

**METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE DE LAS BROCAS DE  
PERFORACIÓN DEBIDO A LA INTERACCIÓN BROCA - ROCA**

**FANNY MARGARITA ACUÑA MENDOZA  
JACOBO IGNACIO CUAO MOREU**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

**METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE DE LAS BROCAS DE  
PERFORACIÓN DEBIDO A LA INTERACCIÓN BROCA - ROCA**

**FANNY MARGARITA ACUÑA MENDOZA  
JACOBO IGNACIO CUAO MOREU**

**Trabajo de grado para optar al título como Ingeniero de Petróleos**

**Director**

**JOHN ALEXANDER LEÓN PABON  
Ingeniero de Petróleos**

**Co-Director**

**CARLOS ANDRÉS PÉREZ REYES  
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

Este trabajo se lo quiero dedicar primero que todo a Dios, centro de mi vida y luz de mi camino, porque siempre estuvo conmigo en todo momento, ayudándome a no desfallecer y a que tuviera plena confianza en mí.

A mi madre María Fanny Mendoza Mejía, ya que aparte de ser la mejor mamá del mundo, la más verraca, la más valiente, la más cariñosa, es mi mejor amiga y confidente; gracias madre por todos tus consejos, tus oraciones, tu cariño y tu buen ejemplo. Nunca terminaré de agradecerte por todo lo que me has reglado y me sigues regalando. Te amo mamita.

A mi padre “el viejo” Devaloy Enrique Acuña Zárate, gracias por todo papi, por tus consejos, por tu sabiduría, por tu amor, por enseñarme que en la vida hay que dejar huellas y que por más dura a veces que parezcan las cosas siempre habrá una salida; tú has sido ejemplo de superación y de persistencia. Gracias mi viejo.

A mi novio Jaickson Camilo Morales Novoa, tú has sido mi soporte en todo sentido, gracias por tu amor, tus consejos y sobre todo tu paciencia. Espero que este sea solo el comienzo de muchas cosas buenas.

A mis amigos, que me deja esta larga travesía y que se han conservado por eso, por ser buenos amigos; a Greyssi, William, Juan Miguel, Lina, Silvia, Jacobo, Paisa, Gusta, Leo, Veneco, Diana, Rosi, Toloza, Steven, Milhouse, Nora, Mauricio, Andresillo y todos aquellos que no recuerdo en este instante. Gracias muchachos.

Fanny Margarita Acuña Mendoza

## DEDICATORIA

A papá Dios, mi soporte en los triunfos y derrotas.

A mi hija, quien es mi mayor tesoro.

A mi madre y a mi padre, con quienes siempre tendré una deuda eterna, gracias por su paciencia y por su invaluable ayuda a lo largo de mi vida.

A mis hermanos, por lo vivido y lo que aún nos falta.

A mi padrino, por sus consejos y por ser uno de mis mejores amigos.

A mis profesores, por las enseñanzas impartidas.

A todos mis amistades a lo largo de mi vida y aquellas que empezaron en la universidad, tal vez queden cortas estas líneas para nombrarlos a todos pero haré el intento. A mis amigos de infancia y del colegio (Juan David, Jorge Mario, Natalia, Oscar, y todos lo que me faltan). A mis amigos de la universidad empezando por mi compañera Fanny, el grupo fuerte de centro de cómputo (Tavo, Leo, Diana, Rossi, el Veneco, Lorena), mis amigos que se me adelantaron en el grado pero que siempre han estado allí (Angie, Armando, Fabián, Jesús, Mónica, Diego, Nilton y todos los que me faltan). Gracias a todas esas personas por haber estado allí en este camino llamado vida.

JACOBO IGNACIO CUAO MOREU

## AGRADECIMIENTOS

A, **MSc. John Alexander León Pabón**, docente de la escuela de Ingeniería de Petróleos, por su ayuda en los momentos en los que necesitamos de su orientación.

A, **Ing. Carlos Andrés Pérez Reyes**, por su orientación y sugerencias.

A, **Ing. Néstor Fabián Blanco Ballesteros**, por su valiosa colaboración y sugerencias.

A, **Zulma Smith Rodríguez Bueno**, por su valiosa colaboración y su tiempo cuando más la necesitamos.

A nuestra gloriosa alma máter **Universidad Industrial De Santander**, por habernos acogido en sus aulas y por todos sus aportes y experiencias vividas que nos permitieron crecer como personas y formarnos como profesionales.

## CONTENIDO

|  | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN   | 23   |
| 1. BROCAS DE PERFORACIÓN   | 25   |
| 1.1 DEFINICIÓN   | 25   |
| 1.2 UBICACIÓN Y COMPONENTES QUE PERMITEN EL FUNCIONAMIENTO DE LA BROCA.            | 25   |
| 1.3 PERFIL HISTÓRICO   | 28   |
| 1.3.1 Brocas de conos giratorios   | 28   |
| 1.3.2 Brocas de cortadores fijos   | 32   |
| 1.4 TIPOS DE BROCAS  | 34   |
| 1.4.1 Brocas Cónicas   | 36   |
| 1.4.1.1 Partes de una broca cónica   | 37   |
| 1.4.1.2 Clasificación IADC para brocas cónicas                                     | 40   |
| 1.4.2 Brocas de cortadores fijos   | 44   |
| 1.4.2.1 Brocas compactas de diamante policristalino (PDC):                         | 44   |
| 1.4.2.2 Brocas de diamante policristalino térmicamente estable (TSP)               | 47   |
| 1.4.2.3 Brocas de diamante natural   | 48   |
| 1.4.2.4 Clasificación IADC para brocas de cortadores fijos                         | 49   |
| 1.5 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LAS BROCAS  | 51   |
| 1.6 MECANISMOS DE CORTE DE LAS BROCAS CÓNICAS                                      | 51   |
| 1.7 MECANISMOS DE CORTE DE LAS BROCAS DE CORTADORES FIJOS                          | 53   |
| 1.8 VARIABLES OPERATIVAS QUE INFLUYEN EN EL DESEMPEÑO DE LAS BROCAS DE PERFORACIÓN | 55   |
| 1.8.1 Torque.  | 55   |
| 1.8.2 Peso sobre la broca (WOB).   | 56   |
| 1.8.3 Tasa de penetración (ROP).   | 57   |
| 1.8.4 Velocidad rotaria (RPM).   | 57   |
| 1.8.5 Tasa de flujo o caudal   | 58   |
| 1.9 MECANICA DE ROCAS  | 58   |

|   |    |
|---|----|
| 1.9.1 Elasticidad.  | 59 |
| 1.9.1.1 Esfuerzo  | 59 |
| 1.9.1.3 Módulos elásticos   | 71 |
| 1.9.1.4 Poroelasticidad   | 73 |
| 2. FENÓMENOS Y VARIABLES QUE AFECTAN AL DESGASTE DE LAS BROCAS          | 75 |
| 2.1 HIDRAULICA EN LAS BROCAS DE PERFORACIÓN                             | 75 |
| 2.2.1 Propiedades del lodo en la hidráulica de brocas                   | 76 |
| 2.2.1.1 Densidad  | 76 |
| 2.2.1.2 Viscosidad plástica   | 76 |
| 2.2.1.3 Punto cedente   | 76 |
| 2.2.1.4 Resistencia de gel (lb/100 ft <sup>2</sup> ):                   | 76 |
| 2.2.2 pérdidas de presión en las brocas                                 | 76 |
| 2.2.4 Caballaje hidráulico por pulgada cuadrada de la broca (hsi).      | 77 |
| 2.2.5 Fuerza De Impacto Hidráulica                                      | 77 |
| 2.2.6 Velocidad en el jet.  | 78 |
| 2.2.7 Área total de flujo (tfa).  | 78 |
| 2.3 VIBRACIONES   | 79 |
| 2.3.1 Definición de los tipos de vibraciones en la sarta de perforación | 79 |
| 2.3.1.1 Vibraciones axiales   | 80 |
| 2.3.1.2 Vibraciones torsionales   | 81 |
| 2.3.1.3 Vibraciones laterales   | 81 |
| 2.3.2 Fenómenos vibratorios   | 82 |
| 2.3.2.2 Atascamiento/deslizamiento de la sarta (stick/slip              | 83 |
| 2.3.2.3 Rotación no concéntrica de la broca (bit whirl):                | 83 |
| 2.3.2.4 Rotación no concéntrica del aparejo de fondo (BHA whirl):       | 84 |
| 2.3.3.1 Daños en las brocas PDC debido a las vibraciones:               | 85 |
| 2.4 TIPOS DE FALLAS EN LAS BROCAS PDC                                   | 88 |
| 2.4.3 Falla termofísica.  | 91 |
| 2.4.4 Falla termoquímica.   | 91 |
| 2.4.5 Mecanismos de falla del carburo de tungsteno                      | 91 |
| 2.5 GRADOS DE DESGASTE DE LAS BROCAS DE PERFORACIÓN                     | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.5.1 Metodología.   | 93  |
| 3. ALGUNOS MÉTODOS USADOS EN EL ESTUDIO DEL DESGASTE EN LAS BROCAS DE PERFORACIÓN  | 105 |
| 3.1 EVALUACIÓN PRÁCTICA DEL DESGASTE DEBIDO A LA INTERACCIÓN ROCA-BROCA DURANTE LA PERFORACIÓN.                                    | 105 |
| 3.1.2 Resultados en laboratorio y en campo, de la evaluación práctica  | 113 |
| 3.1.2.1 Pruebas con brocas desgastadas en campo.   | 113 |
| 3.1.3 Pruebas de campo.  | 118 |
| 3.2 PRONÓSTICO EN TIEMPO REAL DEL DESGASTE DE LA BROCA COMBINANDO LOS CONCEPTOS DE ENERGÍA DE LA ROCA Y MAGNITUD DE LA PERFORACIÓN | 121 |
| 3.2.1 Rata de penetración (ROP).   | 122 |
| 3.2.2 Modelo ROP de Bourgoyne y Young.   | 122 |
| 3.2.3 Energía mecánica específica (MSE).   | 124 |
| 3.2.4 Desarrollo del modelo de desgaste de la broca en tiempo real.  | 125 |
| 3.2.5 Análisis del modelo para datos de campo.   | 127 |
| 3.2.6 Aplicación en tiempo real del modelo desarrollado  | 131 |
| 4. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE DE LAS BROCAS DE PERFORACIÓN DEBIDO A LA INTERACCIÓN ROCA-BROCA                        | 133 |
| 4.1 SELECCIÓN DE BROCAS POZOS UIS-1 Y UIS-2  | 133 |
| 4.2 ESPECIFICACIONES Y RANGOS DE APLICACIÓN DE LAS BROCAS DEL POZO UIS-1.  | 134 |
| 4.2.1 Broca MSR519M Serie E147204  | 134 |
| 4.2.1.1 Características de diseño  | 134 |
| 4.2.1.2 Desempeño de la broca:   | 135 |
| 4.2.1.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca.   | 137 |
| 4.2.2 Broca SKR616M Serie 221373   | 138 |
| 4.2.2.1 Características de diseño  | 138 |
| 4.2.2.2 Desempeño de la broca  | 139 |
| 4.2.2.3 Eventos Significativos Durante el desempeño de la broca.   | 141 |
| 4.2.3 Broca DSF519M – A12 serie A156093  | 141 |
| 4.2.3.1 Características de diseño.   | 142 |
| 4.2.3.2 Desempeño de la broca.   | 143 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2.3.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca                    | 145 |
| 4.2.4 Broca DSH616M - A6D serie A145111  | 146 |
| 4.2.4.1 Características de diseño  | 146 |
| 4.2.4.2 Desempeño de la broca  | 148 |
| 4.2.4.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca.                   | 150 |
| 4.3 ESPECIFICACIONES Y RANGOS DE APLICACIÓN DE LAS BROCAS DEL POZO UIS-2.          | 151 |
| 4.3.1 Broca MSRE519M serie E147205   | 151 |
| 4.3.1.1 Características de diseño  | 152 |
| 4.3.1.2 Desempeño de la broca  | 152 |
| 4.3.1.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca                    | 153 |
| 4.3.2 Broca RSR716M serie 220993   | 158 |
| 4.3.2.1 Características de diseño  | 158 |
| 4.3.2.2 Desempeño de la broca  | 160 |
| 4.3.2.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca                    | 161 |
| 4.3.4 Broca RSR716M – C1 serie 226380  | 162 |
| 4.3.4.1 Características de diseño  | 162 |
| 4.3.4.2 Desempeño de la broca  | 163 |
| 4.3.4.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca                    | 164 |
| 4.4 METODOLOGÍA  | 165 |
| 4.4.1 Identificación de las variables responsables de las condiciones de desgaste. | 166 |
| 4.4.1.1 Impactos   | 166 |
| 4.4.1.3 Peso Sobre la Broca (WOB):   | 167 |
| 4.4.1.4 Hidráulica   | 167 |
| 4.4.1.5 Diseño y/o Materiales  | 167 |
| 4.4.1.6 Presencia de Desechos  | 168 |
| 4.4.1.7 Velocidad de la Broca  | 168 |
| 4.4.1.8 Otras  | 168 |
| 4.4.2 Criterios para el estudio del Desgaste                                       | 169 |
| 4.4.3 Pasos de la metodología  | 169 |
| 5. CONCLUSIONES  | 173 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 6. RECOMENDACIONES                 | 174 |
| BIBLIOGRAFÍA                       | 175 |
| ANEXOS                             | 180 |
| ANEXO A. Brocas objeto de estudio. | 181 |

## LISTA DE FIGURAS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Figura 1. Brocas cónicas de acuerdo a la estructura de corte                      | 36          |
| Figura 2. Variedad de los insertos  | 37          |
| Figura 3. Partes de una broca cónica  | 37          |
| Figura 4. Tipos de cojinetes  | 38          |
| Figura 5. Almacén de grasa  | 39          |
| Figura 6. Material de una broca PDC   | 45          |
| Figura 7. Tamaño de los cortadores de una broca PDC                               | 45          |
| Figura 8. Angulo de los cortadores de una broca PDC                               | 46          |
| Figura 9. Partes de una broca PDC   | 46          |
| Figura 10. Brocas TSP   | 47          |
| Figura 11. Brocas de diamante natural   | 48          |
| Figura 12. Sistema de clasificación IADC para brocas de cortadores fijos          | 50          |
| Figura 13. Acciones de perforación con conos giratorios                           | 53          |
| Figura 14. Acciones de perforación de los cortadores fijos                        | 54          |
| Figura 15. Respuesta típica de la ROP al cambio de peso (WOB) sobre la broca      | 57          |
| Figura 16. Respuesta típica de la ROP al cambio de la velocidad de rotación (RPM) | 58          |
| Figura 17. Ilustración de fuerzas y esfuerzos                                     | 60          |
| Figura 18. Descomposición de fuerzas  | 62          |
| Figura 19. Equilibrio de fuerzas en un triángulo                                  | 65          |
| Figura 20. Círculo de Mohr  | 67          |
| Figura 21. Deformación de la muestra  | 68          |
| Figura 22. Deformación  | 69          |
| Figura 23. Deformación de cizallamiento   | 70          |
| Figura 24. Deformación ocasionada por un esfuerzo uniaxial                        | 71          |
| Figura 25. Fenómenos vibratorios en la sarta de perforación                       | 82          |
| Figura 26. Tipos de giro  | 85          |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 27. Daños en una broca PDC por vibración   | 86  |
| Figura 28. Perdida de la nariz de una broca tricónica por vibraciones   | 88  |
| Figura 29. Características del desgaste según las estructuras de la broca   | 94  |
| Figura 30. Medida de la pérdida de altura del diente por el desgaste  | 94  |
| Figura 31. Características del desgaste para brocas tricónicas y de cortadores fijos  | 95  |
| Figura 32. Características principales de desgaste cortador fijo  | 96  |
| Figura 33. Códigos para describir la ubicación del desgaste en la broca   | 96  |
| Figura 34. Razón de salida de la broca  | 98  |
| Figura 35. Torque vs WOB para varios tipos de roca perforadas con una broca de 6 in y series IADC 1-3-6 ( $\Omega = 116$ rev/min)                     | 106 |
| Figura 36. Evolución esquemática de $V_n$ vs desgaste de la broca   | 108 |
| Figura 37. Forma general de la relación de torque vs WOB  | 110 |
| Figura 38. Torque vs WOB para tres brocas de 6-in. Serie IADC 1-3-6 a diferentes estados de desgaste (Argilita d'Anjou, $\Omega = 116$ rev/min)       | 114 |
| Figura 39. Broca de 8.5-in de diámetro acondicionada con dientes desgastados en fábrica de Grado T:4.5, antes y después de las pruebas de perforación | 116 |
| Figura 40. Torque vs. WOB para tres brocas de 8.5-in. Serie IADC 1-1-6 a diferentes estados de desgaste (Arenisca de Berea, $\Omega = 60$ rev/min)    | 117 |
| Figura 41. Torque vs. WOB para dos brocas de 8.5-in. Serie IADC 1-1-6 a diferentes estados de desgaste (Lutita de Mancos, $\Omega = 60$ rev/min)      | 118 |
| Figura 42. Torque vs. WOB para una broca de 12.25-in. Serie IADC 1-3-5 a diferentes profundidades ( $\Omega = 80 - 90$ rev/min)                       | 120 |
| Figura 43. Torque vs. WOB para una broca de 17.5-in. Serie IADC 1-1-1 a diferentes profundidades ( $\Omega = 120 - 140$ rev/min)                      | 120 |
| Figura 44. Esquema que muestra cómo se miden los tipos de cortadores para brocas PDC y de conos móviles   | 126 |
| Figura 45. MSE vs. Inverso de la Perforabilidad de la Roca en el norte de Alberta, Canadá   | 127 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 46. MSE vs. Inverso de la Perforabilidad de la Roca en un pozo costa-afuera en Irán | 128 |
| Figura 47. MSE vs. Inverso de la Perforabilidad de la Roca en un pozo costa-afuera en Irán | 128 |
| Figura 48. MSE vs. Inverso de la Perforabilidad de la Roca en el norte de Alberta          | 129 |
| Figura 49. K <sub>1</sub> vs. Profundidad para el pozo costa-afuera en Irán                | 130 |
| Figura 50. K <sub>1</sub> vs. Profundidad para el pozo en el norte de Alberta              | 131 |
| Figura 51. Broca MSR519M serie E147204   | 134 |
| Figura 52. Vista de la broca después de la corrida   | 136 |
| Figura 53. Vista de la broca después de la corrida   | 137 |
| Figura 54. Broca SKR616M Serie 221373  | 138 |
| Figura 55. Vista de la broca SKR616M después de la corrida                                 | 140 |
| Figura 56. Vista de la broca SKR616M después de la corrida (aletas)                        | 140 |
| Figura 57. Broca DSF519M-A12 Serie A156093   | 141 |
| Figura 58. Vista de la broca DSF519M – A12 después de la corrida                           | 144 |
| Figura 59. Vista de la broca DSF519M – A12 después de la corrida (aletas)                  | 144 |
| Figura 60. Broca DSH616M- A6D Serie A145111  | 146 |
| Figura 61. Vista de la broca DSH616M – A6D después de la corrida                           | 149 |
| Figura 62. Vista de la broca DSH616M – A6D después de la corrida (aletas)                  | 149 |
| Figura 63. Broca MSRE519M serie E147205  | 151 |
| Figura 64. Vista de la broca MSRE519M después de la corrida                                | 153 |
| Figura 65. MSE vs 1/F7   | 156 |
| Figura 66. F7 vs F2  | 156 |
| Figura 67. F7 vs F3  | 157 |
| Figura 68. F7 vs F6  | 157 |
| Figura 69. Broca RSR716M serie 220993  | 158 |
| Figura 70. Vista de la broca RSR716M después de la corrida                                 | 161 |
| Figura 71. Broca RSR716M – C1 serie 226380   | 162 |
| Figura 72. Vista de la broca RSR716M – C1 después de la corrida                            | 164 |

Figura 73. Esquema de la metodología para el estudio del desgaste de las brocas de perforación

172

## LISTA DE TABLAS

|  | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Componentes del BHA   | 26   |
| Tabla 2. Características de los dientes de acero y de los insertos de carburo de tungsteno                                       | 43   |
| Tabla 3. Clases de desgaste y sus posibles causas de las brocas tricónicas   | 98   |
| Tabla 4. Correlación entre el grado de los dientes y el criterio de daño para tres tipos de roca                                 | 114  |
| Tabla 5. Correlación entre el grado de los dientes y el criterio de daño para dos tipos de roca                                  | 119  |
| Tabla 6. Correlación entre el grado de los dientes y el criterio de daño para diferentes formaciones del campo del mar del norte | 121  |
| Tabla 7. Valores de K2 para cada sección de pozo sin/con el efecto del peso del lodo   | 129  |
| Tabla 8. Coeficientes de fricción por deslizamiento de la broca calculados   | 130  |
| Tabla 9. Hidráulica de la broca MSR519M serie E147204  | 135  |
| Tabla 10. Parámetros operativos recomendados   | 135  |
| Tabla 11. Desgaste de la broca MSR519M serie E147204 según la IADC   | 136  |
| Tabla 12. Parámetros operativos recomendados   | 139  |
| Tabla 13. Desgaste de la broca SKR616M Serie 221373 según la IADC  | 139  |
| Tabla 14. Hidráulica de la broca DSF519M-A12 Serie A156093   | 142  |
| Tabla 15. Parámetros operativos recomendados   | 142  |
| Tabla 16. Desgaste de la broca DSF519M – A12 serie A156093 según la IADC   | 143  |
| Tabla 17. Hidráulica de la broca DSH616M – A6D Serie A145111   | 147  |
| Tabla 18. Parámetros Operativos recomendados   | 147  |
| Tabla 19. Desgaste de la broca DSH616M – A6D serie A156093 según la IADC   | 148  |
| Tabla 20. Hidráulica de la broca MSRE519M serie E147205  | 152  |
| Tabla 21. Desgaste de la broca MSRE519M serie E147205 según la IADC  | 152  |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 22. Datos de la formación marrón utilizados en el análisis de regresión múltiple | 155 |
| Tabla 23. Parámetros operativos recomendados   | 160 |
| Tabla 24. Desgaste de la broca RSR716M serie 220993 según la IADC                      | 160 |
| Tabla 25. Hidráulica de la broca RSR716 – C1 serie 226380                              | 162 |
| Tabla 26. Desgaste de la broca RSR716M – C1 serie 226380 según la IADC                 | 163 |
| Tabla 27. Criterios para el estudio del desgaste                                       | 169 |

## RESUMEN

**TITULO:** METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE DE LAS BROCAS DE PERFORACIÓN DEBIDO A LA INTERACCIÓN BROCA-ROCA\* .

**AUTOR:** ACUÑA MENDOZA Fanny Margarita  
CUAO MOREU Jacobo Ignacio\*\* .

**PALABRAS CLAVE:** Broca, roca, desgaste

### DESCRIPCIÓN:

Las brocas de perforación son herramientas fundamentales, que juegan un papel muy importante al momento de empezar la operación de perforación, ya que ellas son las encargadas de abrir paso entre las formaciones con el fin de conectar la sarta desde la superficie con el sitio de interés. Este contacto de las brocas con la formación más un gran número de variables, como son los fenómenos asociados a las vibraciones, los parámetros de perforación, la hidráulica de perforación, la litología atravesada entre otros, son los encargados de influenciar en el desgaste de las brocas de perforación.

En el presente documento se busca estudiar el desgaste de las brocas de perforación debido a la interacción broca-roca, por medio de una metodología que involucre los factores mencionados anteriormente, además de la información extraída de los informes finales de brocas, más los datos de parámetros pie a pie, los registros master log y los tipos de desgaste más comunes junto con sus principales causas. Lo anterior, con el fin de analizar y posteriormente establecer cuáles son los principales factores de más influencia en el desgaste, y a su vez determinar el tipo de desgaste que estos causan; estos factores se tendrán en cuenta al momento de nuevas corridas de las brocas, con el fin de tener un mejor control de los mismos para lograr un menor desgaste y así alargar la vida útil de las brocas y por consiguiente reducir los costos en la operación.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías físico-químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director del proyecto Ing. Jhon Alexander León Pabón. Co-Director Ing. Carlos Andrés Pérez Reyes

## ABSTRACT

**TITLE:** METHODOLOGY TO ESTUDY THE DRILL BITS WEAR DUE TO ROCK – BIT INTERACTION.

**AUTHOR:** ACUÑA MENDOZA Fanny Margarita  
CUAO MOREU Jacobo Ignacio\*\*

**KEYWORDS:** Drill bit, rock, wear.

### CONTENT:

Drill bits are essential tools; they play a fundamental role at the moment to start drilling, because drill bits are responsible to open the hole through to the rock formation and connect the surface with the downhole until the oil sand formation. The contact between rocks and drillbits and some factors like vibrations, drilling parameters, hydraulic drilling, lithology etc, altogether are responsible to have a great influence in the different wear types that have been studied in the development of this thesis.

In this document have looked to study the drillbits wear due to rock-bit interaction by a methodology that involves main factors mentioned above, also the information that can be taken from drillbit final report, data from drilling parameters like WOB, RPM, torque, ROP etc, data from master log registry and more common different types of wear in addition to the principal causes of drillbits wear. All the things mentioned above in order to analyze and to establish which are the main factors influencing drillbit wear. Those factors will be taken into account at the moment to evaluate new drillbits running, in order to control them, to achieve a better drillbit performance, minimizing the wear and thus to lengthen drillbit life and to play down drilling cost.

---

\* Thesis of Grade

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. Petroleum Engineering School. Project Director Eng. Jhon Alexander León Pabón. Co-Director Eng. Carlos Andrés Pérez Reyes.

## INTRODUCCIÓN

La perforación es una de las etapas más importantes en el desarrollo de un campo petrolero, y es la culminación de un proceso de exploración intensiva. Esta práctica nos permite llegar hasta una formación de interés, mediante una planificación de la trayectoria que maximice la exposición del pozo a las zonas productoras, permitiendo obtener información más detallada de la litología del terreno que se está estudiando, de todas sus propiedades, de las condiciones del yacimiento y de las propiedades del mismo; también se puede considerar como el puente entre la superficie y el yacimiento. Para el recorrido planeado, los ingenieros preparan un plan detallado para cada una de las etapas del proceso de perforación; este incluirá una localización en superficie y la profundidad total del pozo, como también especifica las características del lodo, los programas de entubación del pozo necesarios para alcanzar la profundidad esperada y el tamaño de las brocas a utilizar.

Es ahí donde las brocas de perforación entran a jugar su rol, ya que permiten ir avanzando a través de toda la roca hasta llegar al punto deseado. Las brocas de perforación son herramientas fundamentales en el sistema de perforación, y hoy en día se encuentran diseñadas con tecnología de punta, que permiten que su rendimiento sea más óptimo, minimizando los efectos del desgaste, de las vibraciones y del torque entre otros.

Las brocas de perforación se dividen en dos grandes grupos, de conos giratorios y de cortadores fijos, cada clase con sus características específicas para ser aplicadas en un rango ya establecido. Aunque podemos encontrar brocas híbridas, que son la fusión de las características de un grupo con el otro; sigue primando el estudio de los dos grandes grupos mencionados anteriormente.

Para estudiar el rendimiento de una broca de perforación, se debe tener en cuenta un gran grupo de parámetros y condiciones a evaluar, por ejemplo si se quiere hablar de rendimiento, primero se tiene que hablar de desgaste, ya que los dos van muy ligados.

El estudio del desgaste de las brocas de perforación es el tema principal del presente trabajo de grado, y su finalidad es la de ofrecer una metodología que facilite el estudio del mismo.

Para ofrecer dicha metodología que cumpla con tal fin, primero se realizará una evaluación detallada de todos aquellos parámetros y fenómenos físicos, que influyen en los diferentes tipos de desgaste, para los dos grandes grupos de brocas de perforación (de conos giratorios y de cortadores fijos), luego teniendo establecidos los parámetros anteriores, se tomarán datos reales de reportes finales de perforación, que cuenten con registros fotográficos acerca del desgaste, con eventos significativos y con parámetros detallados pie a pie, que nos indiquen el comportamiento de ciertas variables en las corridas de las brocas.

Por último se agruparan muchos de los fenómenos y parámetros que influyen en los diferentes tipos de desgaste, se establecerán los más comunes y los que guardan algún tipo de relación y por último se organizarán en orden de importancia, dando origen a una metodología que facilite el estudio del desgaste de las brocas de perforación.

# 1. BROCAS DE PERFORACIÓN

## 1.1 DEFINICIÓN




En la industria petrolera el mecanismo de perforación dominante es la perforación hidráulica rotativa o giratoria, cuyo funcionamiento básico depende de hacer girar desde la superficie o directamente en el fondo del hueco, la broca instalada en la parte inferior de la sarta de perforación. De tal manera esta broca (barrena, trépano, mecha) de perforación se convierte en la herramienta básica de los ingenieros de perforación y a pesar de los distintos tipos y diseños existentes, su principal función recae en cortar o triturar las diferentes formaciones y mantener dicha utilidad en un amplio rango de condiciones. Este raspado o trituración, o en algunos casos ambas acciones juntas, presentes en el funcionamiento de las brocas de perforación, generalmente se derivan del movimiento rotativo. Además deben ser reemplazadas en el caso de que presenten desgaste excesivo o no avancen a través de las formaciones. La Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (IADC, por sus siglas en inglés), es la entidad encargada de la regulación y legislación relacionadas a operaciones de perforación, además de impulsar los avances tecnológicos en seguridad y eficiencia de las brocas de perforación.

## 1.2 UBICACIÓN Y COMPONENTES QUE PERMITEN EL FUNCIONAMIENTO DE LA BROCA.

La parte inferior de la sarta de perforación, también conocida como drill string, contiene la broca y los demás componentes involucrados en la perforación, los cuales en orden ascendente con respecto a la broca, son: el *crossover* para la broca (herramienta que permite unir la broca con el componente que se encuentre

por encima de ella y que posea propiedades de fabricación diferentes), en algunos casos los motores de lodo (máquina de desplazamiento positivo que utiliza como fluido de potencia hidráulica al lodo de perforación de tal modo que logre aportar energía al movimiento rotativo de la broca), los estabilizadores (generalmente de 2 a 3, uno cercano a la broca), los drill collars (los cuales proporcionan la mayor parte del peso sobre la broca, WOB), el percusor (en caso de pegas del equipo de perforación), la HWDP o tubería pesada (Heavy-Weight Drill *Pipe*, la cual soporta la totalidad de los componentes mencionados, dada su alta resistencia a la tensión) y los demás *crossovers* (que permiten el ensamble entre cada componente). Ver Tabla 1.

**Tabla 1. Componentes del BHA**

| COMPONENTE  | DESCRIPCIÓN   |
|---|---|
|   | <p><b>HWDP (Heavy Weight Drill Pipe)</b></p> <p>Tubería de producción de paredes más gruesas. Tiende a ser más fuerte y resistente a la tensión que la tubería convencional.</p>  |
|  | <p><b>Drill Collar</b></p> <p>Proporciona el WOB. Herramientas tubulares de paredes gruesas y obtenidas a partir de barras sólidas de acero. La gravedad actúa a lo largo de su masa para proporcionar la fuerza a la broca de modo que pueda fracturar la roca. Puede alojar herramientas MWD y LWD.</p> |
|  | <p><b>Percusores o Tarros de</b></p> <p>Dispositivo mecánico que proporciona fuerza de impacto en el caso de</p>  |

| COMPONENTE  | DESCRIPCIÓN  |
|---|--|
|  <p><b>Perforación</b><br/><b>(Drilling Jar)</b></p>         | <p>presentarse <i>pega de tuberías (stuck)</i>.</p>  |
|  <p><b>Drill Collar</b></p>                                  | <p>Proporciona el WOB. Herramientas tubulares de paredes gruesas y obtenidas a partir de barras sólidas de acero.</p>  |
|  <p><b>Estabilizador</b><br/><b>(Stabilizer)</b></p>        | <p>Equipo utilizado para estabilizar todo el <i>BHA (Bottom Hole Assembly)</i> a modo de evitar desviaciones, vibraciones y garantizar la calidad del hueco perforado.</p> |
|  <p><b>Motor de Lodos</b><br/><b>(Mud Motor)</b></p>       | <p>Motor de desplazamiento positivo que a través del lodo permite el funcionamiento de la broca de perforación.</p>  |
|  <p><b>Broca de Perforación</b><br/><b>(Drill Bit)</b></p> | <p>Herramienta que tritura y corta la roca.</p>  |

Fuente: Los autores

## 1.3 PERFIL HISTÓRICO

**1.3.1 Brocas de conos giratorios.** En la década de 1800, las perforaciones hechas con herramientas operadas por cable y brocas de percusión eran lentas y limitadas para agujeros poco profundos. Las brocas tipo cola de pescado y los equipos de perforación rotativa con circulación continua para remover los recortes representaron los primeros avances, pero las brocas con cuchillas de acero eran más adecuadas para formaciones blandas y se desgastaban rápidamente. Las estructuras de corte en los conos, que giran en forma independiente para rotar en el fondo del hueco a medida que rota la broca, se hicieron más populares en la década de 1900. Estas brocas duraban más y podían hacer huecos más profundos. No obstante, las primeras brocas de conos giratorios carecían de durabilidad y confiabilidad, pero eran mejores que las brocas de cuchillas.

La primera broca de conos giratorios con tres conos fue patentada por Howard Hughes en 1909. En 1916 y 1917, C. E. Reed desarrolló las brocas con discos gemelos reemplazables y cuatro cortadores giratorios. Estas primeras etapas en la evolución de las brocas ampliaron el rango de aplicaciones de la perforación rotativa más allá de los límites de profundidad y durabilidad alcanzados por brocas con cuchillas de acero. Desde entonces, los nuevos desarrollos han mejorado alternativamente los cojinetes de los conos y la estructura cortante.

Los primeros avances se centraron en las estructuras de corte. A principios de la década de 1930, se desarrollaron brocas con suficiente espacio entre los conos. Al dejar espacio entre conos adyacentes, los cortadores pueden ser más largos y proporcionar una acción de limpieza adicional en formaciones blandas. Anteriormente, los dientes tenían que ser lo suficientemente cortos para no tocarse entre sí a medida que giraban los conos. Aproximadamente al mismo tiempo, los fabricantes comenzaron a utilizar el acero tratado térmicamente y a soldar metal más resistente sobre los dientes de acero para taladrar formaciones

con alta resistencia a la compresión. Los primeros avances se centraron en las estructuras de corte. A principios de la década de 1930, se desarrollaron brocas con suficiente espacio entre los conos. Al dejar espacio entre conos adyacentes, los cortadores pueden ser más largos y proporcionar una acción de limpieza adicional en formaciones blandas. Anteriormente, los dientes tenían que ser lo suficientemente cortos para no tocarse entre sí a medida que giraban los conos. Aproximadamente al mismo tiempo, los fabricantes comenzaron a utilizar el acero tratado térmicamente y a soldar metal más resistente sobre los dientes de acero para taladrar formaciones con alta resistencia a la compresión.

A medida que mejoraron las estructuras de corte y las brocas comenzaron a perforar en forma más agresiva, la vida útil del cojinete se convirtió en un factor limitante. A mediados de la década de 1930, se desarrollaron los cojinetes de rodillos antifricción. Los viajes para cambios de la broca mejoraron de 6-8 horas a 20-25 horas, con el correspondiente incremento en el metraje y la disminución en los costos. Las boquillas para fluidos fueron introducidas en 1950 para mejorar la limpieza de la broca y del agujero y para incrementar las velocidades de penetración. Esto se logra forzando chorros de lodo en el fondo del hueco para apartar los recortes retenidos por la presión hidrostática. Los insertos de carburo de tungsteno, introducidos en 1951, fueron de gran ayuda para la perforación de rocas duras. Los insertos de carburo, con solamente una pequeña reducción en la dureza, eran más duros y más resistentes al desgaste que el mejor acero, y podían perforar largos intervalos antes de desgastarse.

