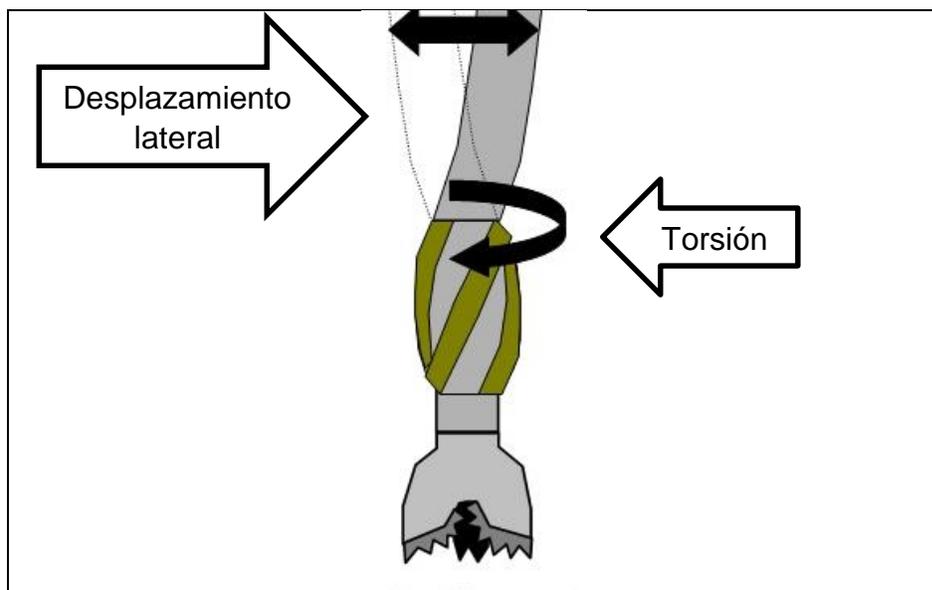
Entre los problemas más frecuentes se encuentran los siguientes:

- Tasa de penetración reducida.
- Escapes y falla por cizallamiento en la tubería.
- Incremento de costos.
- Daño o falla por fatiga de los elementos de corte de la broca debido a la carga variable sobre los cortadores y a las RPM variables.

1.4.2 Vibraciones Laterales. Este tipo de vibraciones se generan cuando la broca no gira en el eje del radio del pozo, lo cual tiene como consecuencia golpes contra las paredes del pozo y por consiguiente un aumento de diámetro de este mismo; desde la superficie es muy complicado identificar y tomar acciones correctivas, a su vez se reduce la vida de la herramienta de corte y la tasa de penetración (ROP) disminuye¹².

En la figura 5 se puede apreciar el comportamiento de la sarta en la vibración lateral.

Figura 5. Vibración lateral



Fuente. CEDRO, Y. y DONALD, J. S. Vibración En La Sarta De Perforación. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010a. p. 15

¹¹ BARBOSA, Nelson y PINZON, Lina. Análisis de la influencia del fenómeno stick-slip en los esfuerzos de los cortadores de una broca PDC, mediante simulación por elementos finitos. vol. 8, no. 2, p. 98-110

¹² MAYACELA GUADALUPE, Carlos Javier. Estudio De La Relación Entre Los Diferentes Niveles De Shocks Y Vibraciones Con El Perfil Del Pozo, Ensamble De Fondo, Formación Y Litología Observados Durante La Perforación De Los Pozos Petroleros En La Cuenca Oriente Del Ecuador. Quito, Ecuador.: Universidad Tecnológica de Equinocal, 2008. p. 14

De este modo, puede tomar tres formas, donde cada una es más crítica que la anterior:

1.4.2.1 Vibración rotacional de la broca (Bit Whirl). Se define como la rotación excéntrica de la broca, lo cual se observa más comúnmente en brocas tipo PDC¹³.

1.4.2.2 Vibración excéntrica rotacional del BHA (Forward BHA Whirl). Se describe como la rotación excéntrica cuyo eje gira en el mismo sentido de la sarta, que por lo general es en sentido horario.

1.4.2.3 Vibración excéntrica contra rotacional de BHA (Backward BHA Whirl). Se presenta cuando la fricción contra la pared del pozo ocasiona una rotación en sentido anti horario, es decir en rotación contraria a la sarta.

Entre los problemas más comunes se encuentran:

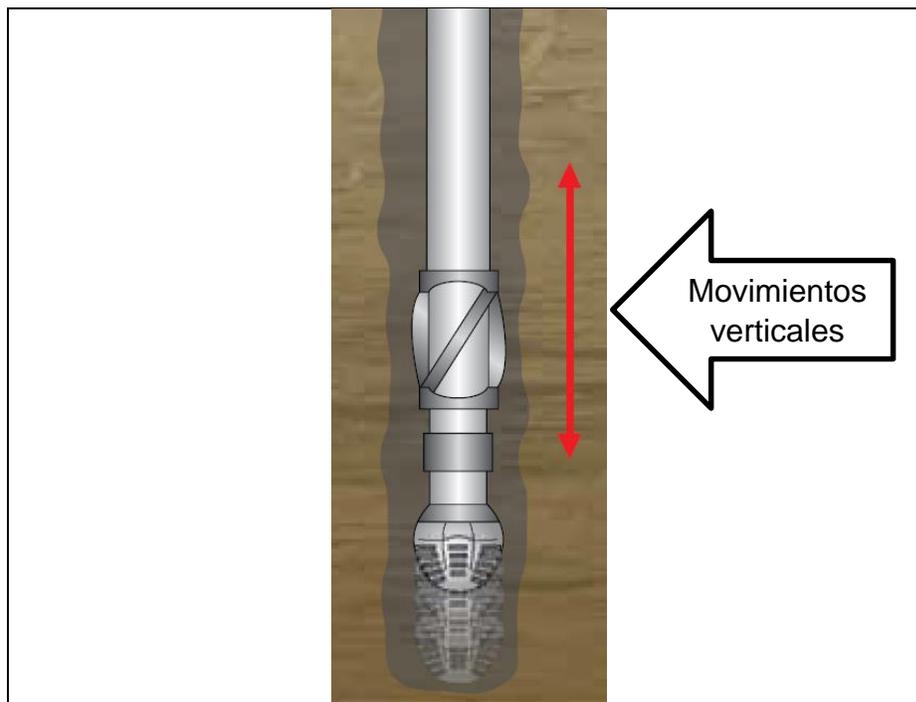
- ROP reducida
- Desgaste prematuro de la broca
- Fisuras y fallas en el BHA
- Aumento del diámetro del pozo, inestabilidad del hueco, daños al revestimiento.

1.4.3 Vibraciones axiales. Las vibraciones axiales, como se muestra en la figura 6, son aquellas que generan saltos tanto en la sarta de perforación como en la broca y también son responsables de la reducción de la tasa de penetración (ROP), debido a que la broca presenta fallas en sus cortadores. Este tipo de vibraciones se presenta más comúnmente cuando se está perforando con brocas tricónicas¹⁴. Las vibraciones axiales a su vez provocan saltos en la tubería y evitan tener un peso uniforme sobre la broca lo que puede generar daños en esta. Generalmente entre más dura sea la formación a perforar, más alta será la frecuencia de vibración axial de la broca.

¹³ BRETT, J. Ford; WARREN, Thomas M. y BEHR, Suzanne M. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1989.

¹⁴ CEDRO, Y. y DONALD, J. S. Vibración En La Sarta De Perforación. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010b. p. 32-34

Figura 6. Vibración axial



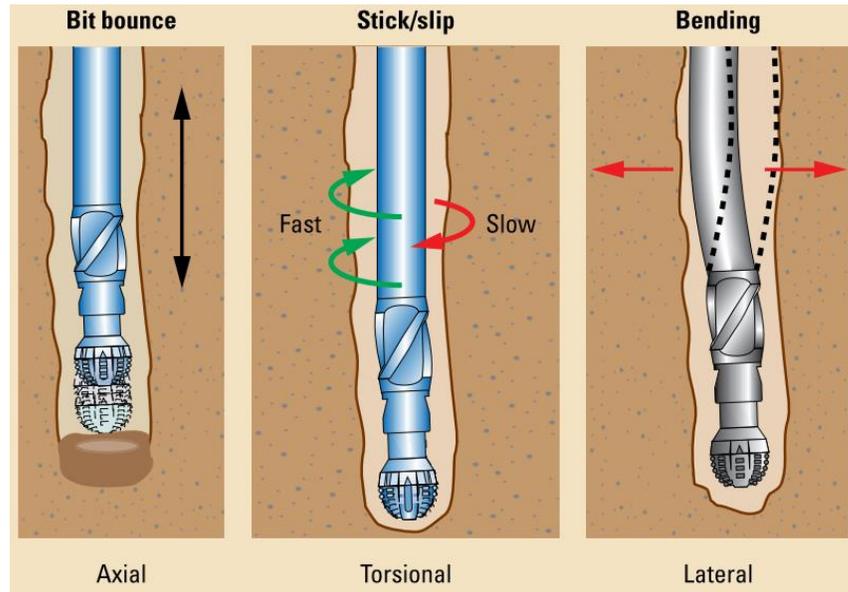
Fuente. Schumberger. Oilfield Review. En: Oilfield Review. p. 65

Entre los problemas están:

- Brocas que fallan o se desgastan rápidamente, fallas mecánicas en el BHA
- Se inducen otros modos de vibración por impacto
- Reducción de ROP

1.4.4 Fenómenos vibratorios. De acuerdo con las vibraciones mencionadas en los anteriores apartados, existe una serie de fenómenos que se generan a partir de estas, que producen un movimiento resultante que normalmente es llamado respuesta paramétrica, que se puede evidenciar en la figura 7.

Figura 7. Fenómenos vibratorios



Fuente. Schumberger. Oilfield Review. En: Oilfield Review. p. 65

1.4.4.1 Stick/slip. En este fenómeno la broca se detiene por completo hasta que la fuerza de torsión suministrada en la superficie se acumula en la sarta y supera la fricción y la resistencia haciendo que la broca y el BHA giren; como consecuencia, la broca gira a una velocidad demasiado alta en comparación con la que se observa en la superficie antes de que vuelva a tener una velocidad normal a medida que la energía acumulada se disipa en todo el cuerpo de la sarta¹⁵

1.4.4.2 Bit bounce. También llamado movimiento axial o rebote de la barrena, posee una frecuencia característica cuyo valor es principalmente una función del tipo de broca, la rigidez de la sarta de perforación y la dureza de la formación¹⁶.

1.5 ANÁLISIS MODAL

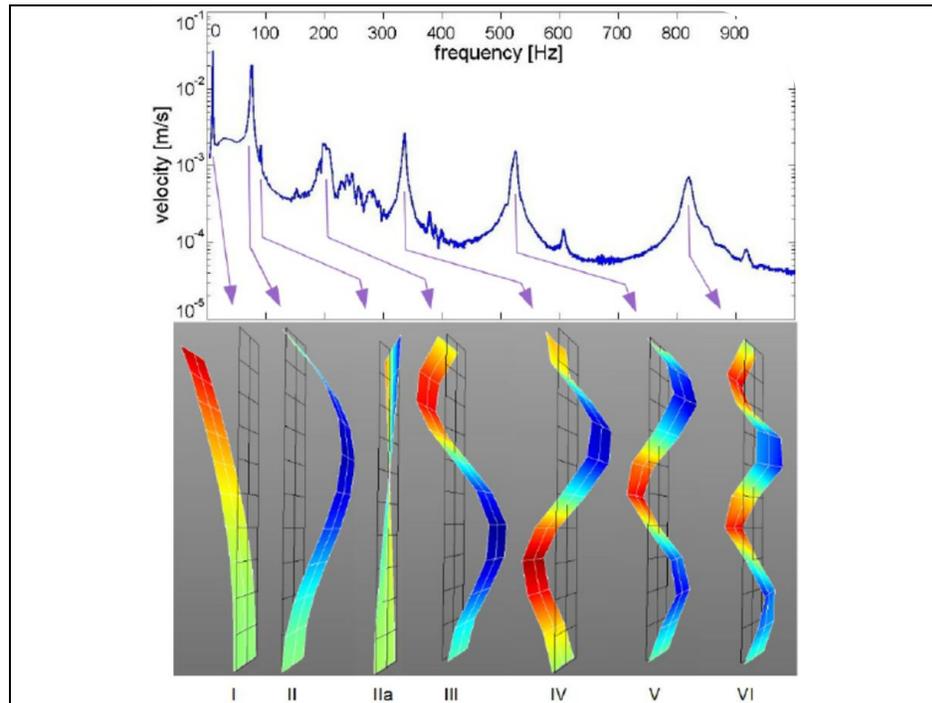
El análisis modal es aquel usado para la determinación de los modos de vibración de una estructura y se puede observar en la figura 8 con los modos de vibración de una placa. En este sentido, estos modos son utilizados usualmente para entender el comportamiento de la estructura, pero también pueden ser usados para la evolución modal de la estructura en distintos casos de cargas.¹⁷

¹⁵ JIMENEZ DE, la Cruz y DOMINGUEZ CARDONA, John Édison. Analisis De Fallas Y Errores En Los Procedimientos De Control De Pozos En Situaciones Anormales Durante La Perforacion. [Print(0)]: 2011. p. 53-54

¹⁶ Schumberger. Oilfield Review. En: Oilfield Review. p. 63-64

¹⁷CSi. CSi Analysis Reference Manual for SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge®. Berkeley: 2015. p. 552

Figura 8. Análisis modal de una viga fija



Fuente. GRZEGORZ, Litak Vertical beam modal response in a broadband energy harvester, 2016

Con respecto al análisis modal, este es definido por crear un caso de carga y establecer el tipo de comportamiento de la estructura a analizar.

A continuación se explican los dos tipos de análisis modal que existen para elegir, siempre y cuando se defina el caso de carga modal.

1.5.1 Análisis de vector propio. Este análisis determina las vibraciones no amortiguadas libres de formas modales y las frecuencias del sistema. Estos modos naturales proporcionan una muy buena visión del comportamiento dentro de la estructura. Cada par de valor propio – vector propio es llamado un modo de vibración natural de la estructura¹⁸.

1.5.2 Análisis del vector Ritz. Este análisis busca encontrar los modos que son excitados por una carga en particular. Los vectores de Ritz pueden proporcionar mejores bases que la de vector propio cuando se usa para la respuesta del espectro o para la evolución del análisis que es basado sobre superposiciones modales.

¹⁸ CSi. CSi Analysis Reference Manual for SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge®. Berkeley: 2015. p. 552

Sumado a lo anterior, un análisis modal se puede desarrollar de forma teórica basándose en técnicas analíticas o simulaciones y experimentales; teniendo cuatro pasos fundamentales ¹⁹:

- Medición mediante acelerómetros
- Tratamiento digital
- Análisis de señales
- Aplicación de modelos

¹⁹ CATEC. Análisis modal. [Electronic(1)]. [Consultado el 13 de Agosto de 20162016]. Disponible en: <http://www.catec.aero/materiales-y-procesos/lisis-modal.htm>

2. CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LA BROCA

En el presente capítulo se definen las condiciones de operación de la broca, su geometría, sus parámetros de perforación y además las especificaciones de diseño que posee la broca seleccionada; que se desarrollarán en los siguientes apartados con base en la información recolectada

2.1 CARACTERIZACIÓN Y CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA BROCA

El análisis de las fallas de una broca constituye uno de los objetivos de la investigación y en este sentido es pertinente realizar una caracterización de la operación de la broca con el fin de determinar las situaciones que se puedan presentar y revisar futuras consecuencias.

Así, la caracterización de una broca tiene como objetivo conocer su capacidad enfatizando en información específica de su diseño y funcionamiento, ya que estos dos aspectos son relevantes cuando se busca contextualizar los eventos que pueden ocasionar fallas sobre esta y hacen necesaria la revisión de los siguientes conceptos: torques permitidos, geometría de la broca, tiempos máximos de operación y sugerencias operativas.

Cabe señalar que los conceptos mencionados deben ser definidos debido a su estrecha relación con la capacidad de la broca y a su importancia durante la operación de perforación, por ejemplo si se excedieran parámetros como el torque máximo permitido o no se le diera importancia a la geometría y especificaciones para las que fue diseñada la broca, se incurriría en un error de operación que puede traer como consecuencia fallas o daños.

De este modo, los valores obtenidos en la caracterización de la broca son de completa utilidad para la realización del proyecto, porque permiten hacer un análisis de lo que le sucede a la misma. Esto se llevó a cabo gracias a información recolectada y obtenida en fuentes de información bibliográfica que incluyen artículos y revistas.

2.2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Las especificaciones de diseño son aquellas que permiten conocer las características de la broca, como su geometría y los rangos de peso que se le pueden aplicar, entre otros. Por dichas razones, a continuación se dan detalles de cada una de las especificaciones que se han utilizado a lo largo de la investigación, esta broca se seleccionó debido a que se busca perforar formaciones duras.

2.3 GEOMETRÍA

La broca seleccionada para el estudio corresponde a la clasificación IADC 6-3-2. Se trata de una herramienta que tiene un diámetro de 7 7/8", lo que aproximadamente equivale a 200mm. Posee tres conos giratorios que tienen cortadores tipo inserto de carburo de tungsteno o TCI por sus siglas en ingles. En la figura 9 se observa la broca seleccionada.

Figura 9. Broca tricónica



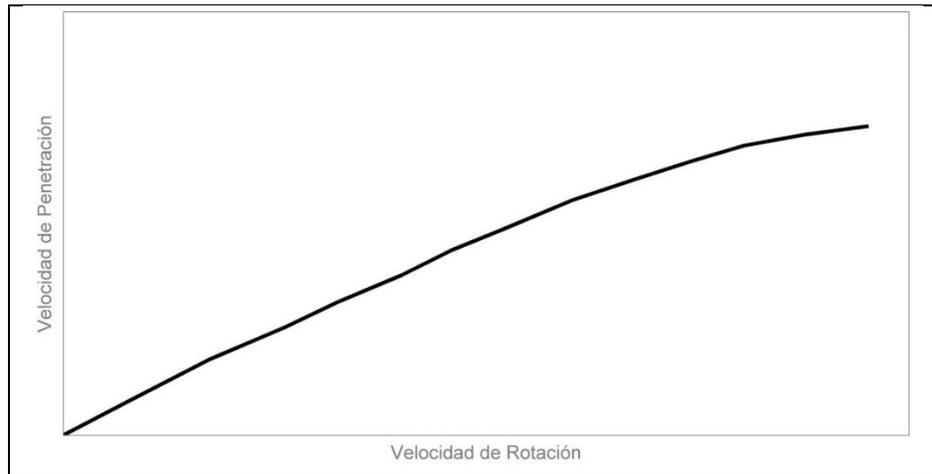
Fuente. PDB Tools, Inc

2.4 VELOCIDADES DE ROTACIÓN

Ahora bien, como denotan Pérez y Merino: “la velocidad de rotación es aquella que nos indica el número de vueltas completadas por minuto de un cuerpo que gira sobre su propio eje”²⁰; si la velocidad de rotación es alta, la tasa de penetración también lo será como se muestra en la figura 10. En el caso de la broca seleccionada según el fabricante, la velocidad de rotación o las rpm adecuadas para un desempeño óptimo oscilan entre 50 a 100 rpm.

²⁰ PEREZ, Julián Merino, María. Definición de RPM. [Electronic(1)]. 2016]. Disponible en: <http://definicion.de/rpm/>

Figura 10. Velocidad de penetración vs velocidad de rotación



Fuente. HUANAY ROJAS, Judid, Yesenia. Perforación Rotativa Con Triconos. [Print(0)]: Huancayo: 2012. p. 22. Modificada por el autor.

2.5 RANGO DE WOB

Con relación a el peso sobre la barrena, WOB por sus siglas en inglés o también llamado empuje, es aquel valor que está directamente ligado a la tasa de penetración (ROP)²¹, si el peso aplicado sobre la broca es muy alto, su tasa de penetración también lo será, como consecuencia de esto, los elementos cortadores de la broca pueden sufrir algún tipo de falla, es por eso que la broca seleccionada debe trabajar con WOB que van desde las 10000 lbs hasta 60000 lbs²².

El empuje que se le aplica a la broca debe ser el suficiente para sobrepasar la resistencia a la compresión de la roca como muestra la figura 11, pero no debe ser muy alto ya que conlleva a fallos prematuros o anormales en la broca; igualmente un empuje excesivo también disminuye la vida de los cojinetes²³.

En el estudio se tomó una carga de 15 Klbs para poder simular las vibraciones verticales en brocas tricónicas, debido a que en el estudio "Analysis on drill string Vibration signal of Stick slip and bit bouncing"²⁴, se presentan las vibraciones verticales cuando se aplica esta carga.

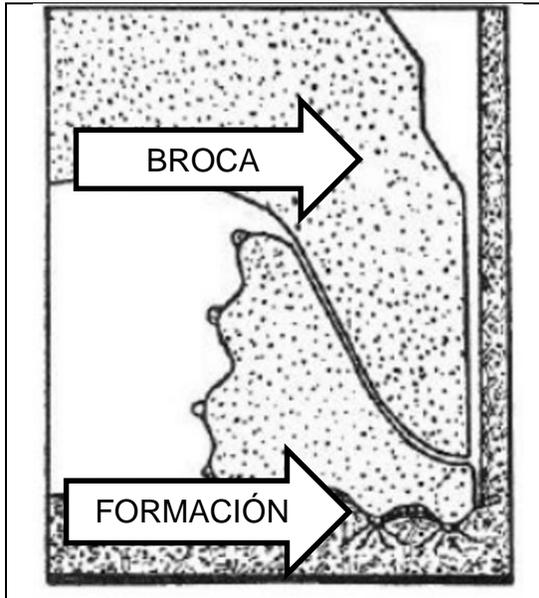
²¹ CEDRO, Y. y DONALD, J. S. Vibración En La Sarta De Perforación. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010b. p. 25

²² PDB TOOLS, inc. 7 7/8 (200mm) EX632. [Print(0)]. Disponible en: http://www.pdbtools.com/web/specs/077_EX632_970013.pdf

²³ HUANAY ROJAS, Judid, Yesenia. Perforación Rotativa Con Triconos. [Print(0)]: Huancayo: 2012. p. 22

²⁴ QIU, Weiqing; FU, Huaigang y LI, Peili. Analysis on Drill String Vibration Signal of Stick Slip and Bit Bouncing.

Figura 11. Fractura de la roca



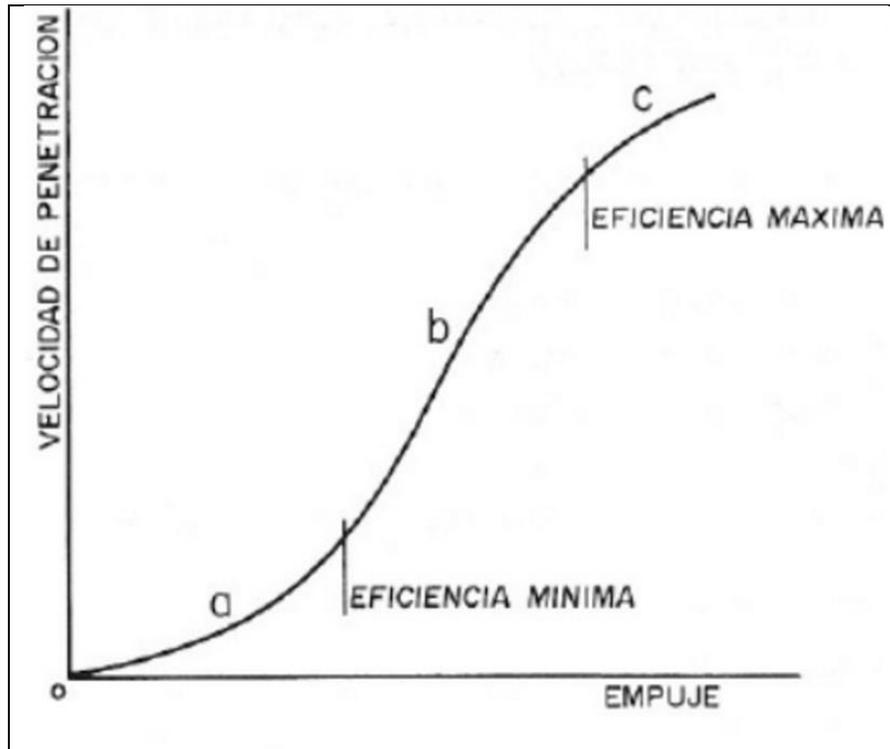
Fuente: (HUANAY ROJAS, Judid, Yesenia. Perforación Rotativa Con Triconos. [Print(0)]: Huancayo: 2012. p. 22).
Modificada por el autor

De otro modo, los triconos pueden trabajar en tres situaciones distintas de empuje que se observan en la figura 11.

Cuando se perfora con brocas tricónicas, se forma una estructura tipo lóbulo en el fondo del pozo. El número de lóbulos es igual al número de seccionamientos de la broca, es decir, al número de cortadores que se encuentren en contacto con la formación en un instante de tiempo. Cuando los conos de la broca giran sobre la formación del fondo, se forman y se desintegran continuamente estructuras tipo cresta.²⁵

²⁵ BAKENOV, A. S., et al. Enhanced Drilling Performance Through Controlled Drillstring Vibrations. p. 1-8

Figura 12. Efecto del empuje sobre la velocidad de penetración



Fuente. HUANAY ROJAS, Judid, Yesenia. Perforación Rotativa Con Triconos. [Print(0)]: Huancayo: 2012. p. 22

A partir de la figura 12, la zona *a* muestra un empuje insuficiente y a su vez una velocidad de penetración baja; en la zona *b* está el empuje y avance eficiente; y por último en la zona *c* se encuentra un empuje excesivo que nos lleva al enterramiento de la herramienta.

En este sentido, Aparicio presenta una relación para el cálculo del empuje mínimo E_m , que se presenta en la ecuación a continuación, la cual corresponde al valor mínimo de carga para que la broca sea perforada ²⁶.

$$E_m = 28,5 * RC * D$$

Dónde:

E_m = Empuje mínimo (libras-peso)

RC = Resistencia a compresión de la roca (MPa)

²⁶ APARICIO MORALES, Ángel. Análisis De La Correlación Entre Parámetros De Control En Máquinas Pilotadoras y Las Propiedades Resistentes Del Terreno. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009. p. 49

D = Diámetro del tricono (pulg)

En el Cuadro 1 se comparan los valores mínimos resultantes al aplicar la fórmula anterior con los valores que se observan en la práctica minera según la dureza de la roca.

Cuadro 1. Fuerza mínima de empuje según el tipo de roca

TIPO DE ROCA	RC (Kgp/cm ²)	E _m (Lbp)	E _{práctica} (Lbp)
Muy blandas	<400	<1150	<1500
Blandas	400 – 800	1150 – 2300	1500 – 3000
Medianas	800 – 1200	2300 – 3400	3000 – 5000
Duras	1200 – 2000	3400 – 5700	5000 – 7000
Muy duras	>2000	>5700	7000 – 9000

Fuente. Análisis de la correlación entre parámetros de control en máquinas piloteadoras y las propiedades resistentes del terreno. Ángel Aparicio Morales

A su vez, se ha obtenido también una fórmula empírica que permite estimar la fuerza de empuje máxima que pueden llegar a soportar los rodamientos del tricono en función del diámetro de perforación y se presenta a continuación²⁷:

$$E_L = 810 * D^2$$

Dónde:

E_L = Empuje límite del tricono (libras-peso)

D = Diámetro del tricono (pulg)

En el cuadro 2 están consignados los valores límites para triconos con sus diferentes diámetros.

²⁷ APARICIO MORALES, Ángel. Análisis De La Correlación Entre Parámetros De Control En Máquinas Piloteadoras y Las Propiedades Resistentes Del Terreno. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009. p. 50

Cuadro 2. Fuerza de empuje máxima según el diámetro de perforación

DIAMETRO DEL TRICONO (Pulg)	EMPUJE LÍMITE (Libras)
5 1/8	21000
6 ¼	31000
6 ¾	37000
7 7/8	60000
9	65000
9 7/8	79000
12 ¼	121000

Fuente. Análisis de la correlación entre parámetros de control en máquinas pilotadoras y las propiedades resistentes del terreno. Ángel Aparicio Morales

2.6 FORMACIONES PARA LA QUE FUE DISEÑADA

La herramienta está diseñada para formaciones medio – duras, con un rango de esfuerzo de compresión sobre la roca que va de 25000 – 50000 psi. De este modo, las especificaciones de cada una son las siguientes:

2.6.1 Formaciones medias. Los triconos en este tipo de formaciones tienen los cojinetes de un tamaño medio, esto de acuerdo a los empujes necesarios y el tamaño de los dientes. La longitud de sus dientes, espaciamiento y descentramiento son mucho menores que los triconos para formaciones blandas.²⁸

2.6.2 Formaciones duras. Estos triconos tienen cojinetes grandes, sus dientes son cortos, resistentes y la distancia entre cada uno de ellos es mínima. Los conos además tienen muy poco descentramiento ya que esto hace que aumente el avance de trituración.²⁹

2.7 FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Los fluidos de perforación son medios de circulación que llevan los cortes realizados por la broca desde debajo de esta hasta la superficie, algunos de los más comunes son los siguientes³⁰:

- Aire – gas
- Espuma/fluidos aireados
- Lodos en base agua
- Lodos en emulsión de aceite
- Lodos en base aceite

²⁸ JIMENO, C. L. Manual De Perforación y Voladura De Rocas. 2da ed. Madrid: 2003. p. 70-505-7007-7

²⁹ Ibid, p 71

³⁰ ARIAS, Dick. Tipos de fluidos de perforación más comunes. [Electronic(1)]. [Consultado el 27 de Junio de 20162016]. Disponible en: <http://perfob.blogspot.com.co/2015/09/tipos-de-fluidos-de-perforacion-mas.html>

2.7.1 Sistemas aire gas. Se puede señalar que tienen grandes ventajas económicas al usar aire comprimido, mezclas de aire o gas inerte y agua en lugares donde hay pocas posibilidades de encontrar grandes cantidades de agua. Además, a continuación se presentarán las principales ventajas y desventajas de esto:

Ventajas:

- Tasa de penetración más alta que con cualquier otro fluido de perforación.
- Hueco de diámetro más exacto y menos desviado.
- Mejores trabajos de cementación.
- Sin peligro de pérdidas de circulación

Desventajas:

- La mezcla puede ser explosiva con otros gases.
- Corrosión de la tubería.
- No hay control de la presión.
- No hay enfriamiento ni lubricación.

2.7.2 Espuma o lodos aireados. Estos fluidos se hacen inyectando agentes espumantes y agua en el aire o en una corriente de gas para crear una espuma viscosa y estable. Los fluidos aireados se hacen inyectando aire o gas en un lodo con base gel y se usan principalmente para reducir la presión hidrostática y para la incrementación de la rata de penetración.

2.7.3 Lodos base agua. Consisten en una fase continua de agua la cual contiene arcilla y otros sólidos. Se usan con el fin de estabilizar la formación y reducir la erosión de las paredes del hueco³¹

2.7.4 Lodo en emulsión de aceite. Son lodos de agua que tienen aceite emulsificado disperso o suspendido en una fase continua de agua. Estos lodos son menos costosos que los lodos en base aceite y además tienen más beneficios que estos.

³¹ ARIAS,Dick. Tipos de fluidos de perforación mas comunes. [Electronic(1)]. [Consultado el 27 de Junio de 20162016]. Disponible en: <http://perfob.blogspot.com.co/2015/09/tipos-de-fluidos-de-perforacion-mas.html>

2.7.5 Lodos base aceite. Consisten en una fase continua de aceite que contiene arcilla y otros sólidos. Son usados en operaciones especiales de perforación, como la perforación en temperaturas extremadamente altas, formaciones muy sensibles y en la penetración en zonas productivas que podrían ser dañadas por lodos base agua³², entre las principales ventajas y desventajas se encuentran:

Ventajas:

- Minimiza el daño de la formación.
- Evita la hidratación de la arcilla.
- Provee mejor lubricación.
- Minimiza la corrosión en la tubería.
- Estabilidad en altas temperaturas.

Desventajas:

- Susceptibles a contaminación con agua, aireamiento y espumamiento.
- Inflamable.
- Más costoso que los lodos base agua.
- Ensuciador y peligroso.
- No es amistoso con el ambiente.

Es así como la broca seleccionada puede trabajar con cualquier fluido de perforación mostrado anteriormente.

2.8 HIDRÁULICA DE BROCAS

Se refiere a aquella operación en la cual se utiliza un fluido, que en este caso es el fluido de perforación o lodo, siendo aquel que desde la superficie transmite energía a través del equipo de bombeo hasta la broca y de esta hacia la formación a través de las boquillas y se puede evidenciar en la figura 13.

Además, una hidráulica eficiente colabora en tener una velocidad de penetración acorde a la limpieza sobre la cara de la broca y el fondo del pozo. A su vez ayuda a aumentar la vida útil de la broca al mantener un óptimo enfriamiento y lubricación³³.

2.9 BOQUILLAS O JETS

Son aquellos componentes de la broca por donde sale el fluido de perforación, como se observa en la figura 13. Estas boquillas están ubicadas encima de cada cono de

³² ARIAS,Dick. Tipos de fluidos de perforación mas comunes. [Electronic(1)]. [Consultado el 27 de Junio de 20162016]. Disponible en: <http://perfob.blogspot.com.co/2015/09/tipos-de-fluidos-de-perforacion-mas.html>

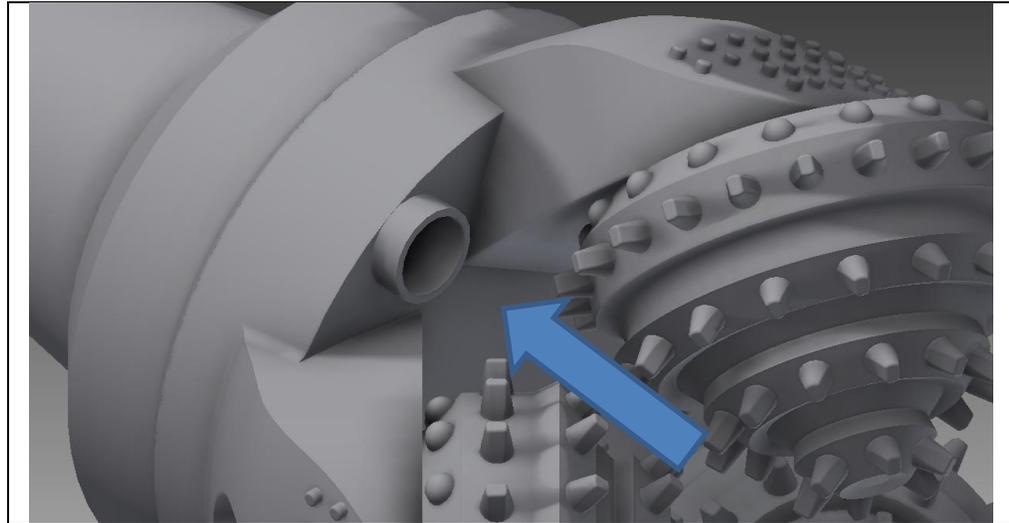
³³ BRIONES LUNA,Cesar, Alejandro y LEON HIDALGO,Ruddy, Katherine. Estudio De La Eficiencia De Las Brocas Usadas En Las Operaciones De Perforación En La Formación Tiyuyacu, En Pozos Del Campo Sacha. Quito.: Escuela Politécnica Nacional., 2015. p. 36.

la broca, son reemplazables y tienen diferentes dimensiones dependiendo del uso que se les dé. La hidráulica de la broca es usada para realizar una lubricación óptima de las boquillas sobre la cara de la broca y así evitar áreas estancadas y de circulación inversa optimizando la perforación,³⁴ de acuerdo con García.

García: también agrupa los factores que más afectan a la hidráulica de la broca y estos son:

- Presión de las bombas
- El flujo o caudal
- El diámetro de la broca
- El peso del lodo
- Diámetro interno de la sarta

Figura 13. Ubicación de boquillas



2.10 CORTADORES

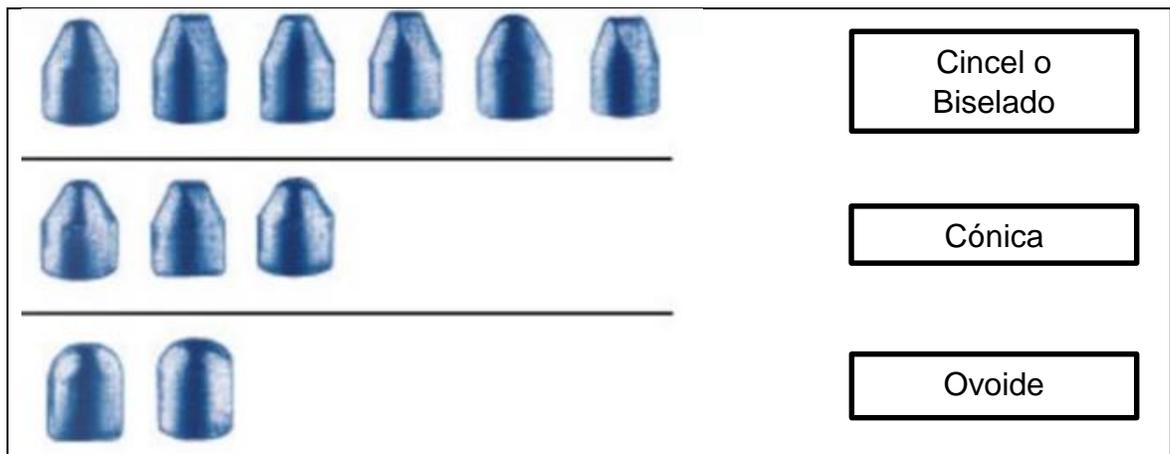
En cuanto a los cortadores, las brocas tricónicas se dividen en 2 tipos: dientes de inserto de carburo de tungsteno y dientes de acero. En el estudio presentado se usarán los TCI o inserto de carburo de tungsteno³⁵.

Los insertos se clasifican por su forma, que se describen en las siguientes secciones y se pueden ilustrar en la figura 14:

³⁴ GARCIA, German. Evaluación De Los Elementos De Desgaste De Las Brocas Tricónicas En El Piedemonte Llanero. Bogotá D.C.: Universidad de América, 2004. p. 32

³⁵ Ibid, p 32

Figura 14. Tipos de insertos



Fuente. Lone Star Drill Bits Catalog, 2014. Tomada de: <http://www.lonestarbit.com/>

2.10.1 Ovoides. Son aquellos usados para formaciones duras debido a su forma corta y redondeada, esto con el fin de minimizar su fractura. Además, esto facilita que los rodamientos puedan ser más grandes y resistentes. Su forma de corte en este tipo de cortador es de aplastamiento y fragmentación más que de deformación y arranque de la roca.

2.10.2 Cónicos. Son usados en formaciones medio duras, con el fin de incrementar la tasa de penetración. Tienen un amplio espaciamiento para permitir una eficiente limpieza.

2.10.3 Biselados o en forma de cincel. Son fabricados exclusivamente para formaciones blandas debido a que son largos, delgados y ampliamente espaciados. Al tener un mayor largo que los demás, este tipo de cortador logra mayor penetración en formaciones blandas. La acción de corte se produce por raspado y tallado, siendo así sus cortes grandes y angulosos³⁶.

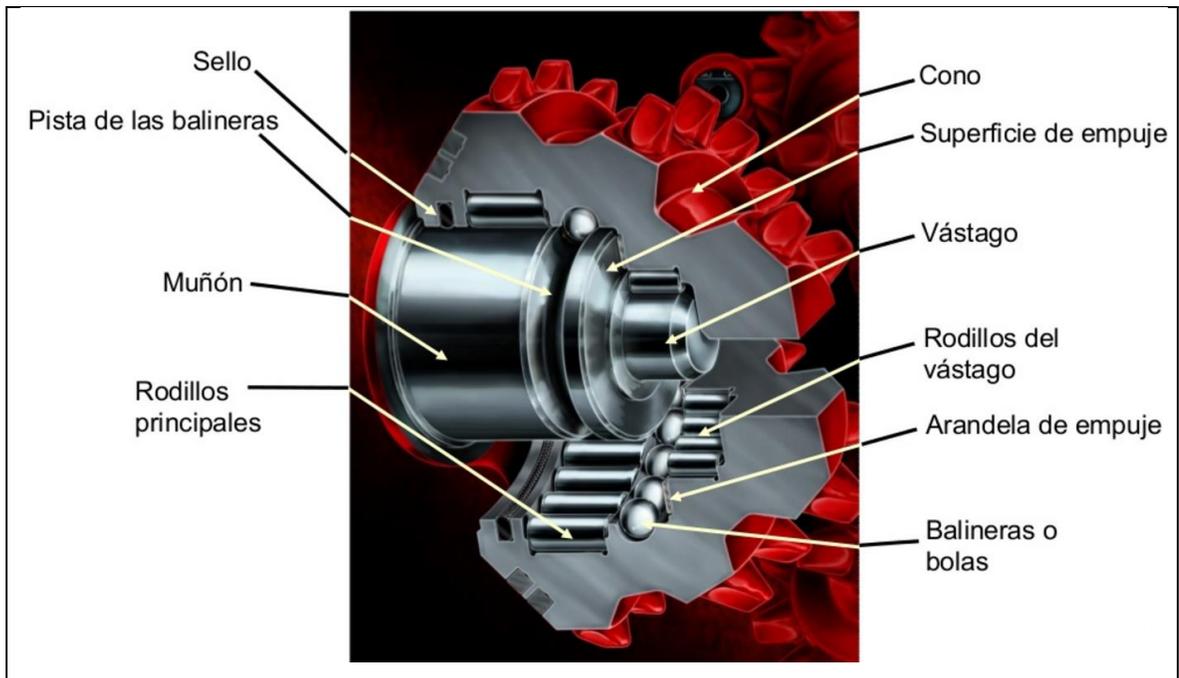
2.11 COJINETES

Los cojinetes en brocas tricónicas son aquellos que le permiten girar a los conos alrededor del cuerpo de la broca y son también quienes soportan las cargas presentes en esta. Estos se dividen en dos tipos: cojinetes de rodillos y cojinetes de fricción o journal, que se explicarán a continuación.

³⁶ GARCIA, German. Evaluación De Los Elementos De Desgaste De Las Brocas Tricónicas En El Piedemonte Llanero. Bogotá D.C.: Universidad de América, 2004. p. 32

2.11.1 Cojinetes de rodillos. Son conocidos como cojinetes anti-fricción y se usan en brocas de 12 ¼ “de diámetro y de diámetros mayores. Este tipo de cojinetes tiene una mayor resistencia a los contaminantes pero tiene una capacidad limitada de soportar peso y requiere demasiado espacio³⁷ que se puede observar en la figura 15.