Por primera vez, las estructuras de corte duraron más que los cojinetes. No obstante, el lodo y las sustancias sólidas aún dañaban a los cojinetes, especialmente en aplicaciones críticas. A pesar de que se utilizó una grasa especial para lubricar los componentes del cojinete y extender la vida útil de la broca, la fatiga y el desgaste de las superficies del cojinete de rodillos, y los surcos sobre las piezas de sujeción y los conos, limitaron la durabilidad del cojinete. Fue

entonces necesario un nuevo enfoque para las brocas de insertos. En la década de 1960, se incluyeron sellos para mantener la grasa dentro de los cojinetes y evitar que los líquidos o las sustancias sólidas penetraran. Los depósitos de grasa en cada pieza de sujeción proporcionan lubricación continua y el sistema de compensación del diafragma estabiliza la presión a través de los sellos. No obstante, los cojinetes de rodillos abiertos sin sellos, enfriados y lubricados por los fluidos de perforación, aún se utilizan en barrenas de dientes cortantes para perforaciones de bajo costo.

Hoy en día, los carburos cementados menos porosos se elaboran mediante la combinación de finas partículas de carburo de tungsteno en una matriz de cobalto y se sinterizan a altas temperaturas en una atmósfera al vacío o de hidrógeno. El contenido de cobalto y el tamaño del grano se varían para generar una docena de calidades estándar de carburo cementado. Estos compuestos metálicos combinan la dureza para limitar la deformación, y la resistencia para prevenir el agrietamiento.

A principios de la década de 1970, la empresa Reed Tool Company, en la actualidad Reed-Hycalog, desarrolló un cojinete flotante plateado, construido de una aleación de berilio y cobre que cuenta con mayor capacidad de carga, superior maleabilidad y más resistencia al desgaste, y alta conductividad térmica para disipar el calor. Este cojinete flotante gira entre la superficie del cono y la superficie del cojinete liso para proporcionar cuatro superficies y un área de resbalamiento dos veces mayor que la de los cojinetes de fricción convencionales, lo que reduce las velocidades relativas y disminuye el desgaste. Los cojinetes flotantes además tienen un plateado que reduce la fricción y el desgaste. Casi al mismo tiempo, Reed patentó un sello oval con una sección transversal que es mayor en la dirección radial que en la axial. Los sellos radiales requieren menos del 10% de compresión para sellar en forma eficaz, lo que reduce el desgaste. Una menor presión interfacial reduce también la fricción y el calor, de modo que

los sellos permanecen más fríos. Hoy en día, muchos diseños de brocas utilizan sellos radiales.

Las estructuras de las brocas de conos giratorios inicialmente se fundían o forjaban en una sola pieza con los conos y, en algunas ocasiones, se les adherían cuchillas complementarias. Con el advenimiento del diseño de tres conos, los fabricantes comenzaron a producir unidades con piezas de sujeción y conos individuales que posteriormente se ensamblaban y soldaban. Esto fue el comienzo de seis décadas de continua introducción de mejoras en los procesos de fabricación. Las tolerancias más estrechas para el forjado, el maquinado, el tratamiento térmico, la sinterización, el triturado, la soldadura y la metalurgia de partículas pulverizadas, son los cimientos del actual alto rendimiento de las brocas de conos giratorios. La compañía Reed fue pionera en el armado de un sistema de maquinado de las superficies de los cojinetes, para proveer formas consistentes y eliminar las excentricidades.

Reed también desarrolló los métodos patentados para el terminado de los cojinetes que mejoraron los terminados de las superficies, la concentricidad y el control dimensional. Los elementos de soporte proporcionan un método para sujetar repetitivamente las partes en una máquina. Se ajusta un soporte a un torno para colocar las partes en forma segura y exacta. Las partes de mayor tamaño se fabrican mediante la rotación estática; un torno móvil moldea las partes estacionarias. La rotación estática es hoy en día una norma en la fabricación de la broca de conos giratorios. En forma similar, la soldadura robótica proporciona incrustaciones de aleaciones cuyas formas son casi las formas terminadas. Esto no puede lograrse mediante la soldadura manual.

Los avances en la metalurgia de partículas pulverizadas se han traducido en un mejorado rendimiento del metal duro de alta calidad para las brocas con dientes de acero. Los revestimientos soldados para los dientes de la broca han

evolucionado desde que se utilizaba la soldadura manual con barras compuestas hechas de polvos de acero y carburo. Este arduo proceso de aplicación limita la consistencia y el rendimiento de las brocas con dientes de acero. La barra del compuesto Armor Clad, desarrollada por Reed-Hycalog aumenta al doble la velocidad de aplicación de la soldadura, y al mismo tiempo reduce la degradación por calor de las partículas de carburo.

El proceso patentado del cortador de metal pulverizado, (PMC, por sus siglas en inglés) combina el metal pulverizado y las tecnologías tradicionales del forjado para producir brocas con avanzadas geometrías de corte y características excepcionales. Este método de fabricación que incluye una rápida densificación en estado sólido de la forma final de los conos y los dientes, elimina muchas limitaciones del diseño de la broca convencional y proporciona opciones de un material avanzado que mejora la integridad de la estructura de corte. Los dientes de metal duro que se obtienen con este proceso, cuyos espesores son consistentes y su resistencia al desgaste es alta, constituyen la ventaja principal de la tecnología PMC.

**1.3.2 Brocas de cortadores fijos.** Los diamantes naturales se utilizaron por primera vez alrededor de 1910 en brocas especializadas “saca-núcleos” que hacían cortes en forma de rosquillas y extraían columnas concéntricas de roca en camisas o tubos especiales para ser utilizados en la evaluación de la formación. Las brocas de diamante de pleno diámetro se introdujeron a principios de 1920. Las primeras brocas de PDC se pusieron a la venta a principios de la década de 1970; estas brocas se construyeron sobre la base de la tecnología de General Electric, que permitió que los diamantes sintéticos se adhirieran al carburo de tungsteno.

Las modernas brocas de cortador fijo son descendientes de la broca de arrastre con cuchilla de acero y de las brocas saca-núcleos de diamante natural. Existen

dos tipos de broca de cortador fijo: acero y de matriz. Estas brocas clasificadas como de diamante natural, de un compuesto policristalino de diamante (PDC) híbridas e impregnadas de diamante, no cuentan con partes móviles o cojinetes, sino que tienen cuchillas. En 1953, Hycalog comenzó a fabricar brocas utilizando diamantes naturales colocados en la superficie. Las brocas de PDC se comenzaron a comercializar en 1973; los diseños mejorados híbridos combinaron el PDC y los cortadores revestidos de diamante. Las brocas impregnadas cuentan con diamantes en o cerca de la superficie de las cuchillas. Los diamantes naturales están montados en las brocas con estructura de acero o previamente fijados en las cavidades del molde antes de sinterizar las brocas de matriz con carburo de tungsteno. Los insertos de PDC pueden montarse tanto en las brocas de acero como en las brocas de matriz.

Cuando se introdujeron las brocas de diamante, se utilizaron pequeños diamantes en forma de arenilla. Los diamantes se colocaron en cuchillas de carburo de tungsteno durante la sinterización, pero las cuchillas tendieron a desgastarse demasiado rápido. Además, los diamantes se aflojaban y finalmente originaban la detención de la perforación. Esto dio como resultado brocas convencionales de diamantes con piedras más grandes fijadas siguiendo patrones específicos. No obstante, cuando los diamantes naturales fijados en la superficie se salen de la matriz o se pulen, no quedan elementos duros y filosos para moler las formaciones. Las velocidades de penetración disminuyen y se presentan fallas de desgaste del anillo.

En un principio, la aplicación de brocas de diamante natural no se comprendía bien y los diseños se basaban en la intuición. Hoy en día, las brocas de diamante y el tamaño de los diamantes se ajustan a la dureza de la formación. Las brocas para formaciones más blandas utilizan diamantes grandes para producir hendiduras. Los diamantes pequeños producen más una acción de pulverizado y se utilizan para perforar formaciones duras.

Los diamantes naturales se forman en zonas profundas de la tierra sometidas a intenso calor y extrema presión durante miles de años. A principios de la década de 1970, General Electric desarrolló un proceso de sinterización para fabricar diamantes sintéticos. Delgadas capas circulares de grafito de carbono y cobalto se colocaban en forma alternada en pequeñas latas y se prensaban a 2 millones de lpc [13, 733 MPa]. Luego se las calentaba hasta 2732°F [1500°C] durante cinco minutos. El cobalto fundido, actuando como catalizador y solvente, disuelve el grafito y deposita arenilla monocristalina de diamante, la cual se conglomerada y se une para formar una capa policristalina de diamante. Los cristales individuales, como los diamantes naturales se resquebrajan si las cargas de impacto se aplican en la dirección correcta, pero los diamantes policristalinos adheridos, no cuentan con planos de clivaje (resquebrajamiento) y son más resistentes al impacto.

#### **1.4 TIPOS DE BROCAS**

El sistema por el cual está formada la perforación rotatoria tiene muchos componentes que ayudan al cumplimiento de un objetivo final, dicho objetivo es perforar un pozo cuya profundidad llegue hasta una formación de interés.

Una de las partes fundamentales que componen este sistema son las brocas de perforación, estas se encuentran localizadas en el extremo inferior de la sarta y se utilizan para cortar o triturar la formación durante el proceso de perforación.

Actualmente existen diversas clases de brocas, las cuales son fabricadas por diferentes compañías, para ciertas condiciones de trabajo determinadas. Es por esto que se deben analizar las condiciones donde se va a perforar, para hacer una selección adecuada de la broca a utilizar.

Para seleccionar la broca adecuada, se deben analizar un gran número de variables que interactúan entre sí. Por esta razón es indispensable conocer<sup>1</sup>:

- *La evaluación del desgaste de las brocas previamente empleadas.*
- *Los rendimientos obtenidos en los pozos vecinos.*
- *Los registros geofísicos de pozos vecinos y del mismo pozo (si se tienen).*
- *Los datos sísmicos del área.*
- *El software especializado para el cálculo y análisis para la selección.*
- *Las propiedades de los fluidos de perforación por emplearse en función de la broca elegida.*
- *Las tablas e información geológica.*
- *Los catálogos de brocas.*
- *Los boletines sobre las características de las brocas*
- *Las tablas comparativas de brocas*
- *La clasificación de las brocas (ejemplo IADC)*

Luego de tener en cuenta anteriores factores, se puede decir que existen diversas clases de brocas para distintas clases de trabajo, estas se clasifican en:

1. Brocas Cónicas

- Brocas Cónicas dentadas
- Brocas Cónicas de insertos

2. Brocas de cortadores fijos

- Brocas compactas de diamante policristalino (PDC)
- Brocas de diamante policristalino térmicamente estable (TSP)
- Brocas de diamante natural

---

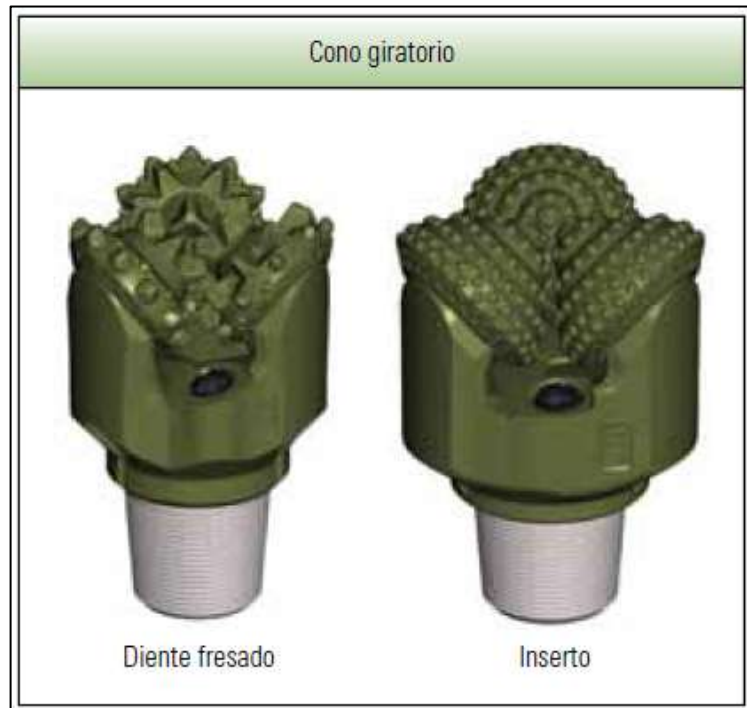
<sup>1</sup> Petróleos Mexicanos. Pemex Exploración Y Producción. Un Siglo De La Perforación En México. Tomo 4- Barrenas E Hidráulica De Perforación.

### 3. Brocas Especiales

**1.4.1 Brocas Cónicas.** Estas brocas como su nombre lo indica, son aquellas que tienen tres conos cortadores que giran sobre su propio eje, además de acuerdo a su estructura de corte, se pueden diferenciar por tener dientes de acero fresados o dientes de carburo de tungsteno. Como se muestra en la figura 1.

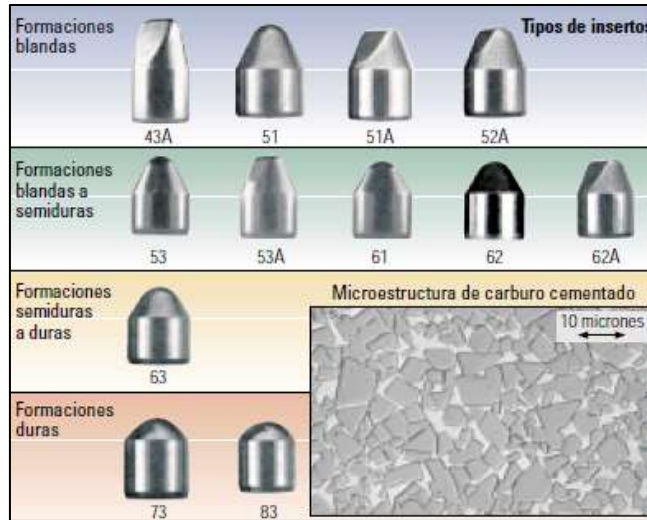
Las brocas cónicas con dientes de acero se utilizan para perforar formaciones blandas con baja resistencia a la compresión, así como también en formaciones semiduras con mayor resistencia a la compresión, por el contrario las que poseen insertos de carburo de tungsteno son utilizadas para perforar formaciones que van desde blandas y semiduras, a duras semiabrasivas y duras abrasivas.

**Figura 1. Brocas cónicas de acuerdo a la estructura de corte**



Fuente: El diseño de las barrenas: desde arriba hacia abajo. Manual - Schlumberger.

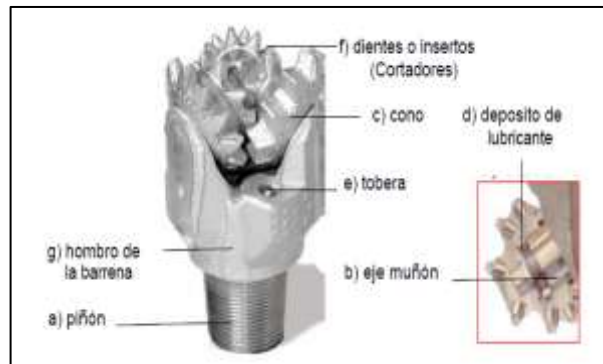
**Figura 2. Variedad de los insertos**



Fuente: Besson, A., Burr, B., et. al. (2000). Oilfield Review Autumn 2000: 12, no. 3. "On the Cutting Edge". Schlumberger..

**1.4.1.1 Partes de una broca cónica.:** En general las brocas cónicas cuentan con tres partes principales que son: la estructura cortadora, los cojinetes y el cuerpo. Las partes más importantes de las brocas cónicas son ilustradas en la figura 3.

**Figura 3. Partes de una broca cónica**



Fuente: Manual para ayudante de perforador (cabo), perforador y malacatero – Pemex.

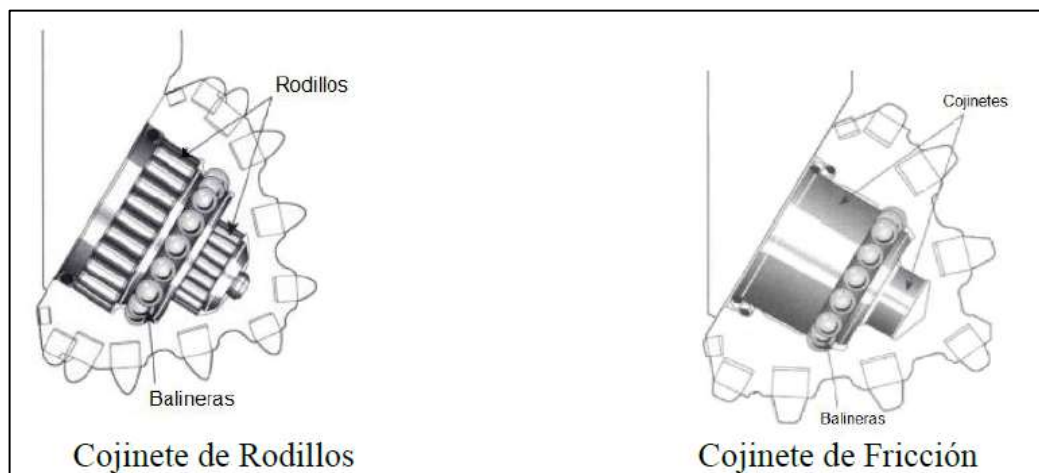
a) Piñón: La función de esta parte es conectar la broca con el resto de la sarta y permitir el paso del fluido de perforación, a través de ella para limpiarla de los recortes.

b) Cojinetes: Son estructuras que funcionan como un eje alrededor de los cuales giran los conos; estos elementos son diseñados en base a la velocidad de rotación (RPM) y al peso sobre la broca (WOB). Dentro del cono se puede encontrar un sistema de retención que está formado por balineras, las cuales evitan que el cono se salga de la parte superior de la broca.

Dependiendo del tipo de estructura de los cojinetes, estos se pueden clasificar en:

- Cojinetes de rodillos: están diseñados para soportar grandes pesos sobre la broca y bajas RPM, puesto que las cargas se distribuyen de manera puntual en los rodillos.
- Cojinetes de fricción: estos cojinetes soportan altas RPM y bajas WOB debido a que las cargas se distribuyen uniformemente en la superficie del cojinete.

**Figura 4. Tipos de cojinetes**

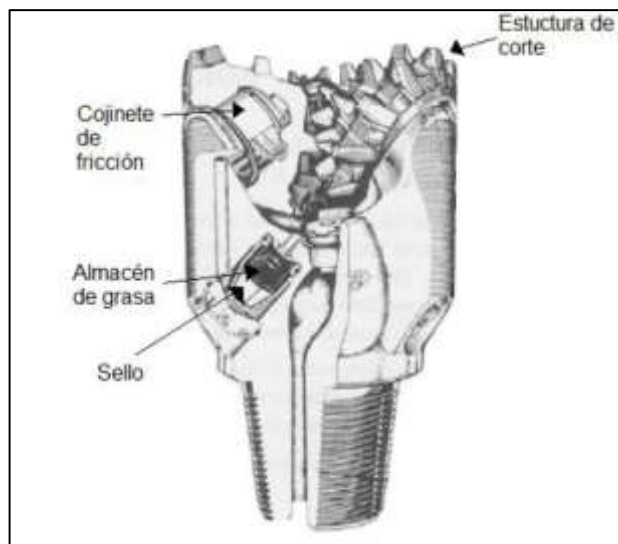


Fuente: Selección de barrenas por correlación – Tesis de grado – Universidad autónoma de México.

c) Conos: partes de donde se encuentran los dientes de acero fresados o los dientes de carburo de tungsteno que son colocados a presión.

d) Depósito de lubricante: son pequeños depósitos que contienen la grasa que lubrica al cojinete y al sistema interno del cono, el cual es movido dentro de la broca por un diferencial de presión, es decir cuando existe un cambio de presión dentro de la broca, se acciona el sello interno que permite el desplazamiento de la grasa, como se muestra en la figura 5. A su vez el sello también evita que el lodo de perforación y las partículas sólidas entren en contacto con la grasa almacenada.

**Figura 5. Almacén de grasa**



Fuente: Selección de barrenas por correlación – Tesis de grado – Universidad autónoma de México.

e) Tobera: las toberas son aquellos orificios por donde pasa el fluido de perforación que lubrica la broca y la limpia.

f) Cortadores: son los dientes encargados de raspar o triturar la roca dependiendo de su tamaño, ubicación y material.

g) Hombro de la broca.

**1.4.1.2 Clasificación IADC para brocas cónicas:** La IADC (International Association Drilling Contractors) cuyo significado es asociación internacional de contratistas de perforación, ha establecido un sistema de clasificación estandarizada para las brocas cónicas, que permite hacer comparaciones entre los diferentes tipos, que ofrecen los fabricantes de las mismas. El código de clasificación cuenta con cuatro caracteres alfanuméricos, los tres primeros son números del 1 al 8 y el último carácter es una letra. Ver tabla 2.

- Primer caracter - serie de la estructura de corte (1 a 8):  
Este primer caracter describe las características generales de la formación. Series de la 1 a la 3 para brocas con dientes de acero y series de la 4 a la 8 para brocas con insertos de carburo de tungsteno. Dentro de este grupo, la formación se volverá más dura y abrasiva a medida que el número vaya aumentando.
- Segundo caracter – tipo de estructura de corte (1 a 4):  
Uno se refiere a la formación más blanda en una serie en particular y 4 se refiere a la formación más dura dentro de la misma serie.
- Tercer caracter – descripción de cojinetes (1 a 7):  
Siete categorías de diseño de cojinetes están contempladas en esta serie, las categorías 8 y 9 están reservadas para futuros usos.
- Cuarto caracter – características disponibles:  
Dieciséis caracteres alfabéticos son usados para indicar “características disponibles”, estas incluyen estructuras especiales de corte, cojinetes, configuración hidráulica y el calibre del cuerpo de la broca.

A – Operaciones con aire: brocas que utilizan aire como fluido de perforación.

B – Cojinete especial sellado: Las configuraciones del sello pueden dar especiales ventajas como la de soportar una alta capacidad de RPM.

C – Centros de chorro: Para proporcionar una mayor distribución uniforme del flujo y la energía hidráulica que se encuentran debajo de la broca.

D – Control de desviación: Estructuras de corte especialmente diseñadas para minimizar la desviación.

E – Toberas: Son usadas principalmente en brocas para formaciones suaves, para mejorar la limpieza de los recortes.

G – Calibre de protección del cuerpo: Depósitos soldados de carburo de tungsteno o insertos de carburo son adicionados al faldón de la broca para proteger el sello y/o el cuerpo en aplicaciones especiales como las direccionales.

H – Aplicaciones direccionales: Diseñadas específicamente para aplicaciones direccionales u horizontales.

J – Desviación del chorro: Estas brocas son usadas para cambios de trayectoria, donde las formaciones son lo suficientemente suaves para ser erosionadas. Tales brocas usualmente contienen dos toberas estándar y una tobera larga, y puede ser orientada para excavar el hueco en una dirección deseada.

L – Agarraderas: Agarraderas de acero con insertos de carburo de tungsteno aplicadas en el cuerpo de la broca.

M – Aplicación de motor: Específicamente diseñada para usos con motores de fondo.

S – Modelo estándar de dientes de acero.

T – Brocas de dos conos: Este tipo de brocas son poco comunes, pero algunas veces son utilizadas para obtener una combinación aceptable de control de desviación y rata de penetración.

W – Estructuras de corte mejoradas.

X – Predomina los insertos de dientes cincelados.

Y – Insertos de dientes cónicos.

Z – Otras formas de dientes.

**Tabla 2. Características de los dientes de acero y de los insertos de carburo de tungsteno**

| SERIE DE ESTRUCTURA DE CORTE                   |   | TIPO DE ESTRUCTURA DE CORTE | DESCRIPCIÓN DE COJINETES   | CARACTERÍSTICAS DISPONIBLES                        |  |
|--|---|-----------------------------|--|--|--|
| D<br>I<br>E<br>N<br>T<br>I<br>S<br>E<br>R      | Formaciones suaves con baja compresión y alta perforabilidad. | 1                           | 1 se refiere a la formación más blanda en una serie particular y 4 se refiere a la formación más dura dentro de la misma serie | Cojinete de rodillo estándar                       | 1 A. Operaciones con aire  |
|  | Formaciones medias a medias duras con alta compresibilidad.   | 2                           |  | Cojinete de rodillo enfriado con aire              | 2 B. Cojinete especial sellado   |
|  | Formaciones duras semi-abrasivas y abrasivas                  | 3                           |  | Cojinete de rodillo con calibre protegido          | 3 C. Centros de chorro   |
|  | Formaciones suaves con baja compresión y alta perforabilidad. | 4                           |  | Cojinete de rodillo sellado                        | 4 D. Control de desviación   |
|  | Formaciones suaves a medias con baja compresibilidad          | 5                           |  | Cojinete de rodillo sellado con calibre protegido  | 5 E. Toberas   |
|  | Formaciones medias duras con alta compresibilidad.            | 6                           |  | Cojinete de fricción sellado                       | 6 G. Calibre de protección del cuerpo  |
| T<br>O<br>S<br>C<br>A<br>R<br>B<br>U<br>R<br>O | Formaciones duras semi-abrasivas y abrasivas.                 | 7                           |  | Cojinete de fricción sellado con calibre protegido | 7 H. Aplicaciones direccionales  |
|  | Formaciones extremadamente duras y extremadamente abrasivas.  | 8                           |  |  | J. Desviación del chorro<br>L. Agarraderas<br>M. Aplicación de motor<br>S. Modelo estándar de dientes de acero<br>T. Brocas de dos conos<br>W. Estructuras de corte mejoradas<br>X. predomina los insertos de dientes cincelados<br>Y. Insertos de dientes cónicos<br>Z. Otras formas de dientes |

Fuente: Los autores

**1.4.2 Brocas de cortadores fijos.** Estas brocas están diseñadas para no contar con partes móviles. Cuentan con cortadores planos en forma de pastilla, que se encuentran montados sobre aletas que son fabricadas del mismo cuerpo de la broca; normalmente, el cuerpo fijo de la broca puede ser de acero, de carburo de tungsteno o una combinación de ambos materiales.

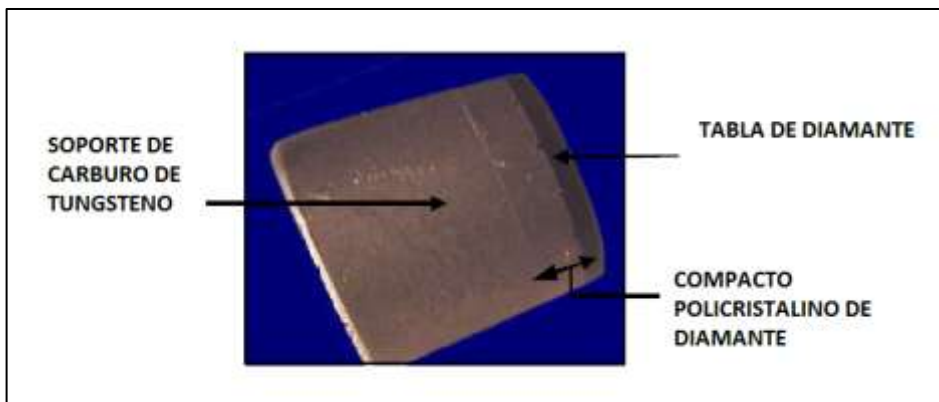
Esta clase de brocas se utilizan preferiblemente para operaciones cuya duración es de varias horas, ya que tienen un alto grado de durabilidad.

Existen tres tipos de brocas que pertenecen a esta categoría:

- Brocas compactas de diamante policristalino (PDC).
- Brocas de diamante policristalino térmicamente estable (TSP).
- Brocas de diamante natural.

**1.4.2.1 Brocas compactas de diamante policristalino (PDC):** El material de los cortadores de estas brocas es diamante sintético, consta de una capa de diamante, unido a sustrato de carburo de tungsteno, como se muestra en la figura 6. La forma de los cortadores es de pastillas que se encuentran montados sobre el cuerpo de los cortadores de la broca. El diseño hidráulico de estas brocas las diferencia de las demás (TSP y Diamante natural) en que está realizado con el sistema de toberas, al igual que las brocas cónicas.

**Figura 6. Material de una broca PDC**

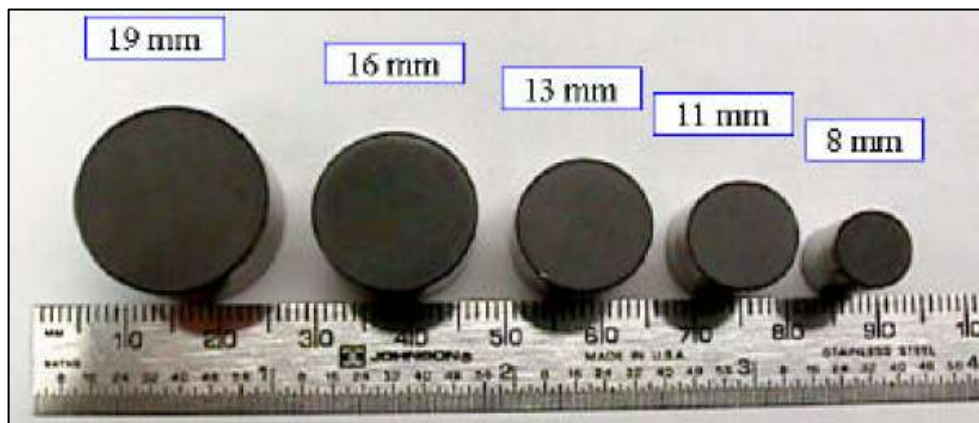


Fuente: Drilling and measurements drill bit. Manual – Schlumberger.

El mecanismo de corte de las brocas PDC es por arrastre, gracias a su diseño hidráulico y al de sus cortadores; además por sus buenos resultados en la perforación rotatoria, es la broca que más se usa actualmente en las operaciones de perforación.

Para brocas PDC podemos encontrar 5 tamaños básicos de cortadores, que varían desde 8 milímetros hasta los 19 milímetros, como se muestra en la figura

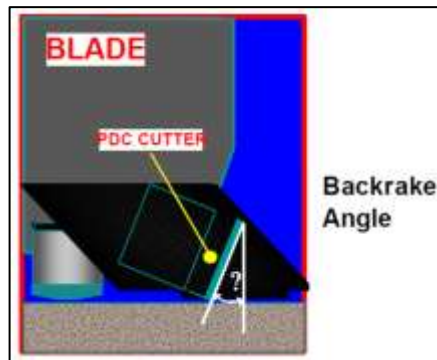
**Figura 7. Tamaño de los cortadores de una broca PDC**



Fuente: Drilling and measurements drill bit. Manual – Schlumberger.

Los cortadores son insertados en el cuerpo de la broca en un ángulo fuera de lo normal, a este ángulo lo podemos llamar “ángulo de Backrake”, y dependiendo del ángulo de orientación de los cortadores, se determina que tan agresiva puede ser la estructura de corte de la broca, entre más bajo sea este ángulo, más agresivo será el corte de la broca; estos ángulos pueden oscilar entre 18% y 40%. Figura 8.

**Figura 8. Ángulo de los cortadores de una broca PDC**



Fuente: Drilling and measurements drill bit. Manual – Schlumberger.

- **Partes de una broca PDC**

Las brocas PDC cuentan con diferentes partes que se identifican como se muestran en la figura 9.

**Figura 9. Partes de una broca PDC**

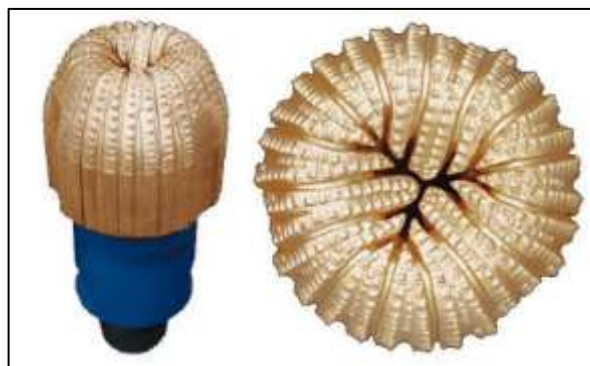


Fuente: Manual para ayudante de perforador (cabo), perforador y malacatero – Pemex.

- a) Piñón: La función de esta parte es conectar la broca con el resto de la sarta y permitir el paso del fluido de perforación, a través de ella para limpiarla de los recortes.
- b) Cortadores: Elementos policristalinos que se encargan de pulverizar la roca.
- c) Aletas: Estructuras donde van montados los cortadores.
- d) Toberas: Orificios por donde sale el fluido de perforación para que la broca permanezca limpia y lubricada.
- e) Hombro de la broca.

**1.4.2.2 Brocas de diamante policristalino térmicamente estable (TSP):** El diseño de este tipo de brocas también cuenta con un solo cuerpo, sin partes móviles. Son utilizadas en la perforación de formaciones duras como calizas duras y arenas finas duras. Este tipo de broca es más usada para la perforación convencional que las de diamante natural, pero presentan la misma desventaja ya que tienen restricciones en la hidráulica. Figura 10.

**Figura 10.** Brocas TSP



Fuente: Drilling and measurements drill bit. Manual – Schlumberger.

Las brocas TSP usan en su estructura de corte diamante policristalino térmicamente estable, en forma de pequeños triángulos no redondos, cuyo tamaño varía entre 1 a 2 milímetros, como las brocas de diamante natural. La densidad, el tamaño y los tipos de cortadores son especificaciones de cada fabricante, dependiendo del medio donde se vaya a utilizar. Este tipo de brocas también son usadas para extraer núcleos y crear un ángulo de desviación al pozo, si así se requiere.

**1.4.2.3 Brocas de diamante natural:** Este tipo de brocas, el pertenecer a la familia de las de cortadores fijos, también cuentan con un cuerpo sólido que envuelve toda la estructura de corte, sin ningún tipo de partes móviles. El material que compone estas brocas puede ser de matriz o de acero y el tipo de cortadores es de diamante natural incrustado en el cuerpo de la broca, que pueden ser de forma redonda pero irregular con diferentes diseños y densidades; entre más abrasiva y dura sea la formación, más pequeño el tamaño de los diamantes a utilizar. Las brocas de diamante natural trabajan con un mecanismo de corte por fricción y por arrastre, lo que genera que trabajen a altas temperaturas, en la actualidad estas brocas no son muy utilizadas, sólo en casos especiales en que las formaciones sean muy duras, para cortar núcleos o para utilizarlas como brocas desviadoras. Figura 11.

**Figura 11.** Brocas de diamante natural



Fuente: Drilling and measurements drill bit. Manual – Schlumberger

**1.4.2.4 Clasificación IADC para brocas de cortadores fijos:** Al igual que para las brocas cónicas, la IADC ha clasificado a las brocas de cortadores fijos, teniendo en cuenta muchas características específicas, el código de clasificación de estas brocas también cuenta con 4 caracteres, el primero de letras y los tres últimos de dígitos.

- Primer caracter – material del cuerpo de la broca:

Este caracter nos indica el material del que está hecha la broca, se utiliza “M” para brocas hechas de matriz y “S” si por el contrario, el material es acero. Figura 11.

- Segundo caracter – densidad del cortador:

El segundo dígito representa el nivel de densidad del cortador, para rangos de 1 a 4 brocas PDC, y para rangos entre 6 y 8 brocas de diamante; mientras menor sea la cantidad, más ligera será la broca. Figura 11.

- Tercer caracter – tamaño y tipo de cortador: Figura 11.

Para cortador PDC: 1 indica > 24 mm

2 indica que el valor está entre 14 y 24 mm

3 indica que está entre 8 y 14 mm

4 indica que es más pequeño que 8 mm

Para brocas de diamante: 1 representa diamante natural

2 se utiliza para brocas TSP

3 se usa para combinaciones entre brocas de  
Diamante natural y TSP

4 se utiliza para brocas impregnadas

- Cuarto carácter – Perfil de la broca:

Este último dígito indica el estilo general del cuerpo de la broca y varía desde 1 (perfil plano) hasta 4 (estilo de turbina con flancos largos). Figura 12.

**Figura 12. Sistema de clasificación IADC para brocas de cortadores fijos**

| 1er Caracter      |                  | 2o Caracter |                     | 3er Caracter |                        | 4o Caracter     |                            |                            |                            |
|-------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------|------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| CUERPO            |                  | FORMACIÓN   |                     | TAMAÑO       |                        | PERFIL          |                            |                            |                            |
| <b>"M" MATRIZ</b> | <b>"S" ACERO</b> | 1           | Muy blanda          | 2            | PDC, 19 milímetros     | 1. Perfil Plano | 2. Perfil Parabólico Corto | 3. Perfil Parabólico Medio | 4. Perfil Parabólico Largo |
|                   |                  |             |                     | 3            | PDC, 13 milímetros     |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 4            | PDC, 8 milímetros      |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  | 2           | Blanda              | 2            | PDC, 19 milímetros     |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 3            | PDC, 13 milímetros     |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 4            | PDC, 8 milímetros      |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  | 3           | Blanda a media      | 2            | PDC, 19 milímetros     |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 3            | PDC, 13 milímetros     |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 4            | PDC, 8 milímetros      |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  | 4           | Media               | 2            | PDC, 19 milímetros     |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 3            | PDC, 13 milímetros     |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 4            | PDC, 8 milímetros      |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  | 5           | Medianamente dura   | 1            | Diamante natural       |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 2            | TSP                    |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 3            | Combinación            |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  | 6           | Dura                | 1            | Diamante natural       |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 2            | TSP                    |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 3            | Combinación            |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  | 7           | Extremadamente dura | 1            | Diamante Natural       |                 |                            |                            |                            |
|                   |                  |             |                     | 4            | Impregnada de diamante |                 |                            |                            |                            |

Fuente: Selección de barrenas por correlación – tesis de grado – universidad autónoma de México.

## **1.5 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LAS BROCAS**

Las brocas de perforación obedecen a varios mecanismos de corte para perforar la roca, esto es dependiendo de su estructura (diseño), que involucra el tamaño de los cortadores, el diseño de los cojinetes, el tamaño de los conos (brocas cónicas), espaciamiento entre los mismos, materiales de fabricación etc. Todos los anteriores parámetros se tienen en cuenta al momento de diseñar la broca, que va a ser utilizada para perforar un ambiente en específico.

Algunos de los principales esfuerzos de falla de las rocas gracias a la acción cortadora de las brocas son:

- Falla por esfuerzo cortante
- Falla por esfuerzo de compresión
- Falla por esfuerzo cortante/esfuerzo por compresión

## **1.6 MECANISMOS DE CORTE DE LAS BROCAS CÓNICAS**

Como se mencionó anteriormente, la estructura de corte de este tipo de broca, consta de hileras de dientes ya sean de acero fresado o de carburo de tungsteno, que se encuentran sobre conos giratorios que giran sobre su propio eje.

De acuerdo a su estructura, las brocas cónicas<sup>2</sup> remueven la roca acanalándola y raspándola o triturándola. Los conos giratorios realizan una acción de trituración. A

---

<sup>2</sup> Besson, A., Burr, B., et. al. (2000). Oilfield Review Autumn 2000: 12, no. 3. "On the Cutting Edge". Schlumberger

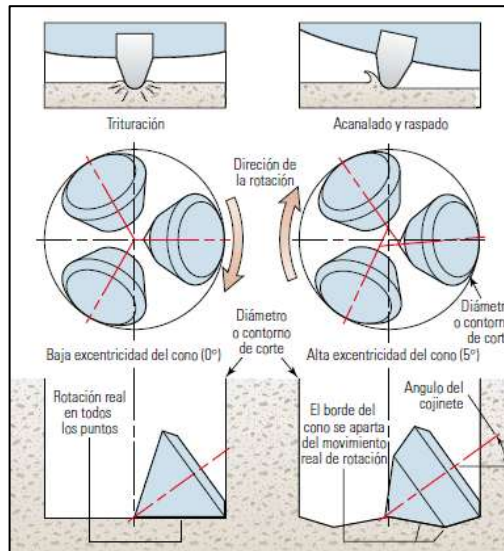
medida que los conos se apartan del movimiento real, las estructuras cortantes penetran y raspan más.

El desplazamiento de los conos, también conocido como ángulo de excentricidad (medida de cuanto se inclinan los cojinetes para que el eje de cada cono no se cruce en el centro de la broca)<sup>3</sup> de los mismos junto con su forma, provocan que los conos detengan su movimiento giratorio por periodos de tiempo, mientras la broca sigue girando, ocasionando el deslizamiento de las estructuras cortantes en el fondo del hueco a medida que raspan la formación. El ángulo de excentricidad puede variar dependiendo de la formación que se desee perforar, por ejemplo para formaciones blandas, el ángulo sería de 5° y para formaciones duras sería de 0°. También es pertinente mencionar que las brocas para formaciones blandas, utilizan estructuras de corte más largas junto con ángulos de desplazamiento en los conos que reducen el movimiento, y para formaciones duras, utilizan estructuras más cortas junto con conos que giren más, provocando una acción trituradora en la roca. Figura 13.

---

<sup>3</sup> Besson, A., Burr, B., et. al. (2000). Oilfield Review Autumn 2000: 12, no. 3. "On the Cutting Edge". Schlumberger

**Figura 13. Acciones de perforación con conos giratorios**



Fuente: Besson, A., Burr, B., et. al. (2000). Oilfield Review Autumn 2000: 12, no. 3. "On the Cutting Edge". Schlumberger.

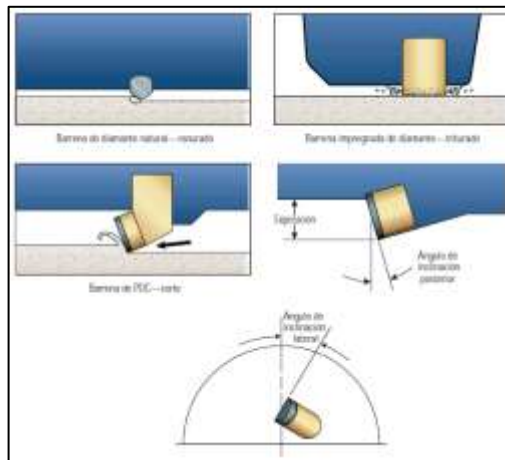
### **1.7 MECANISMOS DE CORTE DE LAS BROCAS DE CORTADORES FIJOS**

Este tipo de broca, no cuenta con partes móviles, es un cuerpo de acero o de matriz en el que se encuentran las cuchillas o aletas donde van montados los cortadores impregnados de diamante; ellas son la evolución de las anteriores brocas de arrastre con cuchillas de acero. Las brocas de cortadores fijos se clasifican principalmente en tres tipos de brocas: PDC, TSP y de diamante natural.

El mecanismo de corte que utilizan las brocas de diamante natural es el de perforar la roca rasurándola; por otro lado las impregnadas de diamante, trituran las formaciones actuando como si fueran ruedas abrasivas o lijas, por ultimo las brocas PDC perforan las formaciones rápidamente actuando similar a como lo

haría un torno, además <sup>4</sup> los ángulos de inclinación posterior y lateral y la exposición del cortador definen cuan agresivamente los cortadores PDC harán contacto con las formaciones. Figura 14.

**Figura 14. Acciones de perforación de los cortadores fijos**



Fuente: Besson, A., Burr, B., et. al. (2000). Oilfield Review Autumn 2000: 12, no. 3. "On the Cutting Edge". Schlumberger.

De los mecanismos básicos de remoción de rocas el más eficaz es el corte, debido a que la resistencia de las rocas a la tensión es normalmente menor a la resistencia a la compresión. Las brocas PDC perforan rápido debido a la acción de corte que ejercen, lo que requiere menos energía que las grandes cargas que ocasionan fallas por compresión en las formaciones.

---

<sup>4</sup> Besson, A., Burr, B., et. al. (2000). Oilfield Review Autumn 2000: 12, no. 3. "On the Cutting Edge". Schlumberger.

## 1.8 VARIABLES OPERATIVAS QUE INFLUYEN EN EL DESEMPEÑO DE LAS BROCAS DE PERFORACIÓN

Existen muchas variables que influyen el desempeño de las brocas de perforación, éstas actúan de una u otra forma en todo el sistema y por consiguiente afectan a las brocas que son parte fundamental del mismo.

Es importante identificar y definir estas variables para optimizarlas, con el fin de prolongar la vida útil de la broca, y a su vez disminuir los costos de la penetración.

Entre las variables más importantes que influyen el rendimiento de la broca, cabe mencionar:

- Torque
- Peso sobre la broca (WOB)
- Tasa de penetración (ROP)
- Velocidad rotaria (RPM)
- Tasa de flujo o caudal

**1.8.1 Torque.** Si tenemos un cuerpo rígido, y le aplicamos una fuerza en un punto cualquiera del mismo, este realizará un movimiento de rotación en torno a algún eje. A eso se le denomina torque y se mide en [libra-fuerza/pie].

En brocas PDC, tener un alto torque implica que es muy posible que la broca esté excavando o si hay baja tasa de penetración, el BHA es el que podría estar generando el torque y no la broca. Por el contrario, si tenemos un bajo torque significa que la broca probablemente está patinando en una formación dura y la estructura de corte podría estar embolada.

En brocas tricónicas tener un torque alto podría significar que los conos están bloqueados, y si eso sucede, el torque irá disminuyendo a medida que los dientes de la broca se van desgastando; torque medio significa que la broca puede estar excavando; mientras que el torque bajo indica que los cortadores podrían estar embolados o sin filo.

Se considera un torque muy alto, cuando la velocidad de rotación en superficie comienza a bajar, también se puede inferir esto si el motor, la mesa rotaria o el top-drive pierden velocidad.

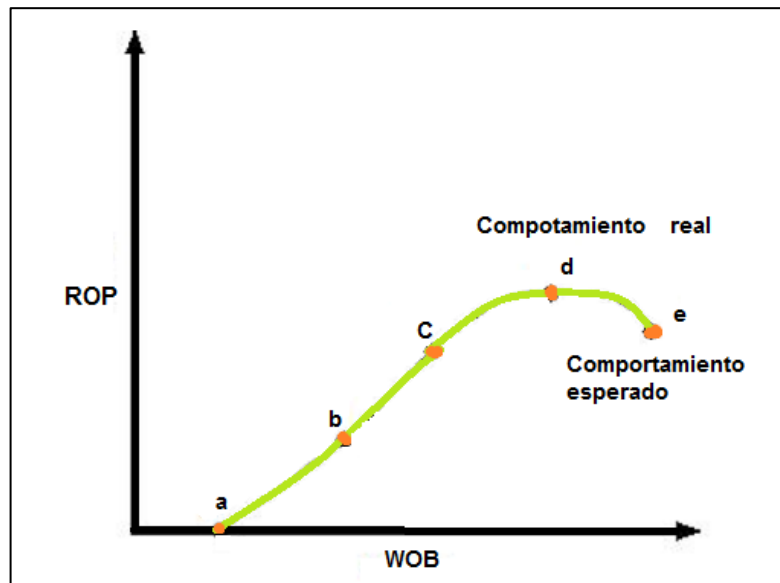
**1.8.2 Peso sobre la broca (WOB).** El WOB o peso sobre la broca, es el encargado de incrementar la tasa de penetración, siempre y cuando se guarden las recomendaciones del fabricante de la broca, con respecto a este parámetro. Esta variable es fundamental para aumentar o disminuir la tasa de penetración (ROP) y también para aumentar la vida útil de la broca.

El cambio del WOB obedece a los cambios en la dureza de las formaciones, por ejemplo si aumenta la fuerza compresiva de la formación, es importante aumentar el WOB y bajar la ROP.

Si la formación es altamente abrasiva, es necesario mantener o reducir un poco el WOB y también bajar las RPM, ya que esto aumentaría el desgaste de los dientes de la broca.

A medida que el desgaste de la broca va incrementando, también lo hará el WOB con el fin de mantener un óptimo ROP y mantener la estabilidad de la broca, reduciendo las vibraciones que se pueden producir.

**Figura 15. Respuesta típica de la ROP al cambio de peso (WOB) sobre la broca**



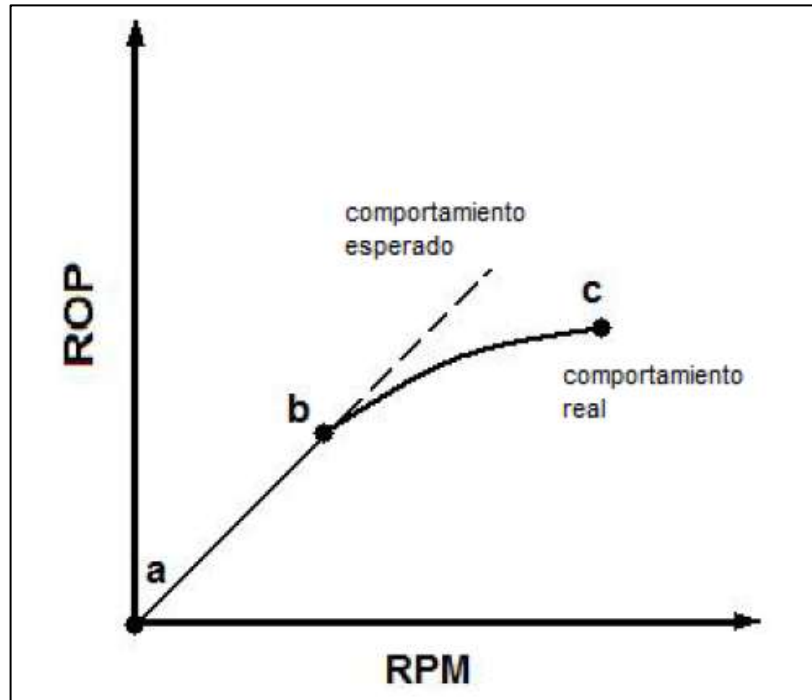
Fuente: Selección de barrenas por correlación – tesis de grado – universidad autónoma de México.

**1.8.3 Tasa de penetración (ROP).** Esta variable se encarga de medir los pies perforados por hora [ft/hora], además indica si se debe o no seguir perforando con la misma broca, ya que de cambiarla se haría porque no se está cumpliendo con el valor adecuado de operación.

**1.8.4 Velocidad rotaria (RPM).** Para obtener la velocidad de rotación total de la broca, se deben sumar los valores de la velocidad de rotación en superficie, con la velocidad de rotación del motor de fondo.

La cantidad de las RPM está en función de la dureza y de la abrasión de la formación, ya que al aumentar la compresión de la misma, es necesario bajar las RPM para minimizar las vibraciones y el desgaste de la broca, por el contrario para formaciones blandas, es necesario aumentarlas para que resulte más eficiente la perforación.

**Figura 16. Respuesta típica de la ROP al cambio de la velocidad de rotación (RPM)**



Fuente: Selección de barrenas por correlación – tesis de grado – universidad autónoma de México.

**1.8.5 Tasa de flujo o caudal.** Este parámetro afecta la limpieza del hueco y de la broca, es decir a mayores tasas de flujo la limpieza es más óptima, luego entonces los recortes serían sacados más eficazmente, lo que produce mejores ROP y un enfriamiento de la broca.

## **1.9 MECANICA DE ROCAS**

Desde el punto de vista práctico de la mecánica de rocas, la condición y propiedades mecánicas de las mismas son de importante interés. En la mayoría de los casos, el complicado proceso que transforma las rocas desde un estado

inicial hasta una roca sedimentaria actual también afectará el comportamiento mecánico de éstas.

Una cuenca sedimentaria puede ser expuesta debido a subsidencia, cambios con respecto al nivel del mar y fuerzas tectónicas, los cuales crean de forma repetitiva ciclos de elevación y depresión, sumado a esto la erosión, los cambios en el ambiente sedimentario, los cambios en la tasa de sedimentación, la disolución y precipitación del material cementante, etc. Todos estos efectos complicarán la descripción geológica de la cuenca sedimentaria, y no solamente las propiedades mecánicas actuales, sino también todas aquellas condiciones límite en términos de los esfuerzos in situ y la presión en poro.

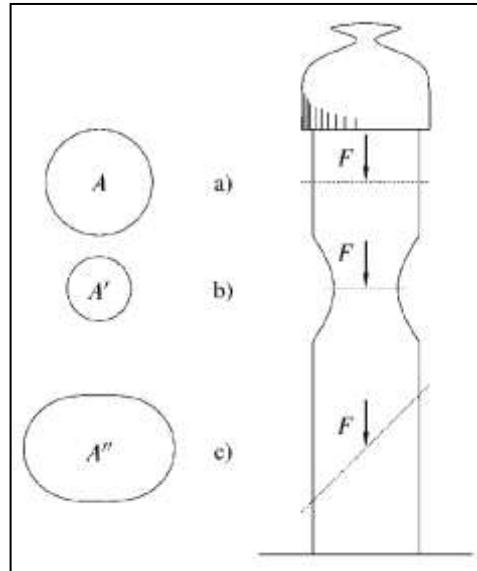
**1.9.1 Elasticidad.** La mayoría de materiales tienen la capacidad de resistir y recuperarse de las deformaciones producidas por la aplicación de fuerzas. Esta propiedad se conoce como elasticidad y es la base de todos los aspectos relacionados a la mecánica de rocas. El tipo de respuesta más simple dentro del estudio de la elasticidad es aquella en la que existe una relación lineal entre las fuerzas externas y las deformaciones correspondientes.

La teoría de la elasticidad se basa en dos conceptos fundamentales, el esfuerzo y la deformación. En cuanto a la mecánica de rocas relacionadas a los yacimientos de petróleo, el interés se centra casi por completo en rocas que tienen porosidades y permeabilidades significativas. La teoría elástica de los materiales sólidos no es suficiente para describir todo el comportamiento de las rocas porosas y permeables, por lo cual se debe tener en cuenta el concepto de la poroelasticidad.

**1.9.1.1 Esfuerzo:** Considerando la situación ilustrada en la figura 17, en la que un objeto de cierta masa reposa sobre la parte superior de una columna, que se encuentra sobre el suelo; debido a la fuerza ejercida por su masa, se percibe la

acción de esta fuerza sobre la columna, mientras que ésta a su vez reacciona con una fuerza de igual magnitud pero en dirección inversa. Por lo tanto la fuerza que actúa desde el tope de la columna debe actuar también a través de cualquier sección transversal de ésta.

**Figura 17. Ilustración de fuerzas y esfuerzos**



Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics – Libro – E. Fjaer et.al.

La fuerza ejercida sobre la selección transversal superior (área A) se denota como F, entonces el esfuerzo  $\sigma$  presente en esa área se define como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

La unidad del SI establecida para el esfuerzo es el Pascal. En la industria del petróleo, es más frecuente utilizar las libras por pulgada cuadrada (psi).

El signo utilizado para las magnitudes del esfuerzo en la mecánica de rocas ha sido definido por convención, considerando a los esfuerzos compresivos como

positivos. La razón histórica de esto se debe a que la mayoría de esfuerzos en este campo son de carácter compresivo.

Como muestra la ecuación 1, el esfuerzo se encuentra definido por una fuerza y un área de sección transversal (o de forma más general, una superficie), a través de la cual actúa la fuerza. Si se considera la sección de área  $A'$ , la fuerza que actúa a través de ella es igual a la fuerza que actúa sobre la sección de área  $A$  (sin tener en cuenta el peso de la columna). Sin embargo el área  $A'$  es menor al área  $A$ , por lo tanto el esfuerzo  $\sigma = F / A'$  es mayor que aquel esfuerzo en el área  $A$ , lo cual indica que el esfuerzo depende de la posición que se tome dentro del objeto de estudio. Generalizando un poco más, el área transversal se puede dividir en un número infinito de sub-secciones, esto con el objeto de definir los esfuerzos locales en cualesquiera puntos sobre el área, a diferencia del esfuerzo promedio de la expresión anterior. Cuando se hace referencia al estado de esfuerzo en un punto, se relaciona implícitamente con estos esfuerzos locales.

La forma en que el área transversal se encuentre orientada con respecto a la dirección de la fuerza también resulta importante en el estudio de esfuerzos. Si se considera la sección transversal de área  $A''$  en la Fig. 3.1, la fuerza no es normal al área, por lo tanto se puede descomponer dicha fuerza en un componente  $F_n$  que es normal al área, y otro componente  $F_p$  que es paralelo a ésta figura 18. La expresión

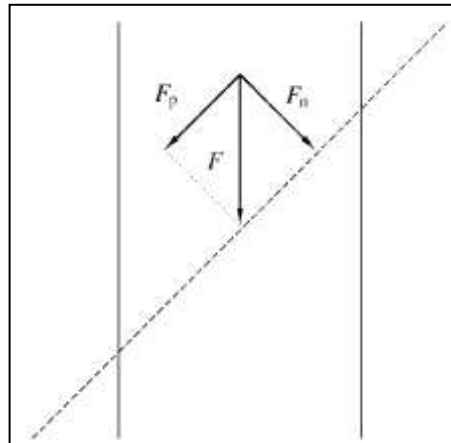
$$\sigma = \frac{F_n}{A''} \quad (2)$$

Se conoce como esfuerzo normal, mientras que la expresión

$$\tau = \frac{F_p}{A''} \quad (3)$$

Se conoce como *esfuerzo de corte* o *de cizallamiento*. De este modo, existen dos tipos de esfuerzo que pueden actuar a través de una superficie, y la magnitud de cada uno depende de la orientación de esa superficie.

**Figura 18. Descomposición de fuerzas**



Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics – Libro – E. Fjaer et.al.

- **Tensor de esfuerzo**

Para describir completamente el estado de esfuerzo en un punto P dentro de la muestra, es necesario identificar los esfuerzos orientados en tres direcciones ortogonales.

Los esfuerzos relativos a una superficie normal al eje-x se denotan por  $\sigma_x$ ,  $\tau_{xy}$  y  $\tau_{xz}$ , los cuales representan el esfuerzo normal, el esfuerzo de corte de una fuerza en la dirección y, y el esfuerzo de corte de una fuerza en la dirección z, respectivamente. Físicamente, sólo habrá un esfuerzo de corte asociado a esta superficie, sin embargo se debe establecer la orientación del esfuerzo, identificando sus componentes axiales:  $\tau_{xy}$  y  $\tau_{xz}$ . De forma similar, los esfuerzos relativos a una superficie normal al eje y se denotan por  $\sigma_y$ ,  $\tau_{yx}$  y  $\tau_{yz}$ , mientras que los esfuerzos relativos a una superficie normal al eje z por  $\sigma_z$ ,  $\tau_{zx}$  y  $\tau_{zy}$ . Por

consiguiente existen en total nueve componentes de esfuerzo relativos a un punto P sobre la superficie de estudio:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

Esta expresión se conoce como *tensor de esfuerzo*, y ofrece una descripción completa del estado de esfuerzo en el punto P.

- **Ecuaciones de equilibrio**

Además de las fuerzas que actúan sobre la superficie de un cuerpo, existen otras que actúan en cualquier parte de dicho cuerpo. Tales fuerzas se conocen como fuerzas de cuerpo (o de masa). Un ejemplo de estas es la gravedad. Se denotan como  $f_x$ ,  $f_y$  y  $f_z$  a los componentes de las fuerzas de cuerpo por unidad de masa que actúan en los puntos  $x$ ,  $y$  y  $z$  de un cuerpo. Por convención,  $f_x$  es positivo si actúa en la dirección negativa  $x$ , y así de forma similar para  $f_y$  y  $f_z$ . Por ejemplo, considérese una pequeña porción del volumen  $\Delta V$  de un material con densidad  $\rho$ . Si  $z$  es el eje vertical, la fuerza de cuerpo debido a la gravedad que actúa sobre este pequeño volumen es  $\rho f_z \Delta V = \rho g \Delta V$ , donde  $g$  es la aceleración por gravedad.

Generalmente las fuerzas de cuerpo dan lugar a los gradientes de esfuerzo. Por ejemplo, un elemento de una formación no sólo está sujeto a la fuerza de gravedad, sino que también debe soportar el peso de la formación suprayacente. De este modo el esfuerzo total se incrementa al aumentar la profundidad.

Para que un cuerpo sometido a esfuerzos permanezca en reposo, se necesita que todas las fuerzas que actúan sobre él se cancelen. Esta condición resulta en un conjunto de condiciones de simetría para el tensor de esfuerzo. Además, se

originan un conjunto de ecuaciones para los gradientes de esfuerzo. A estas ecuaciones se les conoce como *ecuaciones de equilibrio*.

- **Principales esfuerzos en dos dimensiones**

En ocasiones en las que el sistema coordenado se orienta de alguna manera en especial, el tensor de esfuerzo toma una forma sencilla. Para describir esta forma, se deben estudiar los esfuerzos en dos dimensiones. De hecho, muchos problemas de interés práctico son efectivamente en dos dimensiones.

Considérense los esfuerzos normal ( $\sigma$ ) y de corte ( $\tau$ ) en una superficie normal a la dirección  $\theta$  en el plano  $xy$ , como se muestra en la Fig.19. El triángulo en la figura se encuentra en reposo, de tal manera que no actúan fuerzas netas sobre él. La cancelación de fuerzas implica que:

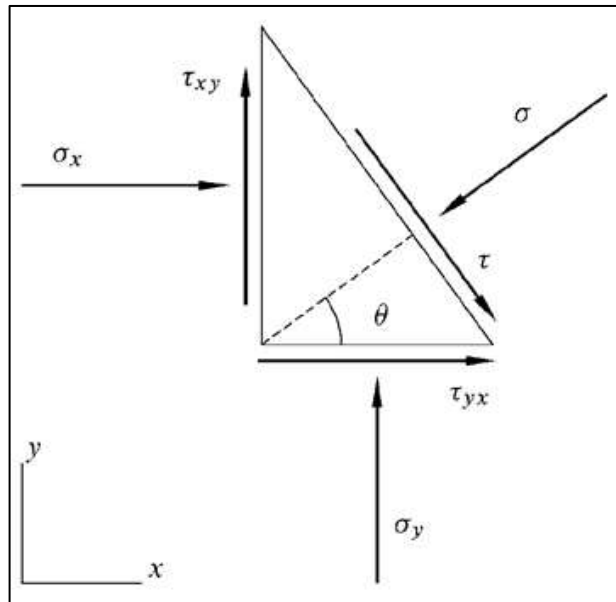
$$\sigma = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (6)$$

$$\tau = \sigma_y \sin \theta \cos \theta - \sigma_x \cos \theta \sin \theta + \tau_{xy} \cos \theta \cos \theta - \tau_{yx} \sin \theta \sin \theta \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2} (\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (8)$$

**Figura 19. Equilibrio de fuerzas en un triángulo**



Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics – Libro – E. Fjaer et.al.

Es posible seleccionar un valor de  $\theta$ , de modo que  $\tau = 0$ . De la Ecuación se nota que esto sucede cuando:

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (9)$$

La Ecuación tiene dos soluciones,  $\theta_1$  y  $\theta_2$ . Ambas corresponden a las dos direcciones para las cuales el esfuerzo de corte  $\tau$  desaparece. Estas dos direcciones se conocen como los *ejes principales de esfuerzo*.

Los esfuerzos normales correspondientes,  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , se conocen como los *esfuerzos principales*, y se hallan al unir las ecuaciones:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4} (\sigma_x - \sigma_y)^2} \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{\tau_{xy}^2 + \frac{1}{4} (\sigma_x - \sigma_y)^2} \quad (11)$$

Los ejes principales son ortogonales

- **Círculos de esfuerzos de Mohr**

A menudo es conveniente re-orientar el sistema coordenado, de tal manera que el eje x se encuentre paralelo al primer eje principal y el eje y paralelo al otro.

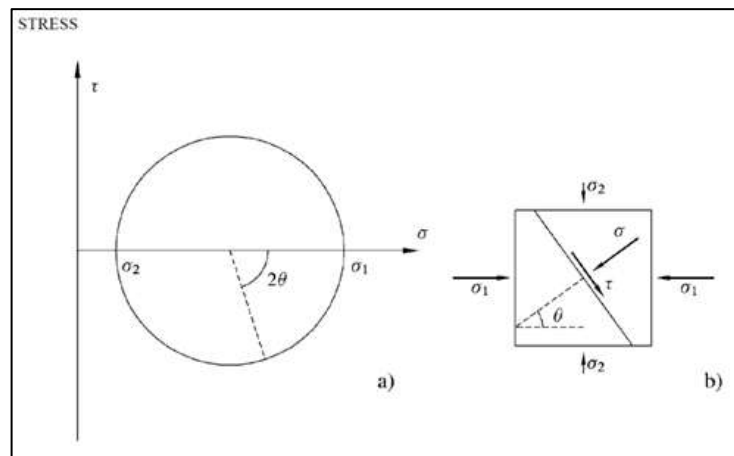
Entonces los esfuerzos  $\sigma$  y  $\tau$  en la dirección general  $\theta$  relativa al eje x, a partir de las ecuaciones, se expresan como:

$$\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (12)$$

$$\tau = -\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \operatorname{sen} 2\theta \quad (13)$$

Al trazar los valores correspondientes de  $\sigma$  y  $\tau$  en un diagrama figura 20, se obtiene un círculo conocido como círculo de Mohr. El radio del círculo es  $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$  y el centro se encuentra en el punto  $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$  en el eje  $\sigma$ .

**Figura 20. Círculo de Mohr**



Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics – Libro – E. Fjaer et.al.

Los esfuerzos  $\sigma$  y  $\tau$  en cualquier dirección figura 20b corresponden a un punto cualquiera en el círculo de Mohr. En la figura 20a se nota que el mayor valor absoluto para el esfuerzo de corte es  $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$  y ocurre para  $\theta = \pi / 4 (= 45^\circ)$  y  $\theta = 3\pi / 4 (= 135^\circ)$ . El círculo de Mohr es una herramienta útil en el análisis de las condiciones para falla de rocas.

**1.9.1.2 Deformación:** Si se considera una muestra como la que se muestra en la figura. La posición de una partícula específica dentro de la muestra inicialmente es  $x, y, z$ . Después de la acción de una fuerza externa, la posición de esta partícula se desplaza. Este desplazamiento en la dirección  $x$  se denota como  $u$ , el desplazamiento en la dirección  $y$  como  $v$ , y el desplazamiento en la dirección  $z$  como  $w$ . Las cantidades  $u, v$  y  $w$  se conocen como los desplazamientos de la

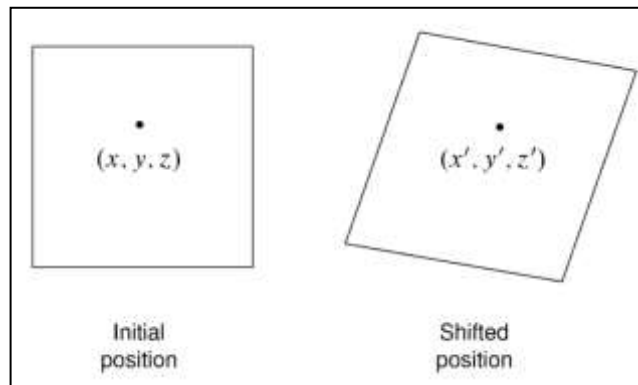
partícula. Con el fin de lograr que los signos de los *desplazamientos* sean compatibles con los signos de los esfuerzos, como se definieron anteriormente, los desplazamientos se toman como positivos cuando apuntan hacia la dirección negativa de los ejes. Por lo tanto, la nueva posición de la partícula que inicialmente estaba en  $x, y, z$  es

$$x' = x - u \quad (14)$$

$$y' = y - v \quad (15)$$

$$z' = z - w \quad (16)$$

**Figura 21. Deformación de la muestra**



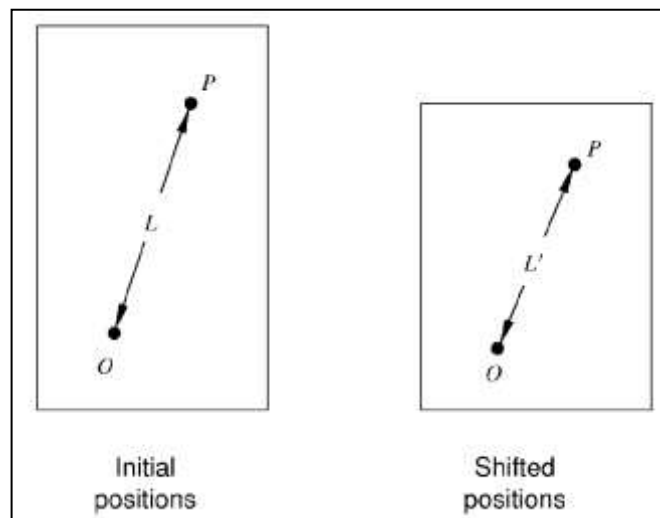
Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics – Libro – E. Fjaer et.al.

Si los desplazamientos  $u, v$  y  $w$  son constantes, es decir que son los mismos para cualquier partícula dentro de la muestra, entonces el desplazamiento simplemente es una traslación de un cuerpo rígido. Otra forma sencilla de desplazamientos es la rotación de un cuerpo rígido.

Si la posición relativa de las partículas dentro de la muestra cambia, de modo tal que las nuevas posiciones no pueden ser obtenidas simplemente a través de una traslación rígida y/o rotación de la muestra, se dice que la muestra ha sido deformada. La figura 22 presenta un ejemplo de una muestra deformada. Los desplazamientos relativos a las posiciones  $O$  y  $P$  no son iguales. La cantidad definida por

$$\varepsilon = \frac{L - L'}{L} = -\frac{\Delta L}{L} \quad (17)$$

**Figura 22. Deformación**



Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics – Libro – E. Fjaer et.al.

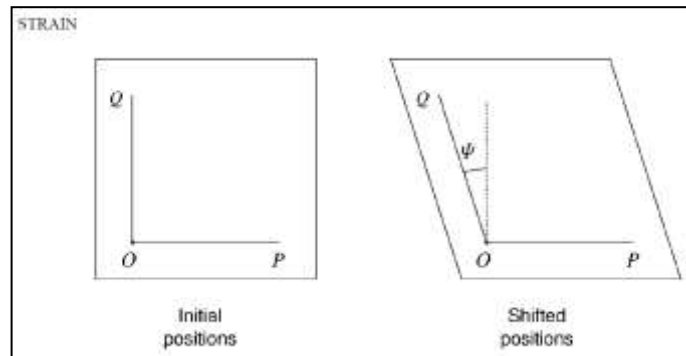
Se conoce como la *elongación* correspondiente al punto  $O$  y a la dirección  $OP$ . Para cumplir con la convención de signos para los esfuerzos, se requiere que la *elongación sea positiva para una contracción*.