Figura 15. Cojinete de rodillos



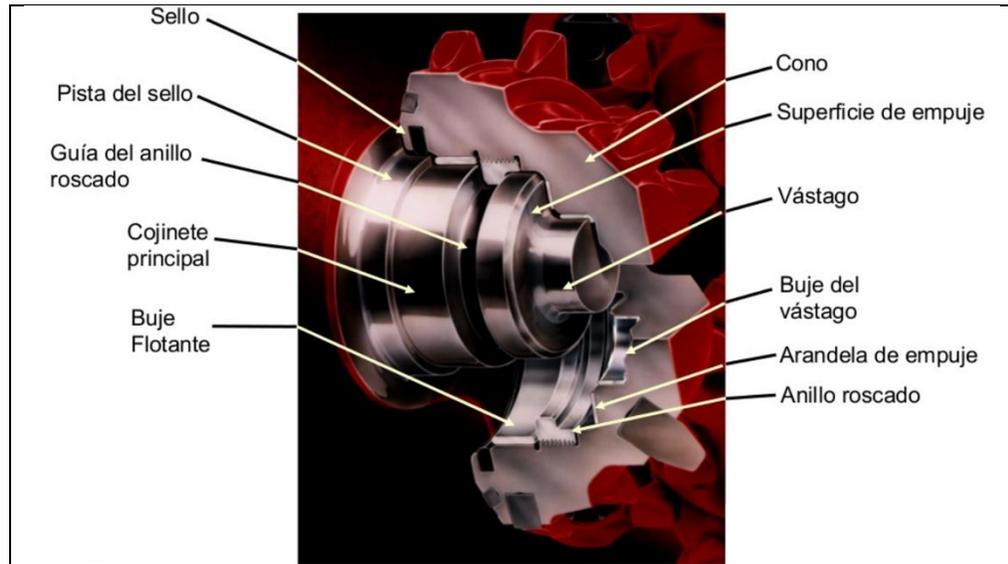
Fuente. Reed Hycalog. 2011. Tomado de: <http://www.cgtech.com/user-stories/reedhycalog/>

2.11.2 Cojinetes de fricción o journey. Son también conocidos como chumaceras y se usan en brocas de 12 ¼” de diámetro y más pequeñas; tienen una gran capacidad de soportar peso pero funcionan a velocidades de rotación bajas y medias, a su vez poseen poca resistencia a los contaminantes que son aquellas partículas que pueden entrar al cojinete y dañarlo. En la figura 16 se pueden observar sus partes y componentes³⁸.

³⁷ MONZON, Jairo. Principios de barrenas tricónicas. [Electronic(1)]. [Consultado el 15 de junio de 2016 2016]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/Jmonzmr/1-principios-de-barrenas-triconicas>

³⁸ Ibid.

Figura 16. Cojinete de fricción o journey

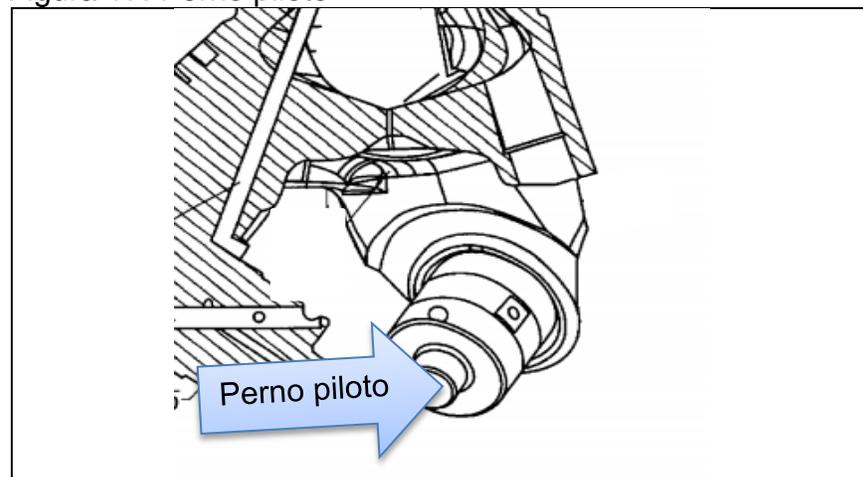


Fuente. Reed Hycalog. 2011. Tomado de: <http://www.cgtech.com/user-stories/reedhycalog/>

2.12 CARGAS EN LOS COJINETES

Las cargas en los cojinetes se distribuyen sobre el perno piloto, que es aquel donde va soportado el cono y los rodamientos de la herramienta. En la figura 17 se puede visualizar el perno piloto de la broca tricónica.

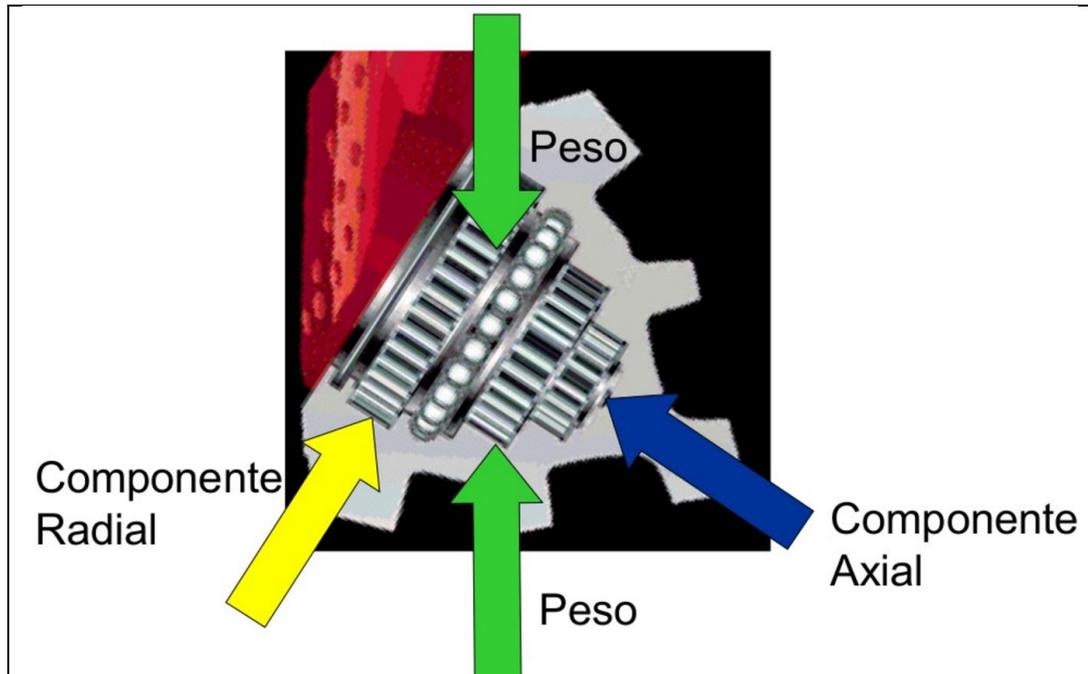
Figura 17. Perno piloto



Fuente. Sealed bearing roller cone bit having anti-plugging device. 2015. Tomada de: http://drillbitsales.com/infomid-20-237.html?gclid=CLa_wbT86tICFYZehgodVEMPqA
Modificada por el autor

Así mismo, las cargas que sufre la broca se dividen en tres: el peso sobre la broca, la carga radial y la carga axial. En la figura 18 se aprecian las componentes de las cargas que se han mencionado.

Figura 18. Distribución de cargas en cojinetes



Fuente. Reed Hycalog. 2011. Tomado de: <http://www.cgtech.com/user-stories/reedhycalog/>

2.13 METALURGIA DE LOS MATERIALES DE FABRICACIÓN DE LAS PARTES DE LA BROCA

El éxito obtenido en la fabricación de triconos se debe a la implementación de aleaciones especiales³⁹, diferentes para cada uno de los elementos que lo constituyen, como se observa en el Cuadro 3. Esto se realiza con el fin de mejorar el rendimiento de la broca, es decir prolongar su vida útil.

³⁹ JIMENO, C. L. Manual De Perforación y Voladura De Rocas. 2da ed. Madrid: 2003. p. 70-505-7007-7

Cuadro 3. Materiales usados en la fabricación de piezas en brocas tricónicas

Elementos del tricono	Propiedades requeridas	Tipo de material
Cono	Resistencia al impacto y a la abrasión	Carbono, manganeso, níquel y molibdeno
Cabezas	Resistencia a la fatiga. Alta resistencia al impacto. Soldable	Carbono, manganeso, cromo y molibdeno
Cojinetes de rodillos y bolas	Alta resistencia al impacto	Carbono, manganeso, níquel, cromo y molibdeno
Pasadores y buje guía	Resistencia al desgaste	Cromo, carbono, níquel, manganeso y silicio
Botón de empuje	Resistencia al desgaste	Carbono, wolframio, cromo, molibdeno y vanadio
Superficie de cojinetes	Resistencia al desgaste	Cobalto, cromo, carbono, wolframio y níquel
Dientes	Resistencia a la abrasión elevada	Wolframio y carbono
Insertos	Resistencia a la abrasión elevada. Resistencia al impacto.	Wolframio, carbono y cobalto

Fuente. JIMENO, C. L. Manual De Perforación y Voladura De Rocas. 2da ed. Madrid: 2003. p. 70-505-7007-7

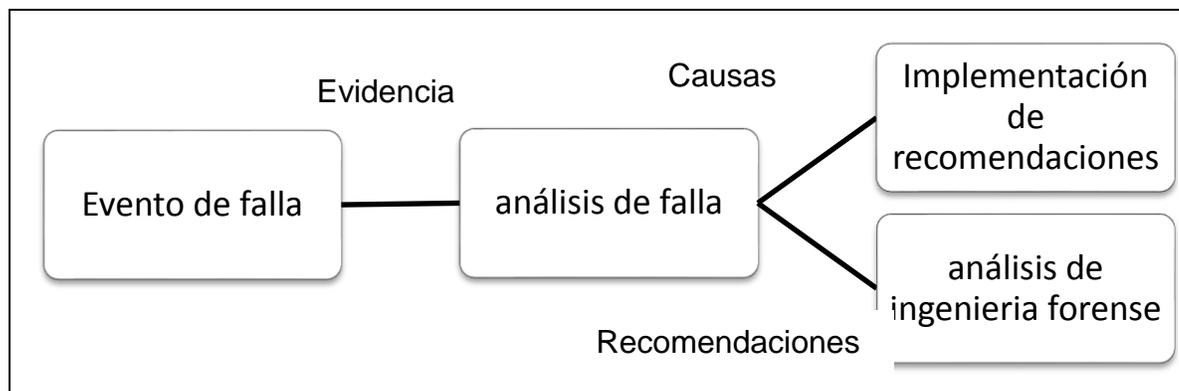
3. FALLAS

Las fallas ocurren cuando un elemento mecánico, una estructura, un conjunto de elementos o un equipo son incapaces de realizar de manera óptima el trabajo para el cual fueron diseñados⁴⁰. De otro modo, no cuentan con las condiciones de seguridad necesarias y los costos de mantenimiento y operación son muy altos, al igual que los demás indicadores específicos; si cumple con estos se dice que se ha experimentado una falla.⁴¹ Este apartado realiza una revisión y descripción con base en fuentes de información secundaria de la clasificación de las fallas, los modos de falla y finalmente una selección de fallas que son tenidas en cuenta a lo largo de la investigación.

Dentro del contexto de presencia de una falla, se debe realizar un procedimiento lógico y sistemático cuyo fin es establecer el mecanismo de falla y los modos de falla en que se presentó el fenómeno y es preciso responder a una pregunta simple ¿cómo falló? También se busca determinar si en algún momento existe la mala operación de dichos elementos por causas organizacionales o humanas, tratando de responder la pregunta ¿por qué falló? Esta revisión se denomina *análisis de fallas*.

Con el análisis de falla se busca tomar las acciones correctivas necesarias para minimizar la aparición de una posible falla. Igualmente, cuando el objetivo principal del análisis de falla es la determinación de responsabilidades legales ya sea por pérdidas económicas, vidas y reclamos de garantías, entre otras, se habla de un análisis de ingeniería forense. En la figura 19 se observa la relación entre el análisis de fallas y la ingeniería forense.

Figura 19. Relación entre análisis de falla y la ingeniería forense



Fuente. ESPEJO MORA, Edgar. Análisis De Falla. Bogotá D.C.: 2012. Modificado por el autor.

⁴⁰ Rodríguez, Jorge. Fallas en elementos mecánicos. Pontificia Universidad Católica de Perú. 2010

⁴¹ ESPEJO MORA, Edgar. Análisis De Falla. Bogotá D.C.: 2012.

De acuerdo con la operación del equipo, Espejo E. clasifica las fallas de tres formas distintas:

3.1 CLASIFICACIÓN DE FALLAS

a) Deja de operar:

Por ejemplo la fractura del marco de una bicicleta, ya que la deja inservible.

b) Sigue operando de manera no satisfactoria:

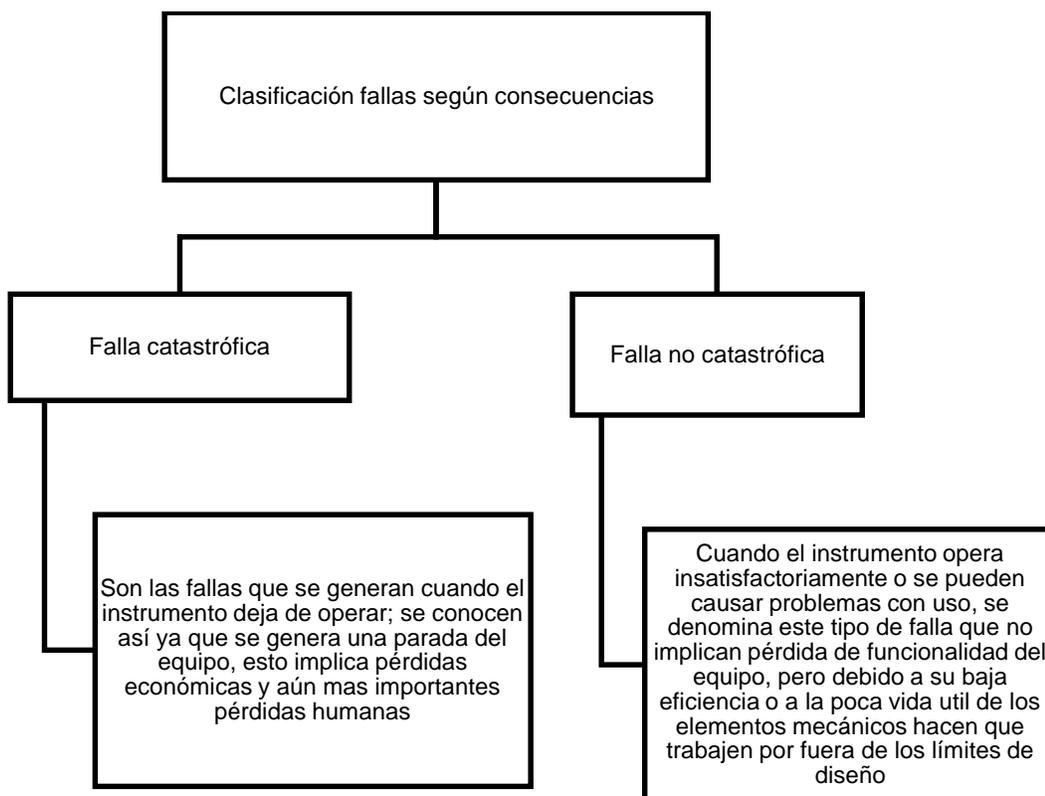
Como por ejemplo una nevera al no contener alimento por dentro, esto provoca que la nevera siga funcionando, pero como consecuencia se estará gastando más energía, ya que no se le da uso alguno.

c) Seguir usando la máquina puede ocasionar daños mayores.

Así, según Espejo si no se mantiene bien lubricado un sistema de transmisión puede llegar a ocasionar grandes problemas no deseados en un futuro

3.1.1 Sub clasificación según las consecuencias. En lo que se refiere a la clasificación de fallas de acuerdo con las consecuencias, la figura 20 ilustra los dos tipos de fallas: catastrófica y no catastrófica.

Figura 20. Sub clasificación de fallas



Fuente. ESPEJO MORA, Edgar. Análisis De Falla. Bogotá D.C.: 2012. Modificado por el autor.

Cuando una falla se desarrolla en un periodo de tiempo corto, es llamada *falla súbita* ya que no permite realizar paradas programadas del equipo para tomar alguna acción correctiva y a su vez su detección es casi imposible en etapas tempranas. De esta manera, generalmente este tipo de fallas son catastróficas y están asociadas a la fractura frágil, la fractura dúctil y la deformación plástica⁴².

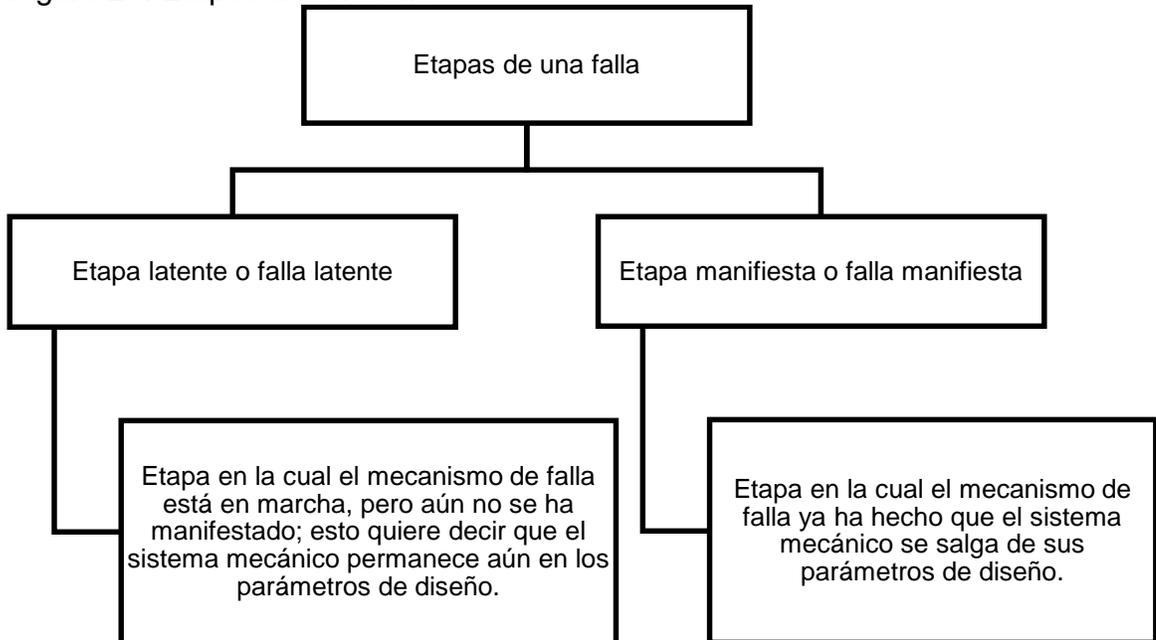
En otros casos cuando la falla permite su detección en etapas tempranas y el seguimiento de su progreso, es llamada *falla progresiva*, la cual facilita la toma de acciones correctivas antes de que se convierta en una falla catastrófica. Como ejemplo de modos de falla de este tipo se tienen en cuenta los siguientes: la fractura por fatiga, la fractura por corrosión bajo esfuerzo, el desgaste adhesivo, el desgaste abrasivo y la corrosión generalizada, entre otros. Cabe resaltar que si la velocidad de evolución de una falla progresiva es demasiado alta, puede llegar a convertirse en una falla súbita⁴³.

⁴² ALVAREZ, Francisco y VEGA, Jose. Análisis De Falla En Los Sistemas De Bombeo Mecánico Del Campo Cantagallo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2008.

⁴³ ESPEJO MORA, Edgar. Análisis De Falla. Bogotá D.C.: 2012.

3.1.2 Etapas generales de una falla. Las etapas de las fallas pueden dividirse en dos grupos principales, que se describen con profundidad en la figura 21 y corresponden a la etapa latente y la etapa manifiesta.

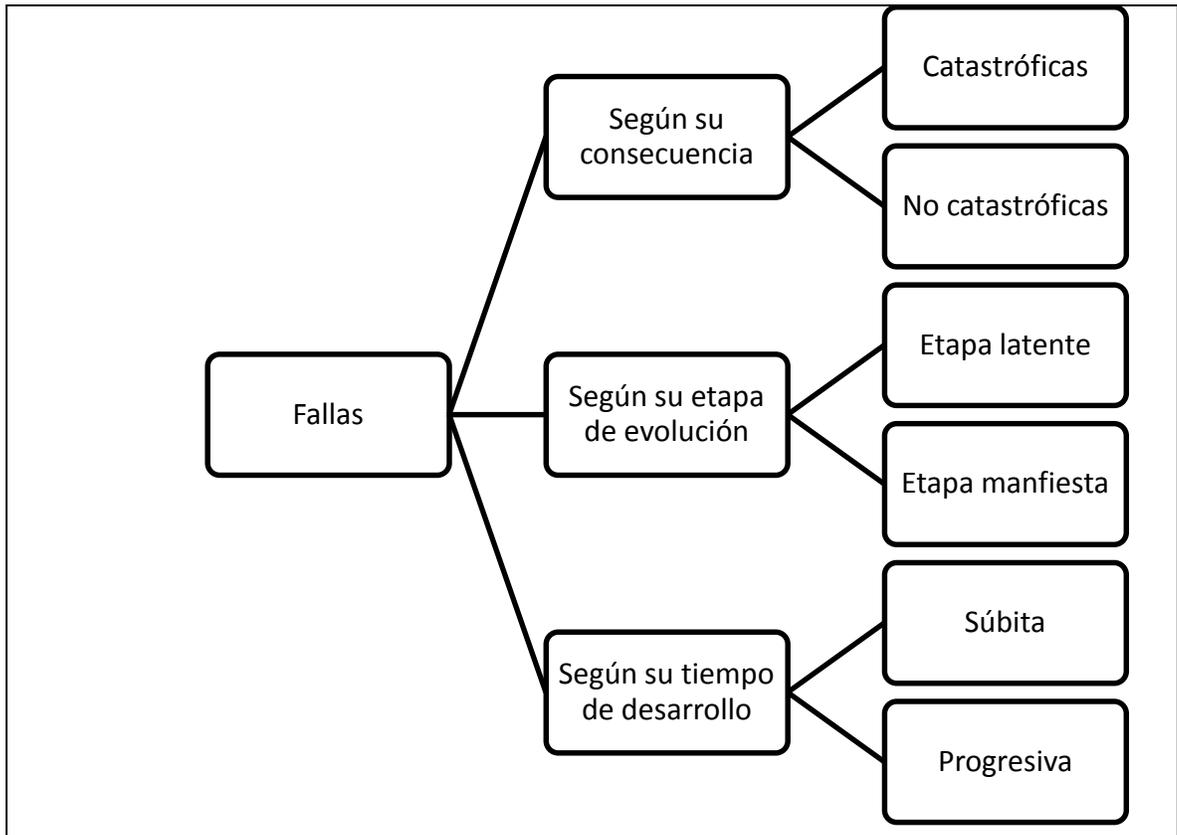
Figura 21. Etapas de una falla



Fuente. WILCHES, José. La fatiga: Principal causa de falla de los elementos mecánicos. 1995. Modificado por el autor.

En síntesis, la figura 22 ilustra la clasificación de las fallas que se han descrito en las secciones anteriores

Figura 22. Clasificación de fallas



Fuente. WILCHES, José. La fatiga: Principal causa de falla de los elementos mecánicos. 1995. Modificado por el autor.

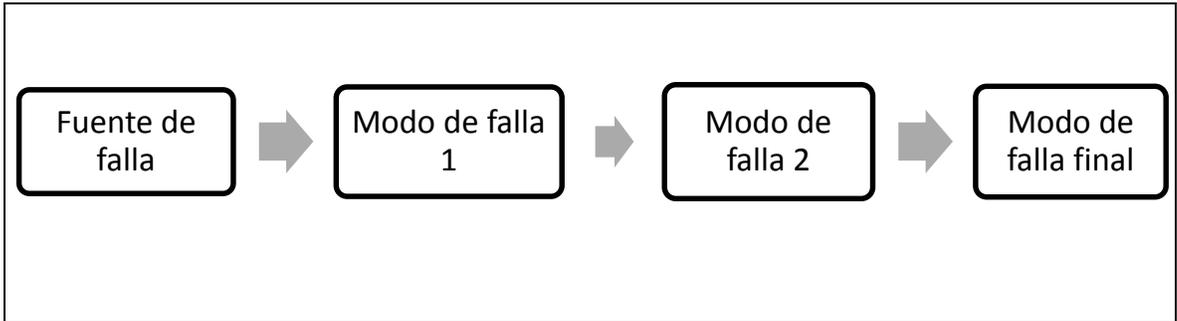
3.2 MODOS DE FALLA

Los modos de falla corresponden a la manera física o química en que un elemento de máquina falla, es decir, la forma en que el elemento va perdiendo sus características, por ejemplo, la corrosión por picadura o el desgaste adhesivo, entre otros.⁴⁴

En la figura 23 se esquematiza la relación entre la fuente de la falla, los modos de falla y el mecanismo de falla.

⁴⁴ CABRERA, Raul. Deterioro de los materiales. [Electronic(1)]. [Consultado el Febrero 2017] Disponible en: <http://es.slideshare.net/raecabrera/capitulo-5-deterioro-de-los-materiales-9247562>

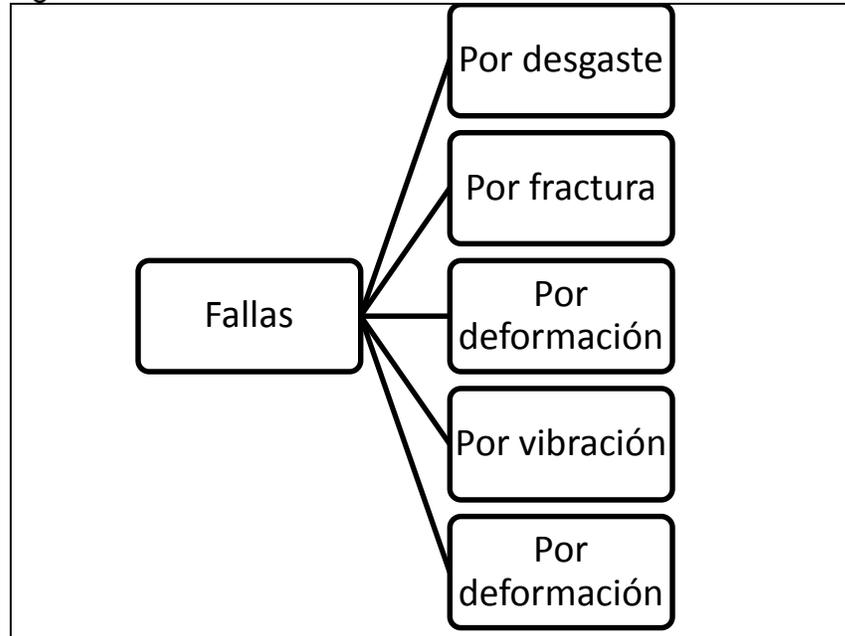
Figura 23. Relación entre fuente, modos y mecanismo de falla



Fuente. Análisis de falla. 2012. Modificado por el autor.

Además, los elementos mecánicos son piezas mecánicas que fueron diseñados para soportar distintos tipos de cargas y deformaciones, dependiendo de la temperatura, presión y composición química del ambiente, al modificarse alguna de las condiciones anteriores se pueden desarrollar varios modos de falla, como se ilustra en la figura 24.

Figura 24. Modos de falla básicos de los elementos mecánicos



Fuente. WILCHES, José. La fatiga: Principal causa de falla de los elementos mecánicos. 1995. Modificado por el autor.

3.2.1 Falla por fractura. Corresponde al tipo de falla que consiste en la separación de la misma en dos o más fragmentos como se observa en la Figura 24. Como consecuencia, se da la aparición de un elemento de máquina producto de las grietas existentes y la posterior propagación de éstas, bajo las cargas que experimenta⁴⁵.

Figura 25. Falla por fractura (cono roto)



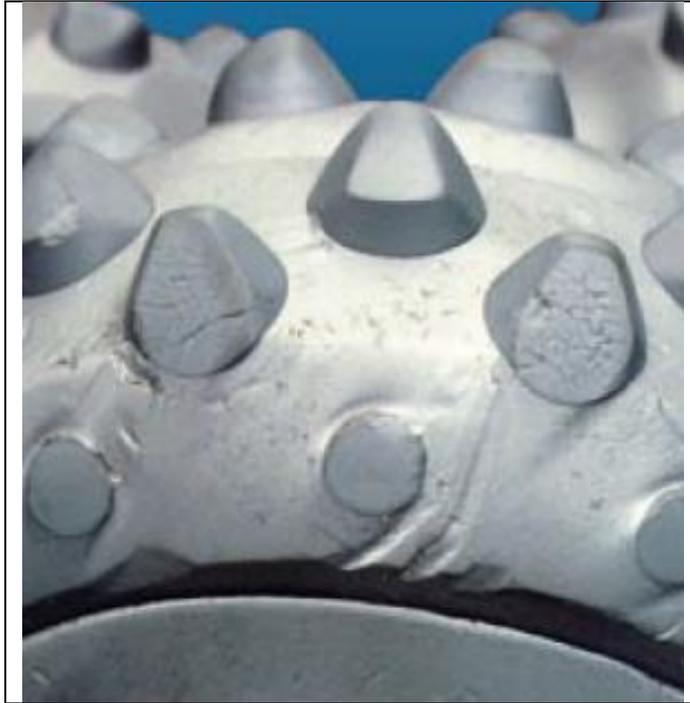
Fuente. SMITH INTERNATIONAL, Inc. ROLLER CONE DULL GRADING MANUAL. 2008.

3.2.2 Falla por desgaste. El desgaste es la acción no deseada de remover material en superficies que se encuentran en contacto⁴⁶. Esto a su vez produce modificación en la geometría y dimensiones del elemento mecánico; se genera principalmente bajo la acción de esfuerzos de contacto y deslizantes; en la figura 26 se observa un ejemplo.

⁴⁵ ECHEVERRIA, Ricardo. Fractura De Materiales. Universidad Nacional del Comahue, 2003.

⁴⁶ BARRIENTOS RIOS, Gabriel y RAZETO MIGLIARO, Mario. Análisis De Fallas En Equipos Industriales. 2014. p. 228

Figura 26. Falla por desgaste (Desgaste de cortador)



Fuente. SMITH INTERNATIONAL, Inc. ROLLER CONE DULL GRADING MANUAL. 2008.

3.2.3 Falla por corrosión. Al igual que las fallas de desgaste, las fallas por corrosión sufren modificaciones en su geometría y sus dimensiones, esto ocurre bajo la acción química o electroquímica del medio que rodea una determinada pieza en el caso de la corrosión, como se observa en la figura 27⁴⁷.

⁴⁷ ESPEJO MORA, Edgar. Análisis De Falla. Bogota D.C.: 2012.

Figura 27. Falla por corrosión



Fuente. SMITH INTERNATIONAL, Inc. ROLLER CONE DULL GRADING MANUAL. 2008.

3.2.4 Falla por deformación. Este tipo de falla se presenta cuando la pieza cambia su geometría de manera permanente bajo cargas (deformación plástica), es decir, la pieza no podrá regresar a su estado inicial bajo ningún proceso, ya que ha excedido el límite del material en cuanto a su grado de deformación de elástica a plástica⁴⁸. Esto se puede apreciar en la figura 28.

⁴⁸ SMITH INTERNATIONAL, Inc. ROLLER CONE DULL GRADING MANUAL. 2008.

Figura 28. Falla por deformación



Fuente. SMITH INTERNATIONAL, Inc. ROLLER CONE DULL GRADING MANUAL. 2008.

3.2.5 Falla por vibración. Cuando existe un estado vibratorio anormal en un equipo, este puede ser la evolución o el progreso de cualquiera de los modos de falla mencionados. Así mismo, las fallas por vibración indican que se tienen amplitudes, velocidades o aceleraciones de vibración muy altas, lo cual pueden desencadenar las fallas mencionadas anteriormente como los son fallas por fractura, deformación y desgaste⁴⁹.

3.2.6 Modos de fallas de los elementos mecánicos. De acuerdo con las formas de falla, Espejo menciona que los elementos mecánicos por naturaleza hacen parte de una máquina y estos a su vez están sujetos a distintas cargas durante su operación. Además de esto los elementos mecánicos son especialmente diseñados para cumplir distintas funciones dentro de una máquina aunque en algunos casos estos tienden a disminuir su capacidad de eficiencia dentro de la misma. Lo anterior ocurre gracias a que están expuestos a cargas o esfuerzos los cuales no se encuentran dentro de sus límites de diseño.⁵⁰

⁴⁹ BAKENOV, A. S., et al. Enhanced Drilling Performance Through Controlled Drillstring Vibrations. p. 1-8

⁵⁰ ESPEJO MORA, Edgar. Análisis De Falla. Bogota D.C.: 2012.

En este sentido, a continuación se describirán los modos de fallas de los elementos mecánicos comunes que se encuentran dentro de una broca de perforación.

3.2.7 Modo de falla en rodamientos. “El rodamiento o cojinete de rodadura es un elemento mecánico, situado entre dos componentes de una máquina, dichos componentes presentan un eje de rotación común, de forma que un componente puede girar respecto a otro”⁵¹.

Así, las condiciones a las que comúnmente los rodamientos están sometidos son:

- Cargas muertas. Pueden ser de tipo radial o axial, generando esfuerzos de contacto cíclicos.
- Cargas disipativas. Son aquellas fuerzas de fricción que se presentan entre los elementos del rodamiento (elementos rodantes, pistas y jaulas); en el caso puntual de las brocas, las fuerzas de fricción generadas entre los conos en rotación. Estos elementos generan pérdida de energía y a su vez están ligados al deslizamiento los cuales generan fuerzas tangenciales cíclicas en las zonas que se encuentran en contacto.⁴⁶
- Medio ambiente. El cual puede reaccionar químicamente con las partes del rodamiento (corrosión).
- Medio con partículas abrasivas. Pueden promover la abrasión entre las jaulas, los elementos rodantes y las pistas.

3.3 SELECCIÓN DE FALLAS

A partir de los tipos de vibraciones descritos en el Roller Cone Dull Grading Manual⁵², se analizan los casos de fallas más comunes presentes en una broca tricónica causadas por diferentes condiciones de operación, las cuales se presentan a continuación:

3.3.1 Fractura de dientes (Broken Teeth - BT). El elemento de corte es considerado fracturado si 1/3 de su geometría ya no está presente. Este tipo de falla puede ser un indicador potencial de una mala selección de la broca. En la imagen 29 se puede apreciar la fractura de dientes.

⁴⁹ RUBIO ALONSO, Higinio. Diseño mecánico. [Electronic(1)]. [Consultado el 21 de Agosto de 2016] Disponible en: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/diseño-mecánico-1/material_clase/ocw_rodamientos1

⁵² SMITH INTERNATIONAL, Inc. ROLLER CONE DULL GRADING MANUAL. 2008.

Figura 29. Broken Teeth



Fuente. SMITH INTERNATIONAL, Inc. ROLLER CONE DULL GRADING MANUAL. 2008.

3.3.2 Cono fracturado (Broken cone – BC). Este tipo de falla se constituye por una broca con uno o más conos que son fracturados en dos o más piezas, suele ocurrir cuando existe una carga de impacto excesiva o en prácticas inapropiadas de perforación, como se visualiza en la figura 30.

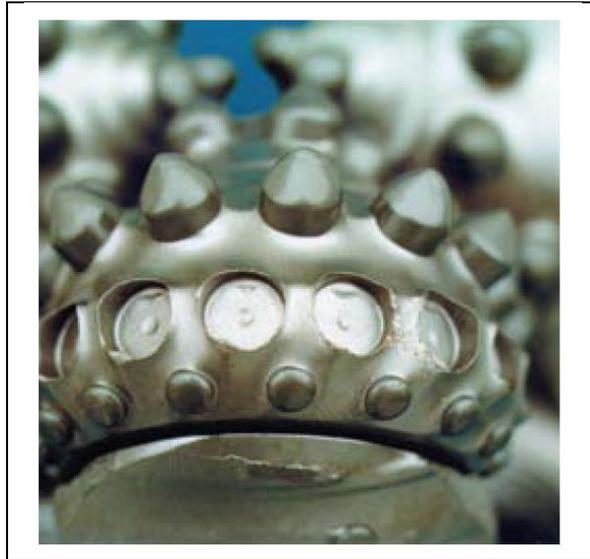
Figura 30. Broken cone



Fuente. SMITH INTERNATIONAL, Inc. ROLLER CONE DULL GRADING MANUAL. 2008.

3.3.3 Pérdida del diente (Lost Teeth - LT). Este tipo de falla describe la pérdida del cortador o de los cortadores. Puede ser muy perjudicial para el resto de la broca. Esto es consecuencia de que el peso sobre la broca o WOB es excesivamente alto. La pérdida del diente se aprecia en la figura 31.

Figura 31. Lost Teeth

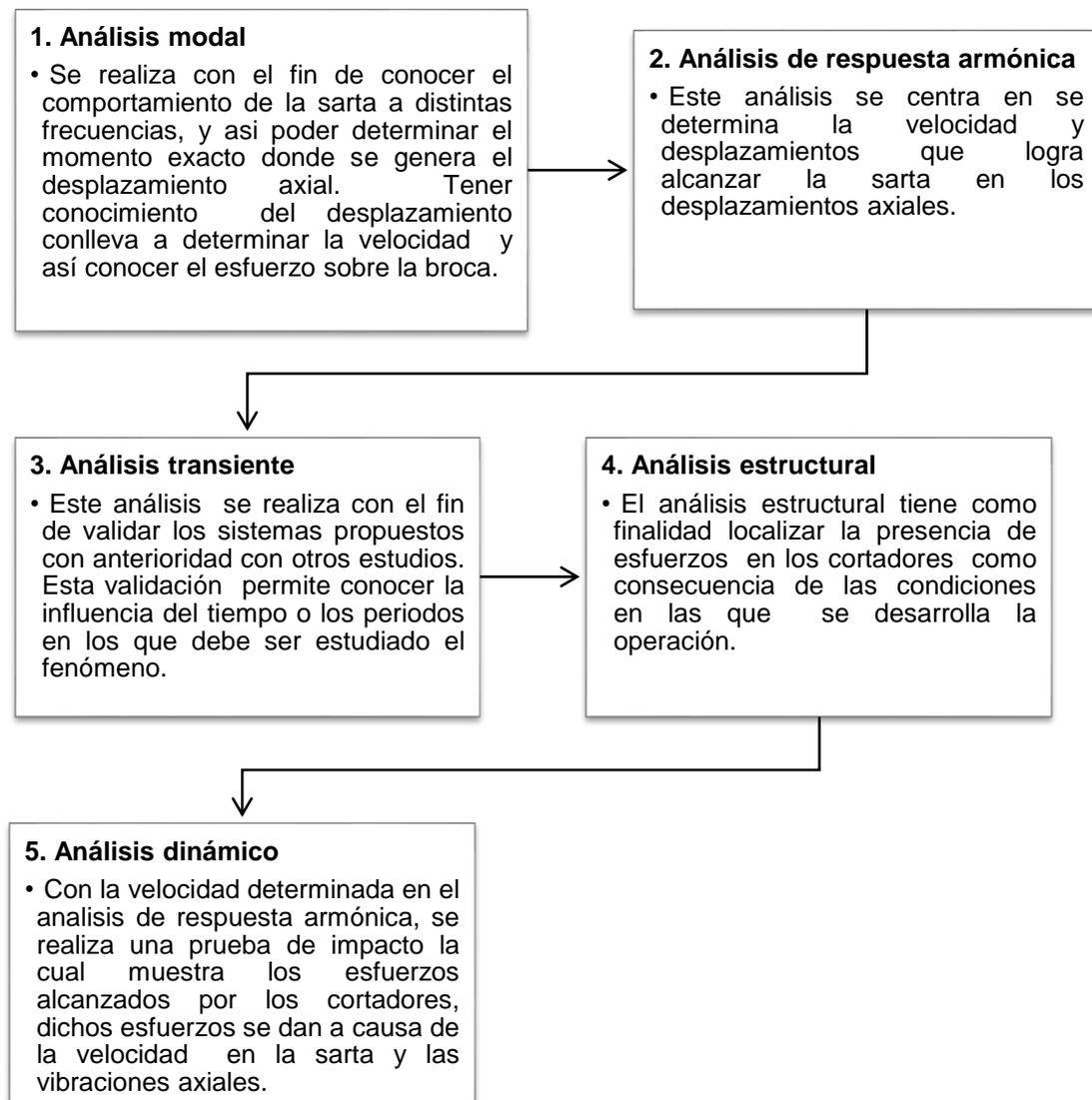


Fuente. SMITH INTERNATIONAL, Inc. ROLLER CONE DULL GRADING MANUAL. 2008.

4. SIMULACIONES

En los apartados anteriores se han descrito las generalidades, la operación de la broca, la clasificación de las fallas y los elementos necesarios para el desarrollo de la investigación; en este capítulo se describe la metodología que utilizada, basada en una serie de análisis mediante el método de elementos finitos para evaluar el comportamiento de las brocas bajo el efecto de vibraciones verticales o axiales; estos análisis reflejan el desarrollo de uno de los objetivos del proyecto y se realiza por medio de la implementación del software Ansys. Los análisis utilizados para el desarrollo de la metodología se explican en la Figura 32.

Figura 32. Metodología



Enfatizando en lo anterior, la metodología que orientó el estudio inicia mediante el análisis modal, con el fin de determinar la frecuencia de resonancia de la geometría usada y a partir de ésta decretar mediante el análisis armónico, la velocidad y desplazamiento máximo que logra alcanzar la sarta debido a las vibraciones verticales. La siguiente fase corresponde al análisis transiente que busca la comparación de los resultados obtenidos de diversos estudios a través de la revisión bibliográfica. Seguido de esto, se integra el análisis estructural para la determinación de los esfuerzos en el cono y cortadores de la broca propio de las condiciones en que se desarrolla la operación; finalmente se implementó el análisis dinámico con el fin de conocer el esfuerzo sufrido por el cortador en el momento del impacto contra la formación.

Lo anterior se evidencia en este capítulo con las simulaciones propias del estudio.

4.1 DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS EN LOS CORTADORES Y CUERPOS DE LA BROCA

El análisis a continuación, tiene como finalidad identificar las velocidades y desplazamientos de la broca tricónica producto de las vibraciones axiales y por medio de estas conocer los esfuerzos a los que se encuentra sometida la broca en el fondo del pozo a causa del impacto con la formación. En este sentido es necesario hallar velocidades y desplazamientos para así concluir con la determinación de los esfuerzos. Al respecto es necesario aclarar que los desplazamientos axiales tienen el nombre de *bit bounce* que significa salto de la barrena o broca y están totalmente ligados al tipo de broca, formación y carga que se le aplica tanto a la sarta como a la broca.