La elongación es un tipo específico de cantidades conocidas como *deformaciones*. El otro tipo de deformación que puede ocurrir se expresa como el cambio  $\psi$  del ángulo entre dos direcciones inicialmente ortogonales (figura 23). La cantidad

$$\Gamma = \frac{1}{2} \tan \psi \quad (18)$$

Se conoce como *deformación por cizallamiento* (o *de corte*) correspondiente al punto  $O$  y a la dirección  $OP$ .

**Figura 23. Deformación de cizallamiento**



Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics – Libro – E. Fjaer et.al.

- **Tensor de deformación y variables independientes de deformación** De forma similar a la ecuación, las deformaciones se pueden organizar en un tensor de deformación:

$$\vec{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \Gamma_{xy} & \Gamma_{xz} \\ \Gamma_{xy} & \varepsilon_y & \Gamma_{yz} \\ \Gamma_{xz} & \Gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (19)$$

- **Deformaciones principales**

Anteriormente se observó que para algunas direcciones específicas el esfuerzo de corte desaparece, de tal modo que para una orientación específica del sistema

coordinado (con el eje paralelo a los ejes principales de esfuerzo) el tensor de esfuerzo toma una forma sencilla. Esta situación es similar para las deformaciones.

En dos dimensiones, se puede demostrar que la deformación por cizallamiento desaparece en las direcciones  $\theta$  relativas al eje  $x$ , lo cual satisface la ecuación:

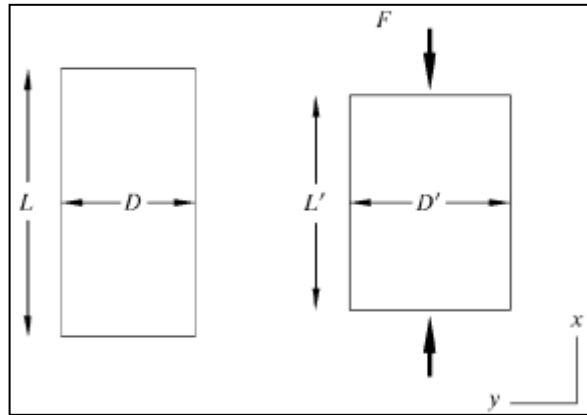
$$\tan 2\theta = \frac{2\Gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (20)$$

Por consiguiente, en dos dimensiones, hay dos direcciones ortogonales para las cuales la deformación por cizallamiento desaparece. Estas direcciones se conocen como los *ejes principales de deformación*. Las elongaciones en las direcciones de los principales ejes de deformación, se conocen como *deformaciones principales*.

**1.9.1.3 Módulos elásticos** La teoría de elasticidad lineal se ocupa de situaciones en las que existen relaciones lineales entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes. Mientras que la mayoría de las rocas se comportan de forma no lineal cuando están sujetas a esfuerzos grandes, su comportamiento se puede describir por medio de relaciones lineales para cambios lo suficientemente pequeños en cuanto al esfuerzo. Considérese una muestra de longitud  $L$  y área de sección transversal  $A = D^2$  (figura 24). Cuando la fuerza  $F$  es aplicada sobre las superficies superior e inferior, la longitud de la muestra se reduce a  $L'$ . Entonces el esfuerzo aplicado es  $\sigma_x = F / A$  y la elongación correspondiente es  $\varepsilon_x = (L - L') / L$ , de acuerdo a las ecuaciones. Si la muestra exhibe un comportamiento lineal, es porque existe una relación lineal entre  $\sigma_x$  y  $\varepsilon_x$ , la cual se expresa como

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x \quad (21)$$

**Figura 24. Deformación ocasionada por un esfuerzo uniaxial**



Fuente: Petroleum Related Rock Mechanics – Libro – E. Fjaer et.al.

Esta ecuación se conoce como *ley de Hooke*, mientras que el coeficiente  $E$  es el *módulo de Young* o simplemente el módulo  $E$ . El módulo de Young es una medida de la rigidez de una muestra, es decir la resistencia de la muestra a ser comprimida por un esfuerzo uniaxial, y pertenece a un grupo de coeficientes conocidos como los *módulos elásticos*.

Otra consecuencia del esfuerzo aplicado  $\sigma_x$  (figura 24) es un incremento en el ancho  $D$  de la muestra. La elongación lateral es  $\varepsilon_y = \varepsilon_z = (D - D') / D$ . Por lo general  $D' > D$ , por consiguiente  $\varepsilon_y$  y  $\varepsilon_z$  se tornan negativos. El cociente definido por

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (22)$$

Es otro parámetro elástico, conocido como la *relación de Poisson*, y es una medida de la expansión lateral relativa a la contracción longitudinal.

Los materiales *isotrópicos* son materiales cuya respuesta es independiente de la orientación del esfuerzo aplicado. Para tales materiales los ejes principales de esfuerzo y los ejes principales de deformación siempre coinciden.

Para las rocas, la relación de Poisson normalmente es 0.15-0.25. Para las rocas menos resistentes y porosas,  $\nu$  puede aproximarse a cero o incluso tornarse negativa. Los módulos elásticos son medidos en las mismas unidades que el esfuerzo, p.ej., Pa, psi o bar.

**1.9.1.4 Poroelasticidad:** Los conceptos anteriores para ser comprendidos consideran a las rocas como homogéneas y sólidas. Sin embargo, las rocas por lo general son materiales compuestos, y por lo tanto son heterogéneas a escala microscópica. La forma en que las rocas se comportan, su respuesta elástica, sus esfuerzos de falla, etc., dependen, en gran medida, de los componentes *no sólidos* de los materiales.

- **Suspensión de partículas sólidas en un fluido**

Si se considera un medio poroso sencillo; específicamente uno en el que las partes sólidas y fluidas se deforman independientemente una de otra. En la práctica, este medio se puede concebir como una suspensión de partículas sólidas en un fluido, o por ejemplo, como una arena completamente no-consolidada y saturada por agua. Si esta mezcla se coloca en un recipiente, la deformación volumétrica debida a una presión externa  $\sigma_p$  es:

$$\varepsilon_{vol} = \frac{\sigma_p}{K_{eff}} \quad (23)$$

Donde  $K_{eff}$  es el módulo de elasticidad de volumen de la mezcla. La deformación total sin embargo, debe ser igual a la suma a las deformaciones de cada componente, atribuidas a la porción de volumen de cada componente.

$$\varepsilon_{vol} = \frac{V_s}{V_{tot}} \varepsilon_{vol,s} + \frac{V_f}{V_{tot}} \varepsilon_{vol,f} \quad (24)$$

Donde los subíndices s y f denotan sólido y fluido, respectivamente, y  $V_{tot}$  es el volumen total. Ahora, la porosidad  $\phi$  se define como el volumen ocupado por el fluido con respecto al volumen total, es decir:

$$\phi = \frac{V_f}{V_{tot}} \quad (25)$$

$$\frac{V_s}{V_{tot}} = 1 - \phi \quad (26)$$

Las deformaciones  $\varepsilon_{vol,s}$  y  $\varepsilon_{vol,f}$  se obtienen del módulo de elasticidad de volumen del sólido ( $K_s$ ) y del fluido ( $K_f$ ), respectivamente, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_{vol}} = \lambda + \frac{2}{3}G \quad (27)$$

Entonces la Ecuación se puede escribir como:

$$\varepsilon_{vol} = (1 - \phi) \frac{\sigma_p}{K_s} + \phi \frac{\sigma_p}{K_f} \quad (28)$$

Combinando esta ecuación con la Ecuación. Se encuentra que el módulo efectivo de la suspensión está dado por

$$\frac{1}{K_{eff}} = \frac{1 - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f} \quad (29)$$

## **2. FENÓMENOS Y VARIABLES QUE AFECTAN AL DESGASTE DE LAS BROCAS**

Los fenómenos que afectan el desgaste de las brocas de perforación se puede dividir principalmente en: geológicos y operativos. El primero como su nombre lo indica son todos aquellos fenómenos que se derivan de las rocas como son la abrasión, la dureza de las formaciones, el tipo de minerales que contiene la roca etc; por otro lado las variables operativas son aquellas que tienen que ver con la broca, como la hidráulica, las variables que se pueden manejar (ROP,WOB, RPM), etc. El cuidado y control de estas variables y fenómenos permitirá minimizar el desgaste y determinar su rendimiento de operación sobre las formaciones que se van a perforar.

### **2.1 HIDRAULICA EN LAS BROCAS DE PERFORACIÓN**

Las brocas de perforación requieren de una hidráulica que cumpla cuatro funciones básicas: separación de los recortes desprendidos, limpieza de los conos y los cortadores, enfriamiento de la broca y transporte de los recortes hacia la superficie, para evitar la pulverización de los mismos. Si la hidráulica de las brocas es capaz de cumplir con estas funciones, se pueden obtener rendimientos más altos en la perforación y velocidades de penetración más óptimas.

Por ejemplo en brocas PDC la hidráulica es de vital importancia, ya que este tipo de brocas son brocas de arrastre y producen altas temperaturas al momento de perforar, la hidráulica ayuda a disminuir la temperatura y así evitar la degradación térmica de la broca y por consiguiente aumentar su vida útil.

Los métodos de optimización de la hidráulica tienen como objetivo principal determinar la caída de presión en la broca, con el fin de determinar la energía

generada por el equipo de bombeo en superficie, sea transmitida óptimamente hasta el fondo del pozo para su correcta limpieza.

## 2.2.1 Propiedades del lodo en la hidráulica de brocas

**2.2.1.1 Densidad:** Es la masa por unidad de volumen y se expresa en libras por galón (ppg). La densidad permite generar una presión hidrostática, que es clave en el control de las presiones del subsuelo.

**2.2.1.2 Viscosidad plástica:** Es la resistencia del fluido a fluir causada por la fricción mecánica. Se expresa en centipoise (cp) y se ve afectada por: la concentración de sólidos y el tamaño y forma de los sólidos.

**2.2.1.3 Punto cedente:** Es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción en un fluido. Estas fuerzas son el resultado de las cargas positivas y negativas ubicadas en o cerca de las superficies de las partículas.

**2.2.1.4 Resistencia de gel (lb/100 ft<sup>2</sup>):** Se conoce como tixotropía a la propiedad de algunos fluidos para formar una estructura de gel cuando están estáticos, regresando al estado de fluidez cuando se aplica un esfuerzo de corte.

**2.2.2 pérdidas de presión en las brocas:** La pérdida de presión es una función directa de la tasa de fluido, área de la boquilla y peso del lodo.

$$\Delta P_b = \frac{Q^2 \times \rho}{10,858 \times A_n^2} \quad (30)$$

Donde

Q = tasa de flujo [GPM]

$\rho$  = Peso del lodo [ppg]

**2.2.3 Caballaje hidráulico de la bomba.** También es conocido como potencia hidráulica de la broca y es la tasa a la cual el fluido trabaja en el área específica de flujo en la broca, es decir en el orificio de una boquilla o en el área total del flujo (TFA). Este concepto es el más usado para la optimización de la hidráulica, pero se tienen que tener en cuenta ciertas consideraciones:

- Una potencia hidráulica baja en la broca puede producir bajas velocidades de penetración y un rendimiento deficiente de la broca.
- La potencia hidráulica en la broca no puede exceder la potencia hidráulica total del sistema.

$$BHHP = \frac{\Delta P_b x Q}{1,714} \quad (31)$$

**2.2.4 Caballaje hidráulico por pulgada cuadrada de la broca (hsi).** Este varía significativamente dependiendo del diámetro de la broca. Para una comparación más fácil, BHHP se convierte a HSI.

$$HSI = \frac{BHHP}{0,785 x D_b^2} \quad (32)$$

Donde

$D_b$  = diámetro de la broca en pulgadas

**2.2.5 Fuerza De Impacto Hidráulica.** Es Definida Como La Fuerza De Choque Del Fluido Contra La Formación A Través De La Broca, Como Una Función De Densidad Del Fluido, Tasa De Circulación Y Velocidad En La Boquilla.

$$IF = \frac{V_n x Q x \rho}{1,930} \quad (33)$$

Donde

$V_n$  = velocidad en el jet [ft/seg]

Q = caudal [gpm]

$\rho$  = densidad [lb/gal]

**2.2.6 Velocidad en el jet.** Es la velocidad con la que circula el fluido en las boquillas de los ejes de la broca. [ft/seg]

$$V_n = \frac{417,2 \times Q}{(D_{n1}^2 + D_{n2}^2 + D_{n3}^2 + \dots)} \quad (34)$$

Donde

Q = caudal [gpm]

$D_n$  = diámetro de la boquilla [1/32 pulg]

**2.2.7 Área total de flujo (tfa).** El área total de flujo de las brocas con boquillas es la suma del área circular de todas las boquillas y es expresada en pulgadas cuadradas.

$$TFA = (7,6699 \times 10^{-4}) \times (D_{n1}^2 + D_{n2}^2 + D_{n3}^2 + \dots) \quad (35)$$

Donde

$D_n$  = diámetro de la boquilla [1/32 pulg]

## 2.3 VIBRACIONES

Se entiende por vibración como “la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio)”.<sup>5</sup>

En la perforación siempre se presentan vibraciones, éstas varían en magnitud y provocan que la energía requerida en la perforación no se transmita en su totalidad para hacer el agujero; luego entonces se convierten en un problema frecuente, que equivale a altos costos en la operación, mayor tiempo en el desarrollo de la misma y daños en a través de toda la sarta; principalmente en la broca, donde afecta significativamente su rendimiento. Estas vibraciones no son más que la energía que se libera en forma mecánica, debido al desbalance que existe en un sistema de perforación; dicho sistema constituido por la interfaz con la formación que se está perforando, la sarta de perforación, la broca y el fluido de perforación. La energía que se libera es debido a la relación  $E_s$  (energía necesaria para perforar la roca)  $<$   $E_{ts}$  (energía total del sistema); Est es la suma de varios factores como el peso sobre la broca, las RPM, la tasa de lodo, la fricción de la sarta contra las paredes del agujero etc.

Como el sistema tiende a permanecer en equilibrio, es ahí cuando las vibraciones aparecen, liberando energía para hacer que el sistema se conserve en ese estado.

**2.3.1 Definición de los tipos de vibraciones en la sarta de perforación.** Las vibraciones en la sarta de perforación se deben principalmente a todo cambio en las condiciones de perforación; las condiciones en el fondo del pozo cambian debido a factores tales como el contacto entre la broca y la formación y el contacto entre la sarta y la pared del pozo.

---

<sup>5</sup> Smith Gonzales, J., Cedro Resendiz Y. Vibración en la sarta de perforación, tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México. 2010.

- Interacción broca/agujero: Las condiciones en la interface formación-broca como son la velocidad de la broca y la dureza de la roca son los factores más importantes en la integración de la respuesta dinámica. Debido a la variante e incierta naturaleza de estas condiciones, una simple metodología operacional no es suficiente para eliminar las vibraciones y los daños consecuentes a la que se enfrenta el personal.<sup>6</sup>
- Interacción agujero/sarta de perforación: Conocer los estados críticos de la sarta de perforación y desarrollar las mediciones que reduzcan sus efectos adversos en la operación mejora la eficiencia de la misma. Muchos estados pueden estar acompañados por pandeo y vibraciones extremas de la sarta de perforación cuando sus frecuencias naturales igualan la velocidad angular de rotación. Es importante no únicamente establecer las velocidades críticas de rotación de las brocas de perforación, si no también identificar los estados de Flexión o pandeo, el cual permitirá encontrar regiones de interacción entre la sarta y la pared del agujero y calcular la reacción de tales interacciones.
- Otras causas a considerar, pueden ser la flexión de la tubería y el desalineamiento de la sarta.

Las vibraciones que se crean se clasifican dependiendo de la dirección en que estas se presentan, luego entonces pueden ser axiales, laterales y torsionales y a su vez estos movimientos generan fenómenos vibratorios como son salto de la broca, atascamiento/deslizamiento, flexión y giro excéntrico.

**2.3.1.1 Vibraciones axiales:** Este tipo de vibraciones son más comunes en brocas tricónicas y pueden causar saltos en la sarta de perforación y por

---

<sup>6</sup> Smith Gonzales, J., Cedro Resendiz Y. Vibración en la sarta de perforación, tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México. 2010.

consiguiente, disminuir la ROP. Para el caso de la perforación de pozos verticales someros se pueden detectar las vibraciones en la superficie gracias a las variaciones en la carga del gancho y los saltos en el top drive o en la kelly; por el contrario para pozos horizontales y pozos a grandes profundidades las vibraciones pueden ser atenuadas y se necesitara de un sistema de detección de vibración para identificar el problema en la superficie.

**2.3.1.2 Vibraciones torsionales:** Las vibraciones torsionales hacen que la rotación en la broca sea irregular, gracias a esto, se pueden presentar cuatro daños principales: fatiga de la tubería, fallos en los componentes de la sarta, inestabilidad del pozo y deformaciones en las paredes del pozo y por último daños en la broca<sup>7</sup>; todos estos daños producen una reducción el rendimiento en la perforación; este fenómeno de vibración torsional es conocido con el nombre de Stick/slip. Este tipo de vibraciones provocan una disminución en la velocidad de rotación de la broca y en los estabilizadores, mientras que la velocidad en la mesa rotaria y en el top drive se mantiene o aumenta, lo que conlleva a que la broca y el estabilizador acumulen gran cantidad de energía que cuando se libera, provoca un incremento drástico y peligroso en la velocidad de rotación. Las ondas torsionales viajan a través de toda la sarta de perforación, desde el fondo a la superficie y de regreso a la broca.

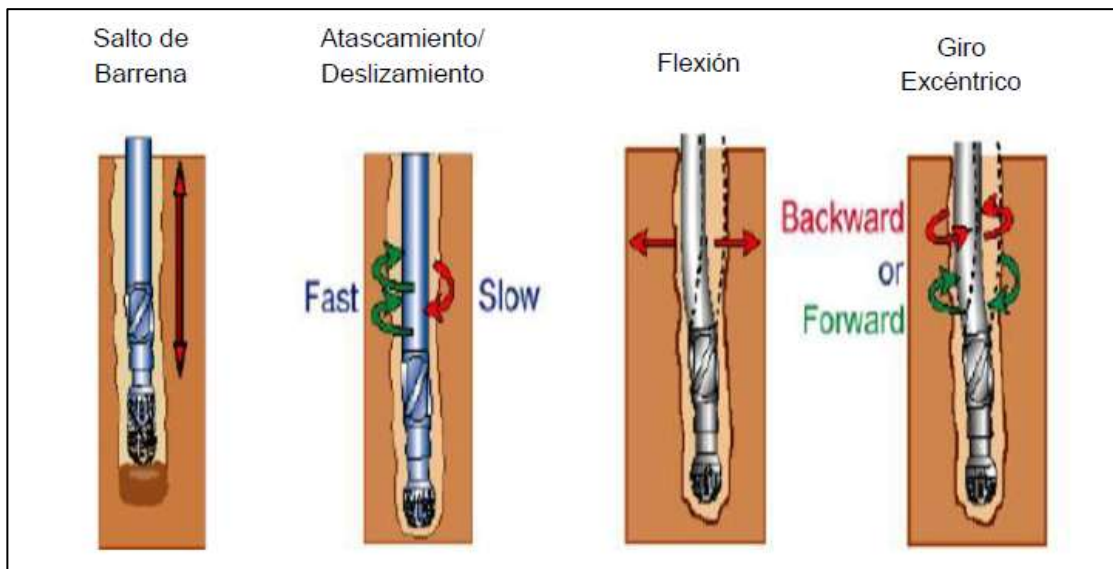
**2.3.1.3 Vibraciones laterales:** Estas vibraciones se presentan cuando la broca o los estabilizadores giran alrededor de un eje no coincidente con el eje del agujero, lo cual provoca una ampliación en el diámetro del pozo. Al contrario que las vibraciones torsionales, estas no pueden ser identificadas en superficie, lo cual provoca que los daños en la sarta sean más severos, gracias a los ciclos de tensión de alta frecuencia a los que la sarta es sometida.

---

<sup>7</sup> Navarro López, E., Suárez R. Vibraciones en una sarta de perforación: problemas de control. 2004.

**2.3.2 Fenómenos vibratorios.** Cuando se perfora se pueden presentar ciertos movimientos mecánicos en la sarta, debido a las vibraciones presentadas y definidas anteriormente. Estos mecanismos se pueden acoplar causando otro movimiento resultante que normalmente es llamado respuesta paramétrica.

**Figura 25. Fenómenos vibratorios en la sarta de perforación**



Fuente: Smith Gonzales, J., Cedro Resendiz Y. Vibración en la sarta de perforación, tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México. 2010.

**2.3.2.1 Salto de la broca (bit bouncing):** Este fenómeno provoca que la broca golpee el fondo del pozo en repetidas ocasiones, ocurre principalmente en pozos verticales y cuando se perfora con brocas tricónicas o se perfora formaciones muy duras; también puede ser el resultado de otros mecanismos de movimiento como lo son el atascamiento/deslizamiento (stick-slip) o el giro (whirl). En superficie se puede identificar este fenómeno en los movimientos del top drive o de la Kelly y en la fluctuación del WOB. El salto de la broca provoca fallas tempranas en las mismas y la reducción de la ROP. Algunos métodos para evitar este tipo de fenómeno son la reducción del WOB y el incremento de las RPM, también un

cambio del diseño de la broca o la utilización de amortiguadores en el fondo (shock subs).

**2.3.2.2 Atascamiento/deslizamiento de la sarta (stick/slip):** Se define como un movimiento alternado que va de lento a rápido en el momento de rotación del aparejo de fondo de la sarta de perforación.<sup>8</sup>

Gracias al movimiento de rotación de la broca, esta se detiene por unos momentos causando un torque sobre la sarta de perforación y por consiguiente un giro en esta, esto generalmente ocurre en pozos con ángulos muy elevados, cuando la broca PDC es agresiva y cuando la sarta sufre de fricción contra las paredes del pozo. En superficie se puede identificar este fenómeno mediante las variaciones del torque y de las RPM y los daños que puede causar son un sobretorque, lo que produciría daño en las conexiones de la sarta. La solución para que no se presente este fenómeno puede ser la reducción del WOB y de las RPM, también se puede disminuir la fricción entre la sarta y las paredes del pozo, si se aumenta la lubricidad del lodo.

**2.3.2.3 Rotación no concéntrica de la broca (bit whirl):** Se define como una rotación excéntrica (rotación que no está alrededor del centro geométrico) de la broca, ésta en vez de rotar alrededor de un centro geométrico, rota de manera excéntrica provocando contacto con la pared del pozo; este tipo de fenómenos ocurren debido a un desbalance en la sarta de perforación.

Este fenómeno generalmente ocurre en pozos verticales, en formaciones intermedias y duras y cuando se perfora con brocas PDC con cortadores laterales muy agresivos. En superficie la detección es casi imposible, solo se detecta en la

---

<sup>8</sup> Smith Gonzales, J., Cedro Resendiz Y. Vibración en la sarta de perforación, tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México. 2010.

broca cuando esta sale debido a ciertas características como son el estar fuera de medida del agujero o fuera de round; en el fondo se detecta gracias a la presencia de vibraciones laterales de alto impacto, estos altos impactos inducen al movimiento de whirl en la broca, provocando fallas prematuras en el aparejo de fondo de la sarta de perforación, fallas en las brocas y la reducción de las ROP. Para reducir este fenómeno es necesario utilizar brocas anti whirl.

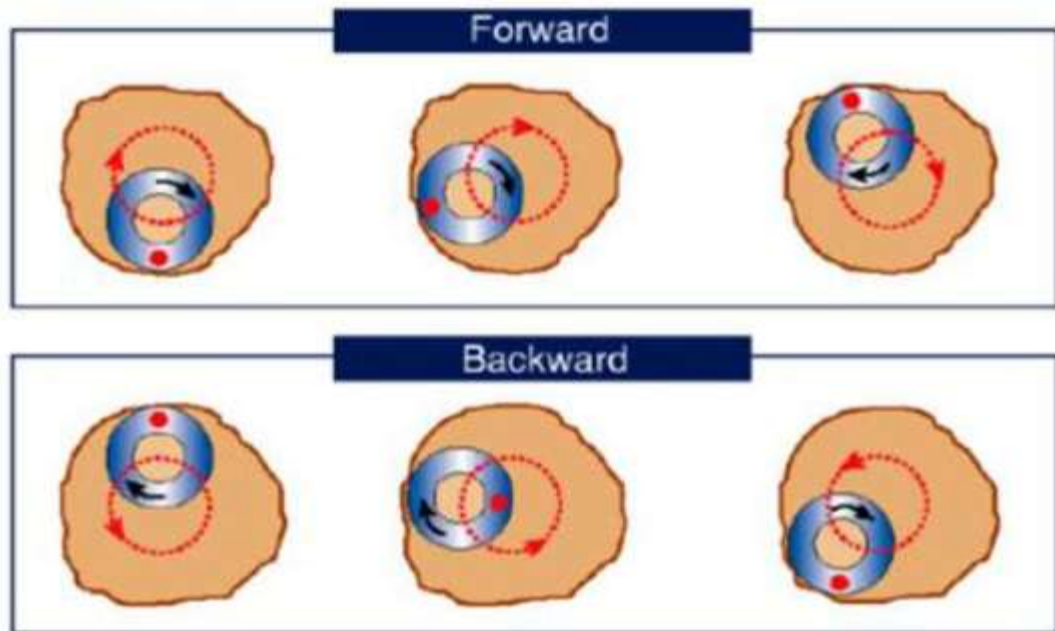
**2.3.2.4 Rotación no concéntrica del aparejo de fondo (BHA whirl):** Se define como el movimiento excéntrico del aparejo de fondo de la sarta de perforación en el pozo<sup>9</sup>. Este movimiento también puede ser en la misma dirección de la rotación de la tubería, en reversa o en movimientos caóticos. Este fenómeno ocurre generalmente en pozos verticales, en secciones inestables del aparejo de fondo de la sarta de perforación y cuando la lubricidad del lodo no es la adecuada. En superficie es detectable cuando ese movimiento induce al bit bouncing o la revisión de los componentes de la sarta de perforación después de las corridas; cuando se presenta desgaste de un solo lado de los estabilizadores y de las uniones especiales de las herramientas son señales típicas del BHA Whirl.

Para la reducción de este fenómeno se recomienda la utilización de escariadores y el incremento de la lubricidad del lodo, así como el rediseño del aparejo de fondo de la sarta de perforación y de mejores prácticas en la perforación. Cualquier intento de reducción de este tipo de movimiento mientras se está perforando debe empezar con el paro en la perforación para eliminar la resonancia que existe para después cambiar las RPM y el WOB en la superficie.

---

<sup>9</sup> Smith Gonzales, J., Cedro Resendiz Y. Vibración en la sarta de perforación, tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México. 2010.

**Figura 26. Tipos de giro**



Fuente: Smith Gonzales, J., Cedro Resendiz Y. Vibración en la sarta de perforación, tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México. 2010.

**2.3.3 Efecto de las vibraciones en las brocas de perforación.** Como ya se mencionó anteriormente las vibraciones axiales, torsionales y laterales afectan significativamente el desempeño de toda la sarta de perforación, al igual que los fenómenos vibratorios (atascamiento/deslizamiento (stick-slip), giro (whirl) en brocas PDC y el salto de la broca en brocas tricónicas) afectan significativamente a las brocas; estudios realizados anteriormente sobre el efecto de las vibraciones en la sarta de perforación, han arrojado diseños nuevos implementados a las brocas, con el fin de mitigar estos efectos y de optimizar la operación.

**2.3.3.1 Daños en las brocas PDC debido a las vibraciones:** En las brocas PDC los fenómenos vibratorios que más afectan su rendimiento y que producen una falla rápida son el stick-slip y el giro excéntrico (whirl), estos afectan la broca de muchas maneras negativas como en el rendimiento, la durabilidad, la tasa de perforación y el tiempo de vida de la broca.

Las brocas PDC son brocas muy eficientes, con altas tasas de perforación en condiciones normales; pero cuando entran en formaciones más duras las estructuras de corte se ven afectadas, por lo cual la tasa de perforación disminuye. Esto se presenta cuando la broca PDC entra en estas formaciones, el peso (WOB) tiende a aumentar para que la tasa de perforación no se vea comprometida, este aumento del WOB provoca en la broca el fenómeno vibratorio conocido como stick-slip el cual provoca un gran daño en la misma; como la broca sufre un mayor torque causado por el fenómeno, esto provoca una repentina liberación de energía, la cual genera una velocidad de rotación muy grande que compromete la vida de la broca, por lo cual su control o reducción es importante, y como se mencionó anteriormente, los efectos principales que sufre la broca son las rupturas de los insertos de diamantes o cortadores y las fallas tempranas, estos hechos acortan la vida de la misma, causando tiempos de espera y tiempos no productivos.

**Figura 27. Daños en una broca PDC por vibración**



Fuente: Smith Gonzales, J., Cedro Resendiz Y. Vibración en la sarta de perforación, tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México. 2010.

**2.3.3.2 Daños en las brocas tricónicas debido a las vibraciones:** Las brocas tricónicas están mayormente afectadas por las vibraciones axiales, las cuales provocan un fenómeno ya mencionado como es el salto de la broca, aunque estas también pueden presentar los mismos fenómenos que las brocas PDC, causando los mismos efectos.

Por ejemplo, cuando las brocas tricónicas sufren vibraciones torsionales, generan un fenómeno llamado atascamiento-deslizamiento (Stick-Slip); se ha observado en varias pruebas que este fenómeno actúa de una manera ciertamente independiente, ya que cuando la broca se encuentra “atascada” las variaciones de los parámetros, en este caso el WOB y TOB son menores en contraparte que cuando se encuentra “deslizándose”, esto se debe a que cuando la broca se atasca, la perforación se detiene, pero ambos parámetros antes mencionados se siguen aplicando en la perforación y durante el periodo donde se desliza la broca estos parámetros cambian, por ejemplo estudios revelan que las RPM pueden ir de 0 a 146 en un instante, mientras que el WOB puede ir de 8,000 lb a 21,000 lb aproximadamente y el TOB puede ir de 200 lb-ft a 800 lb-ft, estas fluctuaciones tan significativas en estos parámetros pueden ser la mayor causa de las rupturas en los insertos de la broca y posiblemente responsables de fallas prematuras en la misma.

Otro ejemplo sería cuando la broca presente un Giro (Whirl), aquí los parámetros WOB y TOB medidos sobre la broca en fondo del pozo son menores a los medidos en superficie, esto se debe a que cuando se está presentando este fenómeno vibratorio, algunos componentes del aparejo de fondo de perforación están en constante contacto con las paredes del pozo, estos contactos con la pared del pozo, generan movimientos axiales y torsionales a lo largo del aparejo de fondo provocados por la fricción. Como resultado de esto, las fuerzas efectivas aplicadas a las brocas se ven reducidas por lo cual la tasa de perforación se ve afectada, además de provocar efectos de destrucción en la broca.

Las estructuras de corte de las brocas tricónicas y sus características influyen significativamente en la dinámica de la broca, y por consiguiente en su desempeño; por lo tanto es importante crear estructuras de corte más balanceadas que mejoraran el desempeño de este tipo de brocas y que reducirán los fenómenos vibracionales.

**Figura 28. Perdida de la nariz de una broca tricónica por vibraciones**



Fuente: Smith Gonzales, J., Cedro Resendiz Y. Vibración en la sarta de perforación, tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de México. 2010.

## 2.4 TIPOS DE FALLAS EN LAS BROCAS PDC

Por mucho tiempo, la industria ha utilizado brocas de diamante sintético para incrementar el rendimiento de la perforación y disminuir costos. Sin embargo, muchos problemas que resultan de las propiedades del material, control de calidad y limitaciones en la tecnología de perforación permanecen con las brocas PDC.

Existen algunos modos de falla de las brocas PDC, como son falla por esfuerzos residuales, falla por fatiga mecánica, falla termofísica y falla termoplástica entre otras.

Los anteriores mecanismos se pueden clasificar en dos categorías: aquellos que involucran fallas inducidas principalmente por efectos mecánicos (falla por esfuerzos residuales y falla por fatiga mecánica) y aquellos que involucran fallas inducidas por efectos térmicos (fallas termofísicas y termoquímicas).

Cabe anotar que las formaciones duras y abrasivas pueden generar muchas más fricción en la interfase broca-roca.

**2.4.1 Falla por esfuerzos residuales.** Después del proceso HPHT (alta presión, alta temperatura), gracias a algunas sustancias que intervienen en el mismo, podemos encontrar graves esfuerzos residuales en las brocas PDC. Un porcentaje significativo de los cortadores es rechazado gracias a que este esfuerzo residual es bastante alto.

Durante las operaciones normales de perforación, el esfuerzo residual dejado por el proceso mencionado anteriormente, puede causar laminación cuando las brocas PDC son sometidas a altas fuerzas de impacto.

Este tipo de desgaste frecuentemente ocurre en las brocas (PDC) cuando perforan formaciones duras. Altas velocidades de impacto causan ondas de choque de compresión, que viajan desde la superficie de la capa de diamante a través del cortador, reflejándose desde la superficie libre como una segunda onda de tensión, lo que causa mucho más daño que las ondas compresivas.

**2.4.2 Falla por fatiga mecánica.** Por debajo de 730 °C, la fatiga mecánica actúa tanto en una microescala como en una macroescala. En la microescala, los

cortadores PDC sufren un daño en forma de un cincelado microscópico, debido a la fatiga mecánica. A esa temperatura, el diamante está sujeto a cargas repetidas que eventualmente fatigan el enlace entre partículas de diamante, rompiéndolo y causando la pérdida de partículas de diamante desde la estructura policristalina.

Este fenómeno de falla por fatiga algunas veces es difícil de comprender, gracias a la extrema rigidez del cristal del diamante, hay un desajuste reticular en la unión entre los cristales y las inclusiones metálicas, generalmente cobalto.

Otras impurezas atrapadas en la zona de enlace proporcionan una zona débil donde las cargas de choque impuestas sobre el cristal rígido, pueden resultar en fatiga cíclica en el límite del grano. Esos enlaces de diamante-diamante que están directamente cerca a la interface cortador/roca soportan la carga de la vibración molecular inducida a través de la acción cortante de los cortadores.

La carga cíclica ocurre a tasa de penetración constante, causando falla por fatiga de los enlaces diamante-diamante.

Desgaste macroscópico atribuido a la fatiga mecánica tiene un mecanismo de desgaste diferente al debilitamiento de los lazos diamante-diamante. Al igual que en otros materiales frágiles, la propagación de grietas a través de la estructura de grano también puede ocurrir. Durante la carga cíclica de los cortadores PDC, fracturas pueden propagarse lentamente a tensiones más bajas a través de la capa de diamante. Las pruebas indican que después de 100.000 ciclos, la fuerza requerida en el borde de corte para inducir agrietamiento o para causar astillado macroscópico es alrededor de un tercio de su valor estático. La propagación de microfisuras cerca de la superficie del diamante, probablemente debilita la estructura de grano del mismo, permitiendo falla macroscópica a bajas tensiones.

**2.4.3 Falla termofísica.** Esta falla traumática resulta de los esfuerzos internos causados por la expansión diferencial del diamante y del material ligador. Cobalto es el ligador más frecuentemente usado en la sinterización<sup>10</sup> del PDC. El coeficiente de expansión térmica del cobalto es considerablemente mayor al del diamante. Por lo tanto, el cobalto se expande más rápidamente que el diamante. Como la temperatura del volumen del diamante aumenta por encima de 730 °C, esfuerzos causados por las diferentes tasas de expansión conducen a graves agrietamientos intergranulares, macrosinzelado y rápida falla de los cortadores PDC.

**2.4.4 Falla termoquímica.** En atmosferas inertes o reducidas, los diamantes son estables alrededor de 1200°C, por lo cual ambos puntos para diamantes naturales y sintéticos vuelven lentamente a la forma cristalográfica que es térmicamente estable a la presión atmosférica. Incluso el llamado PDC térmicamente estable se convierte a grafito si se calienta por encima de la temperatura. Cuando el oxígeno está presente, el diamante se revertirá más rápidamente a grafito, al principio del proceso a bajas temperaturas de alrededor de 875°C.

**2.4.5 Mecanismos de falla del carburo de tungsteno.** El desgaste del carburo de tungsteno está dividido en dos categorías: desgaste microscópico y desgaste macroscópico.

A escala microscópica, los enlaces individuales de diamante en los cortadores PDC, son mucho más fuertes que alguno que se encuentre durante la perforación; a bajas temperaturas, el ligador metálico tiene un pequeño efecto en el comportamiento del desgaste. En contraste, la eliminación preferencial del ligador

---

<sup>10</sup> Sinterizar: Tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza, creando enlaces fuertes entre las partículas.

cobalto es un factor significativo en el daño abrasivo de carburo de tungsteno/cobalto. Hay dos tipos de desgaste abrasivo, el duro y el suave.

El desgaste por abrasión suave ocurre cuando las partículas abrasivas que son más suaves que los granos de carburo de tungsteno y aún más duras que el ligador de cobalto (ejemplo cuarzo), preferencialmente eliminan el enlace, dejando las partículas de carburo de tungsteno libres para ser desalojadas de la estructura. Así en la ausencia de los efectos térmicos, el desgaste por abrasión suave es realmente lento.

El desgaste abrasivo fuerte ocurre cuando las partículas abrasivas que son más duras que el carburo de tungsteno golpean el compuesto y fracturan granos individuales de carburo de tungsteno por el impacto. Esta acción causa un largo grado de deformación plástica como se van formando las ranuras o cráteres en la superficie del material, formando huecos y esfuerzos residuales que conducen a la fragmentación de los granos de carburo de tungsteno.

Evidencia significativa existe que comprueba que los efectos térmicos son más importantes en la influencia del tipo de mecanismo de desgaste que actúa sobre los carburos cementantes.

En una escala macroscópica, los mecanismos de falla del carburo de tungsteno también son afectados por las altas temperaturas. Choque térmico y fatigas causan fallas por esfuerzos térmicos que son inducidos mediante gradientes térmicos cercanos al plano de desgaste. El choque térmico describe el desarrollo del estado del esfuerzo cuando un plano de desgaste a alta temperatura de un cortador PDC es enfriado repentinamente con fluido de perforación. La fatiga térmica, por otro lado, se refieren a los cambios cíclicos en las temperaturas del plano de desgaste que responde rápidamente y cercanamente a las fluctuaciones en el peso sobre los cortadores.

Otras causas para los mecanismos de daño macroscópico son cargas más allá del punto de esfuerzo de compresión de los cortadores, deformación plástica, que deja esfuerzos residuales extensos, cargas cíclicas mecánicas y cargas de impacto; todas las anteriores inducen a las fracturas. A temperaturas elevadas, los anteriores mecanismos exhiben una gran tendencia a propagar fracturas

## **2.5 GRADOS DE DESGASTE DE LAS BROCAS DE PERFORACIÓN**

El grado de desgaste de las brocas de perforación es de suma importancia, ya que mediante el podemos identificar si la broca ha tenido el rendimiento esperado, o si por el contrario su rendimiento ha sido menor, y si así es, se identificarán aquellos factores o problemas que influyeron en el bajo rendimiento de la herramienta.

Uno de los métodos estandarizados en la perforación para la evaluación del desgaste de las brocas, es la implementada por la IADC (International Association of Drilling Contractors) en el año de 1987 y que ha tenido algunas mejoras hasta llegar a la actual.

La IADC formulo dos metodologías para los dos grandes tipos de brocas que son las tricónicas y las de PDC.

**2.5.1 Metodología.** El sistema de graduación de desgaste consta de 8 columnas, que juntas forman un código de 8 caracteres que describe el desgaste de las brocas y la razón que se tuvo para sacarla del agujero.

**Figura 29. Características del desgaste según las estructuras de la broca**

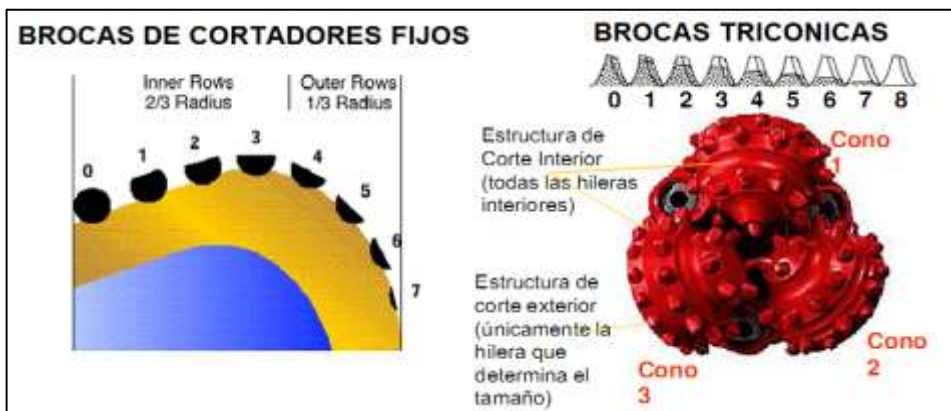
|                      |                    |                  |           |                |              |                |              |               |  |
|----------------------|--------------------|------------------|-----------|----------------|--------------|----------------|--------------|---------------|--|
| T                    |                    |                  |           | B              |              | G              |              | Observaciones |  |
| Estructura Cortadora |                    |                  |           | B              |              | G              |              | Observaciones |  |
| Hileras Interiores   | Hileras Exteriores | Caracter Desgast | Ubicación | Cojinete Sello | Calibre 1/16 | Otros Desgast. | Razón Salida |               |  |
| (1)                  | (O)                | (D)              | (L)       | (B)            | (G)          | (O)            | (R)          |               |  |

Fuente: Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos triconos y e cortadores fijos. Baker Hughes.1999.

1. Columna 1 (I-Interior): se utiliza para reportar el estado de los cortadores que no entran en contacto con la pared del pozo.
2. Columna 2 (O-Exterior): se utiliza para reportar el estado de los cortadores que si entran en contacto con la pared del pozo.

En estas dos columnas anteriores se utiliza una escala lineal de 0 a 8 para establecer el estado de los cortadores.

**Figura 30. Medida de la pérdida de altura del diente por el desgaste**



Fuente: Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos triconos y de cortadores fijos. Baker Hughes.1999.

Lo anterior se aplica tanto para dientes de acero como para dientes de insertos de carburo de tungsteno y se le asigna el valor de 0 para cuando el diente no perdió altura a 8 para cuando el diente perdió toda su altura.

3. Columna 3 (D-Característica principal del desgaste-estructura cortadora): se utiliza un código de dos letras para indicar la característica principal del desgaste de la estructura cortadora.

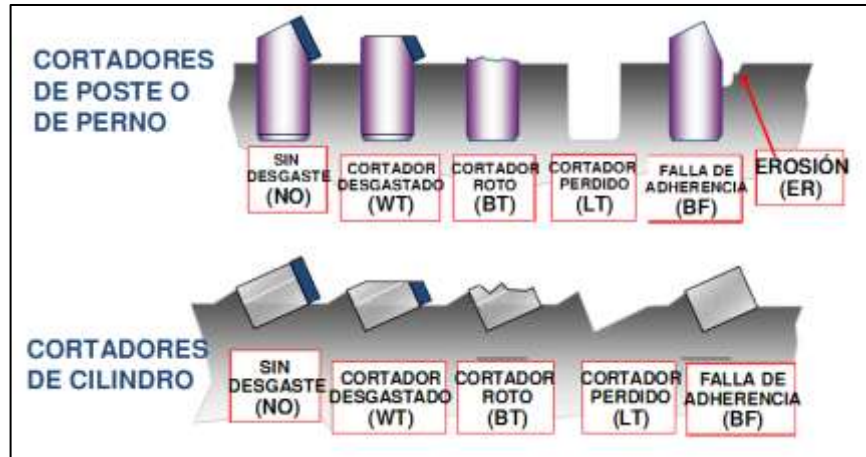
**Figura 31. Características del desgaste para brocas tricónicas y de cortadores fijos**

|                              |                                    |
|------------------------------|------------------------------------|
| *BC — Cono Roto              | LN — Boquilla perdida              |
| BF — Falla en el enlace      | LT — Dientes perdidos              |
| BT — Diente/cortador roto    | OC — Desgaste excéntrico           |
| BU — Trépano embolado        | PB — Trépano comprimido            |
| *CC — Cono fisurado          | PN — Boquillas o canales tapados   |
| *CD — Cono arrastrado        | RG — Calibre redondeado            |
| CI — Interferencia de conos  | RO — Anilladot                     |
| CR — Coroneado               | SD — Daño en el extremo de la pata |
| CT — Dientes astillados      | SS — Autoafilado                   |
| ER — Erosión                 | TR — Sobre huella                  |
| FC — Crestas achatadas       | WO — Lavado                        |
| HC — Fisuras x calentamiento | WT — Diente/cortador desgastado    |
| JD — Daño por chatarra       | NO — Sin desgaste                  |
| *LC — Cono perdido           |                                    |

\* Indicar N° ó **NOS** de cono/s en la columna 4.

Fuente: Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos triconos.  
Baker Hughes.1999.

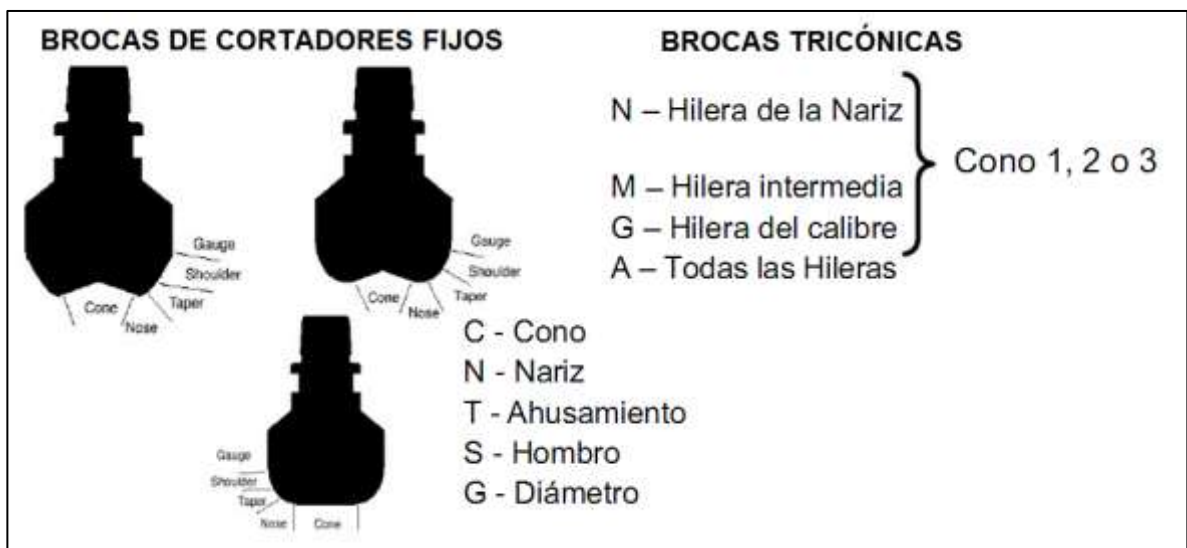
**Figura 32. Características principales de desgaste cortador fijo**



Fuente: Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos triconos y de cortadores fijos. Baker Hughes.1999.

4. Columna 4 (L-Ubicación): se utiliza una lera o un número para indicar la ubicación en la cara de la broca donde ocurre la característica principal del desgaste.

**Figura 33. Códigos para describir la ubicación del desgaste en la broca**



Fuente: Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos triconos y de cortadores fijos. Baker Hughes.1999.

La ubicación se define así:

Calibre: estructuras cortadoras que tocan la pared del Pozo.

Nariz: estructuras cortadoras más centrales de la broca.

Intermedia: estructuras cortadoras entre la nariz y el calibre.

Todas: todas las hileras.

5. Columna 5 (B-Cojinetes/sellos): Se utiliza una letra o un número, según el cojinete, para indicar la condición del mismo. Para brocas que tienen cojinetes no sellados, se utiliza una escala lineal de 0 a 8 para indicar la condición de desgaste del cojinete, tomando como 0 a un cojinete nuevo y a 8 uno totalmente desgastado. Por el contrario para brocas con cojinete sellados se utiliza una letra para indicar la condición del sello, siendo la “E” la que indicará que el sello está efectivo, la “F” que el sello está fallado y la “N” indicará que no es posible graduar el sello.

Nota: Para las brocas de cortadores fijos siempre se va a marcar una X lo que significa que no aplica.

6. Columna 6 (G-Calibre): se utiliza para reportar sobre el calibre de la broca. La letra “I” indica que no hubo reducción de calibre. Si la broca tiene una reducción del calibre, se debe registrar en 1/16” de pulgada.
7. Columna 7 (O-otras características del desgaste): se utiliza para reportar otras características del desgaste de las brocas, en adición al desgaste de la estructura cortadora descrito en la columna 3 (D). Se tiene en cuenta que esta columna no es exclusiva para características de desgaste de estructuras cortadoras. Se utiliza para esta columna los códigos de dos letras mostrados en la figura 7.
8. Columna 8 (R-Razón de salida): se utiliza para reportar a causa por la cual la broca fue sacada.


**Figura 34. Razón de salida de la broca**






|     |   |   |
|-----|---|---|
| BHA | — | Cambio de ensamble de fondo                   |
| CM  | — | Tratamiento fluido                            |
| CP  | — | Coroneado                                     |
| DMF | — | Falla de Motor de Fondo                       |
| DP  | — | Barra tapada                                  |
| DSF | — | Falla de barras                               |
| DST | — | Ensayo de formación                           |
| DTF | — | Falla de herramientas de fondo                |
| FM  | — | Cambio de formación                           |
| HP  | — | Problema de diámetro                          |
| HR  | — | Horas   |
| LIH | — | Dejado en el pozo                             |
| LOG | — | Perfilaje                                     |
| PP  | — | Presión de la bomba                           |
| PR  | — | Penetración Menor                             |
| RIG | — | Reparación del Equipo                         |
| TD  | — | Profundidad final/Profundidad de entubamiento |
| TQ  | — | Torque  |
| TW  | — | Barra torcida                                 |
| WC  | — | Condiciones climáticas                        |

Fuente: Sistema de graduación de desgaste de IADC para trépanos tricónos y de cortadores fijos. Baker Hughes.1999.

**2.5.2 Características de desgaste más comunes en brocas tricónicas.** Las brocas tricónicas presentan algunos tipos comunes de desgaste, estos son producto de factores tales como malas prácticas operacionales, presencia de sulfuro de hidrógeno, falla en los cojinetes, una hidráulica inadecuada, golpes fuertes de la broca con bordes filosos, desbalance en la broca entre otros.

**Tabla 3. Clases de desgaste y sus posibles causas de las brocas tricónicas**

| TIPO DE DESGASTE  | POSIBLES CAUSAS  |
|---|--|
| <p><b>Cono roto</b></p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sulfuro de hidrogeno</li> <li>• Golpe de la broca contra un borde o filo</li> <li>• Interferencia de conos a causa de una falla en el cojinete</li> </ul> |

| TIPO DE DESGASTE   | POSIBLES CAUSAS  |
|--|--|
| <p data-bbox="391 289 597 321"><b>Dientes rotos</b></p>               | <ul data-bbox="764 289 1474 657" style="list-style-type: none"> <li>• Practicas operativas erróneas</li> <li>• Resistividad compresiva de la roca excede a la resistividad compresiva de la estructura cortadora</li> <li>• Exceso de WOB</li> <li>• Exceso de RPM</li> <li>• Presencia de chatarra</li> </ul> |
| <p data-bbox="370 688 618 720"><b>Broca embolada</b></p>              | <ul data-bbox="764 741 1474 940" style="list-style-type: none"> <li>• Presencia de resto de formación estacionada entre los conos</li> <li>• Inadecuada limpieza hidráulica del pozo</li> <li>• Perforar una formación pegajosa</li> </ul>   |
| <p data-bbox="386 968 602 999"><b>Cono fisurado</b></p>             | <ul data-bbox="764 1024 1474 1171" style="list-style-type: none"> <li>• Presencia de chatarra</li> <li>• Presencia de sulfuro de hidrogeno</li> <li>• Sobrecalentamiento de la broca</li> </ul>  |
| <p data-bbox="370 1266 618 1297"><b>Cono arrastrado</b></p>         | <ul data-bbox="764 1276 1474 1360" style="list-style-type: none"> <li>• Falla del cojinete en uno o más conos</li> <li>• Almacenamiento de desechos entre conos</li> </ul>   |
| <p data-bbox="326 1577 662 1608"><b>Interferencia de conos</b></p>  | <ul data-bbox="764 1633 1474 1833" style="list-style-type: none"> <li>• Brocas comprimidas</li> <li>• Ensanchamiento de un diámetro de menor calibre con excesivo peso sobre la broca</li> <li>• Falla del cojinete en uno o mas conos</li> </ul>  |

**Coroneador**

- Presencia de chatarra

**Dientes astillados**

- Presencia de chatarra
- Carga de impactos por corrida brusca
- Pequeña interferencia entre conos
- Malas prácticas operacionales

**Erosión**





- Presencia de cortes abrasivos en el lodo transportados a alta velocidad
- Problemas con la hidráulica (exceso)
- Formación abrasiva
- Exceso de WOB

**Crestas achatadas**






- Dureza de la formación
- Parámetros operativos


**Sello afectado por calor**

Temperatura moderada durante carreras largas

| TIPO DE DESGASTE   | POSIBLES CAUSAS  |
|--|--|
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura elevada durante carreras cortas</li> </ul>  |
| <p data-bbox="386 716 602 800"><b>Fisuras por calentamiento</b></p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Malas prácticas operacionales</li> </ul>  |
| <p data-bbox="355 1073 633 1108"><b>Daño por chatarra</b></p>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Presencia de chatarra</li> </ul>  |
| <p data-bbox="363 1392 625 1428"><b>Perdida del cono</b></p>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Golpes con una parte muy dura de la formación</li> <li>• Falla del cojinete</li> <li>• Presencia de sulfuro de hidrogeno</li> </ul> |
| <p data-bbox="345 1640 643 1675"><b>Perdida de boquilla</b></p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación incorrecta de la boquilla</li> <li>• Diseño de boquilla inadecuado</li> <li>• Daño mecánico</li> </ul>                  |

| TIPO DE DESGASTE   | POSIBLES CAUSAS  |
|--|--|
|                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erosión en la boquilla</li> </ul>   |
| <p><b>Perdida de dientes</b></p>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erosión</li> <li>Presencia de sulfuro de hidrogeno</li> </ul>   |
| <p><b>Desgaste excéntrico</b></p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Cambio en la formación, de quebradiza a plástica</li> <li>Mala estabilización en pozo desviado</li> <li>WOB inadecuado</li> <li>Tipo de broca incorrecta para perforar</li> <li>Presión hidrostática que excede significativamente a la presión de formación</li> </ul> |
| <p><b>Broca comprimida</b></p>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Forzamiento de la broa en un agujero no calibrado</li> <li>Comprimir la broca en el plato de ajuste</li> </ul>  |
| <p><b>Boquilla tapada</b></p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Deposición de material solido en la boquilla</li> </ul>   |

| TIPO DE DESGASTE   | POSIBLES CAUSAS   |
|--|---|
|  <p><b>Calibre redondeado</b></p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Atravesar una formación abrasiva con exceso de RPM</li> </ul>  |
| <p><b>Daño en el extremo de la pata</b></p>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Presencia de chatarra en el fondo del pozo</li> <li>• Broca comprimida que deja a la pata como la parte más saliente</li> </ul>                            |
| <p><b>Desgaste autoafilado</b></p>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corridas excesivas</li> </ul>  |
| <p><b>Tracking o sobrehuella</b></p>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambios en la formación, de quebradiza a plástica</li> <li>• Cuando la presión hidrostática excede significativamente a la presión de formación</li> </ul> |
| <p><b>Sello desgastado</b></p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Solidos del fluido carcomiendo el material del sello</li> </ul>  |

| TIPO DE DESGASTE  | POSIBLES CAUSAS |
|---|-----------------|
|  |                 |

Fuente: Los autores

### **3. ALGUNOS MÉTODOS USADOS EN EL ESTUDIO DEL DESGASTE EN LAS BROCAS DE PERFORACIÓN**

Existen numerosos modelos del proceso de perforación que se han propuesto con el fin de optimizar la perforación rotativa. Estas técnicas se basan en su mayoría en datos limitados de campo y de laboratorio y que a menudo llevan a resultados imprecisos.

A continuación se describirán dos de los métodos que involucran algunos parámetros mecánicos de perforación, y que fueron diseñados para un tipo de broca determinada (cónicas o de cortadores fijos)

#### **3.1 EVALUACIÓN PRÁCTICA DEL DESGASTE DEBIDO A LA INTERACCIÓN ROCA-BROCA DURANTE LA PERFORACIÓN.**

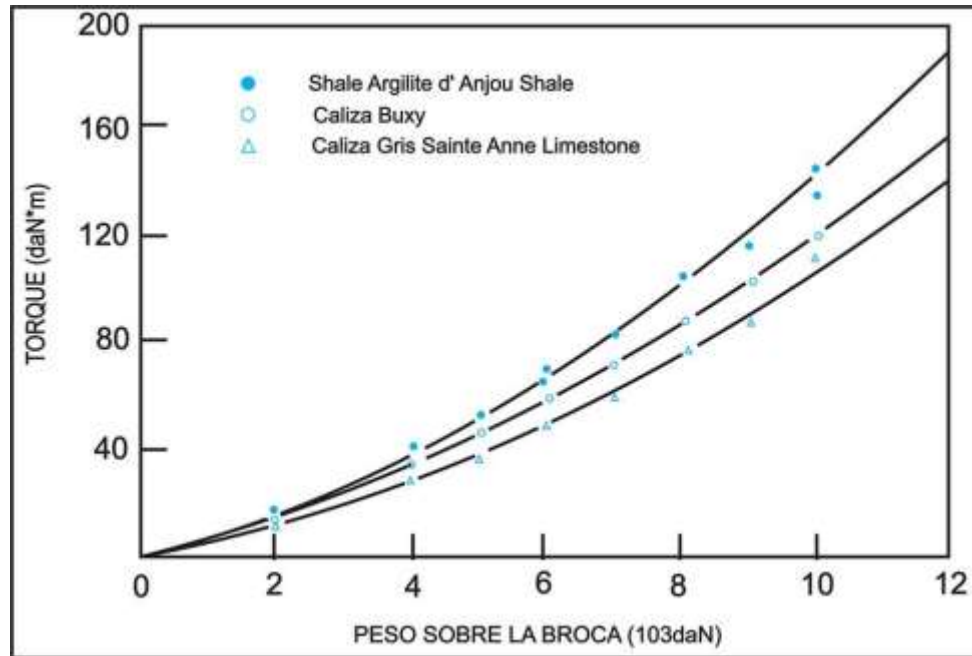
La evaluación del desgaste planteada por el autor, utiliza el método de Criterio de Desgaste.

Tal método se basa en la ecuación general de torque:

$$T_{OB} = u W + v W^2 \quad (36)$$

Y en la estrecha correlación que existe entre el valor de  $v$  y el desgaste en la broca. La forma general de las curvas que se obtienen al graficar torque vs. WOB demuestran que es aconsejable modelar el torque de esta manera.

**Figura 35. Torque vs WOB para varios tipos de roca perforadas con una broca de 6 in y series IADC 1-3-6 ( $\Omega= 116 \text{ rev/min}$ )**



Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March, 1991.

El principio básico para obtener información acerca del estado de desgaste de la broca es determinando  $v$  durante la “corrida” de una broca, que es cuándo el perforador requiere el este valor. El valor de  $v$  se relaciona con la concavidad de la curva en la Ecuación 36, y el método práctico para obtenerlo, implica variar significativamente el WOB en torno a su valor promedio, la transmisión a superficie de los datos de torque y WOB, y el cálculo de  $v$ .  $v_n$  se define como:

$$v_n = v \left( \frac{d^*}{d} \right) \quad (37)$$

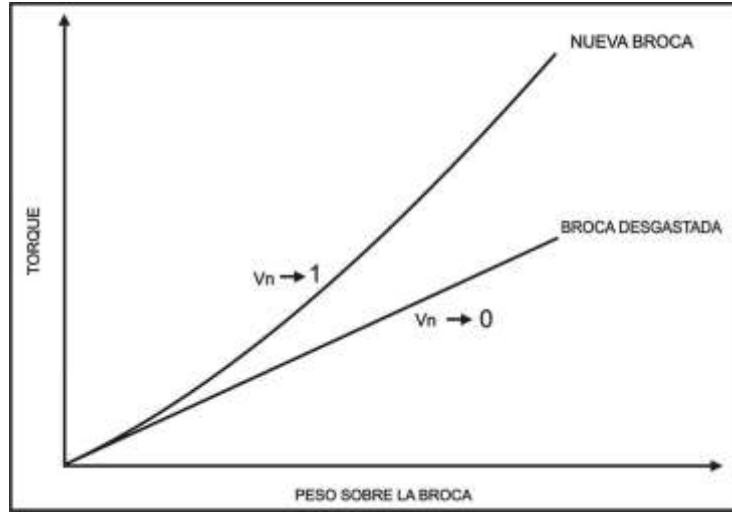
Donde  $d^* = 8\frac{1}{2} \text{ in.}$ , pruebas de laboratorio y datos de campo han demostrado que los valores de  $v_n$  disminuyen constantemente desde una unidad para una broca

nueva hasta cero para una broca completamente desgastada (figura 36). De este modo,  $v_n$  se puede considerar como un buen indicador del desgaste en la broca y un criterio de este desgaste en tiempo real. Esto se cumple para brocas de 6 in. a 17½ in. de diámetro, y para varios tipos de roca, tales como lutitas, areniscas y calizas.

**3.1.1 Antecedentes teóricos.** Anteriormente varios autores habían propuesto modelos basados de ROP o torque para brocas de conos móviles. Primero que todo, estos modelos son sólo aproximaciones del proceso de perforación que dependen de diferentes factores. Segundo, estos modelos no se pueden aplicar en la práctica sin violar algunas de las suposiciones a partir de las cuales fueron desarrollados. De ahí que modelos como los de Warren y Wardlaw se crearon con la suposición de que, por ejemplo, el WOB y el torque se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo de conos provistos de dientes en forma continua en vez de conos provistos de hileras de dientes en forma discontinua.

El modelo de perforación de Wardlaw se basa en el principio de conservación de energía y en el análisis dimensional asistido por resultados de pruebas de campo y laboratorio. La acción mecánica del diente de una broca incluye una fase de penetración y compresión durante la cual la roca absorbe energía antes de fracturarse. Esta energía almacenada se usa para remover los ripios (también conocidos como *chips*) de la cara de la roca y contra las fuerzas del diferencial de presión. Un análisis más detallado, combinado con la naturaleza del proceso de perforación, conducen a las tres principales clases de condición, dependiendo de los valores de WOB y del nivel de energía hidráulica. Por consiguiente, se determinaron tres ecuaciones de ROP y se pudieron formular tres ecuaciones de torque.

**Figura 36. Evolución esquemática de  $V_n$  vs desgaste de la broca**



Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March, 1991.

Las tres fórmulas de ROP de acuerdo a Wardlaw (disertación), se pueden expresar de la siguiente manera.

Condición Clase 1 (nivel de alta energía hidráulica):

$$\frac{1}{R_1} = \frac{\pi}{32} \frac{\lambda^2}{D} \frac{d}{\gamma_1} \frac{1}{\text{sen}^4\left(\frac{\beta}{2}\right) \text{sen } 2\theta} \frac{p S d^3}{\Omega W^2} + \frac{d}{D \gamma^2} \frac{4 \pi}{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \text{sen}^2\theta} \frac{S}{\Omega d E} \quad (38)$$

Condición Clase 2 (perforación con nivel hidráulico insuficiente):

$$\frac{1}{R_2} = \frac{\pi}{32} \frac{\lambda^2}{D} \frac{d}{\gamma_1} \frac{1}{\text{sen}^4\left(\frac{\beta}{2}\right) \text{sen } 2\theta} \frac{p S d^3}{\Omega W^2} + \frac{\gamma_3 F_\eta}{4} \frac{p d^2}{q \rho V^2} \quad (39)$$

Condición Clase 3 (para formaciones de baja permeabilidad):

$$\frac{1}{R_3} = \frac{\pi}{32} \frac{\lambda^2}{D} \frac{d}{\gamma_1} \frac{\mu h}{\text{sen}^4\left(\frac{\beta}{2}\right) \text{sen } 2\theta} \frac{S d^3}{W^2} + \frac{d}{D \gamma^2} \frac{4 \pi}{\tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \text{sen}^2 \theta} \frac{S}{\Omega d y} \quad (40)$$

Además el torque, está dado por

$$T_{OB} = \left( \frac{\pi d^2}{\gamma \text{sen} 2\theta} \right) \left( \frac{SR}{\Omega} \right) \quad (41)$$

Sustituyendo  $R$  en la ecuación 41, se definen las siguientes ecuaciones para el torque en la broca:

$$T_1 = \frac{D}{\lambda^2} \frac{16 \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \text{sen}^4 \frac{\beta}{2} \frac{1}{d^2 p} \frac{W^2}{1 + \frac{128}{\lambda^2} \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \frac{\text{sen}^2(\beta/2) \text{sen} \beta}{\tan \theta} \frac{W^2}{d^4 p E}} \quad (42)$$

$$T_2 = \frac{D}{\lambda^2} \frac{16 \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_3} \text{sen}^4 \frac{\beta}{2} \frac{1}{d^2 p} \times \frac{W^2}{1 + \frac{D}{\lambda^2} \frac{8 F_\eta \gamma_1 \gamma_3}{\pi} \frac{\text{sen}^4(\beta/2) \text{sen} 2\theta \Omega}{q \rho V^2 S d^2} W^2} \quad (43)$$

$$T_3 = \frac{D}{\lambda^2} \frac{16 \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \frac{\text{sen}^4(\beta/2)}{\mu h} \frac{1}{d^2 \Omega} \frac{W^2}{1 + \frac{128}{\lambda^2} \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \frac{\text{sen}^2(\beta/2) \text{sen} \beta}{\mu h \tan \theta} \frac{W^2}{d^4 \Omega E}} \quad (44)$$

Estas ecuaciones, donde  $\gamma/2\pi$  representa la fracción del área cortada en el fondo con cada revolución, sirven para la mayoría de los casos de perforación.

Todas las ecuaciones de torque se pueden escribir como

$$T_{OB} = I \left[ \frac{W^2}{(1 + J W^2)} \right] \quad (45)$$

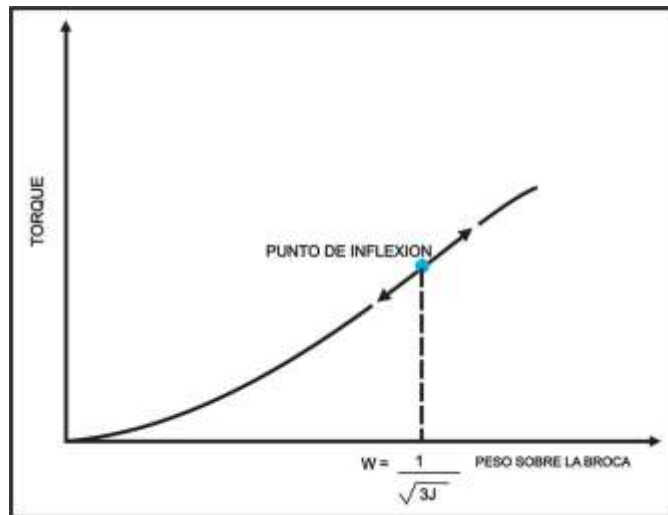
Y son representadas en la figura 37, donde  $I$  y  $J$  tienen un valor específico para cada clase de condición. Ahora, considerando la curva que representa a la

ecuación 45, las siguientes ecuaciones muestran que el valor de  $r$  aumenta con el desgaste de los dientes, asumiendo que todas las condiciones de perforación son constantes.

La fórmula del radio de curvatura está dada por

$$r = \frac{\left[1 + \frac{4 I^2 W^2}{(1+J W^2)^4}\right]^{3/2}}{2 I \frac{1-3 J W^2}{(1+J W^2)^3}} \quad (46)$$

**Figura 37. Forma general de la relación de torque vs WOB**



Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March, 1991.

Teniendo en cuenta los resultados de laboratorio y de campo, es cierto que (ver figura 37)

$$W < \left(\frac{1}{\sqrt{3J}}\right) \quad \text{o} \quad 3 J W^2 < 1 \quad (47)$$

Entonces la Ecuación 46 se convierte en

$$r \cong \frac{(1 + 6 J W^2)}{2 I} \quad (48)$$

Relacionando la Ecuación 48 con la Ecuación 43, la cual corresponde a la condición de perforación Clase 2, se obtiene

$$I = \frac{D}{\lambda^2} \frac{16 \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_3} \text{sen}^4 \frac{\beta}{2} \frac{1}{d^2 p} \quad (49)$$

$$J = \frac{D}{\lambda^2} \frac{8 \gamma_1 \gamma_3 F_\eta}{\pi} \frac{\text{sen}^4(\beta/2)}{q \rho V^2 S d^2} \Omega \quad (50)$$

Cuando el desgaste de la broca aumenta, la superficie que soporta el WOB,  $\lambda$ , se incrementa y la profundidad de penetración del diente,  $D$ , disminuye. De este modo las Ecuaciones 49 y 50 muestran que  $I$  y  $J$  disminuyen. Combinando las Ecuaciones 47 y 48, se deduce que el valor del radio de curvatura,  $r$ , aumenta con el desgaste de los dientes para un WOB dado.

Por consiguiente, la Ecuación 45 tiende hacia una función lineal, y el valor de  $v$ , definido por la Ecuación 36, efectivamente disminuye cuando el desgaste en la broca aumenta.

Warren propuso otra relación de torque que reemplaza el concepto de balance de energía por el concepto de balance de fuerza. Demuestra que el torque de una broca de conos móviles está determinado en gran medida por el WOB aplicado, la profundidad de penetración del diente, y el efecto del ángulo de excentricidad del cono. Si la fricción de los cojinetes se considera despreciable y si el torque causado por la acción del WOB que actúa sobre la sección circular transversal de un cono y el torque causado por la influencia de la excentricidad del cono se unen, la ecuación de torque total es

$$T_{OB} = \left( K_1 + K_2 \sqrt{\frac{D}{d}} \right) d W \quad (51)$$

Donde  $K_1$  y  $K_2$  son constantes, principalmente en términos del tipo de broca. Además, la ecuación de Cheatham *et al.* Entre  $W$ ,  $D$ ,  $\sigma$ , y  $b$  se puede escribir como

$$W = (K_3 b + K_4 \delta) \sigma \quad (52)$$

Cuando las Ecuaciones 51 y 52 se combinan, la ecuación de torque es

$$T_{OB} = K_1 d W + K_5 W \sqrt{\frac{W}{\sigma} - K_3 b} \quad (53)$$

Donde  $K_1$ ,  $K_3$  y  $K_5$  son constantes en términos del tipo de broca, formación, y hasta cierto punto, de la velocidad rotatoria. A medida que la broca se desgasta, el ancho de la superficie plana del diente,  $b$ , aumenta y el valor del segundo término de la Ecuación 53 disminuye. Por consiguiente, esta ecuación tiende hacia una relación lineal y, como es de esperarse, el valor de  $v$ , definido por la Ecuación 36, disminuye cuando la broca se desgasta.