Para entender en que valores oscilarán los esfuerzos determinados se conoce que los datos experimentales de los desplazamientos axiales de la broca, pueden ir de 2,5 mm a 15 mm⁵³.

Los datos que se presentan a continuación son producto de lo que se evidenció en el capítulo 2 con respecto a su descripción y justificación de uso en esta investigación. Así, el modelo que se describe inicia a partir de una carga aplicada sobre la sarta o WOB que equivale a 15 Klb.

La broca tiene una designación IADC 6-3-2, con un diámetro 7 7/8 (200 mm), está diseñada para velocidades de rotación de 50 a 100 rpm y un WOB que va desde 10000 lb hasta 60000 lb.

⁵³ CEDRO, Y. y DONALD, J. S. Vibración En La Sarta De Perforación. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010. p. 32-34

4.1.1 Geometría. La geometría usada en el primer análisis para la sarta es una longitud de 200 m y un diámetro de 134 mm. En este sentido, el análisis que se presenta se basa en el método de la matriz de movilidad que consiste en representar la geometría de la sarta como un cilindro macizo sin importar la altura o diámetro de la misma, de manera que sólo se debe garantizar la masa total de la sarta⁵⁴. Esto quiere decir que si se tiene una longitud de 50 m con una masa X, la longitud puede variar pero la masa debe permanecer constante.

Es así como, en este estudio, la masa de la sarta es de 22140 Kg con una longitud de 200 m y un diámetro de 134 mm; al realizar el método de la matriz de movilidad y aplicando la ecuación de volumen de un cilindro, se mantuvo constante la masa y se modificaron la longitud y el diámetro, tomando un valor aleatorio de 50 m para la longitud como se aprecia en la Figura 33.

Figura 33. Sarta (Método matriz de movilidad)



Partiendo de la ecuación del volumen de un cilindro se determina el valor del diámetro del mismo:

$$V = \pi R^2 h$$

$$R = \sqrt{\frac{V}{\pi h}}$$

$$R = \sqrt{\frac{m}{\pi h \rho}}$$

Con el fin de simular escenarios favorecedores para el gasto computacional, se realiza otra prueba cambiando el valor de la longitud a 50 m:

$$R = \sqrt{\frac{22140 \text{ kg}}{\pi * 50 \text{ m} * 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

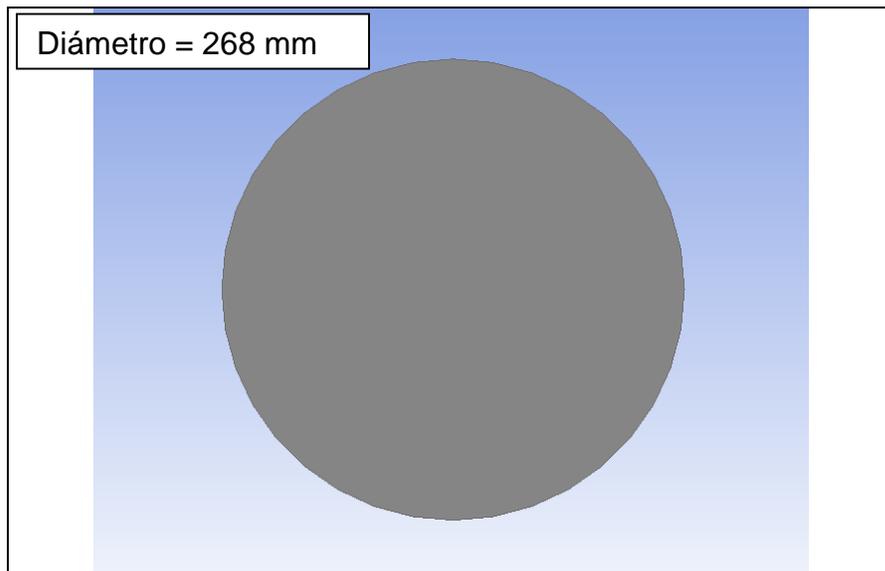
⁵⁴ CLAYER, F., et al. The Effect of Surface and Downhole Boundary Conditions on the Vibration of Drillstrings.

$$R = 134 \text{ mm}$$

$$D = 268 \text{ mm}$$

Por consiguiente el diámetro exterior es de 268 mm como se aprecia en la figura 34; debido a que a mayor longitud el tiempo que se demora en la realización del análisis también es mayor.

Figura 34. Diámetro sarta (método matriz de movilidad)



Para simular el comportamiento axial de la sarta se incorporaron a la geometría dos sistemas de resorte – amortiguador, uno en la parte inferior de la sarta y otro en la superior de la misma⁵⁵. El objetivo de introducir estos dos sistemas es simular la interacción entre la broca y la formación, sistemas que se describirán a continuación.

Es necesario aclarar que los valores correspondientes al sistema resorte – amortiguador vienen dados por el tipo de formación que se está perforando y el material de la sarta. Estos dos valores son constantes, R_r y K_r para la parte inferior y para la parte superior R_e y K_e , que corresponden a la constante de amortiguamiento y la constante de resorte respectivamente. En este caso la formación perforada está constituida de caliza dura (Limestone) y la sarta es de acero estructural, estas características fueron tomadas del estudio “The Effect of

⁵⁵ KAPITANIAK, Marcin, et al. Unveiling complexity of drill–string vibrations: Experiments and modelling. En: International Journal of Mechanical Sciences. 10. vol. 101–102, p. 324-337

Surface and Downhole Boundary Conditions on the Vibration of Drillstrings”⁵⁶, en el cual también se indican los siguientes valores:

- Superior

$$R_e = 40000 \frac{N \cdot s}{m}$$

$$K_e = 1 \times 10^7 \frac{N}{m}$$

- Inferior

$$R_r = 20000 \frac{N \cdot s}{m}$$

$$K_r = 6 \times 10^7 \frac{N}{m}$$

Las propiedades de la caliza se observan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Propiedades de la caliza

Densidad (Kg/m ³)	2920
Módulo de Young (GPa)	80
Relación de Poisson	0,25

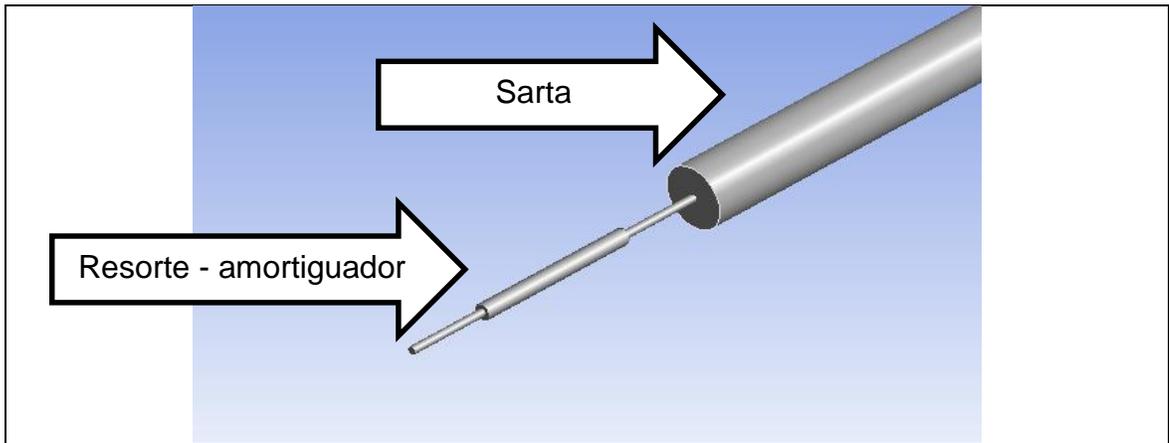
Fuente. MatWeb Material Property Data. Recuperado 30 de Enero de 2017. Del sitio web:
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=87597d62662c46a7a308b11e16c563c6&ckck=1>

Para el sistema resorte – amortiguador de la parte inferior, éste se encuentra descrito en la figura 35, destacando que trabaja con un oscilador de un grado de libertad. Este resorte tiene como finalidad simular la elasticidad de la roca a medida que es empujada por la broca y el amortiguador representa los mecanismos de pérdida de energía relacionados con la fractura y el desplazamiento de la roca y de los cortadores⁵⁷.

⁵⁶ CLAYER, F., et al. The Effect of Surface and Downhole Boundary Conditions on the Vibration of Drillstrings.

⁵⁷ Ibid, p 7.

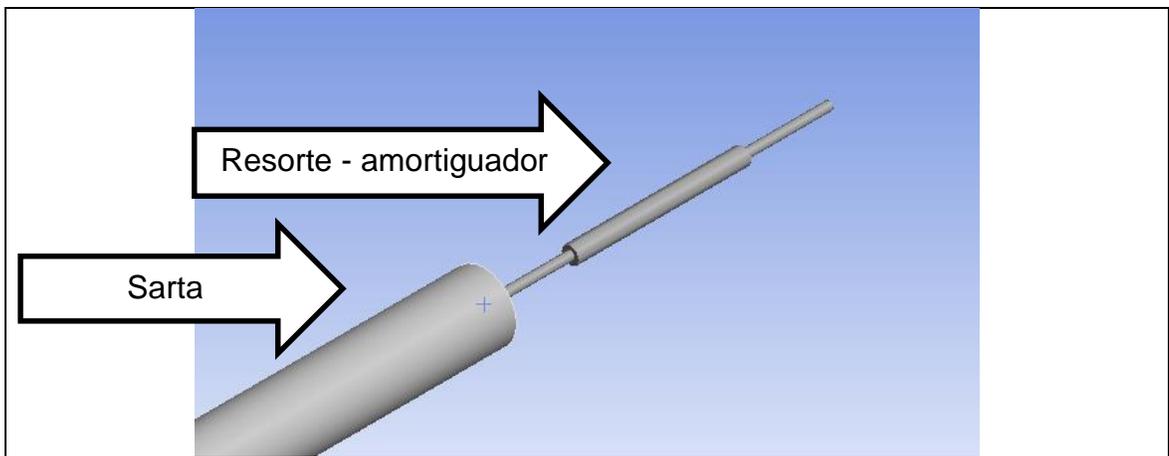
Figura 35. Sistema resorte - amortiguador (inferior)



Ahora bien, en la parte superior de la sarta el sistema resorte – amortiguador actúa como un simple oscilador de un solo grado de libertad, al igual que en la parte inferior sus valores dependen del equipo utilizado en superficie y del material del cual se encuentra construida la sarta.

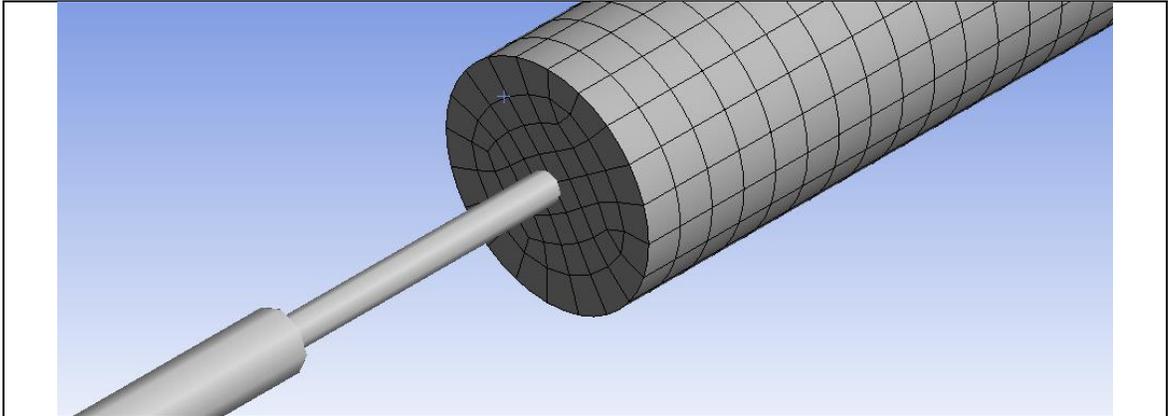
El esquema dinámico superior se puede observar de mejor manera en la figura 36.

Figura 36. Sistema resorte - amortiguador (superior)



4.1.2 Discretización de la sarta. En lo concerniente a la discretización de la sarta, la figura 37 muestra dicha malla que tiene una dimensión de 70 mm y se fue reduciendo para tener mayor aproximación de los resultados, como se aprecia más adelante en el estudio.

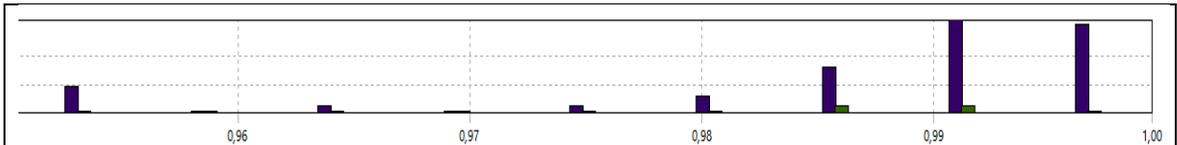
Figura 37. Discretización de la sarta



Las imágenes 38 y 39 reflejan la calidad de malla aplicada anteriormente; según fuentes de simulación consultadas, existen dos características que determinan si una malla es buena o no, estas son la ortogonalidad y la oblicuidad del elemento⁵⁸

4.1.2.1 Con relación a la ortogonalidad, éste es un parámetro que permite saber que tan bien se encuentra alineado un elemento con respecto a otro. Debe tener valores que van desde 0,6 a 1 para tener una buena calidad del elemento⁵⁹; la malla de sarta usada en el estudio tiene una ortogonalidad aceptable y se aprecia en la figura 38 con los valores que se encuentran entre 0.95 y 1.

Figura 38. Ortogonalidad de la malla

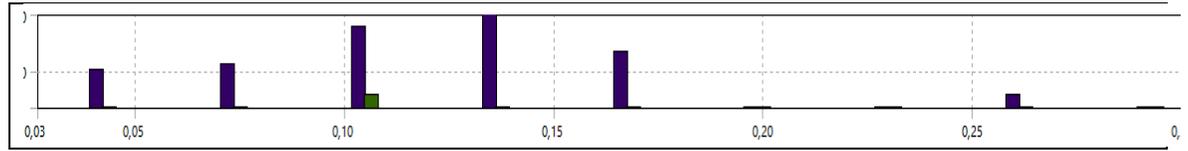


4.1.2.2 La oblicuidad o asimetría hace referencia a que tan cerca se está de una cara ideal, en la mayoría de los casos dicha cara ideal es un triángulo equilátero o un cuadrilátero equiangular; para tener un buen mallado sus valores deben encontrarse entre 0 y 0,25. En este caso la calidad de la malla se observa en la figura 39 y se aprecia que la calidad de los elementos se encuentra entre los valores que se nombran con anterioridad.

⁵⁸ TOBA, Alex. Análisis Simétrico De Impacto Ballístico. [Internet]. YouTube: 2016.

⁵⁹ Ibid.

Figura 39. Oblicuidad de la malla

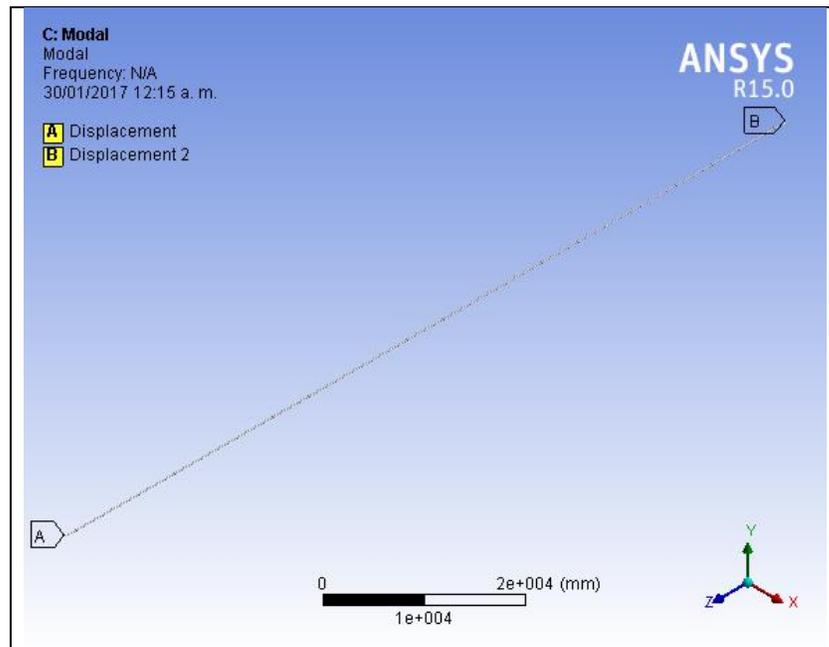


4.2 SIMULACIÓN SARTA

Con los datos que se han presentado en diversos apartados, se realizaron distintos análisis para determinar los desplazamientos de la sarta y sus velocidades, como se presenta en los análisis a continuación.

4.2.2 Análisis modal. Inicialmente se realiza el análisis modal de la geometría para determinar el comportamiento de la sarta a distintas frecuencias, también para encontrar la frecuencia de resonancia de la geometría. Así, el ejercicio se realiza con frecuencias de 0 a 100 Hz y con intervalos de 50 pasos, estos valores fueron seleccionados debido a que permiten hacer una mejor caracterización del procedimiento revelando un mayor número de datos en comparación con intervalos más pequeños. Las condiciones de frontera, son dos condiciones de desplazamiento que se aplican para permitir el direccionamiento de la sarta y se emplean únicamente en los bordes del cilindro, generando así el desplazamiento en la dirección axial de la sarta. En la figura 40 se observan dos restricciones de desplazamiento (puntos A y B):

Figura 40. Puntos de restricción (modal)



La simulación revela el comportamiento que tendrá el sólido a diferentes frecuencias; del análisis modal y a partir de dicho análisis se obtuvo como resultado el comportamiento de interés para este estudio se describe en desplazamientos verticales y se presenta cuando la frecuencia es igual a 8,95 Hz, lo que quiere decir, que la sarta está presentando resonancia en este instante.

En el Cuadro 5 se aprecia la convergencia de malla realizada para el análisis modal el cual inicia en 70 mm y finaliza en 30 mm de tamaño de malla.

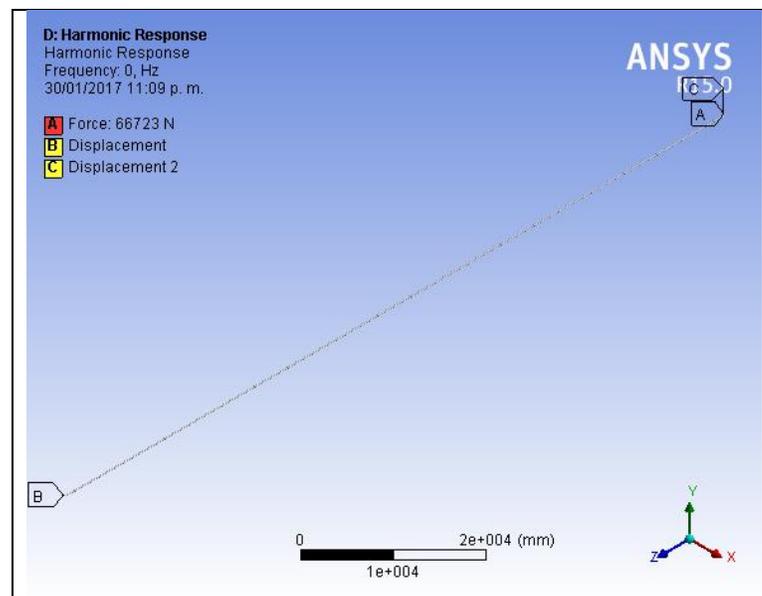
Cuadro 5. Convergencia de malla para análisis modal

Tamaño de malla (mm)	Frecuencia (Hz)
70	8,991
50	8,973
30	8,953

Teniendo la frecuencia con la cual el comportamiento de la sarta genera desplazamientos axiales que sufre la broca en operación y suponiendo que a esta frecuencia se estima el desplazamiento máximo (axial) de la sarta, se realiza un análisis llamado respuesta armónica, con el cual se pueden determinar las velocidades y desplazamientos máximos que puede llegar a alcanzar la sarta debido a las vibraciones verticales con la ayuda de la frecuencia de resonancia que se encontró en el análisis modal y con la carga que se estimó en el estudio.

En la Figura 41 se observa el diagrama de cuerpo libre que es usado para el análisis de respuesta armónica en este estudio.

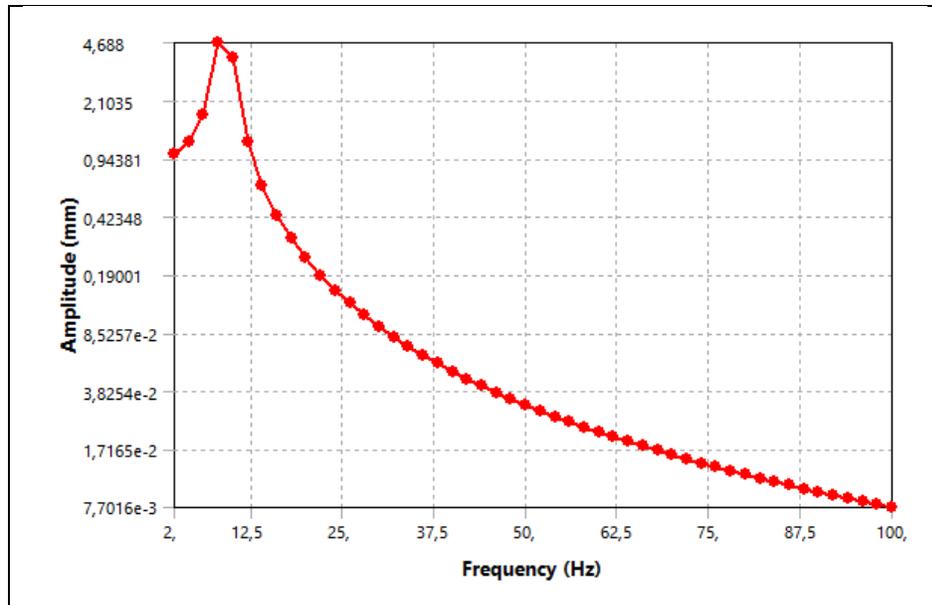
Figura 41. Aplicación de cargas (respuesta armónica)



Se denota que el diagrama de cuerpo libre exhibe las dos restricciones de desplazamiento en la sarta y la fuerza que se aplica, además se hace necesario integrar al software la frecuencia de resonancia que se halló en el análisis modal.