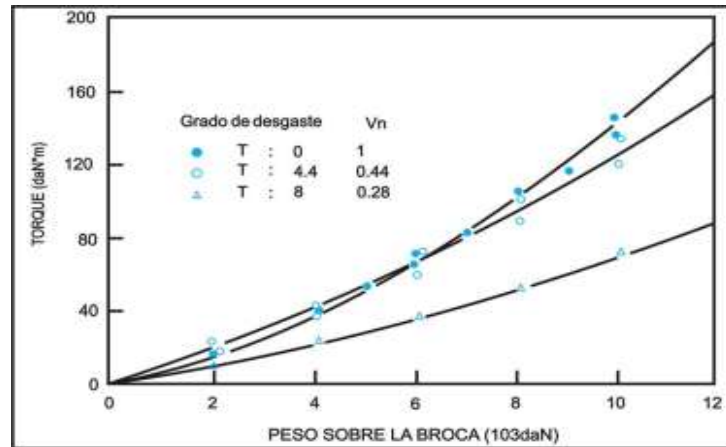
Finalmente, las relaciones de torque basadas en los conceptos de balance de energía o de fuerza muestran que si el desgaste en los dientes aumenta se tiende a linealizar la relación entre el WOB aplicado y el torque. Se deduce que el coeficiente del término no-lineal de estas expresiones puede representar un criterio para el desgaste en los dientes de la broca. La determinación de este coeficiente durante una “corrida” de broca y el conocimiento de su relación con el desgaste hace posible describir el estado del desgaste de la broca y, en consecuencia, mejorar el desempeño de la broca y la seguridad del pozo, así como reducir los costos de perforación.

**3.1.2 Resultados en laboratorio y en campo, de la evaluación práctica.** Se llevaron a cabo experimentos en dos laboratorios de investigación con diferentes tipos de brocas de conos móviles.

**3.1.2.1 Pruebas con brocas desgastadas en campo.** Se hizo una primera serie de pruebas con brocas tricónicas de 6-in. de diámetro y equipadas con boquillas. Las brocas se desgastaron en campo y, conforme a esto, se graduó el estado de los dientes. Se utilizaron tres diferentes tipos de roca con una amplia variedad de propiedades: Argilita d'Anjou (lutita), caliza de Buxy, y caliza de Gris Sainte Anne, con resistencias compresivas de 20000, 10000 y 20500 psi, respectivamente. Se midieron la ROP y el torque como funciones del WOB a una velocidad rotativa ajustada para una presión de confinamiento de 1300 psi, presión en pozo de 1200 psi, y tasa de flujo de lodo base-agua de 0.63 gal/min. La ROP y el torque se midieron paso a paso para el WOB aplicado; cada etapa fue lo suficientemente extensa para que la ROP se estabilizara.

En la figura 38 se muestran los resultados obtenidos con las tres brocas J3 (Series IADC 1-3-6) valoradas de acuerdo al estado de sus dientes, desde el Grado T:0 (broca nueva) hasta el T:8 (desgaste total). Las muestras de Argilita se perforaron a 116 rev/min. Como era de esperar, a medida que la graduación de los dientes aumentaba, el criterio de desgaste,  $v_n$ , disminuía de 1 a 0.28. La Tabla 1 presenta una evolución similar de  $v_n$  para las calizas de Buxy y de Gris Sainte Anne. Otras pruebas adicionales revelaron que la influencia de la velocidad rotativa en el torque era menor.

**Figura 38. Torque vs WOB para tres brocas de 6-in. Serie IADC 1-3-6 a diferentes estados de desgaste (Argilita d'Anjou,  $\Omega = 116$  rev/min)**



Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March, 1991.

Sin embargo, las brocas se habían desgastado en diferentes pozos, lo cual generó ciertos problemas, tales como valores distintos de fricción en los cojinetes debido a un posible daño en éstos. Para eliminar estos problemas, se hicieron más pruebas de laboratorio con brocas nuevas acondicionadas con dientes desgastados en fábrica.

**Tabla 4. Correlación entre el grado de los dientes y el criterio de daño para tres tipos de roca**

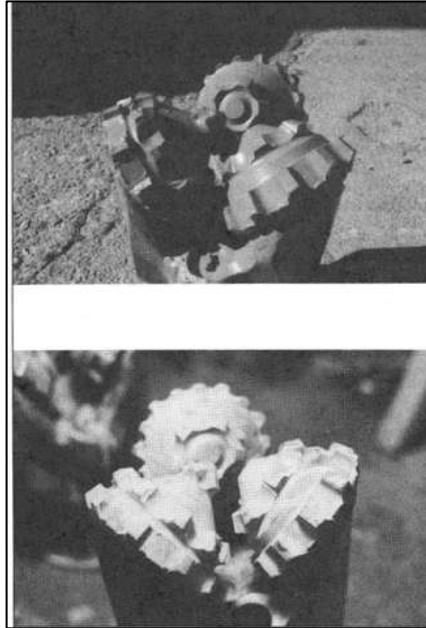
| Grado de los dientes | Vn*         |                         |                         |
|----------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|
|                      | Caliza Buxy | Caliza Gris Sainte Anne | Shale Argilite d'Anjour |
| T:0                  | 0.72        | 0.75                    | 1                       |
| T:4                  | 0.45        | 0.27                    | 0.44                    |
| T:8                  | 0.09        |                         | 0.28                    |

Para estos valores de Vn\*, el WOB es medido en 10<sup>3</sup> daN y el torque es medido en daN·m

Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March, 1991.

**3.1.2.2 Pruebas con brocas nuevas:** La segunda serie de pruebas se llevó a cabo con brocas tricónicas nuevas de 8½ in. Equipadas con boquillas, chumaceras (*journal bearings*) selladas, y desgaste en los dientes logrado en fábrica de Grados T:0, T:45 y T:8 (ver figura 39). Se perforaron dos tipos de roca: lutita de Mancos, la cual tiene una porosidad de 1.4% y resistencia compresiva de 10000 psi, y la arenisca de Berea, la cual tiene una porosidad de 21% y resistencia compresiva de 9000 psi. Estas pruebas se realizaron a una velocidad rotativa ajustada; se simuló una profundidad de 2297 ft con 1500 psi de presión de confinamiento para la lutita de Mancos, y se simuló una profundidad de 5906 ft con una presión de confinamiento de 4000 psi para la arenisca de Berea. La tasa de flujo del lodo base-agua fue de 1.51 gal/min. Los procedimientos fueron los mismos de las pruebas anteriores.

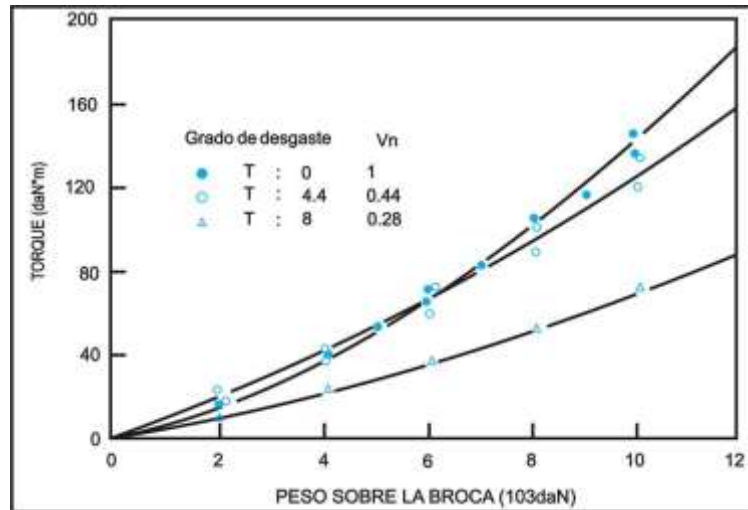
**Figura 39. Broca de 8.5-in de diámetro acondicionada con dientes desgastados en fábrica de Grado T:4.5, antes y después de las pruebas de perforación**



Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March, 1991.

La figura 40 muestra los resultados obtenidos con las tres brocas J1 (Series IADC 1-1-6) que perforaron las muestras de arenisca de Berea a 60 rev/min. Esta prueba corroboró que normalmente  $v_n$  disminuye (desde 0.81 a 0.1) a medida que el grado de los dientes aumenta. Los puntos en la figura 41 corresponden a las brocas que perforaron las muestras de lutita de Mancos, y en las cuales se obtuvieron resultados similares a aquellos mencionados anteriormente (ver Tabla 2). Otras pruebas previas habían demostrado que la influencia del diferencial de presión a través del fondo del pozo de hasta 2000 psi, sobre el torque era muy pequeña. Además, el procedimiento llevado a cabo en la prueba confirmó que aplicar el WOB paso a paso o aplicarlo de la manera en que se hace en un *drill-off test* no representa ningún cambio en el valor de  $v_n$ .

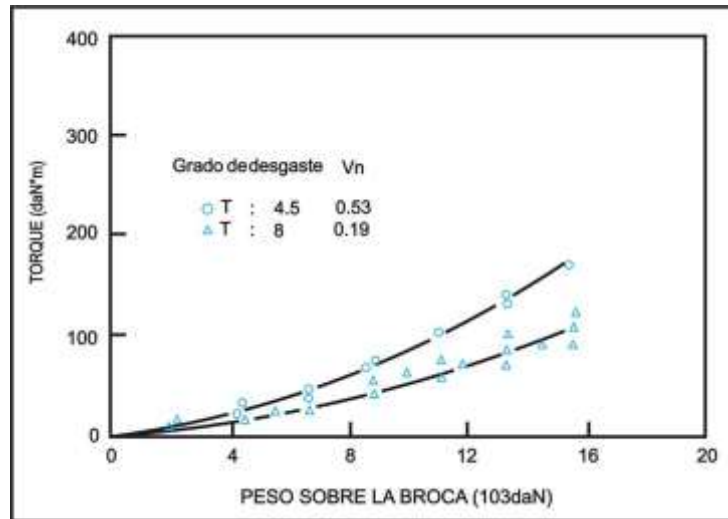
**Figura 40. Torque vs. WOB para tres brocas de 8.5-in. Serie IADC 1-1-6 a diferentes estados de desgaste (Arenisca de Berea,  $\Omega = 60$  rev/min)**



Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March, 1991.

Los resultados de laboratorio descritos confirmaron que los parámetros  $v$  y  $v_n$  definidos por las Ecuaciones 36 y 37 representan bien el grado de desgaste de una broca tricónica para una amplia variedad de formaciones.

**Figura 41. Torque vs. WOB para dos brocas de 8.5-in. Serie IADC 1-1-6 a diferentes estados de desgaste (Lutita de Mancos,  $\Omega = 60$  rev/min)**



Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March, 1991.

**3.1.3 Pruebas de campo.** Se obtuvieron datos de torque y WOB de brocas con un sistema comercial de MWD de dos pozos costa-afuera. Estos datos se captaron de tal manera que estuvieran disponibles en superficie en intervalos de un minuto y después se generaron valores de mediciones promedio de WOB y del torque asociado.

Los puntos en la figura 42 se obtuvieron durante una “corrida” de broca en un pozo costa-afuera en el suroeste de China. La broca Serie IADC 1-3-5 de de 12¼ in. perforó a una tasa de flujo de 2.27 gal/min y entre 80-90 rev/min. En la figura 42, como se esperaba  $v_n$  disminuyó desde los 7864 pies hasta los 8169 pies pero aumentó desde los 8661 pies hasta los 8776 pies. Este último incremento probablemente sea como resultado de la magnitud del WOB en la tercera sección, la cual es 50% menor que aquellas de las dos primeras secciones. De hecho,

para evaluar el criterio de desgaste,  $v_n$ , se necesita en cierta medida un rango de variación de WOB similar.

**Tabla 5. Correlación entre el grado de los dientes y el criterio de daño para dos tipos de roca**

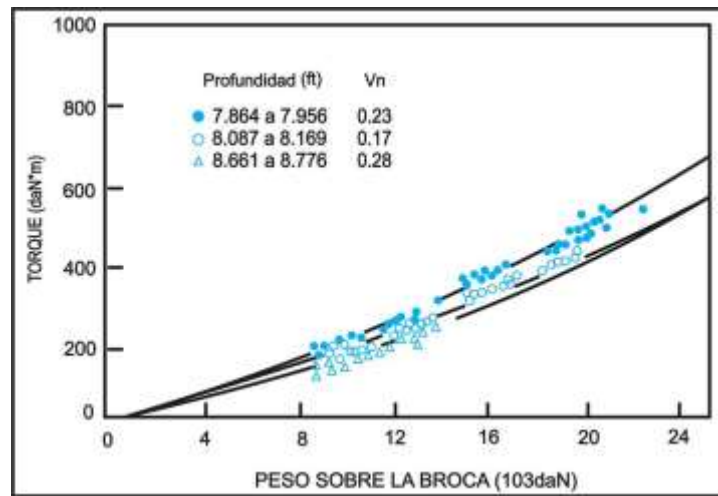
| Grado de los dientes | Vn*          |                |
|----------------------|--------------|----------------|
|                      | Shale Mancos | Arenisca Berea |
| T:0                  |              | 0.81           |
| T:4.5                | 0.53         | 0.33           |
| T:8                  | 0.19         | 0.10           |

**Para estos valores de Vn\*, el WOB es medido en 10<sup>3</sup> daN y el torque es medido en daN\*m**

Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March,1991.

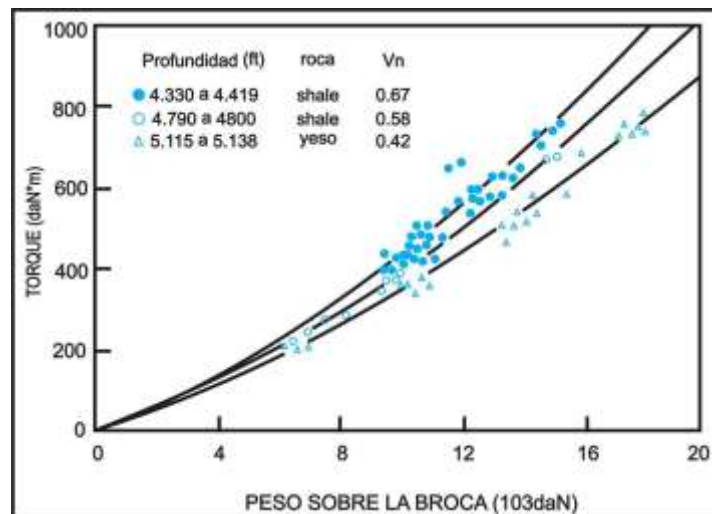
La figura 43 y la Tabla 5 muestran la evolución de  $v_n$  para una “corrida” de broca realizada costa-afuera en los Países Bajos desde los 4285 pies hasta los 5489 pies y a una tasa de flujo de 2.52 gal/min. Al final de la “corrida”, los dientes de la broca de 17½ in. se encontraban en el Grado T:2. La normal disminución de  $v_n$  es particularmente interesante debido a que la formación consta de dos secciones muy diferentes, lutita y caliza.

**Figura 42. Torque vs. WOB para una broca de 12.25-in. Serie IADC 1-3-5 a diferentes profundidades ( $\Omega = 80 - 90$  rev/min)**



Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March,1991.

**Figura 43. Torque vs. WOB para una broca de 17.5-in. Serie IADC 1-1-1 a diferentes profundidades ( $\Omega = 120 - 140$  rev/min)**



Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March,1991.

**Tabla 6. Correlación entre el grado de los dientes y el criterio de daño para diferentes formaciones del campo del mar del norte**

| <b>Grado de los dientes</b> | <b>Profundidad [ft]</b> | <b>Roca</b>                | <b>Vn*</b> |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|------------|
| T:0 a 1                     | 4,330 a 4,419           | Shale moderadamente limoso | 0.67       |
| T:1 a 2                     | 4,790 a 4,800           | Shale moderadamente limoso | 0.58       |
| T:2                         | 5,115 a 5,137           | Tiza                       | 0.42       |

**Para estos valores de Vn\*, el WOB es medido en 10<sup>3</sup> daN y el torque es medido en daN\*m**

Fuente: HUBERT, Fay. Practical evaluation of rock-bit wear during drilling. SPE 21930 – PA, presentado en SPE/IADC Drilling Conference Held. Amsterdam. March, 1991.

### **3.2 PRONÓSTICO EN TIEMPO REAL DEL DESGASTE DE LA BROCA COMBINANDO LOS CONCEPTOS DE ENERGÍA DE LA ROCA Y MAGNITUD DE LA PERFORACIÓN**

Los procesos de gestión de las tasas de perforación llevados a cabo por las operadoras se deben diseñar para maximizar la tasa de penetración total basándose en la profundidad en pies perforada y acumulativa. La forma en que los diferentes parámetros de perforación pueden afectar la tasa de penetración es compleja. Sin embargo, se tienen dos de los métodos principales para optimizar la perforación, que son los modelos de energía mecánica específica (MSE) y de tasa de penetración invertida (ROP). Ambos métodos pueden ayudar a optimizar la operación de perforación analizando ciertas variables como el peso sobre la broca (WOB) y la velocidad rotativa. Una manera efectiva para perforar un pozo debe contar con una idea aproximada del estado del desgaste de la broca *in situ*. El

objetivo de este método de pronóstico es evaluar el desgaste de la broca en tiempo real y crear una herramienta capaz de asistir en las decisiones que implican retirar la broca.

**3.2.1 Rata de penetración (ROP).** Se han propuesto diferentes modelos de ROP con el objetivo de combinar relaciones experimentales conocidas o relaciones matemáticamente derivadas, entre las condiciones de operación y la rata de penetración. Estos modelos hacen posible aplicar métodos de optimización formal al problema de seleccionar el mejor peso sobre la broca (WOB) y la mejor velocidad rotativa para obtener el mínimo costo por pie.

**3.2.2 Modelo ROP de Bourgoyne y Young.** En este modelo, la rata de penetración es función de diferentes variables tales como la compactación de los sedimentos, presión de poro, peso de la broca, velocidad rotativa, fuerza de impacto, hidráulica de la broca, desgaste del cortador. Matemáticamente, este modelo se expresa de la siguiente manera:

$$ROP = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5 \times f_6 \times f_7 \times f_8 \quad (54)$$

Donde el conjunto de variables que van desde  $f_1$  a  $f_8$  representan los distintos efectos normalizados sobre la ROP tales como la perforabilidad de la roca, los parámetros operacionales y el desgaste de la broca. En las siguientes fórmulas que abarcan desde la función  $f_1$  hasta la  $f_8$ , los términos que van desde  $a_1$  hasta  $a_2$  corresponden a las constantes experimentales del modelo.

$f_1$  es el efecto de la perforabilidad de la roca, lo cual es proporcional a la resistencia de la formación y está dado por:

$$f_1 = e^{2.303 a_1} \quad (55)$$

El segundo término es el efecto de la profundidad, dado por:

$$f_2 = e^{2.303 a_2 (10000-D)} \quad (56)$$

Donde  $D$  es la profundidad en pies.

El tercer término es el efecto que la presión de poro tiene sobre la ROP, en donde la sobrepresión o exceso de presión incrementará la ROP, y está dado por:

$$f_3 = e^{2.303 a_3 D^{0.69} (g_p - 9)} \quad (57)$$

Donde  $g_p$  es la presión de poro en libras por galón equivalente.

El cuarto término es el efecto del desequilibrio (*overbalance*) sobre la ROP ocasionado por el aumento del peso del lodo.

$$f_4 = e^{2.303 a_4 D (g_p - P_c)} \quad (58)$$

Donde  $P_c$  es el peso del lodo en libras por galón.

El quinto término es el efecto sobre la ROP ocasionado por el cambio en el peso sobre la broca (WOB).

$$f_5 = \left[ \frac{\left(\frac{w}{d_B}\right) - \left(\frac{w}{d_B}\right)_t}{4 - \left(\frac{w}{d}\right)_t} \right]^{a_5} \quad (59)$$

Donde,  $w$  es el peso sobre la broca (WOB),  $d_B$  es el diámetro de la broca.

El sexto término es el efecto de la velocidad rotativa sobre la ROP.

$$f_6 = \left(\frac{N}{60}\right)^{a_6} \quad (60)$$

Donde  $N$  son las revoluciones por minuto.

El séptimo término es el efecto del desgaste de la broca sobre la ROP.

$$f_7 = e^{-a_7 \times h} \quad (61)$$

Donde  $h$  proporciona la cantidad de desgaste para una broca.

El último término es el efecto de la fuerza de impacto del chorro (*jet*), el cual incluye el efecto de la hidráulica de la broca sobre la ROP. **Descripción  $F_j$ .**

$$f_8 = \left(\frac{F_j}{1000}\right)^{a_8} \quad (62)$$

**3.2.3 Energía mecánica específica (MSE).** El concepto de MSE está definido como el trabajo requerido para romper un volumen dado de roca. El proceso de monitoreo de la MSE puede aportar la capacidad de detectar cambios en la eficiencia de perforación lo cual posiblemente puede ser utilizado para optimizar los parámetros de operación. Por definición se puede definir como la energía de entrada a la ROP de salida. La ecuación de MSE se puede expresar en términos de los parámetros de perforación:

$$MSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 \pi \times N \times T}{A_B \times ROP} \quad (63)$$

En la fórmula anterior,  $A_B$  es el área superficial de la broca (*pulgadas<sup>2</sup>*),  $N$  es la velocidad rotativa (*vueltas por minuto*),  $T$  es el torque medido (*lbf x ft*) y la MSE en *psi*.

En la Ecuación 63, el torque se usa como una variable. El torque en la broca se puede medir con un sistema a tiempo real (por ejemplo, MWD) pero en la mayoría de los casos no hay mediciones del torque en la broca. Se incluye el coeficiente específico de fricción por deslizamiento de la broca ( $\mu$ ) para representar el torque como una función del WOB y permitir el cálculo de la MSE en ausencia de datos reales de medición de torque.

$$T = \mu \frac{D_B \times WOB}{36} \quad (64)$$

Por último, las Ecuaciones 63 y 64 se unen para constituir la MSE modificada, que se expresa como:

$$MSE_{Mod} = WOB \left( \frac{1}{A_B} + \frac{13.33 \times \mu \times N}{D_B \times ROP} \right) \quad (65)$$

El coeficiente de fricción por “deslizamiento” de la broca es una constante adimensional la cual tiene un valor específico para las brocas de conos móviles y PDC. Los valores exactos del coeficiente de fricción por “deslizamiento” de la broca, se obtienen usando el torque medido y el WOB en mediciones de laboratorio (Pessier 1992).

**3.2.4 Desarrollo del modelo de desgaste de la broca en tiempo real.** En el modelo de ROP de Bourgoyne y Young, el ROP se define como el efecto de las ocho funciones lo cual se puede invertir para obtener la perforabilidad de la formación que se denota como la función  $f_1$  (ft/hr).

Los demás datos de perforación tales como la ROP, el WOB, las RPM, la tasa de flujo, el peso del lodo y la presión de poro por cada pie perforado se pueden utilizar para estimar el valor de perforabilidad de la roca de la siguiente manera:

$$f_1 = \frac{ROP}{f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5 \times f_6 \times f_7 \times f_8} \quad (66)$$

También, el desgaste fraccional de la broca se simplifica y se asume como una tendencia lineal decreciente vs. la profundidad utilizando la siguiente ecuación:

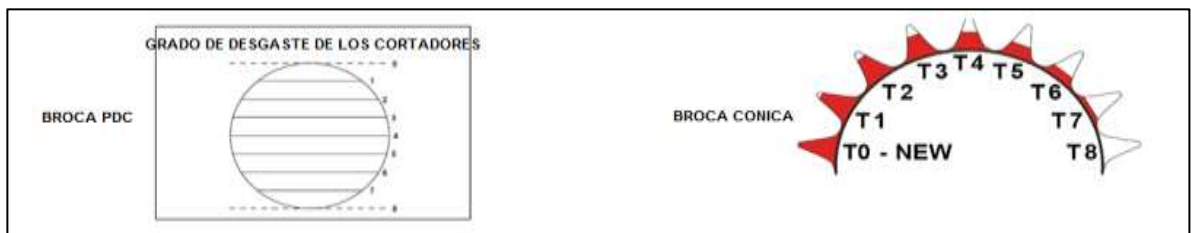
$$h = \frac{(Depth_{Current} - Depth_{in})}{(Depth_{Out} - Depth_{in})} \times \frac{DG}{8} \quad (67)$$

En la ecuación anterior, *DG* es el grado de desgaste de la IADC (*IADC dull grade bit wear state*) el cual es revelado cuando se retira la broca y tiene un valor que se encuentra entre 0 y 8, tal como se muestra en la figura 44 para las brocas de conos móviles y PDC.

La energía mecánica específica utiliza el valor de ROP directamente en su fórmula. Para encontrar una relación entre el valor de MSE y la perforabilidad de la roca se planteó un nuevo modelo. Este nuevo modelo inicialmente se formuló de la siguiente manera:

$$MSE = K_1 \times \left(\frac{1}{f_1}\right)^{K_2} \quad (68)$$

**Figura 44. Esquema que muestra cómo se miden los tipos de cortadores para brocas PDC y de conos móviles**

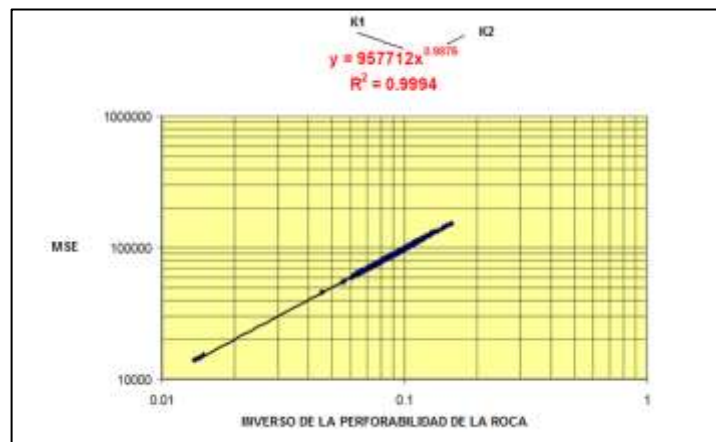


Fuente: RASHIDI, B. Real – time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts. SPE 117109. Presentado en International Petroleum Exhibition and Conference Held. Abu Dhabi. Nov,2008.

**3.2.5 Análisis del modelo para datos de campo.** Se utilizaron datos de perforación de pozos en el norte de Alberta en Canadá, y pozos costa-afuera en Irán localizados en el Golfo Pérsico, para investigar las constantes  $K_1$  y  $K_2$ .

Se calcularon la MSE y el inverso de la perforabilidad de la roca en el modelo ROP, eliminando el efecto del peso del lodo ( $f_4 = 1.0$ ), para secciones inclinadas (*offset*) de “corrida” de broca y se trazaron en una escala *log-log* para obtener las constantes  $K_1$  y  $K_2$  tal como se observa en las figuras 45, 46, 47 y 48. Se notó que el valor calculado de  $K_2$  es independiente de los cambios en los parámetros de perforación (*WOB*, *MW*, *RPM*, etc) lo cual se detalla en la Tabla 4. Basándose en este análisis inicial el valor  $K_2$  se igualó a uno en la Ecuación 68 y entonces el modelo cambió a una forma lineal con el valor de  $K_1$  como constante de proporcionalidad. Luego, se obtuvo el coeficiente de fricción por deslizamiento de la broca ( $\mu$ ) y algunos de estos valores se presentan en la **Tabla 5**. Se observa que estos valores se encuentran dentro del conjunto de valores anteriormente presentado de 0.21 para conos móviles y de 0.84 para PDC (**Pessier 1992**).

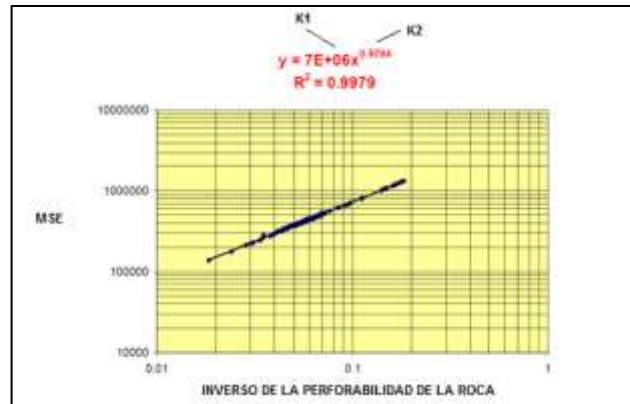
**Figura 45. MSE vs. Inverso de la Perforabilidad de la Roca en el norte de Alberta, Canadá**



Fuente: RASHIDI, B. Real – time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts. SPE 117109. Presentado en International Petroleum Exhibition and Conference Held. Abu Dhabi. Nov,2008.

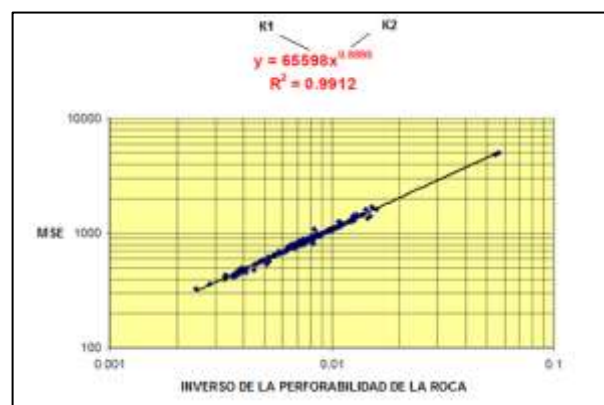
El próximo paso fue el análisis del valor  $K_1$ . Las figuras 49 y 50 muestran ejemplos representativos de una tendencia incremental en el  $K_1$  calculado a medida que se logra mayor profundidad en las “corridas” de perforación.

**Figura 46. MSE vs. Inverso de la Perforabilidad de la Roca en un pozo costafuera en Irán**



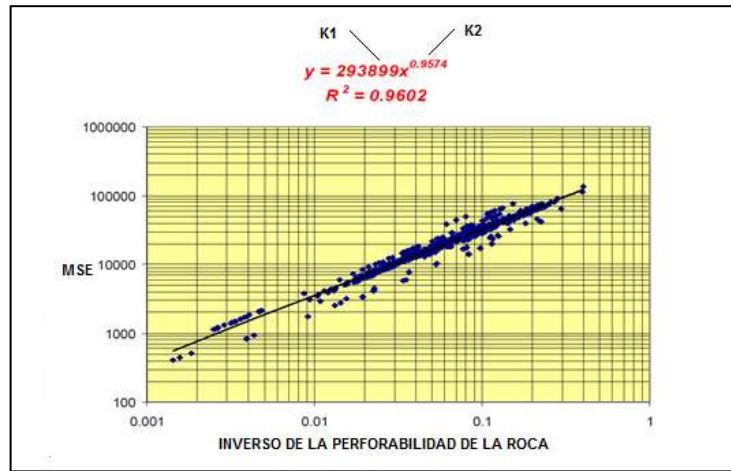
Fuente: RASHIDI, B. Real – time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts. SPE 117109. Presentado en International Petroleum Exhibition and Conference Held. Abu Dhabi. Nov,2008.

**Figura 47. MSE vs. Inverso de la Perforabilidad de la Roca en un pozo costafuera en Irán**



Fuente: RASHIDI, B. Real – time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts. SPE 117109. Presentado en International Petroleum Exhibition and Conference Held. Abu Dhabi. Nov,2008.

**Figura 48. MSE vs. Inverso de la Perforabilidad de la Roca en el norte de Alberta**



Fuente: RASHIDI, B. Real – time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts. SPE 117109. Presentado en International Petroleum Exhibition and Conference Held. Abu Dhabi. Nov,2008.

**Tabla 7. Valores de K2 para cada sección de pozo sin/con el efecto del peso del lodo**

| Well Section #                        | K <sub>2</sub> |
|---------------------------------------|----------------|
| Well A of Iranian Field (3724m-3850m) | 1.0608         |
| Well A of Iranian Field (3991m-4116m) | 0.8349         |
| Well A of Iranian Field (4169m-4315m) | 0.8212         |
| Well A of Iranian Field (4315m-4453m) | 1.0225         |
| Well B of Iranian Field (3280m-3314m) | 0.9538         |
| Well B of Iranian Field (3510m-3543m) | 0.9024         |
| Well A of North Alberta (450m-1515m)  | 1.2464         |
| Well B of North Alberta (2206m-2671m) | 1.1909         |

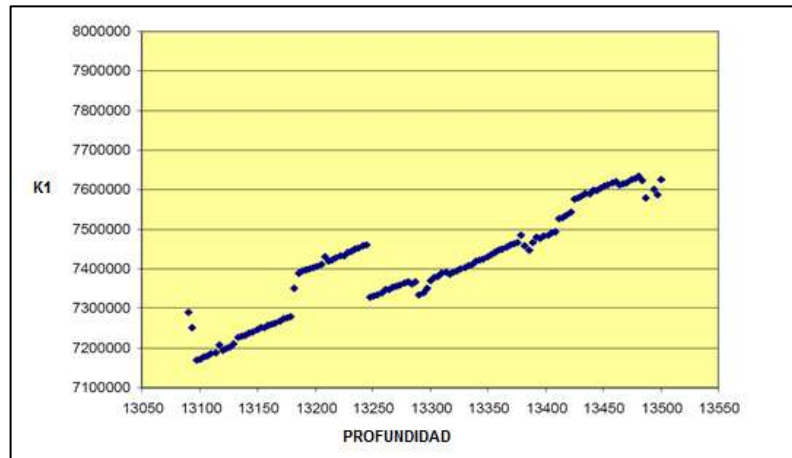
Fuente: RASHIDI, B. Real – time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts. SPE 117109. Presentado en International Petroleum Exhibition and Conference Held. Abu Dhabi. Nov,2008.

**Tabla 8. Coeficientes de fricción por deslizamiento de la broca calculados**

| Sección del pozo         | Profundidad [ft] | Coefficiente de fricción por deslizamiento de la broca |
|--------------------------|------------------|--|
| Pozo A de un campo Iraní | 3724 – 3850      | 0.7  |
|                          | 3850 – 3991      | 0.45   |
|                          | 3991 – 4116      | 0.55   |
|                          | 4116 – 4169      | 0.5  |
|                          | 4169 - 4315      | 0.6  |
|                          | 4315 - 4453      | 0.6  |

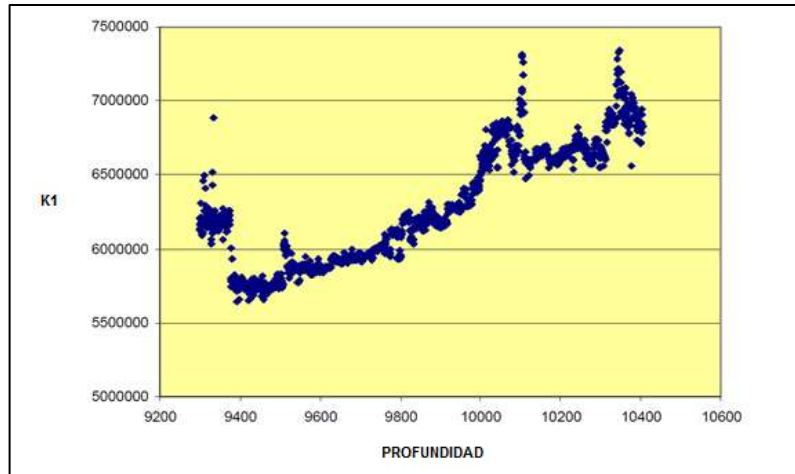
Fuente: RASHIDI, B. Real – time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts. SPE 117109. Presentado en International Petroleum Exhibition and Conference Held. Abu Dhabi. Nov,2008.