En la figura 42 se evidencia el resultado de desplazamiento máximo de la sarta debido a las condiciones aplicadas en el extremo superior e inferior de esta.

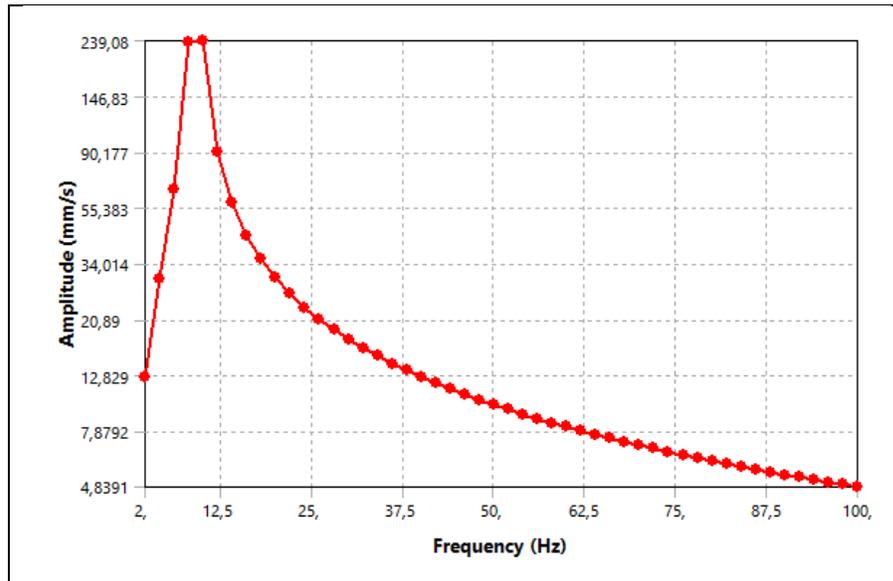
Figura 42. Desplazamiento axial de la sarta (respuesta armónica)



Además, como se ilustra en la figura 42, el desplazamiento máximo se presenta alrededor de 8,95 Hz y su magnitud es de 4,69 mm; la amplitud de la onda tiende a 0 debido a que la gráfica se realiza a partir del desplazamiento axial de la sarta que se ha simulado. Al aumentar la frecuencia de la sarta, el comportamiento de esta tiende a ser en forma de espiral razón por lo cual el desplazamiento axial se reduce y no es de interés en este estudio.

En la figura 43 se indica la velocidad axial máxima alcanzada por la sarta estudiada debido a las vibraciones verticales, el valor máximo equivale a 239,08 mm/s y se presenta cuando la frecuencia de la sarta es de alrededor de 8,95 Hz. El valor de 239,0 mm/s permite tener una idea de cuál es la velocidad de impacto que tiene la broca contra la formación. Para continuar con el análisis dinámico que se muestra más adelante de este estudio, el valor de la velocidad que se halló con anterioridad se utiliza para describir los esfuerzos sufridos por el cortador.

Figura 43. Velocidad axial de la sarta (respuesta armónica)

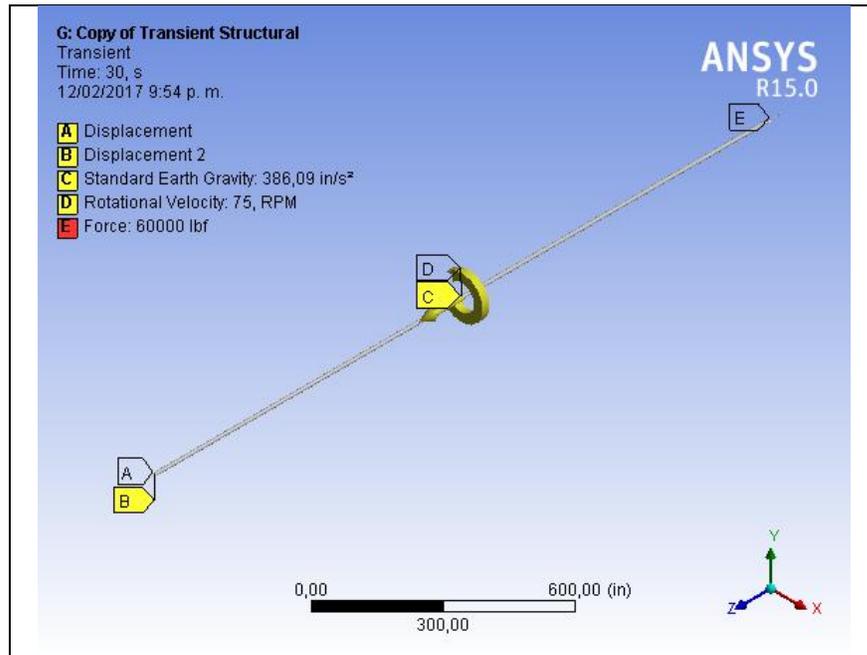


4.2.3 Análisis transiente (variación de tiempo). Según el estudio “Modeling and Analysis of Axial and torsional Vibrations of Drillstrings with Drag Bits”, las vibraciones axiales o los desplazamientos axiales se presentan cuando el peso o fuerza sobre la broca no es lo suficiente alto, debido a que en la interacción broca – formación no se presenta ninguna ruptura de la formación sino que se presenta un choque entre los cortadores y la formación haciendo que se desplace de manera axial⁶⁰.

A continuación se presentan las condiciones de frontera de la sarta para realizar el análisis transiente. En este sentido, como se observa en la figura 44, se aplica una carga transiente, es decir, variada con el tiempo, que en este caso corresponde una fuerza que va desde 0 Lbf hasta 60000 Lbf (límites de fuerza sobre la broca según el fabricante) en 30 segundos de análisis; a su vez se le agrega la fuerza gravitacional y dos desplazamientos para permitir el sentido de movimiento.

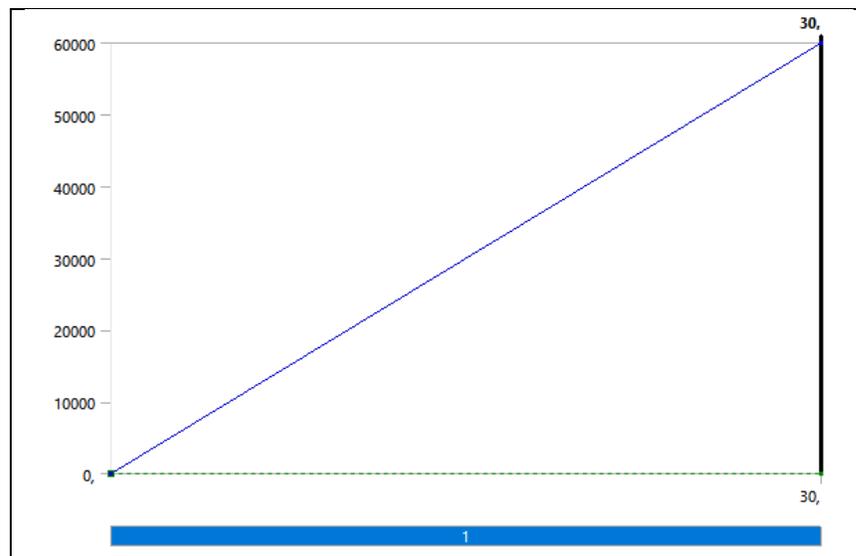
⁶⁰ KAMEL, Jasem y YIGIT, Ahmet. IPTC. (20-22 Enero 2014). Doha, Qatar.:2014.

Figura 44. Condiciones de frontera de la sarta



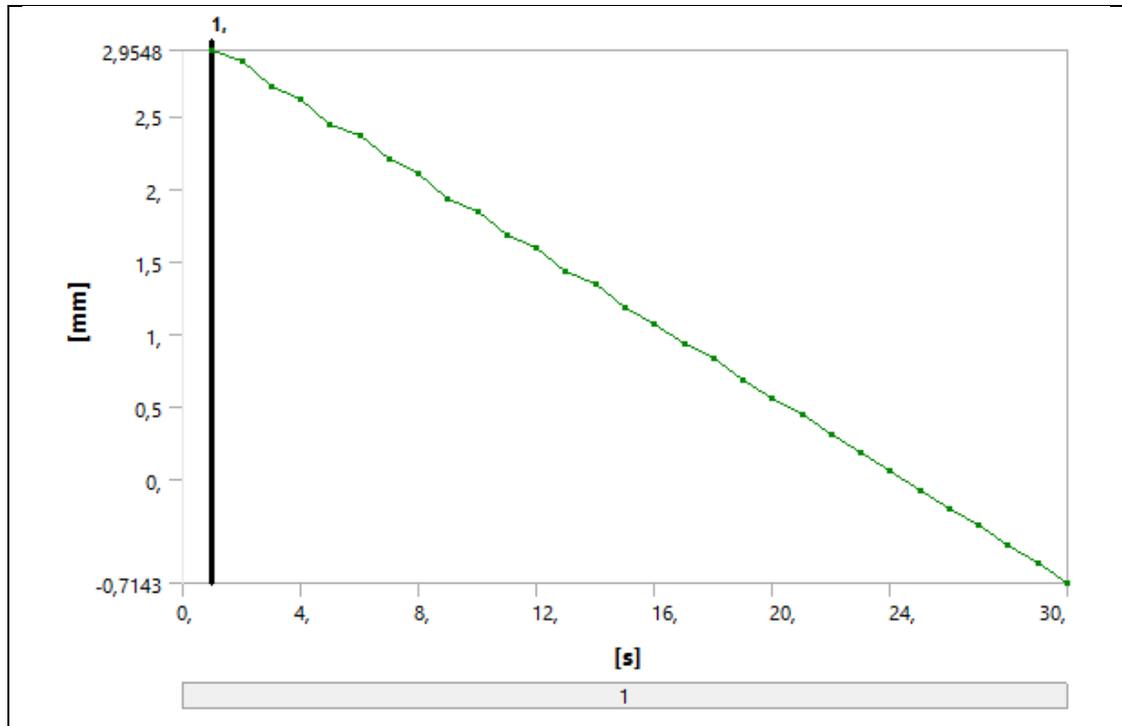
En la figura 45 se observa la fuerza aplicada sobre la sarta la cual va de 0 a 60000 Lbf y el periodo de tiempo va de 0 a 30 segundos de análisis. Se seleccionan de 0 a 60000 Lbf debido a que según el fabricante de la broca, la fuerza máxima que puede soportar la herramienta es de 60000 Lbf.

Figura 45. Fuerza transiente



4.2.4 Resultado transiente. Para referirse al desplazamiento axial de la sarta en función de la fuerza y el tiempo en que se aplica, en la figura 46 se observa que el desplazamiento máximo obtenido se genera en tiempo 1 y el desplazamiento mínimo se presenta cuando se aplica la fuerza máxima, es decir, el desplazamiento es inversamente proporcional a la fuerza; en caso de aplicar la máxima fuerza, se obtiene el menor desplazamiento.

Figura 46. Desplazamiento de la broca dependiendo de la carga aplicada

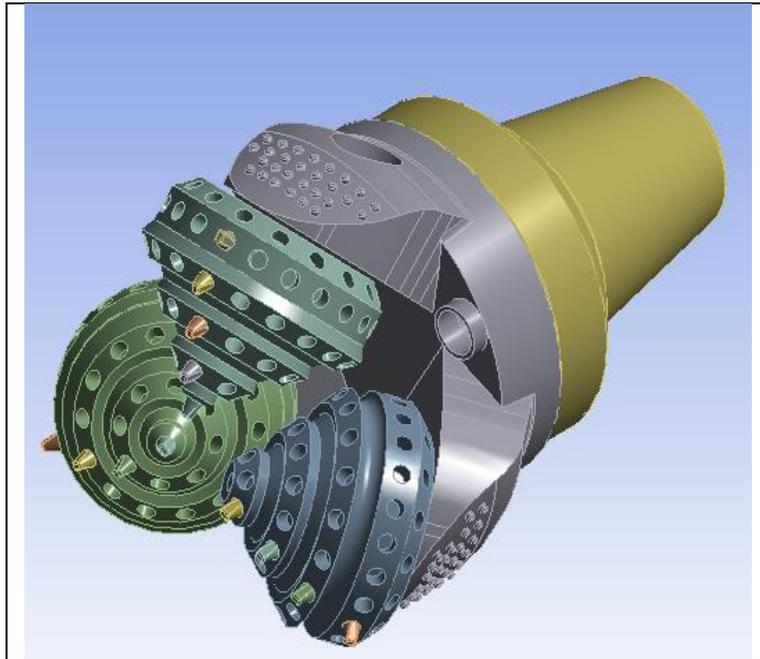


4.3 SIMULACIÓN BROCA

Es significativo resaltar que la simulación en la broca se realiza a partir de los resultados obtenidos previamente. Partiendo de esto, se presenta a continuación una representación en 3D del modelo de la broca, su discretización, el tipo de materiales usados, las cargas aplicadas y los resultados obtenidos.

En la figura 47 se presenta el diseño 3D de la broca.

Figura 47. Broca tricónica 3d



4.3.2 Materiales de la broca. En el Cuadro 6 se aprecian los materiales y las propiedades mecánicas de cada uno de estos.

Cuadro 6. Materiales y propiedades mecánicas de la broca

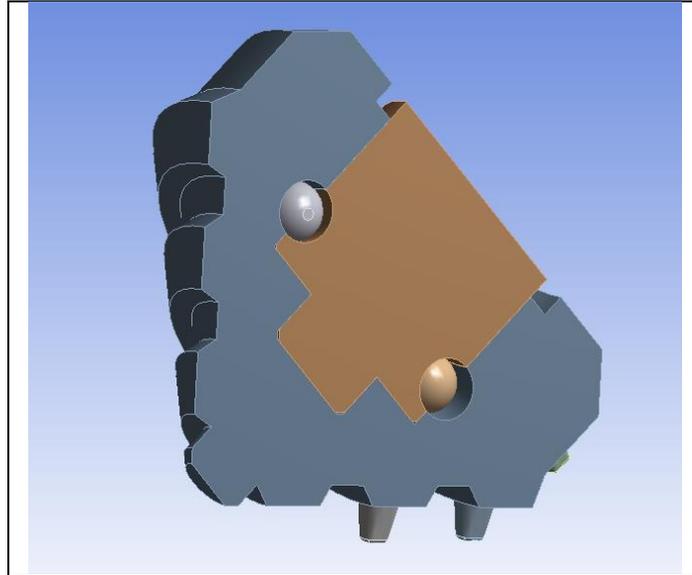
	Dientes	Cuerpo y conos	Rodamientos
Tipo de material	Carburo de tungsteno	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Módulo de Young (GPa)	686	200	220
Relación de Poisson	0,22	0,3	0,3
Densidad (Kg/m ³)	15880	7870	7750
Esfuerzo ultimo (MPa)	820	-	630
Esfuerzo de cedencia (MPa)	530	250	-

Fuente. Tungsten carbide an overview. Recuperado 27 de Enero del 2017. Del sitio web de nombre: <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1203>

El cono de estudio se trabaja de manera simétrica, a su vez se disminuye el número de cortadores ya que con 3 es suficiente para tener un resultado coherente como afirma *Han et*, lo cual permite realizar una simplificación de la geometría para disminuir el gasto computacional considerablemente⁶¹; en la figura 48 se observa el resultado de este proceso.

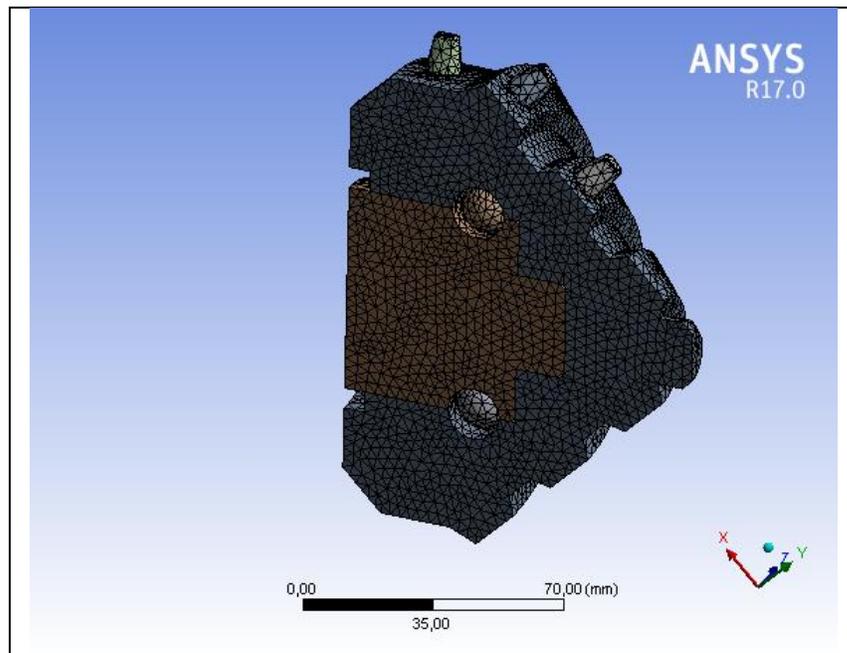
⁶¹ HAN, Chuanjun, et al. Mechanical performance analysis of hollow cylindrical roller bearing of cone bit by FEM. En: Petroleum. vol. 1, no. 4, p. 388-396

Figura 48. Simplificación broca



4.3.3 Discretización de la broca. La malla presente en la broca es tetraédrica, este tipo de malla permite el enmallado mucho más fácil en superficies complejas⁶² como la que se presenta en la imagen 49, la dimensión del enmallado es de 3 mm (inicialmente) en todas las zonas del sólido.

Figura 49. Discretización broca



⁶² TOBA,Alex. Análisis Simétrico De Impacto Ballístico. [Internet]. YouTube: 2016.

4.3.4 Condiciones de contorno. La identificación de las condiciones de borde es uno de los parámetros más importantes para la realización del estudio, pues todos los análisis realizados derivan en la aplicación de cargas y restricciones. A continuación se presenta un análisis estático para conocer los esfuerzos que están presentes tanto en el cuerpo como en los cortadores de la broca.

En este análisis se aplica la carga de manera individual en cada cortador y en relación con lo presentado por Rashidi; Hareland y Wu⁶³, la fuerza de cada cortador que se encuentra en contacto con la formación en el fondo es equivalente a la WOB aplicada y se puede presentar como se muestra en la ecuación a continuación:

$$WOB = n_t * F$$

Dónde:

F: es la fuerza de cada cortador

n: número de insertos en contacto con la formación

WOB: Peso sobre la broca

Despejando la F de la ecuación anterior:

$$F = \frac{WOB}{n_t}$$

Suponiendo que cuando la broca está en contacto con la formación, el número de dientes que están soportando la carga sea 12, la ecuación queda de la siguiente manera:

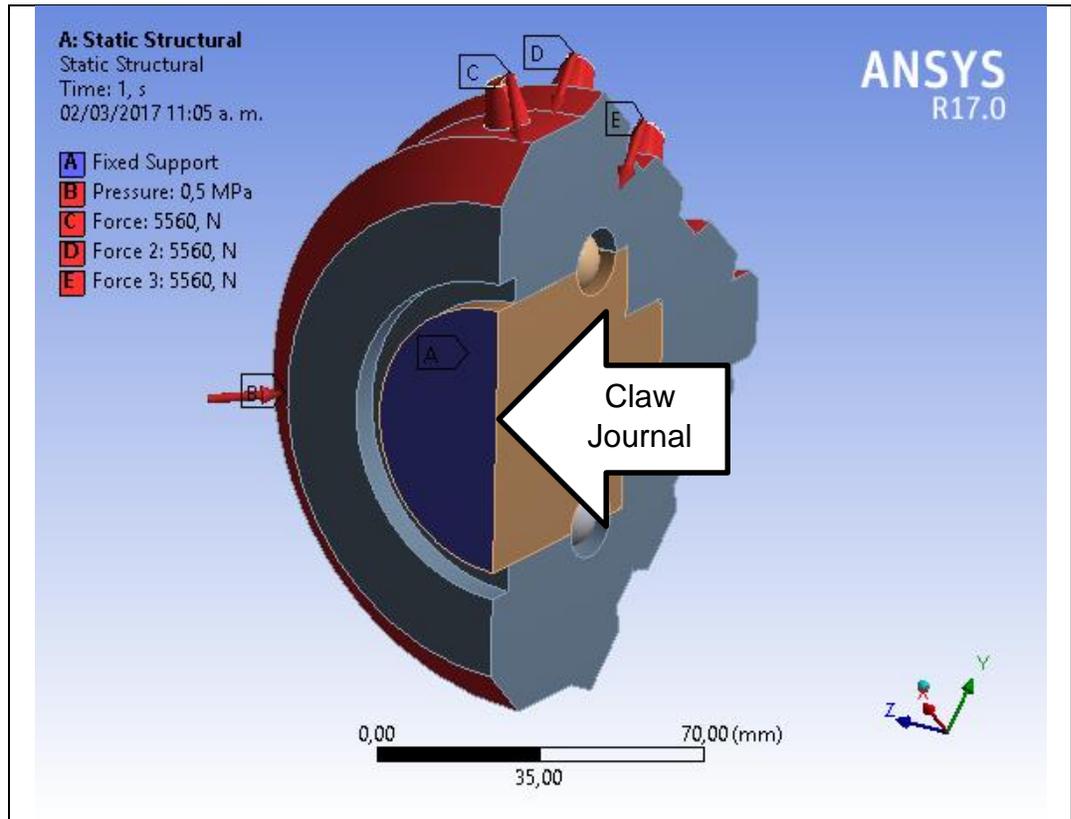
$$F = \frac{15000 \text{ lbf}}{12} = \frac{66723,32 \text{ N}}{12}$$

$$F = 1250 \text{ Lbf} = 5560 \text{ N}$$

Por consiguiente, cada cortador tendrá una fuerza de 5560 N; además el claw journal se fija y se le agrega la presión de los fluidos dentro del pozo cuyos valores pueden variar de 0,2 a 0,8 MPa, en este estudio el valor se toma en 0,5 MPa como se observa en la figura 50.