**Figura 49. K1 vs. Profundidad para el pozo costa-afuera en Irán**



Fuente: RASHIDI, B. Real – time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts. SPE 117109. Presentado en International Petroleum Exhibition and Conference Held. Abu Dhabi. Nov,2008.

**Figura 50.  $K_1$  vs. Profundidad para el pozo en el norte de Alberta**



Fuente: RASHIDI, B. Real – time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts. SPE 117109. Presentado en International Petroleum Exhibition and Conference Held. Abu Dhabi. Nov,2008.

**3.2.6 Aplicación en tiempo real del modelo desarrollado** Basándose en los resultados se supone que la constante  $K_1$  se puede estimar y puede ser utilizada para estimar la función de desgaste cuando la broca se encuentra en el agujero, todo en tiempo real. Para ajustar las tendencias de  $K_1$  y el grado de desgaste de la broca versus la profundidad se correlaciona un  $K_1$  invertido y normalizado ( $1/K_1$ ) versus el desgaste de la broca de tal manera que ambos lados de la ecuación empiecen desde uno al inicio de cada “corrida” de broca y disminuyan durante la “corrida”:

$$Norm \left( \frac{1}{K_1} \right) = 1 - A \times h^B \quad (69)$$

Se utilizaron datos de pozo costa-afuera inclinado de un campo en Irán con una broca de 8½” de diámetro para verificar esta ecuación y obtener las constantes  $A$  y  $B$  para encontrar la relación entre el valor normalizado y el grado de desgaste fraccional de la broca ( $0 < h < 1$ ). Una broca “verde” siempre se fijará al valor

normalizado de uno en el primer metro de cada “corrida” de broca. En el caso de una broca completamente desgastada, el desgaste fraccional es uno y el valor normalizado ( $1/K_1$ ) es cero. Por lo tanto, se concluye que la única forma de alcanzar el valor normalizado de cero sería si la constante  $A$  es igual a uno, entonces la Ecuación 69 cambia:

$$Norm \left( \frac{1}{K_1} \right) = 1 - h^B \quad (70)$$

Se utilizó un *software* específico de regresión para obtener las constantes  $B$  más precisas. La Tabla 3 muestra los valores calculados de  $B$ , los errores relacionados y el desgaste fraccional determinado de la broca. La figura 51 muestra el comportamiento funcional de la función normalizada observada para cada sección perforada con relación a los diferentes estados de desgaste de la broca utilizando las constantes  $B$  calculadas.

El último paso es encontrar una relación entre las constantes  $B$  calculadas y el desgaste fraccional determinado de la broca en cada sección perforada y generalizarla a la ecuación que gobierna el pronóstico en tiempo real del desgaste en la broca. Esto se llevó a cabo correlacionando las constantes  $B$  versus el desgaste fraccional de la broca para cada “corrida” tal como se muestra en la figura 52. Mostrando una buena afinidad entre los puntos y la ecuación final.

$$B = 5.6392 \times h + 0.4212 \quad (71)$$

El coeficiente de correlación para el ajuste es bueno ( $R^2 = 0.96$ ). Se supone que al utilizar más secciones de “corrida” de broca se tendrán resultados más precisos. Entonces se introduce la Ecuación 71 dentro de la Ecuación 70 y se utiliza como la ecuación que gobierna la estimación del desgaste en la broca para aplicaciones en tiempo real.

## **4. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE DE LAS BROCAS DE PERFORACIÓN DEBIDO A LA INTERACCIÓN ROCA-BROCA**

La metodología desarrollada en este capítulo cuyo fin es el de proporcionar una serie de pasos y recomendaciones, que se deben tener en cuenta al momento de estudiar el desgaste en las brocas de perforación, involucró en su desarrollo la mayor cantidad de parámetros y fenómenos posibles que influyen en el desgaste, con el fin de entregar un trabajo muy completo, y que sea de gran utilidad al momento de estudiar el desgaste en las brocas de perforación.

### **4.1 SELECCIÓN DE BROCAS POZOS UIS-1 Y UIS-2**

En los pozos UIS-1 y UIS-2 se utiliza aproximadamente 35 brocas de perforación de distintas clases, de las cuales se selecciona aquellas que perforaron intervalos de más de 1000 ft, con el fin de poder apreciar un desgaste significativo en cada una de ellas.

En el pozo UIS-1 y UIS-2 se seleccionaron 4 tipos de brocas diferentes que atravesaron 6 formaciones distintas. (Ver anexo A).

## 4.2 ESPECIFICACIONES Y RANGOS DE APLICACIÓN DE LAS BROCAS DEL POZO UIS-1.

### 4.2.1 Broca MSR519M Serie E147204

Figura 51. Broca MSR519M serie E147204



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**4.2.1.1 Características de diseño:** Esta broca posee 5 aletas y cortadores raptor de 19mm. Estos cortadores tienen una capa de PDC termoestable que es un 200% más resistente al calor y un 400% más resistente a la abrasión que los PDC Premium. La capa termoestable mejora significativamente la resistencia a la abrasión manteniendo un borde de corte afilado de lento desgaste. La capa termoestable se desgasta más lentamente que el Diamante Policristalino multimodal detrás de este, formando dos bordes afilados que mantienen la ROP. Esto permite a la broca perforar más rápido y una mayor longitud que una PDC Premium.

Cuenta con Componentes de Control de Torque TCC “SmootTorque TM”; estos son una configuración de insertos que aportan una respuesta de torque predecible para un peso determinado y reducen la variación en el toque. Los componentes TCC reducen el riesgo de vibración torsional y mejoran el control direccional y del toolface. La configuración de insertos ubicada detrás de los cortadores PDC actúa

como reductores de torque instantáneo, eliminando y/o reduciendo los picos de torque al perforar.

**Tabla 9. Hidráulica de la broca MSR519M serie E147204**

| <b>Hidráulica De La Broca</b>       |          |
|-------------------------------------|----------|
| <b>Caída de presión [psi]</b>       | 1050     |
| <b>Velocidad de chorro [ft/seg]</b> | 331      |
| <b>Fuerza de impacto [lbs]</b>      | 1250     |
| <b>HSI</b>                          | 3.71     |
| <b>Boquillas [32 nds]</b>           | (5) x 14 |
| <b>TFA [in<sup>2</sup>]</b>         | 0.752    |
| <b>Caudal [GPM]</b>                 | 800      |
| <b>SPP [PSI]</b>                    | 1921     |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**Tabla 10. Parámetros operativos recomendados**

| <b>Parámetros recomendados</b> |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>WOB mínimo [klbs]</b>       | 5   |
| <b>WOB máximo [klbs]</b>       | 49  |
| <b>HSI</b>                     | 2-7 |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**4.2.1.2 Desempeño de la broca:** Esta broca perforó la sección que va desde 525' hasta 2500', atravesando las formaciones naranja, rosada y dorada, encontrando un contenido litológico de 60% de arcilla, 20% arena + arenisca, 10% limolita y 10% conglomerado. El tiempo de perforación fue de 41 horas totales y 32.25 horas netas. La broca sale con un desgaste, el cual se calificó utilizando la metodología estandarizada de la IADC.

**Tabla 11. Desgaste de la broca MSR519M serie E147204 según la IADC**

| Hileras Interiores | Hileras Exteriores | Característ | Ubicación del daño | Cojinete sello | Calibre 1/16" | Otro desgaste | Razón salida |
|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|----------------|---------------|---------------|--------------|
| 7                  | 7                  | BT          | A                  | X              | I             | CT            | TD           |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

La broca presenta un desgaste severo en todos sus cortadores. Se puede observar que inicialmente se presentó daño por impacto (por los cortadores que aún se conservan), muy probablemente en la formación rosada, en la cual existe conglomerado y hubo vibración; posterior se presentó desgaste normal por la erosión en la formación dorada, donde hay presencia de limolita. Los elementos mitigadores de impacto impidieron daño adicional.

**Figura 52. Vista de la broca después de la corrida**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**Figura 53. Vista de la broca después de la corrida**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

#### **4.2.1.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca.**

- EVENTO 1: Se inicia la perforación a partir de los 525' con ROP=100/150 ft/h GPM=810; Presión=1300 psi; WOB=10/15 klb y Tq=4-5 Klb. Se toca el fondo lentamente y se incrementa el WOB paulatinamente para evitar impactos en los cortadores.
- EVENTO 2: Se presenta vibración torsional por el top drive. Entre 850' y 1377' se incrementan las RPM's a 120 con el fin de mitigar dicha vibración. El peso se maneja entre 15 y 25 Klbs, pero en varias oportunidades se ve restringido porque la rotaria se detiene.
- EVENTO 3: Entre 1000' y 1400' se encuentra un contenido de conglomerado de 30%, generándose vibraciones torsionales, axiales y laterales de una

intensidad intermedia. Este intervalo que pertenece a la formación ROSADA, tuvo gran incidencia sobre el estado de la broca, gracias a su contenido de conglomerado y niveles de limolita.

- **EVENTO 4:** A 2150' se incrementa el WOB ya que se vio un descenso de la ROP, esto provoca un leve incremento de la ROP. La formación DORADA es principalmente arcillosa, con contenido de limolita y arena; sin embargo, la ROP y el daño por impacto en la broca indican que el mismo ocurrió en la formación ROSADA, demostrando su dureza; la formación DORADA por su contenido de arcilla permitió el avance de la broca aun cuando ésta ya se encontraba sin cortadores indicando que se trata de una formación "blanda". En la formación ROSADA se recomienda usar una broca más pesada.

#### 4.2.2 Broca SKR616M Serie 221373

**Figura 54. Broca SKR616M Serie 221373**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**4.2.2.1 Características de diseño:** Esta broca cuenta con 6 aletas y cortadores PDC, raptor de 16mm, termoestables y con mayor resistencia a la abrasión. La broca cuenta con tecnología Seeker (esta tecnología ajusta la broca al perfil específico del pozo, tipo de empuje y litología, usando un amplio rango de

productos en la industria), componentes de control de torque y calibre tipo smoothSteer, los cuales se describieron anteriormente.

**Tabla 12. Parámetro operativos recomendados**

| Parámetros recomendados         |               |
|---------------------------------|---------------|
| Max WOB                         | 49            |
| Rango de TFA [in <sup>2</sup> ] | 0.295 – 2.651 |
| Máximo flujo [GPM]              | 1400          |
| Caída de presión [psi]          | 175 – 1250    |
| HSI                             | 1 - 7         |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**4.2.2.2 Desempeño de la broca:** Esta broca nueva, perforó hasta 7060' de la formación VERDE (792' de la verde y 1340' de la morada) que presenta un contenido de lutita del 30%, arcillolita 30% y arenisca del 15%. Manejó una ROP efectiva de 28.1 ft/hr en las formaciones VERDE y MORADA.

Al salir, la broca presentó daño importante de su estructura de corte, principalmente daño mecánico, lo cual se puede asociar con eventos de vibración registrados en toda la corrida, es importante destacar que se registraron intercalaciones de limolita (15%) y caliza (TZ) en la formación VERDE y hasta 10% de conglomerado, caliza y carbón en la formación MORADA, lo cual genera inestabilidad en la broca.

**Tabla 13. Desgaste de la broca SKR616M Serie 221373 según la IADC**

| Hileras Interiores | Hileras Exteriores | Características de desgaste | Ubicación del daño | Cojinete de sello | Calibre 1/16" | Otro desgaste | Razón salida |
|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|---------------|---------------|--------------|
| 4                  | 2                  | BT                          | A                  | X                 | I             | RO            | CP           |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

La broca en su estructura de corte se encuentra con cortadores rotos (BT), en todas sus áreas (A). Los protectores de calibre (TSP) se encuentran buenos, sale en calibre (I), tiene comienzos de un Ring-Out (RO) y su razón de salida fue por llegada al punto de corazonamiento (CP). y se trabajó con parámetros altos como WOB. Las figuras 55 y 56 muestran los rasgos del desgaste.

**Figura 55. Vista de la broca SKR616M después de la corrida**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**Figura 56. Vista de la broca SKR616M después de la corrida (aletas)**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

#### 4.2.2.3 Eventos Significativos Durante el desempeño de la broca.

- EVENTO 1: A 4949´ se presenta fenómeno de Stick-Slip y a 5174´ se baja la ROP a 4 ft/hr y se realiza prueba de perforabilidad manejando los parámetros así: 110 rpm, 10-20 klbs WOB; se continua ensanchando a 20 ft/hr desde 5174´ hasta 5250 y luego se nota un aumento de la ROP de hasta 150 ft/hr. El día 07/11/2012 termina ensanchamiento con los siguientes parámetros 880 gpm, 1750 psi, 25-30 klbs WOB, 115-120 rpm, 1-4 klb\*ft TQ a las 10:58 hrs a la profundidad de @5522, y se da inicio a la perforación desde @5522 con los mismos parámetros repasando 1 vez cada parada.
- EVENTO 2: A 6038´ se presenta el fenómeno de STICK SLIP y se levanta la sarta hasta que recupere rotación, se aumenta a 1000 GPM y se repasa esos puntos apretados notando también un colgamiento de 7000 klbs WOB; luego se disminuye este efecto. Después de la profundidad de 6400´ se presenta una baja ROP (30 ft/hr), hasta 7060´.

#### 4.2.3 Broca DSF519M – A12 serie A156093

Figura 57. Broca DSF519M-A12 Serie A156093



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**4.2.3.1 Características de diseño.** Esta broca cuenta con 5 aletas, cortadores DuraForce de 19 mm y calibre de 1.75 pulgadas. Los cortadores DuraForce, cuentan con una tecnología que les permite exhibir máxima resistencia al impacto. Este cortador incorpora una nueva interfase no plana, para minimizar los esfuerzos en el mismo; cuenta con material de diamante policristalino específicamente seleccionado para resistencia al impacto y una superficie PDC termoestable para máxima resistencia a la abrasión.

También cuenta con una tecnología llamada protección TSP en el calibre (placas de producto térmicamente estable TSP en el calibre) y material hardmetal soldado al gauge que aportan durabilidad y calibre ultra suave.

**Tabla 14. Hidráulica de la broca DSF519M-A12 Serie A156093**

| Hidráulica de la broca       |                 |
|------------------------------|-----------------|
| Caída de presión [psi]       | 618             |
| Velocidad de chorro [ft/seg] | 350             |
| Fuerza de impacto [lbs]      | 804             |
| HSI                          | 4.16            |
| Boquillas [32 nds]           | (3) 16 + (2) 10 |
| TFA [in <sup>2</sup> ]       | 0.74            |
| Flujo [GPM]                  | 600             |
| Peso del lodo [ppg]          | 11              |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**Tabla 15. Parámetros operativos recomendados**

| Parámetros recomendados      |             |
|------------------------------|-------------|
| Máximo WOB [klbs]            | 38          |
| Rango TFA [in <sup>2</sup> ] | 2455 – 9815 |
| Máximo flujo [gpm]           | 700         |
| Caída de presión [psi]       | 700 - 2000  |
| HSI                          | 2 - 7       |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**4.2.3.2 Desempeño de la broca.** La broca perforó un total de 1167ft de la formación ROJA; los primeros 320ft fueron 30% lutita, 60% limolita y 10% arena. Con ROP 40/100 ft, usando WOB=8/10 Klbs. Esto indica que el desempeño de la broca en la limolita es alto, aun usando poco peso. La limolita se describe como moderadamente firme.

Entre 7.600 y 8.280 pies se aprecia litología principalmente arcillosa (80/60%) y restante limolita, con ROP menor (30/70 ft/hr), usando WOB entre 12 y 15 Klbs; al intentar usar mayor peso ocurrió embotamiento; se aprecia que el desempeño es menor cuando incrementa el contenido de arcilla; esto indica que el rendimiento se redujo en la arcilla.

Entre 8.280 y 8500 pies se incrementa el contenido de conglomerado hasta 80% y la ROP cae 15/30%; sin embargo, la ROP es menor cuando incrementa el contenido de arcilla. El contenido conglomerático en los últimos 220 pies deterioró la broca de modo importante, por impacto.

Se concluye que la broca tuvo un desempeño excelente en limolita (primeros 320 pies) logrando ROPs de hasta 140 FT/hr, 80 ft/hr promedio, pero disminuye hacia la arcilla (siguientes 680 pies) donde la ROP es 30/70 ft/hr. La broca no presentó resistencia al conglomerado, ya que en los últimos 220 pies sufre fuerte daño por impacto en todos los cortadores.

**Tabla 16. Desgaste de la broca DSF519M – A12 serie A156093 según la IADC**

| Hileras Interiores | Hileras Exteriores | Características de desgaste | Ubicación del daño | Cojinete y sello | Calibre 1/16" | Otros desgastes | Razón de salida |
|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|---------------|-----------------|-----------------|
|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|---------------|-----------------|-----------------|

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

La broca presentó desgaste tipo Cored, perdiendo los cortadores en la parte interna de la estructura, en el cono exactamente, siendo esta la razón del lento avance al final de la perforación. Este desgaste se presenta por fuerte impacto en la zona de conglomerado. Todos los demás cortadores presentan desgaste tipo BT, cortadores rotos. La broca se conserva en calibre y no presenta boquillas tapadas ni embotamiento.

**Figura 58. Vista de la broca DSF519M – A12 después de la corrida**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**Figura 59. Vista de la broca DSF519M – A12 después de la corrida (aletas)**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

#### 4.2.3.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca

- EVENTO 1: Se encuentra la formación ROJA a 7333' con contenido de limolita de 40%, shale 30%, arena 20% y caliza 10%, usando 600 GPM, 120/130 RPM, WOB = 8/12, SPP = 2600/2850 psi y ROP entre 40 y 100 ft/hr, con un promedio de 70 ft/hr; la predominancia de limolita es altamente favorable para la broca, permitiendo un desempeño bastante alto.
- EVENTO 2: Entre 7.930 y 8.280 pies se perfora con una ROP alta 40/100 ft/hr, contenido principalmente arcilloso (60%), restante limolita (40%), usando WOB menor a 12 Klbs (para evitar embotamiento por el alto contenido de arcilla), 120/130 RPM, 600 GPM. El contenido de limolita permite un alto desempeño.
- EVENTO 3: Desde 8.280' la ROP cae abruptamente a 15/30 ft/hr, ocurriendo un cambio litológico importante; de 10% el conglomerado se incrementa a 40/90%. A partir de 8.380 pies la cantidad de arcilla se incrementa y la ROP se viene reduciendo. El WOB continúa incrementando hasta 24 Klbs, buscando mejorar el desempeño; se usan 100 RPM, Tq = 5/10 Klb-ft. A 8.483', en vista del lento avance, se realiza procedimiento para limpiar la broca, para descartar embotamiento, se vuelve a fondo usando poco peso (WOB = 10/12 Klbs) con

un avance de 10 ft/hr; se incrementa el peso (15/18 Klbs), sin apreciar incremento de ROP; el contenido de conglomerado no sólo redujo el desempeño drásticamente sino que también causó grave daño a la broca por impacto.

#### 4.2.4 Broca DSH616M - A6D serie A145111

Figura 60. Broca DSH616M- A6D Serie A145111



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**4.2.4.1 Características de diseño.** Esta broca tiene 6 aletas de cuerpo de matriz y cortadores Helios de 16 mm. La mayor cantidad de aletas y los cortadores de menor tamaño aportan mayor estabilidad a esta broca.

Los cortadores Helios son cortadores PDC altamente termoestables, diseñados específicamente para exhibir alta resistencia térmica. El cortador combina material de diamante Policristalino de alta densidad seleccionado para mantener alta

resistencia al impacto, a la abrasión y específicamente para mejorar la resistencia térmica. La tecnología patentada de lixiviación profunda reduce la degradación térmica de la broca de modo dramático, permitiendo perforar mucho más rápido por mucho más tiempo, mejorando el desempeño general.

**Tabla 17. Hidráulica de la broca DSH616M – A6D Serie A145111**

| <b>Hidráulica de la broca</b>       |                 |
|-------------------------------------|-----------------|
| <b>Caída de presión [psi]</b>       | 422             |
| <b>Velocidad de chorro [ft/seg]</b> | 200             |
| <b>Fuerza de impacto [lbs]</b>      | 689             |
| <b>HSI</b>                          | 2.43            |
| <b>Boquillas [32 nds]</b>           | (3) 13 + (3) 15 |
| <b>TFA [in<sup>2</sup>]</b>         | 0.9             |
| <b>Flujo [GPM]</b>                  | 560             |
| <b>Peso del lodo [ppg]</b>          | 12              |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**Tabla 18. Parámetros Operativos recomendados**

| <b>Parámetros recomendados</b>    |            |
|-----------------------------------|------------|
| <b>Máximo WOB [klbs]</b>          | 38         |
| <b>Rango TFA [in<sup>2</sup>]</b> | 0– 0       |
| <b>Máximo flujo [gpm]</b>         | 700        |
| <b>Caída de presión [psi]</b>     | 700 - 2000 |
| <b>HSI</b>                        | 2 - 7      |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**4.2.4.2 Desempeño de la broca.** La broca perforó un total de 2029 pies con una ROP de 19,8 ft/hr, atravesando cerca de 1000 pies de formación con alto contenido de conglomerado (40/90%), el cual se describe como duro, con fragmentos de filitas, esquistos, cuarcitas, diabasas y basalto.

Los parámetros se manejaron dentro de los límites recomendados; el peso en la broca se incrementó de modo gradual hasta un máximo de 25 Klbs, 70/140 RPM, buscando en todo momento mantener el equilibrio entre durabilidad y desempeño. Adicionalmente se realizó el correcto procedimiento para iniciar perforación limpiando el fondo y realizando la “cama” de la broca.

El desempeño de la broca declinó gradualmente y terminó con ROPs efectivas de entre 8 y 15 ft/hr y torques erráticos de hasta 12 Klbs-ft. El último intervalo es altamente arenoso (60/70%) y en ésta litología la ROP es típicamente mayor, por lo que se decide sacar la broca.

La calificación final de la broca es 3-7-RO-S-X-I-BT-PR; a pesar de que el daño es importante, ésta atravesó un intervalo altamente duro y abrasivo; se considera que el desempeño de esta broca es muy bueno.

**Tabla 19. Desgaste de la broca DSH616M – A6D serie A156093 según la IADC**

| Hileras Interiores | Hileras Exteriores | Características de desgaste | Ubicación del daño | Cojinetes y sello | Calibre 1/16” | Otros desgastes | Razón de salida |
|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 3                  | 7                  | RO                          | S                  | X                 | I             | BT              | PR              |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

La broca presenta desgaste por cortadores rotos en la nariz de las aletas 3, 4 y 5; sin embargo, la aleta 1 no presenta desgaste en esta posición, por lo que se

mantuvo activa en todo el intervalo. El desgaste selectivo en la nariz y nulo alrededor, sugiere fuerte impacto durante intervalos de alta dureza litológica, podría ser en conglomerado; no se aprecia otro tipo de desgaste en cuerpo; la broca está en calibre. Una de las boquillas se encontró tapada.

**Figura 61. Vista de la broca DSH616M – A6D después de la corrida**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

**Figura 62. Vista de la broca DSH616M – A6D después de la corrida (aletas)**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-1

#### 4.2.4.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca.

- EVENTO 1: A 8.900 ft se reducen las RPMs debido a la litología altamente abrasiva que se viene observando; pero justo allí ocurre un cambio litológico y se incrementa la arcilla a 80%; la ROP cae a 10 ft/hr; esto lleva a limpiar la broca (con píldora abrasiva) e incrementar las RPMs nuevamente a 140, a 8960 pies; la ROP se incrementa a 20/40 ft/hr, pero coincide con un descenso en el contenido de arcilla, 30% y aumento del conglomerado a 60%.
- EVENTO 2: Entre 8960 y 9000 se aprecia 70/80% conglomerado y la ROP sube a 20/40 ft/hr, es decir, el desempeño es mejor que en la arcilla.
- EVENTO 3: Entre 9000 y 9300 pies predomina la arenisca (60%) y el desempeño se mantiene alto con ROP desde 20 hasta 60 ft/hr, demostrando el desempeño excepcional en la arenisca, usando WOB = 15/20 Klbs, 140/150

RPM. Se revisa el arrastre en cada parada, sin evidenciar efectos de colgamiento.

- EVENTO 4: Entre 9300 y 10360 pies predomina el contenido de conglomerado, 40/80%, restante arcilla; la ROP cae a 20/25 ft/hr; se prueba WOB encontrando valor óptimo = 18/22 Klbs (por la dureza del conglomerado). Se utilizan 580/630 GPM y 140 RPM; la diferencia del torque en fondo y fuera de fondo indica el buen estado de la broca. En las arcillas la ROP cae drásticamente. No se aprecia arrastre. Hacia 9900 pies aparecen algunas limolitas (20/30%) que incrementan la ROP a 40 ft/hr. En 10110ft el peso del lodo se incrementa a 12ppg y se establece GPM=600 sin apreciar una caída de ROP.
- EVENTO 5: De 10360 a 10600 prácticamente desaparece el conglomerado (10/20%) y se incrementa la arcillolita; la ROP continúa declinando. Hacia los últimos 120 pies perforados el contenido de arenisca se incrementa gradualmente hasta 80% y la ROP se mantiene estable 12/10 ft/hr; por esta razón la broca continúa avanzando. Hacia el final de la corrida se incrementa el torque oscilando entre 7 y 10Klbft.

### **4.3 ESPECIFICACIONES Y RANGOS DE APLICACIÓN DE LAS BROCAS DEL POZO UIS-2.**

#### **4.3.1 Broca MSRE519M serie E147205**

**Figura 63. Broca MSRE519M serie E147205**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

**4.3.1.1 Características de diseño:** Es la misma broca descrita anteriormente en el subcapítulo 4.2.1.

**Tabla 20. Hidráulica de la broca MSRE519M serie E147205**

| Hidráulica de la broca       |                 |
|------------------------------|-----------------|
| Caída de presión [psi]       | 1740            |
| Velocidad de chorro [ft/seg] | 465             |
| Fuerza de impacto [lbs]      | 1731            |
| HSI                          | 6.89            |
| Boquillas [32 nds]           | (3) 13 + (3) 15 |
| TFA [in <sup>2</sup> ]       | 0.552           |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

**4.3.1.2 Desempeño de la broca**

**Tabla 21. Desgaste de la broca MSRE519M serie E147205 según la IADC**

| Hileras Interiores | Hileras Exteriores | Características de desgaste | Ubicación del daño | Cojinete y sello | Calibre 1/16" | Otros desgastes | Razón saliente |
|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|
| 2                  | 4                  | BT                          | S                  | X                | I             | LT/CT           | CP             |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

Al salir la broca se observa con un buen desgaste generado por las intercalaciones Conglomeráticas y daños ocasionados por vibraciones Stick Slip,

torsionales. Los componentes mitigadores de impacto ubicado en el hombro fueron desgastados productos de las vibraciones y abrasión de la formación. Se observan dos cortadores perdidos y varios partidos por el mismo evento. Aunque se manejaron parámetros para disminuir el desgaste en las secciones conglomeráticas la broca sufre también indicios de un Ring Out en el área del hombro. La broca logra llegar al punto del Coring.

**Figura 64. Vista de la broca MSRE519M después de la corrida**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

#### **4.3.1.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca**

- **EVENTO1:** En los momentos que se perfora litología Conglomeráticas se varían parámetros para disminuir las vibraciones. A los 1660 ft se observa disminución de la ROP, niveles Conglomeráticos.
- **EVENTO 2:** Se continúa perforando variando parámetros para encontrar el mejor performance, se observan vibraciones torsionales y torques erráticos. Se cambian parámetros mientras disminuye las vibraciones. Se reporta como tope de BLANCA a los 1658 ft donde efectivamente se observa disminución de la tasa de penetración. Siguiendo la correlación de la litología conglomerática se presentaban aumento de las vibraciones torsionales.

## ❖ **Resultados aplicación del métodos de Burgoyne y Young**

La aproximación desarrollada por Burgoyne y Young, se desarrolla aprovechando los avances en los sistemas de monitoreo de pozos y se vale de un análisis de regresión múltiple de datos detallados de perforación en intervalos cortos de profundidad.

Se trataron de analizar brocas cuyo recorrido fuera extenso para observar de mejor manera el avance y cambio de los demás parámetros junto con el desgaste. Pero teniendo en cuenta que primero se deben caracterizar las formaciones atravesadas, se obtuvieron valores erróneos de las constantes, asociados a las limitaciones del modelo propuesto.

El modelo establece que las constantes son determinadas llevando a cabo un análisis de regresión múltiple de datos muy detallados de perforación tomados en intervalos de profundidad cortos. Otra de las limitaciones incluye que la determinación de las constantes requiere que la Ecuación 63 represente al proceso de perforación con una precisión del 100 por ciento, algo que jamás ocurre. Además que los datos se deben obtener de más de un pozo para garantizar una regresión exitosa.

En el caso de estudio, la única formación de la que se pudieron obtener valores acordes a lo propuesto en el modelo, fue la Formación Marrón, en donde la mayoría de sus datos variaron en un intervalo corto, menor a los 20 pies, sin embargo, y de acuerdo a Burgoyne y Young, se obtuvieron algunos valores negativos debido a la poca cantidad de datos de entrada (el modelo requiere por lo menos 30).

A continuación se muestran los datos de la Formación Marrón utilizados para obtener las constantes que caracterizan a la formación.

**Tabla 22. Datos de la formación marrón utilizados en el análisis de regresión múltiple**

| <b>F. MARRÓN</b> |                |                   |                   |                  |               |                           |                        |                |
|------------------|----------------|-------------------|-------------------|------------------|---------------|---------------------------|------------------------|----------------|
| <b>Prof.[ft]</b> | <b>Broca #</b> | <b>ROP [ft/h]</b> | <b>WO B [klb]</b> | <b>RPM [rpm]</b> | <b>%Desg.</b> | <b>Peso Lodo [lb/gal]</b> | <b>Gasto [gal/min]</b> | <b>P [psi]</b> |
| 33               | 1              | 20                | 1                 | 61               | 0             | 8,6                       | 990                    | 1669           |
| 774              | 1R             | 18                | 55                | 100              | 2             | 9,2                       | 1144                   | 2734           |
| 776              | 2              | 19                | 13                | 100              | 0             | 8,6                       | 617                    | 972            |
| 789              | 2              | 61                | 23                | 100              | 0             | 8,6                       | 596                    | 918            |
| 791              | 3              | 60                | 10                | 76               | 0             | 8,6                       | 859                    | 1869           |

Fuente: Los autores

Al realizar la regresión múltiple se obtienen las siguientes constantes para la formación Marrón:

$$a_1 = 2,65413 \quad (72)$$

$$a_2 = 0,00011 \quad (73)$$

$$a_3 = 7,60 \times 10^{-5} \quad (74)$$

$$a_4 = 5,60 \times 10^{-6} \quad (75)$$

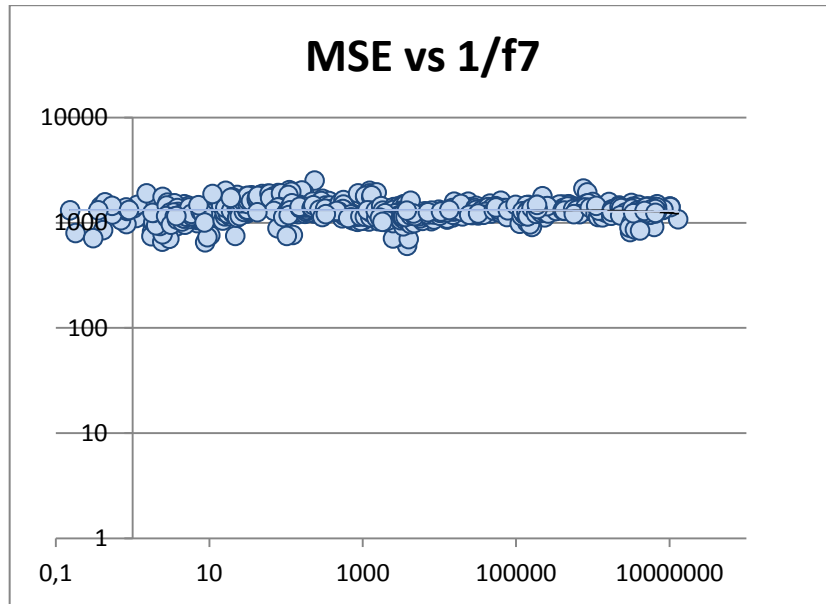
$$a_5 = 0,21972 \quad (76)$$

$$a_6 = -9,57743 \quad (77)$$

$$a_8 = -1,59354 \quad (78)$$

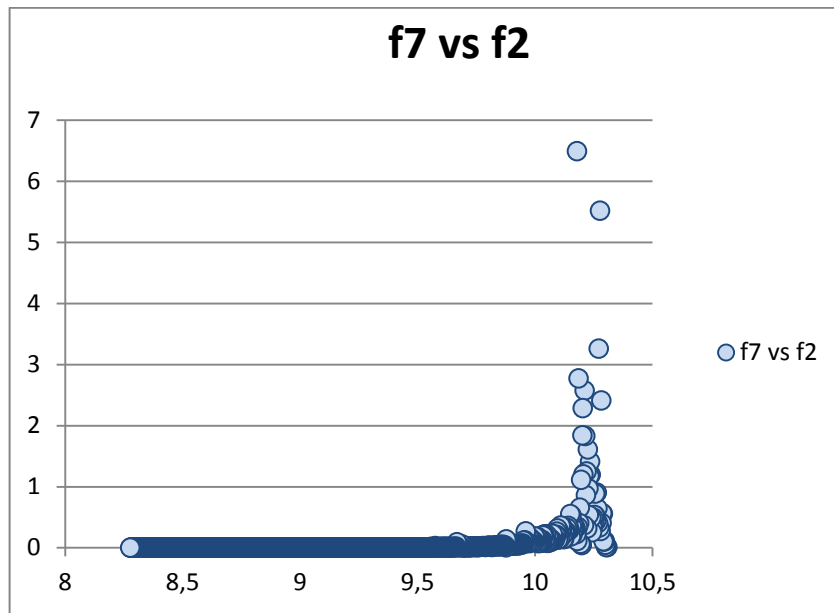
Relacionando cada función obtenida versus la función de desgaste se obtienen los siguientes gráficos para el viaje de 866 pies (791 – 1657 pies) de la Broca # 3 través de dicha formación:

**Figura 65. MSE vs 1/F7**



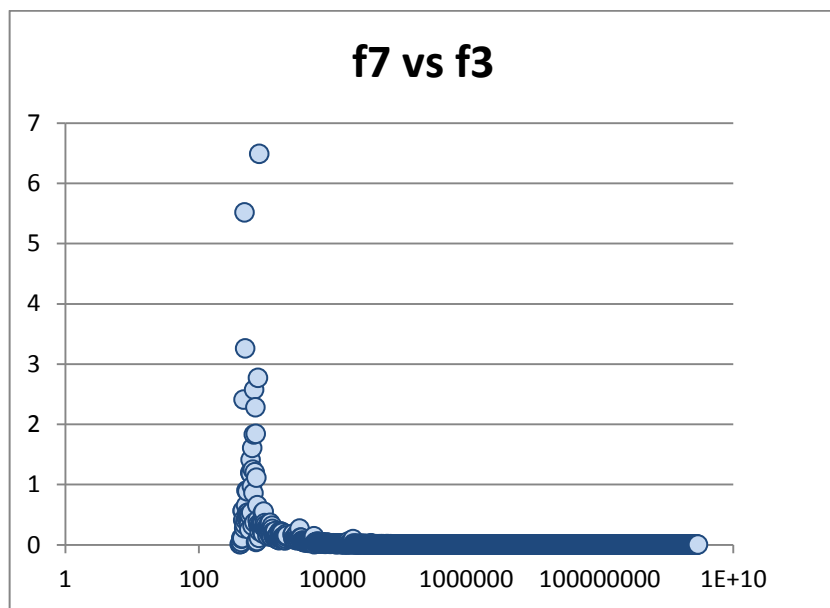
Fuente: Los autores

**Figura 66. F7 vs F2**



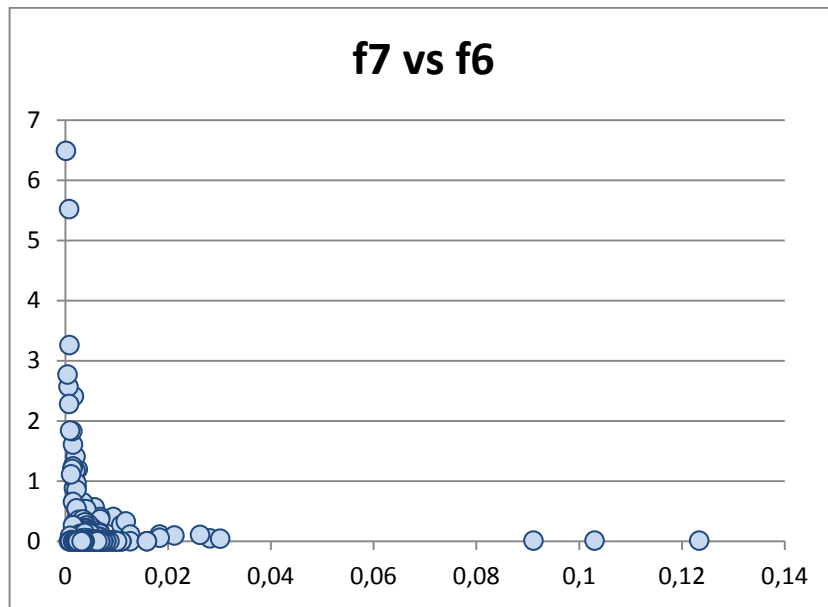
Fuente: Los autores

Figura 67. F7 vs F3



Fuente: Los autores

Figura 68. F7 vs F6



Fuente: Los autores

#### 4.3.2 Broca RSR716M serie 220993

Figura 69. Broca RSR716M serie 220993



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

**4.3.2.1 Características de diseño:** Los cortadores Raptor exhiben una capa de PDC termoestable 200% más resistente al calor y 400% más resistente a la abrasión que los PDC Premium. La capa termoestable mejora dramáticamente la

resistencia a la abrasión manteniendo un borde de corte afilado de lento desgaste. La capa termoestable se desgasta más lentamente que el Diamante Policristalino multimodal detrás de este, formando dos bordes afilados que mantienen la ROP. Esto permite a la broca perforar más rápido y una mayor longitud que una PDC Premium.