⁶³ RASHIDI, Behrad; HARELAND, Geir y WU, Zebing. Performance, simulation and field application modeling of rollercone bits. En: Journal of Petroleum Science and Engineering. 9. vol. 133, p. 507-517

Figura 50. Condiciones de borde de la broca

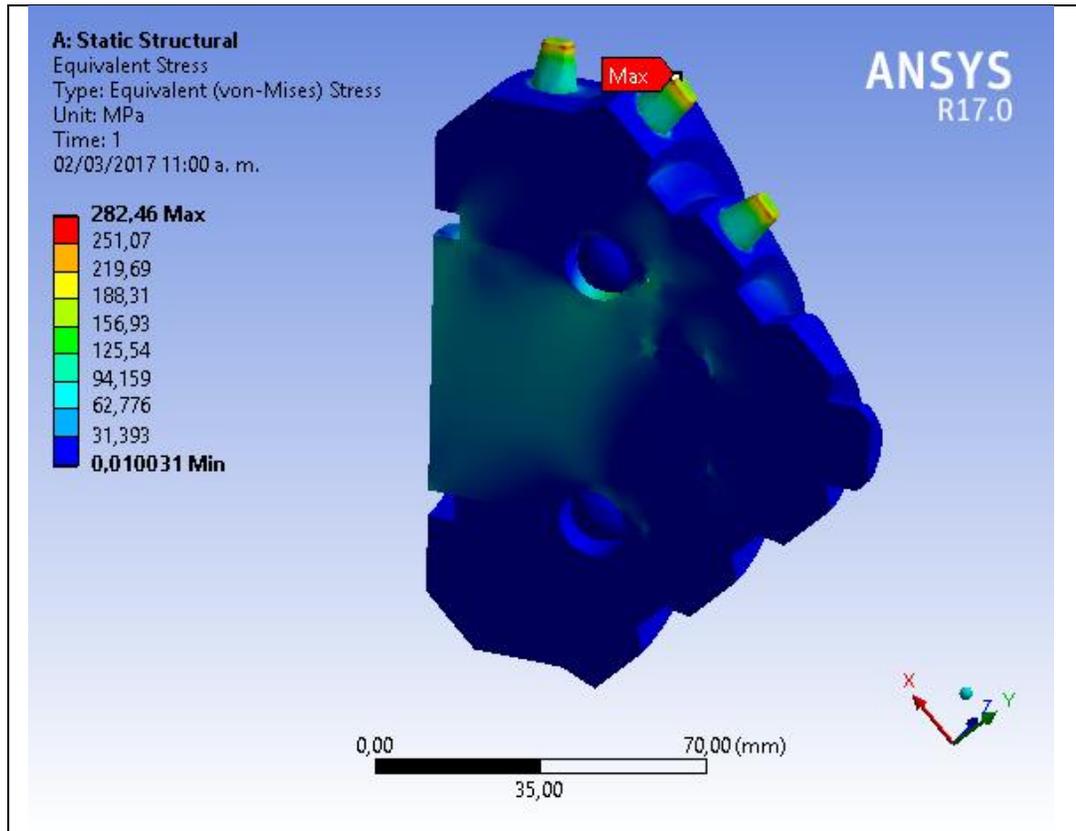


4.3.5 Resultados. Después de realizados los análisis planteados en los apartados anteriores, los resultados obtenidos concuerdan con aquellos presentados en diferentes artículos científicos, tales como “Mechanical performance analysis of hollow cylindrical roller bearing of cone bit by FEM”⁶⁴, en el cual los esfuerzos sufridos en la broca no son lo suficientemente altos para que la herramienta de corte falle; según el estudio es necesario realizar pruebas de fatiga para conocer el momento exacto cuando la herramienta empieza a presentar fallas.

Así, como se observa en la Figura 51, el esfuerzo máximo se presenta en la zona donde el cortador se encuentra en contacto con la formación, ya que esta parte de la pieza es la que soporta todo el WOB de la operación de perforación. El esfuerzo presenta un valor de 282,46 MPa lo cual indica que el material no falla, ya que su límite de cedencia es de 530 MPa.

⁶⁴ HAN, Chuanjun, et al. Mechanical performance analysis of hollow cylindrical roller bearing of cone bit by FEM. En: Petroleum. vol. 1, no. 4, p. 388-396

Figura 51. Esfuerzos von mises (1)



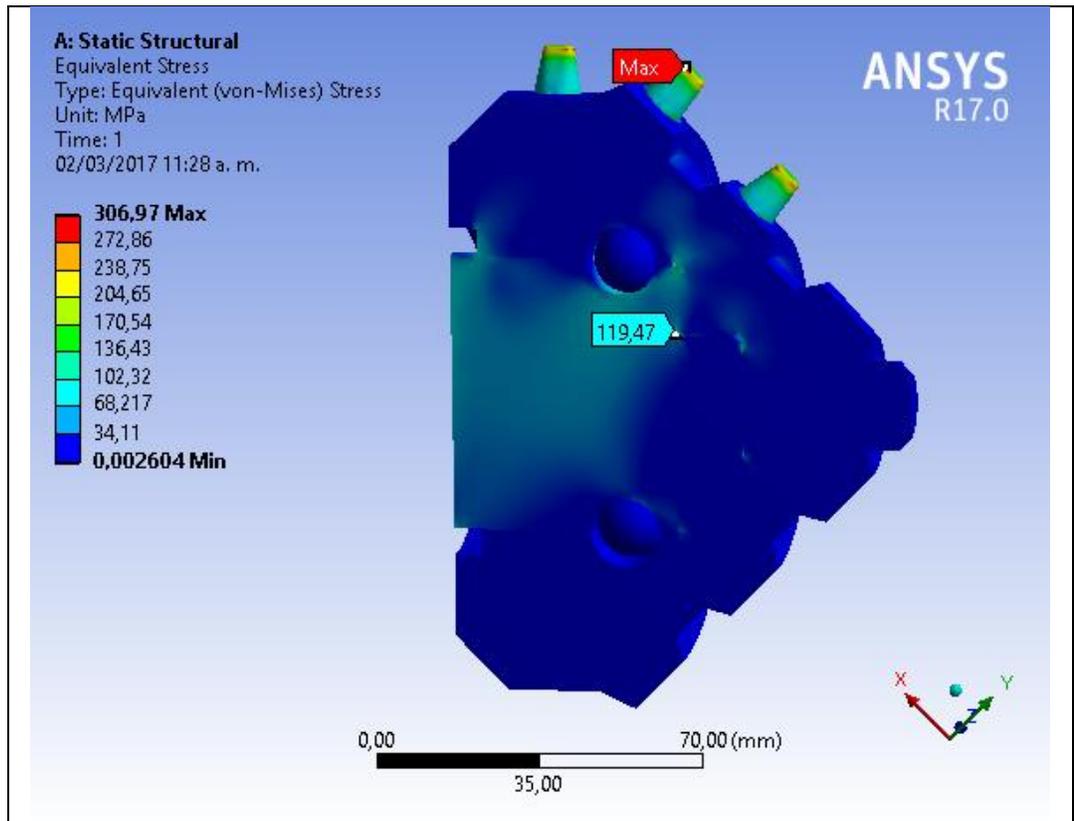
Para verificar la veracidad de los resultados obtenidos, se utilizan diferentes tamaños de malla de la geometría o convergencia de malla, cuyos resultados se pueden ver en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Convergencia de malla

Tamaño de malla (mm)	Von Mises (MPa)
3	282,46
2,5	294,74
2	306,12
1,8	306,97

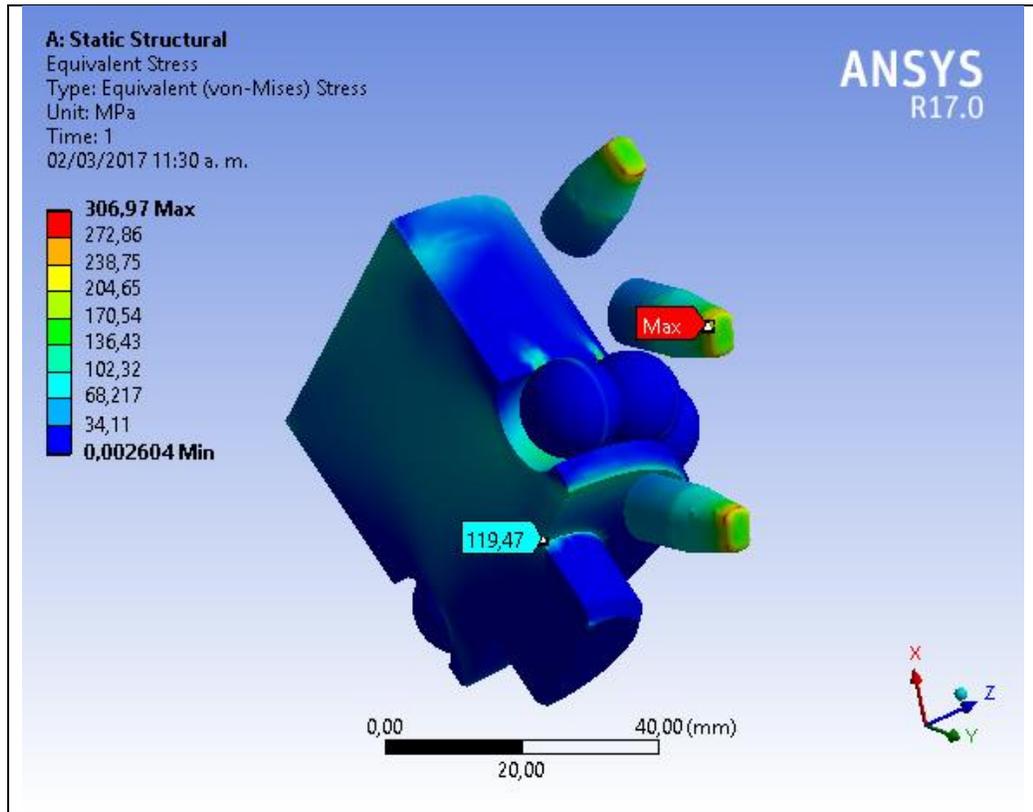
Del ejercicio se obtiene como resultado que el esfuerzo en los cortadores se estabiliza en los 306,97 Mpa, como se puede observar en la figura 52.

Figura 52. Esfuerzos von mises (2)



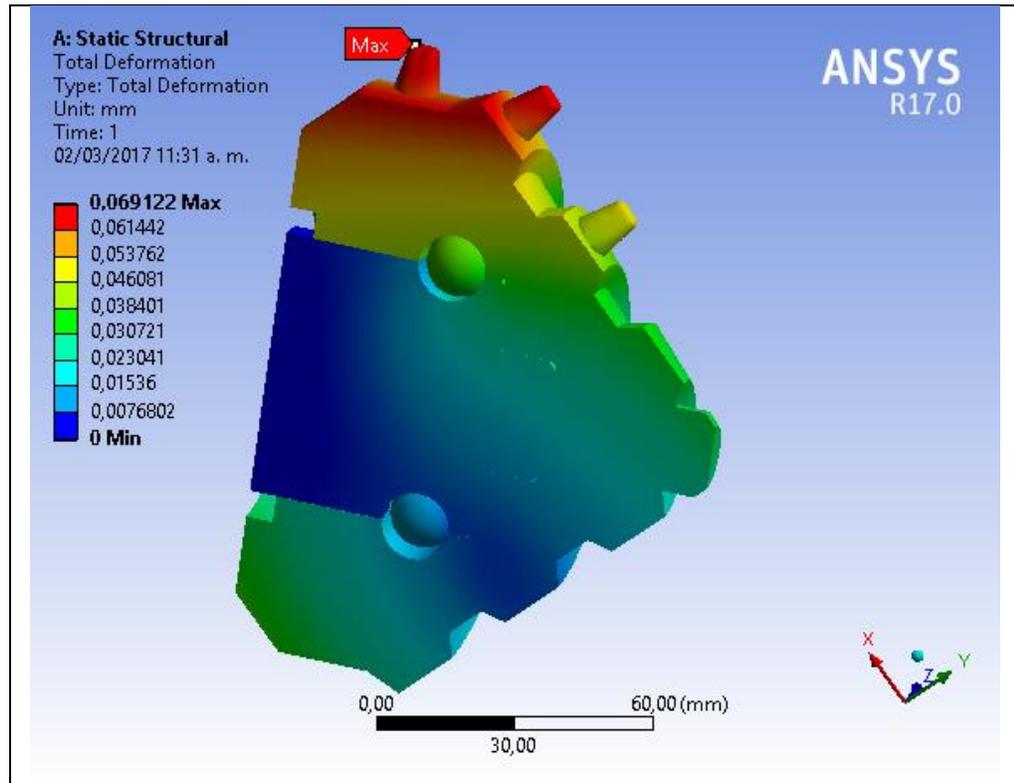
La convergencia a este análisis, gracias a la herramienta que presta el software, solamente se realiza en las zonas donde se cree que puedan existir altos esfuerzos en la broca y se convierte en una ventaja, ya que permite un enmallado muy fino en las zonas críticas. Como resultado se estima que el máximo esfuerzo se presenta en el cortador debido a que esta zona es la que se encuentra en contacto con la formación como se presenta en la figura 52; en el claw journal y el cono, el esfuerzo máximo sufrido por la herramienta no supera los 120 MPa razón por la cual no se presenta ninguna falla en estas dos zonas pues no supera el límite de cedencia de los materiales como se indica en las figuras 52 y 53.

Figura 53. Esfuerzo von mises máximo



En la figura 54 se observa el desplazamiento que sufre la broca en este análisis debido a las cargas aplicadas, teniendo un desplazamiento máximo de 0,0691 mm.

Figura 54. Desplazamiento de la broca



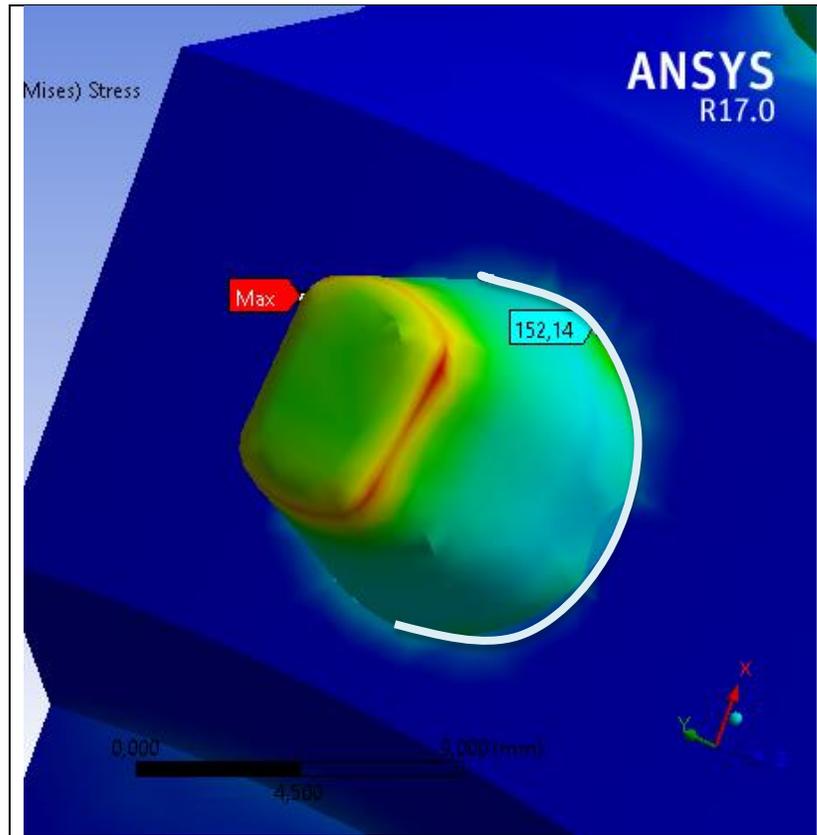
4.4 DELAMINACIÓN DEL CORTADOR

En las brocas tricónicas, los cortadores son introducidos a presión en los orificios de los conos de acero, esta unión entre la broca y el inserto tiene una resistencia mecánica de alrededor 1900 MPa⁶⁵.

Con respecto a lo anterior, en la figura 55 se incluye una curva de color blanco con el fin de marcar la zona de delaminación del cortador, donde se evidencia la magnitud del esfuerzo que se presenta en este estudio.

⁶⁵ QIAN,J., et al. Polycrystalline diamond cutters sintered with magnesium carbonate in cubic anvil press. En: International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 3. vol. 31, p. 71-75

Figura 55. Delaminación del cortador



Como se puede observar en la imagen 55, el esfuerzo que sufre la unión equivale a 152 MPa el cual no supera la resistencia mecánica de esta unión que es de 1900 MPa como se indicó anteriormente y no existe desprendimiento del cortador.

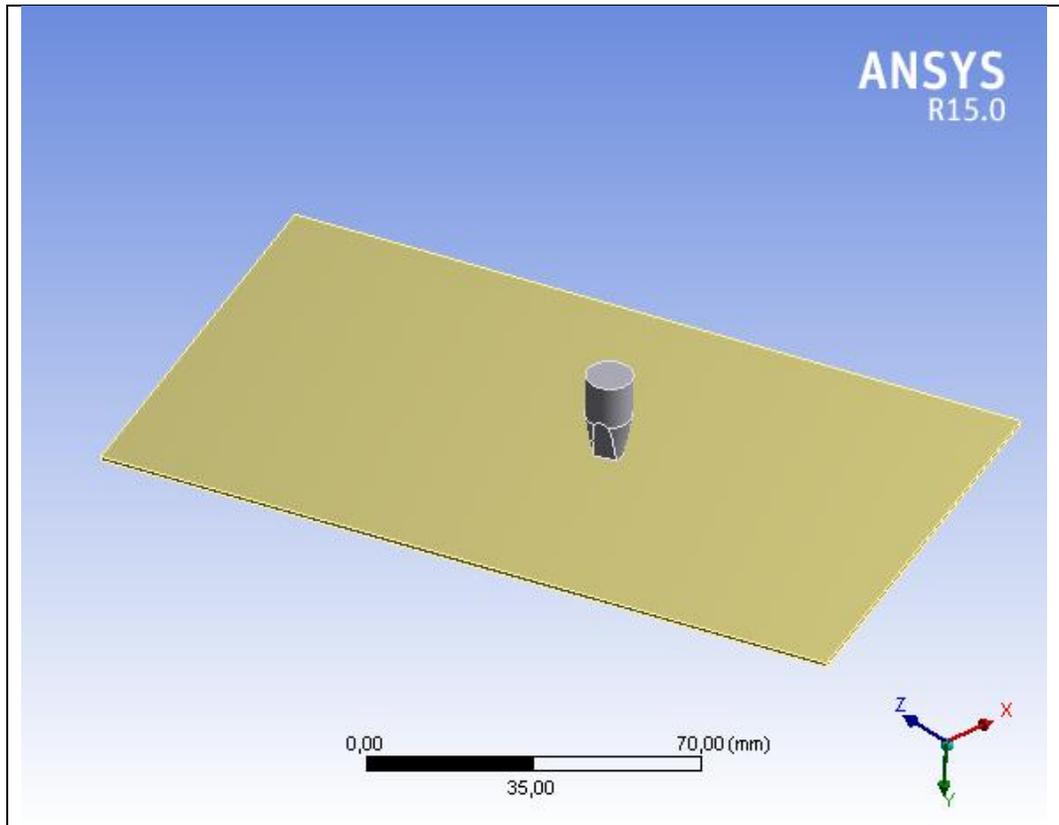
4.5 SIMULACIÓN DINÁMICA EN CORTADOR

El cortador es uno de los elementos más importante de la broca ya que es aquel que permite triturar la formación, por esta razón esta sección de la investigación se centra en analizar el impacto que tiene un diente de la broca contra la formación debido a la velocidad generada por el desplazamiento axial de la sarta que se puede observar en la figura 43.

En este caso se realiza un análisis dinámico que permite determinar esfuerzos de un objeto al chocar contra otro, por ejemplo, un proyectil al impactar contra una pared. Para este estudio en particular se usó el cortador de la broca y la formación.

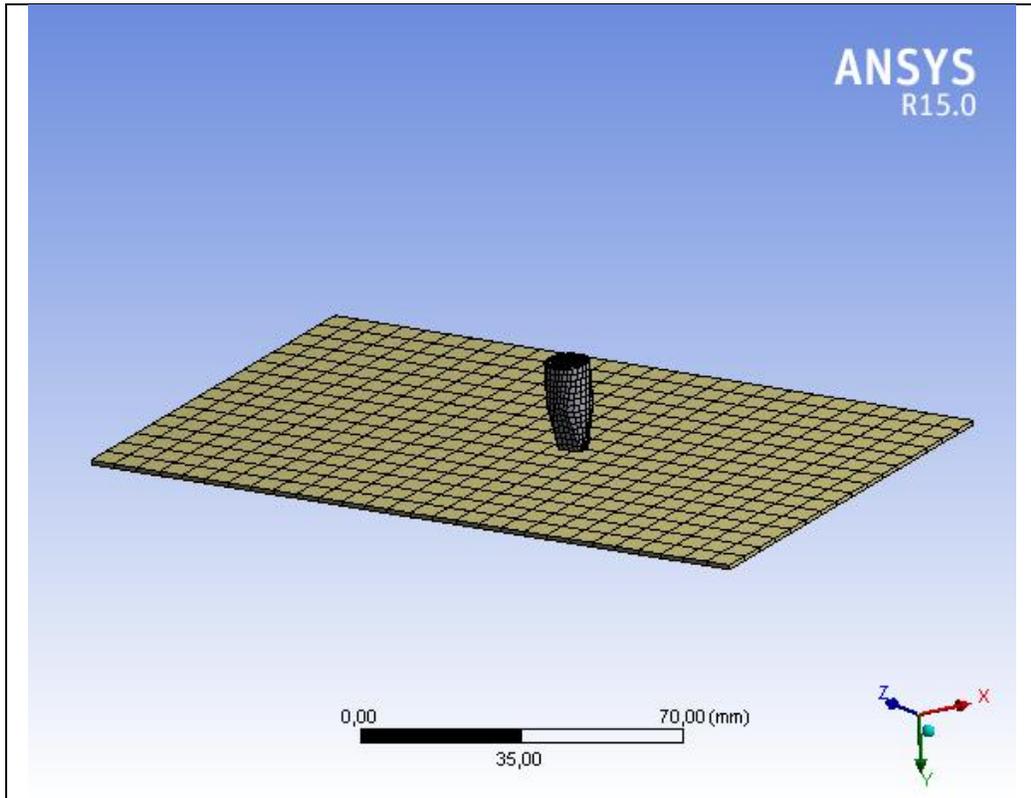
4.5.2 Geometría. La figura 56 sirve para ilustrar un modelo simple, que corresponde a un diente de la broca que se encuentra separado de la superficie 0,005 mm y la formación se simula como una placa rectangular de 1 mm de espesor.

Figura 56. Geometría (Análisis dinámico)



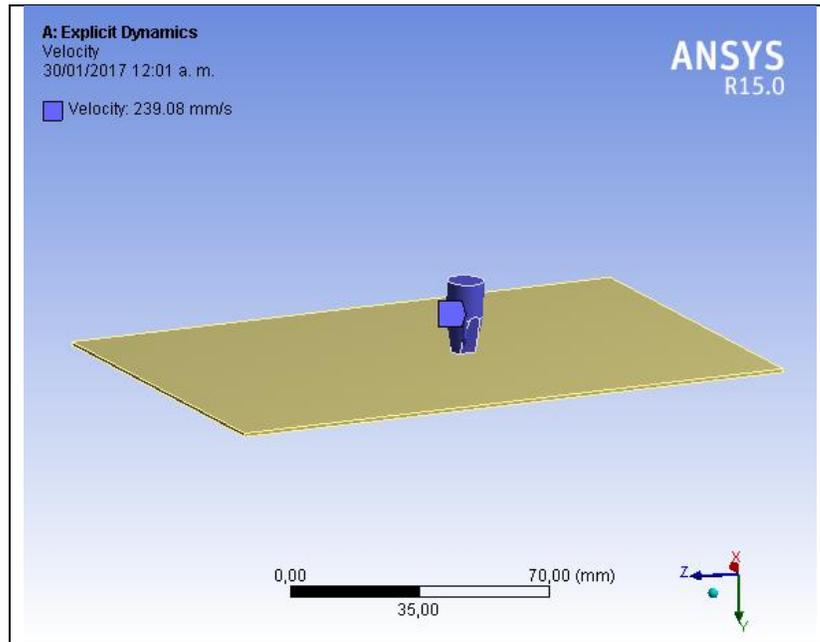
4.5.3 Discretización. La malla en este tipo de análisis se obtiene mediante el enmallado automático, debido a que el análisis dinámico tiene un gasto computacional relativamente alto, en la figura 57 se observa la malla de la geometría usada.

Figura 57. Malla (Análisis dinámico)



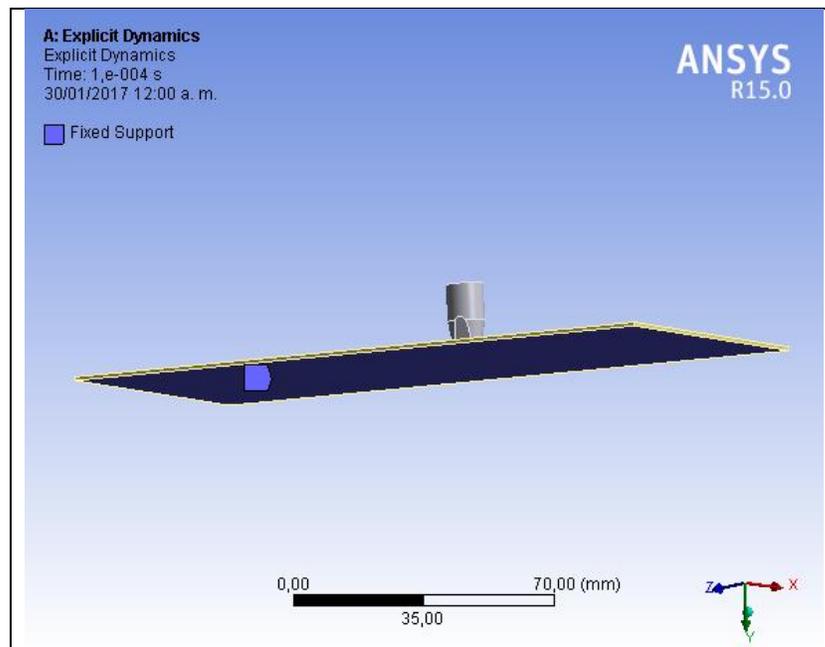
4.5.4 Condiciones de borde. Como condición de frontera se aplica la velocidad al cuerpo del cortador que se ha determinado en el análisis de respuesta armónica, como se muestra en la Figura 58.

Figura 58. Condiciones de borde (1)



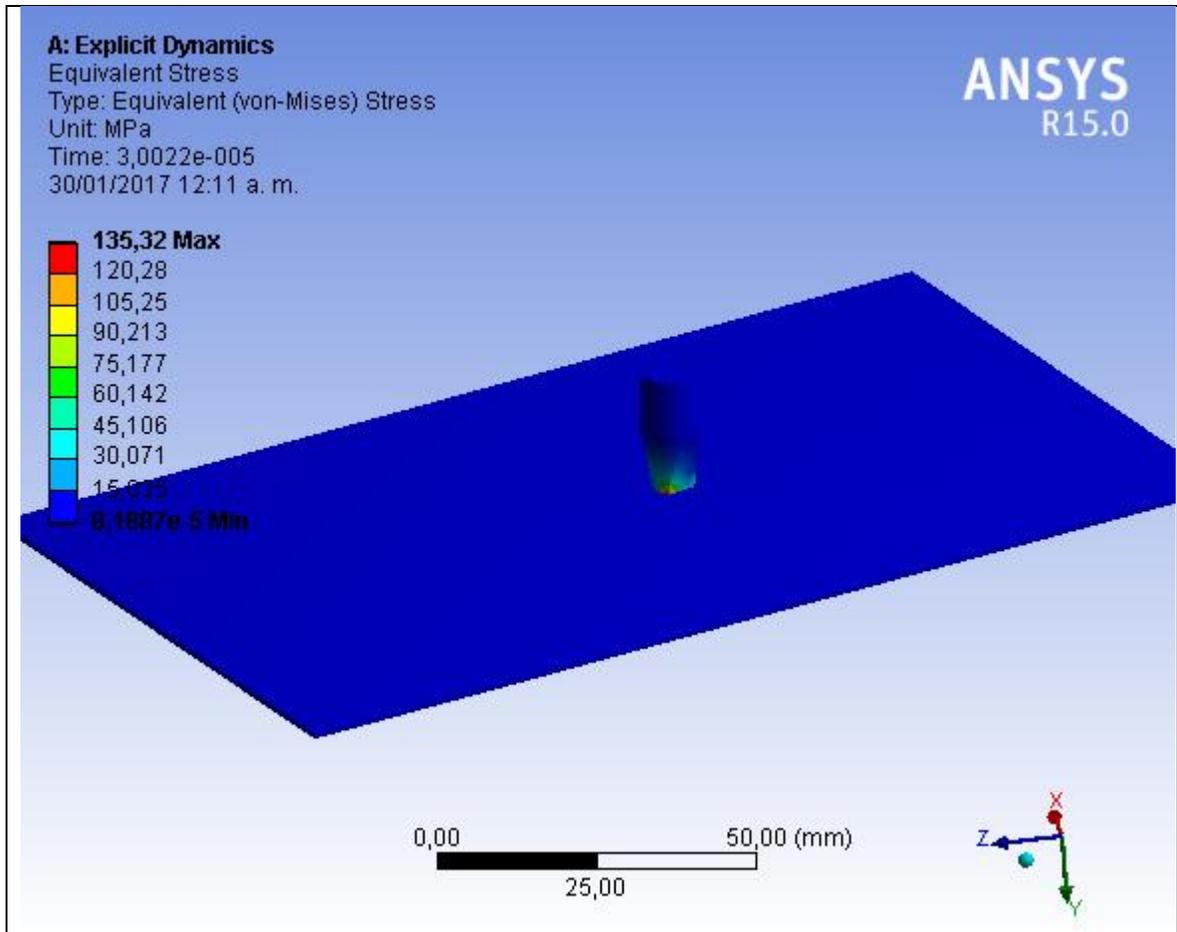
En la Figura 59 se fija la parte inferior de la formación simulando que ésta se encuentra en reposo.

Figura 59. Condiciones de borde (2)



4.5.5 Resultados. En la figura 60 se muestra el resultado de la simulación dinámica y se estima que el esfuerzo máximo se presenta en el momento de impacto contra la formación, con una magnitud de 135 MPa, sin ningún indicio de fractura del cortador; debido a que el esfuerzo se presenta en la interfaz entre el cortador y la formación; la formación sí se fractura como consecuencia del impacto debido a que el esfuerzo último de ésta equivale a 100 MPa.

Figura 60. Esfuerzo von mises



5 CONCLUSIONES

- Como consecuencia a las vibraciones axiales en la operación, la broca puede llegar a sufrir fractura en sus conos según los resultados obtenidos en el estudio que logra alcanzar un esfuerzo de 120 MPa; esto debido a que los esfuerzos en la broca pueden llegar a superar el esfuerzo último del material causando así la ruptura del mismo.
- Al modelar el comportamiento de la sarta se encuentra que la masa es el factor determinante en este proceso, ya que al asumir la masa como un valor constante, los resultados no varían (análisis nodal y análisis armónico) lo que representa un menor gasto computacional, lo anterior se presenta siempre y cuando el diámetro y la longitud de los cilindros varíen.
- La metodología implementada permite encontrar los desplazamientos y velocidades que puede alcanzar la sarta y la broca, producto de las vibraciones axiales; esto se realiza mediante una serie de análisis que se deben trabajar en conjunto para poder conseguir buenos resultados.
- Al analizar la información consultada se encontró que para reducir las vibraciones en la operación es determinante la correcta selección del tipo de broca, es decir se vuelve fundamental tener conocimiento de las condiciones de operación de la misma. Para la determinación de dichas condiciones se realiza una caracterización con el fin de dimensionar las posibles situaciones que se puedan presentar; algunas de las características que representan la broca son: geometría, especificaciones de diseño y ROP, entre otros.
- Al realizar la investigación se estableció que con esta metodología es posible analizar la ocurrencia o no de las fallas estudiadas. Es una metodología que permite hacer una predicción aproximada de lo que podría ocurrir, pero su uso debe hacerse con precaución debido a que se asumieron suposiciones que podrían no ser cercanas a lo ocurrido en la realidad.
- Se determinó que las fallas seleccionadas, que fueron simuladas con el software Ansys, están estrechamente relacionadas con la velocidad de impacto que sufre la herramienta; aunque la herramienta en el estudio no supera los 300 MPa, se debe tener en cuenta que en la realidad los esfuerzos son cíclicos debido a los desplazamientos axiales que producen las vibraciones en la sarta. Si las vibraciones en la sarta aumentan, tiene como consecuencia que las velocidades alcanzadas por la broca son mucho mayores, lo que conllevaría a un mayor valor de esfuerzo que sufre por la herramienta de corte.

6 RECOMENDACIONES

- Se recomienda incluir mayor número de parámetros de perforación como temperatura en el cortador y coeficientes de fricción, entre otros, para tener una mejor caracterización del proceso.
- Es necesario investigar a fondo los comportamientos que tienen las formaciones que se perforan en el territorio nacional, con el fin de poder conocer su constante de rigidez y amortiguamiento y de este modo poder implementar el modelo que se plantea en este estudio.
- Para mejorar la aproximación del comportamiento mecánico de la broca es necesario realizar estudios de fatiga, que permitan establecer el momento exacto de la falla de la herramienta.
- Para realizar el análisis de vibración axial no fue necesario conocer los puntos de contacto entre la sarta y la formación, pero se recomienda evaluar la necesidad de encontrarlos o no.
- Se recomienda realizar un análisis de fatiga para determinar el momento exacto de la falla de la broca debido a las vibraciones verticales o axiales.

BIBLIOGRAFIA

ALVAREZ, Francisco y VEGA, José. Analisis De Falla En Los Sistemas De Bombeo Mecanico Del Campo Cantagallo. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2008.

APARICIO MORALES, Ángel. Análisis De La Correlación Entre Parámetros De Control En Máquinas Pilotadoras Y Las Propiedades Resistentes Del Terreno. Barcelona.: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009. p. 49.

ARIAS, Dick. Tipos De Fluidos De Perforación Más Comunes. [Electronic(1)]. 11 de Septiembre de 2015. [Consultado el 27 de Junio de 20162016]. Disponible en: <http://perfob.blogspot.com.co/2015/09/tipos-de-fluidos-de-perforacion-mas.html>

BAKENOV, A. S., et al. Enhanced Drilling Performance Through Controlled Drillstring Vibrations. p. 1-8

BARBOSA, Nelson y PINZON, Lina. Análisis de la influencia del fenómeno stick-slip en los esfuerzos de los cortadores de una broca P

DC, mediante simulación por elementos finitos. Vol. 8, no. 2, p. 98-110

BARRIENTOS RIOS, Gabriel y RAZETO MIGLIARO, Mario. Análisis De Fallas En Equipos Industriales. 2014. 228 p.

BRIONES LUNA, Cesar, Alejandro y LEON HIDALGO, Ruddy, Katherine. Estudio De La Eficiencia De Las Brocas Usadas En Las Operaciones De Perforación En La Formación Tiyuyacu, En Pozos Del Campo Sacha. Quito.: Escuela Politécnica Nacional., 2015. p. 36.

CABRERA, Raul. Deterioro De Los Materiales. [Electronic(1)]. 13 de Septiembre de 2011. [Consultado el Febrero 2017] Disponible en: <http://es.slideshare.net/raecabrera/capitulo-5-deterioro-de-los-materiales-9247562>

CATEC. Análisis Modal. [Electronic(1)]. [Consultado el 13 de Agosto de 20162016]. Disponible en: <http://www.catec.aero/materiales-y-procesos/lisis-modal.htm>

CEDRO, Y. y DONALD, J. S. Vibración En La Sarta De Perforación. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010a. p. 13-14.

CHESHER, Steven William, et al. Operator/Service Company Research Collaboration Leads to Reduced Downhole Vibration Levels and Improved Drilling Performance. (04). Society of Petroleum Engineers, 2010.

CLAYER, F., et al. The Effect of Surface and Downhole Boundary Conditions on the Vibration of Drillstrings.

CSi. CSi Analysis Reference Manual for SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge®. Berkeley: 2015. 552 p.

ECHEVERRIA, Ricardo. Fractura De Materiales. Universidad Nacional del Comahue, 2003.

ESPEJO MORA, Edgar. Análisis De Falla. Bogota D.C.: 2012.

GARCIA, German. Evaluación De Los Elementos De Desgaste De Las Brocas Tricónicas En El Piedemonte Llanero. Bogotá D.C.: Universidad de América, 2004. p. 32.

HAN, Chuanjun, et al. Mechanical performance analysis of hollow cylindrical roller bearing of cone bit by FEM. En: PETROLEUM. Vol. 1, no. 4, p. 388-396
HUANAY ROJAS, Judid, Yesenia. Perforación Rotativa Con Triconos. [Print(0)]:Huancayo: 2012. 22

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El instituto, 2008. 110 p.

-----. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 4490. Bogotá: El instituto, 1998, 12 p.

-----. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 5613. Bogotá: El instituto, 1998. 8 p.

JIMENEZ DE, La Cruz y DOMINGUEZ CARDONA, John Édison. Analisis De Fallas Y Errores En Los Procedimientos De Control De Pozos En Situaciones Anormales Durante La Perforacion. 2011. p. 53-54.

JIMENO, C. L. Manual De Perforación Y Voladura De Rocas. 2da ed. Madrid: 2003. 70 p. ISBN 84-505-7007-7

KAMEL, Jasern y YIGIT, Ahmet. Modeling and Analysis of Axial and Torsional Vibrations of Drillstrings with Drag Bits. En: IPTC.(20-22 Enero 2014). Doha, Qatar.: 2014.

KAPITANIAK, Marcin, et al. Unveiling complexity of drill-string vibrations: Experiments and modelling. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCES. 10. vol. 101–102, p. 324-337

MAYACELA GUADALUPE, Carlos Javier. Estudio De La Relación Entre Los Diferentes Niveles De Shoscks Y Vibraciones Con El Perfil Del Pozo, Ensambe De Fondo, Formación Y Litología Observados Durante La Perforación De Los Pozos Petróleros En La Cuenca Oriente Del Ecuador. Quito, Ecuador.: Universidad Tecnológica de Equinocial, 2008a. p. 7.

MAYACELA GUADALUPE, Carlos Javier. Estudio De La Relación Entre Los Diferentes Niveles De Shoscks Y Vibraciones Con El Perfil Del Pozo, Ensambe De Fondo, Formación Y Litología Observados Durante La Perforación De Los Pozos Petróleros En La Cuenca Oriente Del Ecuador. Quito, Ecuador.: Universidad Tecnológica de Equinocial, 2008b. p. 14.

MONZON, Jairo. Principios De Barrenas Tricónicas. [Electronic(1)]. 27 de Diciembre de 2014. [Consultado el 15 de junio de 20162016]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/Jmonzmr/1-principios-de-barrenas-triconicas>

MUSIC, Andrés. Diagnostico Y Optimización De Disparos En Desarrollo Horizontal. Santiago de Chile.: Universidad de Chile, 2007.

NAVARRO LÓPEZ, Eva M. y SUAREZ, R. Vibraciones Mecánicas en una Sarta de Perforación: Problemas de Control. En: REVISTA IBEROAMERICANA DE AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL. Vol. 2, p. 43-54

PDB TOOLS, Inc. 7 7/8 (200mm) EX632. [Print(0)]. Disponible en: http://www.pdbtools.com/web/specs/077_EX632_970013.pdf

PEREZ, Julian Merino, Maria. Definición De RPM. [Electronic(1)]. 2016]. Disponible en: <http://definicion.de/rpm/>

QIAN, J., et al. Polycrystalline diamond cutters sintered with magnesium carbonate in cubic anvil press. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRACTORY METALS AND HARD MATERIALS. 3. vol. 31, p. 71-75

RASHIDI, Behrad; HARELAND, Geir y WU,Zebing. Performance, simulation and field application modeling of rollercone bits. En: JOURNAL OF PETROLEUM SCIENCE AND ENGINEERING. 9. vol. 133, p. 507-517

RUBIO ALONSO, Higinio. Diseño Mecánico. [Electronic(1)]. 14 de Noviembre de 2013. [Consultado el 21 de Agosto de 2016Disponible en: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_rodamientos1

Schlumberger. Drillstring Vibrations and Vibration Modeling Drillstring Vibrations and Vibration Modeling. p. 4-7

Schumberger. Oilfield Review. En: OILFIELD REVIEW. p. 63-64
SMITH INTERNATIONAL, Inc. Roller Cone Dull Grading Manual. 2008.

TOBA, Alex. Análisis simétrico de impacto ballístico. [Internet]. YouTube.: 2016

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Yo **Andrés Felipe Sánchez Mesa** en calidad de titular de la obra **Determinación de la influencia de las vibraciones verticales en los principales modos de falla de una broca tricónica**, elaborada en el año **2016**, autorizo al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que me corresponde y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autor manifiesto conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor establezco las siguientes condiciones de uso de mi obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	X
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su autor.

De igual forma como autor autorizo la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C, a los 23 días del mes de Marzo del año 2017.

EL AUTOR:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Andrés Felipe	Sánchez Mesa
Documento de identificación No	Firma
1020786516	

Nota: Incluya un apartado (copie y pegue el cuadro anterior), para los datos y la firma de cada uno de los autores de la obra.