El calibre smooth steer aporta máximo contacto con el hueco, poca Resistencia al giro, reduciendo el torque, lo cual mejora el desempeño e incrementa la vida de la broca. Su forma mejora la geometría del hueco al rotar y genera un direccionamiento más suave al deslizar.

La tecnología Rotary steerable combina perfil, estructura de corte y geometría del calibre en su diseño para mejorar el desempeño de perforación, especialmente usada en combinación con otras herramientas RS. Este diseño aporta excelente direccionalidad en sistemas push-the-bit y point-the-bit. Este calibre es usado especialmente usado en huecos con alto grado de inclinación y secciones tangentes.

Componentes DAG™ aportan a la broca capacidad para backreaming y corte lateral cuando se requiera. El diseño DAG también aporta excelente direccionalidad en sistemas point the bit y push the bit.

Los cortadores diamondback que se encuentran ubicados estratégicamente en las áreas de desgaste crítico aportando una segunda hilera de cortadores a algunas de las aletas. Esto incrementa la densidad de cortadores, mejorando la durabilidad de la broca, incrementando la cantidad de pies perforados y el desempeño de la broca. La estabilidad lateral es mejorada ya que el número de aletas efectivas se incrementa; los cortadores diamondback reemplazan los studs impregnados en las áreas más críticas.

La protección TSP en el calibre consta de placas de TSP y material hardmetal soldado al calibre que aportan durabilidad y calibre ultra suave.

**Tabla 23. Parámetros operativos recomendados**

| Parámetros recomendados      |              |
|------------------------------|--------------|
| Máximo WOB [klbs]            | 34           |
| Rango TFA [in <sup>2</sup> ] | 0.344– 1.374 |
| Máximo flujo [gpm]           | 600          |
| Caída de presión [psi]       | 700 - 1500   |
| HSI                          | 2 - 6        |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

#### 4.3.2.2 Desempeño de la broca

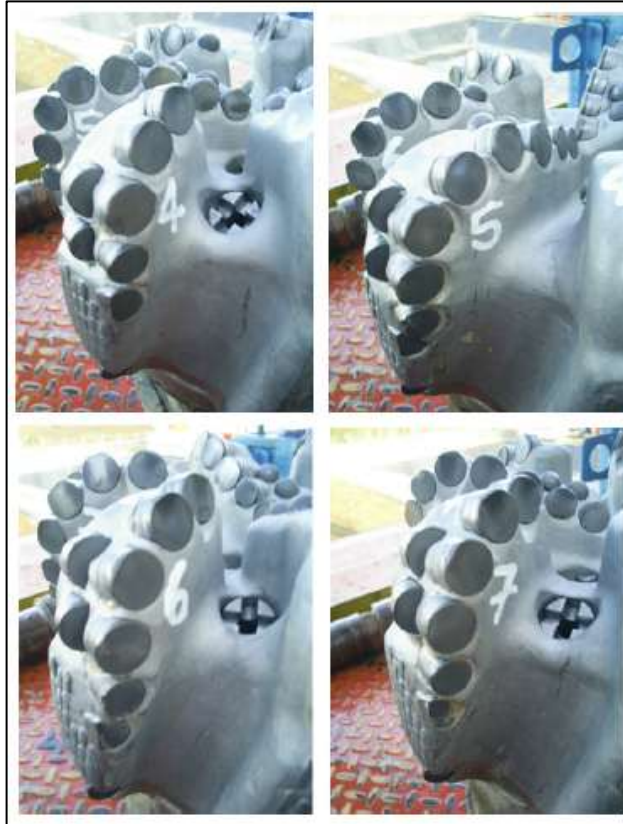
**Tabla 24. Desgaste de la broca RSR716M serie 220993 según la IADC**

| Hileras Interiores | Hileras Exteriores | Característ de desgaste | Ubicación del daño | Cojinete y sello | Calibre 1/16" | Otro desgaste | Razón salida |
|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|------------------|---------------|---------------|--------------|
| 0                  | 1                  | WT                      | S                  | X                | I             | CT            | CP           |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

La broca sale con su estructura de corte en muy buenas condiciones solo un leve desgaste normal producto de la operación en pocos cortadores especialmente en el hombro, pero en términos generales y a pesar de la litología tan severa que perforó la broca sale en muy buenas condiciones, se encuentra en calibre y sin boquillas taponadas.

**Figura 70. Vista de la broca RSR716M después de la corrida**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

#### **4.3.2.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca**

- EVENTO 1: En 8029 ft se comenzó con la perforación del hueco en 8 1/2" con los siguientes parámetros 550 GPM, WOB 15-20 klbs, SPP 2500 psi, RPM 110, TQ 10-13 kft-lb. a 8260 ft se presenta cambio abrupto de litología (cambio de formación), se pasó de un ambiente predominantemente arcilloso a uno prácticamente 100% conglomerado allí cae la ROP a 15-20 ft/hr por lo que se ajustan parámetros y se logra reactivar la ROP a niveles de 40-60 ft /hr.

- EVENTO 2: Durante toda la corrida se presenta una litología bastante variable sin embargo la broca respondió muy bien a estas intercalaciones manteniendo siempre un muy buen desempeño de ROP.

#### 4.3.4 Broca RSR716M – C1 serie 226380

**Figura 71. Broca RSR716M – C1 serie 226380**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

**4.3.4.1 Características de diseño:** Esta broca presenta las mismas características de diseño y los mismos parámetros operativos recomendados que la nombrada en el subcapítulo 4.3.3.

**Tabla 25. Hidráulica de la broca RSR716 – C1 serie 226380**

| Hidráulica de la broca       |                 |
|------------------------------|-----------------|
| Caída de presión [psi]       | 1162            |
| Velocidad de chorro [ft/seg] | 332             |
| Fuerza de impacto [lbs]      | 1226            |
| HSI                          | 7.17            |
| Boquillas [32 nds]           | (3) 11 + (4) 10 |
| TFA [in <sup>2</sup> ]       | 0.58            |
| Flujo [GPM]                  | 600             |
| Peso del lodo [ppg]          | 12              |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

**4.3.4.2 Desempeño de la broca:** Durante esta corrida se realizó ensanchamiento de 151 pies de la formación AMARILLA, principalmente arcillosa y con contenidos de limolita (+/- 20%) y arenisca (10%), desde hueco de 6.00” de diámetro, a 8.500”, utilizando la broca RSR716M, en el pozo vertical UIS-2, utilizando sarta convencional con dos estabilizadores, desde 10000’, para una ROP total de ensanchamiento = 50.3 ft/hr y ROP efectiva de ensanchamiento = 81.2 ft/hr. Desde 10151’ hasta 12100’ se perfora la fase de 8 ½” del pozo, atravesando la formación mencionada. Se optimizan parámetros para lograr máxima eficiencia en la perforación. Se utilizan para este fin 55.5 horas totales y 48 horas en fondo, para una ROP total de perforación = 35.1 ft/hr y ROP efectiva de perforación = 40.6 ft/hr.

**Tabla 26. Desgaste de la broca RSR716M – C1 serie 226380 según la IADC**

| Hileras Interiores | Hileras Exteriores | Características de desgaste | Ubicación del daño | Cojinetes y sello | Calibre 1/16” | Otros desgastes | Razón de salida |
|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 0                  | 1                  | WT                          | S                  | X                 | I             | CT              | CP              |

Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

La broca RSR716M 8 ½” serie: 226380 se encuentra en muy buenas condiciones, con único desgaste por cortadores rotos en la zona del calibre, muy posiblemente debido al ensanchamiento realizado. No se aprecia otra característica de desgaste, no hay boquillas tapadas, ni embotamiento. La broca se encuentra en calibre.

**Figura 72. Vista de la broca RSR716M – C1 después de la corrida**



Fuente: Reporte final de brocas pozo UIS-2

#### **4.3.4.3 Eventos significativos durante el desempeño de la broca**

- EVENTO 1: A partir de 10151' se perfora hueco nuevo utilizando WOB = 15/25 Klbs, 120/130 RPM, 500/600 GPM, observando torque = 15/16 Klbs-ft y ROP que varía abruptamente entre 20 y 70 ft/hr, lo cual se debe a la presencia frecuente de intercalaciones litológicas; la ROP en la arcilla es claramente muy superior.
- EVENTO 2: En el intervalo 10450'-10500' la ROP cae de 70 ft/hr a 20 ft/hr; en ese intervalo se utilizaron 25/30 Klbs, 500 GPM, 130 RPMs. Se bombearon 40 Bbls de píldora abrasiva y se sacudió la sarta para corregir un posible embotamiento. En este intervalo se encontró una litología con un contenido de arenisca + limolita igual a 50% aproximadamente, lo cual explica la caída de la ROP, descartando el embotamiento.

- EVENTO 3: Entre 10500' y 10840' la ROP oscila abruptamente entre 20 y 80 ft/hr, por intervalos. Se presumen varias hipótesis, entre ellas embotamiento, cambios de formación e incluso daño a la estructura de corte. De esta manera se realiza constante variación de parámetros, especialmente del galonaje y RPMs, pero el cambio de parámetros no tiene efecto visible sobre la ROP. Se descarta daño a la broca ya que el torque fuera de fondo es 11/14 Klbs-ft y en fondo es 15/17 Klbs-ft y adicionalmente la ROP mejora en algunos intervalos. La tasa de penetración en este intervalo parece depender más de cambios de formación, pero en general se mantiene muy baja; la litología es 70% arcillosa con intercalaciones de arenisca y limolita.
- EVENTO 4: En el intervalo 10840'-10940' la ROP cae abruptamente desde 80 a 30/40 ft/hr; se vienen usando 550 GPM, 120 RPMs, WOB = 20 Klbs; la litología en este intervalo es 60% limolita + arenisca. Durante la conexión se aprecia arrastre de hasta 20 Klbs bajando, por lo cual se recomienda continuar perforación con WOB = 30 Klbs y con máximo galonaje por el alto contenido de arcilla. Se recomienda máxima rotación de la sarta para evitar el colgamiento de los estabilizadores; el colgamiento de la sarta no se había contemplado explícitamente por tratarse de un pozo vertical. Luego de aplicar los parámetros, la ROP se incrementa en un promedio de 40 ft/hr. Desde este punto hasta TD, en general, la ROP mejora sustancialmente, pero se continúa observando intervalos de muy baja perforabilidad donde la litología es principalmente arenosa y con limolita.

#### **4.4 METODOLOGÍA**

Se plantea una metodología que permite asociar los factores o combinación de factores, que contribuyen en la manifestación del desgaste en las brocas de

perforación, teniendo en cuenta consideraciones de tipo mecánico, geológico, operacional, de selección y de fabricación.

Sin dejar de lado, que la forma más eficiente y precisa para estudiar este desgaste es aquella donde minuciosa y consistentemente se evalúa el desgaste al retirar la broca.

Además, de relacionar los factores que inciden en el desgaste, se podría identificar prácticas de operación que mejoren el desempeño total en la perforación.

**4.4.1 Identificación de las variables responsables de las condiciones de desgaste.** Se exponen a continuación los criterios generales que permiten inferir las diferentes manifestaciones de desgaste, y que además son de valiosa importancia para los fabricantes de brocas de perforación, en la búsqueda de avances y mejoras en el diseño de las brocas.

**4.4.1.1 Impactos:** Las vibraciones axiales, torsionales y laterales afectan significativamente el desempeño de toda la sarta de perforación, al igual que los fenómenos vibratorios.

Las brocas PDC son brocas muy eficientes, con altas tasas de perforación en condiciones normales; pero cuando entran en formaciones más duras las estructuras de corte se ven afectadas, por lo cual la tasa de perforación disminuye. Esto se presenta cuando la broca PDC entra en estas formaciones, el peso (WOB) tiende a aumentar para que la tasa de perforación no se vea comprometida, este aumento del WOB provoca en la broca el fenómeno vibratorio conocido como stick-slip el cual provoca un gran daño en la misma

Las brocas tricónicas están mayormente afectadas por las vibraciones axiales, las cuales provocan un fenómeno ya mencionado como es el salto de la broca, aunque estas también pueden presentar los mismos fenómenos que las brocas PDC, causando los mismos efectos.

**4.4.1.2 Efectos Térmicos:** Esta falla traumática resulta de los esfuerzos internos causados por la expansión diferencial de los materiales.

Los esfuerzos causados por las diferentes tasas de expansión conducen a graves agrietamientos intergranulares, macrosinzelado y rápida falla de los cortadores PDC.

**4.4.1.3 Peso Sobre la Broca (WOB):** El cambio del WOB obedece a los cambios en la dureza de las formaciones, por ejemplo si aumenta la fuerza compresiva de la formación, es importante aumentar el WOB y bajar la ROP.

Si la formación es altamente abrasiva, es necesario mantener o reducir un poco el WOB y también bajar las RPM, ya que esto aumentaría el desgaste de los dientes de la broca.

A medida que el desgaste de la broca va incrementando, también lo hará el WOB con el fin de mantener un óptimo ROP y mantener la estabilidad de la broca, reduciendo las vibraciones que se pueden producir.

**4.4.1.4 Hidráulica:** La hidráulica de la broca cumple cuatro funciones básicas: separación de los recortes desprendidos, limpieza de los conos y los cortadores, enfriamiento de la broca y transporte de los recortes hacia la superficie, para evitar la pulverización de los mismos.

**4.4.1.5 Diseño y/o Materiales:** A esta variable van asociadas fallas en la fabricación y terminación de las brocas, calidad de los materiales usados para el

sustrato, soldadura y cortadores. Incluso la calidad de las roscas y demás componentes de acople de las brocas.

**4.4.1.6 Presencia de Desechos:** Por influencia de las dimensiones y cantidad de los equipos que se manejan en la etapa de perforación, ocurre generación de desechos que se alojan en la zona intervenida por la broca.

**4.4.1.7 Velocidad de la Broca:** La cantidad de las RPM está en función de la dureza y de la abrasión de la formación, ya que al aumentar la compresión de la misma, es necesario bajar las RPM para minimizar las vibraciones y el desgaste de la broca, por el contrario para formaciones blandas, es necesario aumentarlas para que resulte más eficiente la perforación.

**4.4.1.8 Otras:** La ROP se encarga de medir los pies perforados por hora [ft/hora], además indica si se debe o no seguir perforando con la misma broca, ya que de cambiarla se haría porque no se está cumpliendo con el valor adecuado de operación.

En brocas PDC, tener un alto torque implica que es muy posible que la broca esté excavando o si hay baja tasa de penetración, el BHA es el que podría estar generando el torque y no la broca. Por el contrario, si tenemos un bajo torque significa que la broca probablemente está patinando en una formación dura y la estructura de corte podría estar embolada.

En brocas tricónicas tener un torque alto podría significar que los conos están bloqueados, y si eso sucede, el torque irá disminuyendo a medida que los dientes de la broca se van desgastando; torque medio significa que la broca puede estar excavando; mientras que el torque bajo indica que los cortadores podrían estar embolados o sin filo.

**4.4.2 Criterios para el estudio del Desgaste.** Afianzado el conocimiento de la relación existente de forma conjunta y simultánea, entre las variables, se analiza los datos que de ellas se tengan, confrontados con la historia de eventos que experimenta la broca desde su primer uso, esto con el objeto de comprender los entornos y el tiempo en los que la broca se mantuvo bajo esfuerzos.

De estos datos, son de gran importancia los siguientes:

**Tabla 27. Criterios para el estudio del desgaste**

| PARÁMETROS  |   |
|---|---|
| ENTORNO   | TIEMPO  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro</li> <li>• Profundidad perforada</li> <li>• Litologías atravesadas</li> <li>• Arreglo de fondo (BHA)</li> <li>• Hidráulica (Prop del lodo)</li> <li>• Parámetros de perforación vs Profundidad</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Duración de la perforación</li> <li>• Observación y discusión de eventos.</li> </ul> |

Fuente: Los autores

**4.4.3 Pasos de la metodología.** La metodología para el estudio del desgaste de las brocas de perforación tanto para brocas cónicas como para brocas de cortadores fijos, está compuesta por una serie de pasos, los cuales se ilustran a continuación:

1. La metodología parte de la valoración de la broca, dada por la IADC cuando se termina la corrida.

2. De esa clasificación se toma solamente el tipo de desgaste que sufrió la broca. Ver figura 31.

3. Se toman informes finales de corridas anteriores del mismo tipo de broca en el campo y se procede a analizar de esos informes:

- Información de la hidráulica
- Información litológica y parámetros de operación
- Parámetros de perforación Vs Profundidad
- Condición de desgaste
- Eventos significativos
- Recomendaciones

4. Establecer una comparación que involucre la información actual de la corrida con la información antigua de la corrida, con el fin de establecer si hubo una variación significativa entre:

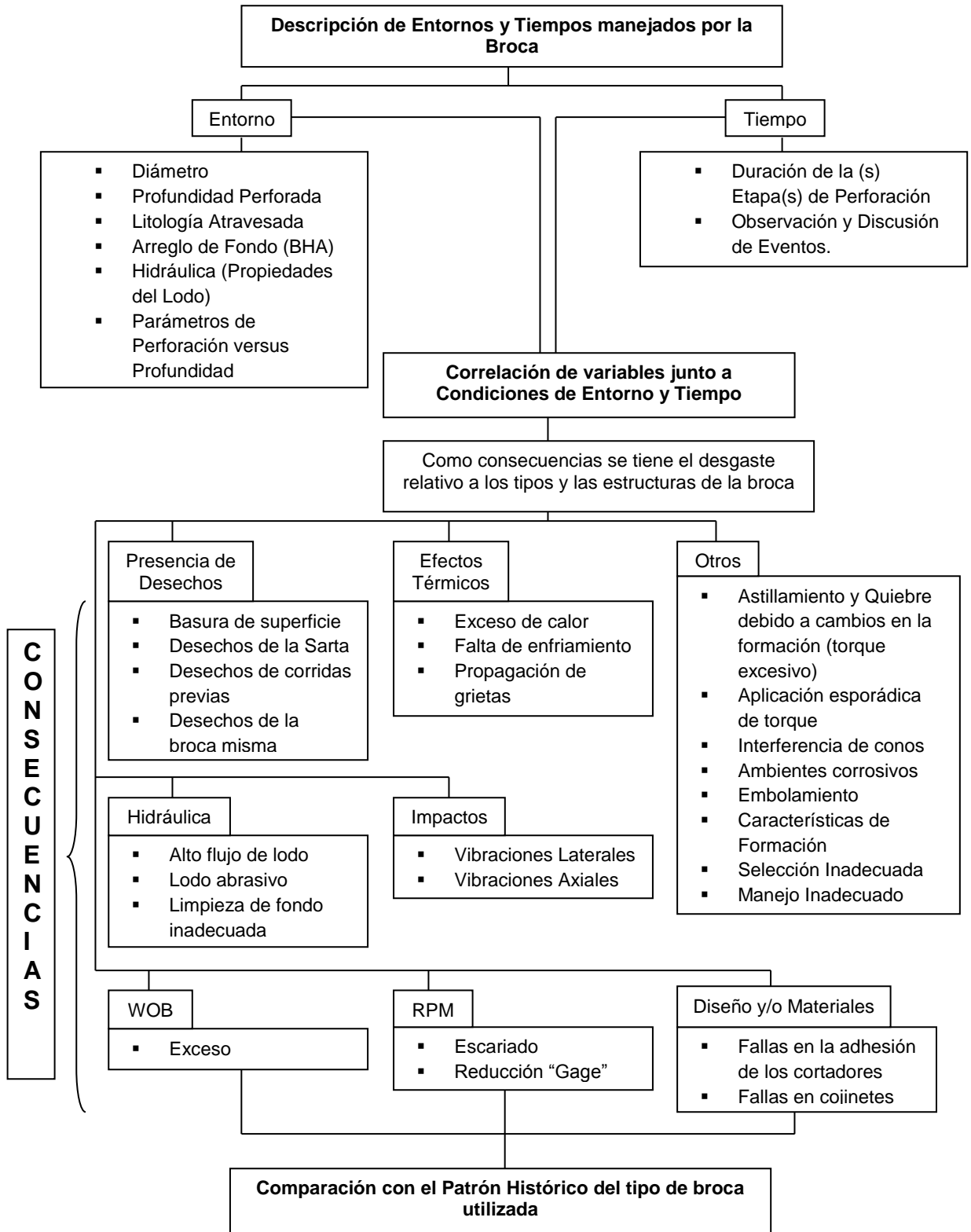
- Parámetros de perforación
- Hidráulica
- Profundidad
- Tiempo de la corrida
- Litología

Esto con el fin de realizar un breve análisis para detectar si las condiciones de las corridas de las brocas (broca nueva y broca (s) antigua (s)) fueron muy diferentes.

Además se realiza una comparación del desgaste entre la corrida nueva con la (s) anterior (es) y se establece cuál de ellas obtuvo menos desgaste.

5. Tomar los parámetros de perforación, la hidráulica, el tiempo de la corrida y las recomendaciones de la broca que obtuvo menos desgaste, con el fin de establecer parámetros operacionales adecuados que ayudarán a una disminución del desgaste, para futuras corridas.
  
6. Por último dependiendo de la variación de los parámetros presentados en las tablas de los anexos B, se establecerá un estimativo de las posibles causas del desgaste.

**Figura 73. Esquema de la metodología para el estudio del desgaste de las brocas de perforación**



## 5. CONCLUSIONES

- Las vibraciones y los fenómenos vibratorios son los parámetros que más influyen en las diferentes clases de desgaste de las brocas de perforación, y aunque comúnmente no se cuantifican, podemos concluir que los casos en que más se presentaron, fueron cuando las brocas estaban sometidas a cambios de formaciones o cuando se atravesaba una formación con un alto contenido de conglomerado.
- No se ha desarrollado un modelo que involucre o abarque la mayoría de las variables que afectan el desgaste, por lo cual la aplicación de algún modelo existente cuenta con muy poca precisión y generalmente es aplicable bajo un número significativo de restricciones, lo que hace más difícil su generalización.
- La gran mayoría de los sistemas de clasificación de desgaste utilizados por las compañías perforadoras y los fabricantes de brocas, se han desarrollado a partir de la clasificación del desgaste que utiliza la IADC.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda un estudio del desgaste de las brocas, que involucren datos reales de la perforación (datos pie a pie, registro master log, informe final de brocas, especificaciones de brocas etc), de más de dos pozos en un mismo campo, con el fin de obtener una mayor precisión en los resultados del modelo aplicado en este trabajo.
- Se recomienda un estudio del desgaste de las brocas, donde se cuente con datos de medición de los tipos de vibración, con el fin de obtener más precisión en el estimativo del desgaste presentado por las mismas.

## BIBLIOGRAFÍA

Baker Hughes. (December 1995). "Drilling Engineering Workbook". Houston, Texas.

Baker Hughes. (June 1999). "Sistema de Graduación de Desgaste De IADC para Trepanos Triconos".

Belaskie, J. P., Dunn, M. D., Choo, D. K. (June 1993). SPE 19968. "Distinct Applications of MWD, Weight on Bit, and Torque". SPE Drilling & Completion.

Besson, A., Burr, B., *et. al.* (2000). Oilfield Review Autumn 2000: 12, no. 3. "On the Cutting Edge". Schlumberger.

Boryczko, P. (Spring, 2012). Drill Bit Selection and Optimization in Exploration Well 6507/6-4A in the Nordland Ridge Area - Master's Thesis. University of Stavanger – Faculty of Science and Technology.

Bourgoyne Jr., A. T., Young Jr., F. S. (August 1974). SPE 4238. "A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection". Society of Petroleum Engineers Journal.

Brandon, B., Cerkovnik, J. (18-21 February 1992). IADC/SPE 23939 "First Revision to The IADC Fixed Cutter Dull Grading System". New Orleans, Louisiana: Drilling Conference Held.

Brandon, B., Cerkovnik, J. (18-21 February 1992). IADC/SPE 23940. "Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System". New Orleans, Louisiana: Drilling Conference Held.

Burgess, T. M., Lesso Jr., W. G. (1985). SPE/IADC 13475. "Measuring the Wear of Milled Tooth Bits Using MWD Torque and Weight-on-Bit". SPE/IADC 1985 Drilling Conference.

Centala, P., Challa V., *et. al.* (2011). Oilfield Review Summer 2011: 23, no. 2. "Bit Design – Top to Bottom". Schlumberger.

De La Torre, P. "Selección de Barrenas Por Correlación". Universidad Nacional Autónoma De México. Distrito Federal, México.

Faÿ, H. (June 1993). SPE 21930. "Practical Evaluation of Rock-Bit Wear During Drilling". SPE Drilling & Completion.

Fjaer, E., Holt, R. M., *et. al.* (2008). Petroleum Related Rock Mechanics - Second Edition. Elsevier. Hungary.

Fujii, K. (1967). 12214 WPC Conference Paper. "A Study of Rotary Drilling by means of Measuring the Torque of Cone Bits".

García, R. (2008). "Estudio Del Rendimiento De La Broca Hcm605z Para La Sección De 12 ¼" Diseñada Para La Perforación De Pozos Horizontales En El Campo Tarapoa". Escuela Superior Politécnica Del Litoral. Guayaquil, Ecuador.

Gazaniol, D. (1987). OTC 5510. "Field Data Analysis of Weight and Torque Transmission to the Drill Bit". 1987 Offshore Technology Conference.

Gerbaud, L., Menand, S. (21-23 February 2006). IADC/SPE 98988. "PDC Bits: All Comes From The Cutter/Rock Interaction". Miami, Florida: Drilling Conference Held.

Glowka, D. A., Stone, C. M. (June 1986). SPE 13527. "Effects of Thermal and Mechanical Loading on PDC Bit Life". SPE Drilling Engineering. Houston, TX – USA.

González, A., Jara, M., Ramirez, L. (2010). "Diseño del Programa de Brocas Requerido Para Perforar El Pozo Direccional XD". Escuela Superior Politécnica Del Litoral. Guayaquil, Ecuador.

Langeveld, C.J. (18-21 February 1992). IADC/SPE 23867. "PDC Bit Dynamics". New Orleans, Louisiana: Drilling Conference Held.

Li, X., Hood, M. (1993). SPE 26294. "Wear and Damage to PDC Bits". Society of Petroleum Engineers.

López, R. (Enero 2012). "Estudio De Desempeño Y Rendimiento De Brocas De Perforación En El Campo Shushufindi Para Optimizar Tiempos De Perforación Mediante La Aplicación De La Base De Datos Phoenix De Halliburton". Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

McGehee, D.Y., Gleeck, J.C. (18-21 February 1992). IADC/SPE 23937. "The IADC Roller Bit Classification system". New Orleans, Louisiana: Drilling Conference Held.

McGehee, D.Y., Gleeck, J.C. (18-21 February 1992). IADC/SPE 23938. "The IADC Roller Bit Dull Grading System". New Orleans, Louisiana: Drilling Conference Held.

Mouritz, A.P., (31 October 1991). SPE 24222. "The Abrasive Wear of Rock Drill Bit Materials". England.

Navarro, EM., Suárez, R. "Vibraciones En Una Sarta De Perforación: Problemas De Control". Instituto Mexicano Del Petróleo. Distrito Federal, México.

Petróleos Mexicanos. (Junio 2000). "Exploración y Producción: Un Siglo De La Perforación En México". Tomo 4- Barrenas E Hidráulica De Perforación.

Petrovi, M., Ivankovic, A., Murphy, N. (September 2012). Journal of the European Ceramic Society, 32 (12): 3021-3027. "The Mechanical Properties of Polycrystalline Diamond as a Function of Strain Rate and Temperature". Elsevier.

Ramsey, M. Technical Writer - Texas Drilling Associates. Tomado de Schlumberger Oilfield Glossary – Drilling Module: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>.

Rashidi, B., Hareland, G., Nygaard, R. 2008. SPE 117109. "Real-Time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts". Society of Petroleum Engineers.

Rodríguez, M.A. (2003). "Caracterización Y Estudio De Brocas PDC Utilizadas Para Perforar Las Principales Cuencas Sedimentarias Del País". Universidad Industrial De Santander. Bucaramanga, Colombia.

Schlumberger. (December 2001). "Drilling and Measurements: Drill Bits".

Sinor, L.A., Powers, J.R. (March 1998). IADC/SPE 39306. "The Effect of PDC Cutter Density, Back Rake, Size, and Speed on Performance. Dallas, Texas: Drilling Conference Held.

Smith, J., Cedro, Y. (2010). "Vibración en La Sarta De Perforación". Universidad Nacional Autónoma De México. Distrito Federal, México.

USSynthetic. Tomado de Diamond As An Engineering Material:  
<http://ussynthetic.com/diamondtechnology/>.

Vlasblom, W. J. (January 2007). Lecture WB3413/OE4626 Dredging Processes.  
"Cutting of Rock". Dredging Engineering Section.

Warren, T. M. (September 1984). SPE 11994. "Factors Affecting Torque for a  
Roller Cone Bit". Journal of Petroleum Technology.

Xiaohong, L., Hood, M. (03 May 1993). SPE 26209. "Wear and Damage to PDC  
Bits". New Orleans, Louisiana: Drilling Conference Held.

# ANEXOS

**ANEXO A. Brocas objeto de estudio.**

**Brocas Objeto De Estudio Pozo UIS – 1.**

| BROCA # | CLASE | DIÁMETRO | TIPO         | SERIE   | INTERVALO DE PROFUNDIDAD | DISTANCIA PERFORADA | FORMACIONES ATRAVESADAS | DESGASTE SALIDA    | DESGASTE ENTRADA    | OBSERVACIONES |
|---------|-------|----------|--------------|---------|--------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------|
| 1-R     | PDC   | 12 1/4   | MSR519 M     | E147204 | 525' – 2500'             | 395                 | NARANJA                 | 7-7BT-A-X-1-CT-TD  | 0-0-NO-A-X-I-NO-BHA | PERFORÓ       |
|         |       |          |              |         |                          | 1180                | ROSADA                  |                    |                     |               |
|         |       |          |              |         |                          | 400                 | DORADA                  |                    |                     |               |
| 10      | PDC   | 12 1/4   | SKR616 M     | 221373  | 4928' – 7060'            | 792                 | VERDE                   | 4-2-BT-A-X-I-RO-CP | NUEVA               | PERFORÓ       |
|         |       |          |              |         |                          | 1340                | MORADA                  |                    |                     |               |
| 12      | PDC   | 8½"      | DSF519 M-A12 | A156093 | 7280' - 8500'            | 53                  | MORADA                  | 4-6-CR-C-X-I-BT-PR | NUEVA               | PERFORÓ       |
|         |       |          |              |         |                          | 1167                | ROJA                    |                    |                     |               |
| 11R     | PDC   | 8½"      | DSH616 M-A6D | A145111 | 8637' - 10666'           | 2029'               | ROJA                    | 3-7-RO-S-X-I-BT-PR | 0-1-CT-G-X-I-PN-BHA | PERFORÓ       |

**Brocas Objeto De Estudio Pozo UIS – 2.**

| <b>BROCA #</b> | <b>CLASE</b> | <b>DIÁMETRO</b> | <b>TIPO</b>     | <b>SERIE</b> | <b>INTERVALO DE PROFUNDIDAD</b> | <b>DISTANCIA PERFORADA</b> | <b>FORMACIONES ATRAVESADAS</b> | <b>DESGASTE SALIDA</b>            | <b>DESGASTE ENTRADA</b> | <b>OBSERVACIONES</b> |
|----------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------|
| <b>3</b>       | PDC          | 12 1/4          | MSRE5<br>19M    | E147<br>205  | 790' –<br>2500'                 | 868                        | MARRON                         | 2-4-BT-<br>S-X-I-<br>LT/CT-<br>CP | 0                       | PERFORO              |
|                |              |                 |                 |              |                                 | 842                        | BLANCA                         |                                   |                         |                      |
| <b>14</b>      | PDC          | 12 1/4          | SKR71<br>6M-A1C | 2166<br>74   | 6776' -<br>7801                 | 1025'                      | AZUL                           | NO SE<br>TIENEN<br>DATOS          | 0                       | PERFORO              |
| <b>17</b>      | PDC          | 8½"             | RSR<br>716M     | 2209<br>93   | 8029' –<br>10000'               | 231                        | AZUL                           | 0-1-WT-<br>S-X-I-<br>CT-CP        | 0                       | PERFORÓ              |
|                |              |                 |                 |              |                                 | 1740                       | AMARILLA                       |                                   |                         |                      |
| <b>19</b>      | PDC          | 8½"             | RSR71<br>6M-C1  | 2263<br>80   | 10000'-<br>12100'               | 2029'                      | AMARILLA                       | 0-1-BT-<br>C-X-I-<br>NO-TD        | 0                       | PERFORÓ              |