

**ANÁLISIS DINÁMICO DE TORQUE Y ARRASTRE DE LOS REDUCTORES DE  
FRICCIÓN NO CONVENCIONALES A PARTIR DE RESINAS DURANTE LA  
CORRIDA DE REVESTIMIENTO.**

**CAMILO ANDRES PALOMINO CONTRERAS**

**JOSE FERNANDO MARTINEZ AMAYA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS**

**ESCUELA INGENIERIA DE PETROLESO**

**BUCARAMANGA**

**2013**

**ANÁLISIS DINÁMICO DE TORQUE Y ARRASTRE DE LOS REDUCTORES DE  
FRICCIÓN NO CONVENCIONALES A PARTIR DE RESINAS DURANTE LA  
CORRIDA DE REVESTIMIENTO.**

Trabajo de grado para optar al título de:

**INGENIERO DE PETROLEOS**

**DIRECTOR:**

**ING. NICOLAS SANTOS SANTOS**

**CODIRECTORES:**

**ING. MAURICIO TARACHE**

**ING. JAVIER URDANETA DURAN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS**

**ESCUELA INGENIERIA DE PETROLESO**

**BUCARAMANGA**

**2013**

**TITULO:**

ANALISIS DINAMICO DE TORQUE Y ARRASTRE DE LOS REDUCTORES DE FRICCION NO CONVENCIONALES A PARTIR DE RESINAS DURANTE LA CORRIDA DE REVESTIMIENTO

**AUTORES:**

JOSE FERNANDO MARTINEZ AMAYA

CAMILO ANDRES PALOMINO CONTRERAS

**PALABRAS CLAVES:**

Centralizadores, centralización, torque, arrastre, cerámica, completamiento.

**RESUMEN**

Los centralizadores son principalmente instalados sobre la tubería de revestimiento para proporcionar un adecuado Stand-off para las operaciones de cementación; sin embargo, también se utilizan para el despliegue de las tuberías de revestimientos para lograr un adecuado Stand-off, se realizan cálculos para determinar el número de centralizadores, su colocación y la frecuencia de separación. El modelar el arrastre se realiza para asegurar que la tubería de revestimiento alcance su profundidad, el objetivo requiere predicciones tanto los efectos de arrastre dinámicos y estáticos que tienen en cuenta el impacto de centralizadores y presiones de sobre tensión en el arrastre. "En los casos en que se utilizan centralizadores no rígidos, los modelos de torque y arrastre convencionales subestiman los efectos de arrastre por fricción"<sup>1</sup>. Del mismo modo se considera que los modelos de estado de surgencia, predicen presiones máximas de surgencias.

Tradicionalmente, el procedimiento de los revestimientos expandibles solidos se han llevado a cabo sin ningún tipo de centralizadores, debido a la percepción del riesgo en cuestión, ya que los centralizadores típicos impondrían restricciones adicionales en el cuerpo de la tubería, lo que requeriría una fuerza adicional. También los centralizadores pueden romperse durante el funcionamiento en el pozo.

Recientemente, se evaluó un centralizador de cerámica innovadora e implementada en el campo. El centralizador de cerámica consta de tres almohadillas u hojas individuales fijadas al cuerpo de la tubería con 120 grados de diferencia el uno al otro, (las almohadillas u hojas están hechas de fibra de carbono con material compuesto de cerámica que se caracteriza por una fuerte tenacidad)<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Theory and Application of a New Generalized Model for Torque and Drag. 2008 SPE 114867 <sup>2</sup> Halliburton conference Bogota 2009

**TITLE:**

DYNAMIC ANALYSIS OF TORQUE AND DRAG REDUCTION OF FRICTION UNCONVENTIONAL STARTING FORM RESIN DURING THE RUN OF CASING

**AUTHORS:**

JOSE FERNANDO MARTINEZ AMAYA

CAMILO ANDRES PALOMINO CONTRERAS

**KEYWORDS:**

Centralizers, stand-off, torque, drag, ceramic, workover.

**ABSTRACT:**

Centralizers are primarily installed on a casing string to provide adequate stand-off for primary cementing operations; however they are also sometimes used to aid in the deployment of casing strings. to achieve adequate stand-off, calculations are performed to determine the number of centralizers, their placement, and spacing frequency. Drag modeling is performed to ensure that the casing string will reach its target depth this requires predictions of both static and dynamic drag effects that take into account the impact of centralizers and surge pressures on drag. "in cases where non-rigid centralizers are used, conventional torque and drag models underestimate frictional drag effects"<sup>1</sup>. Similarly it is considered that steady state surge models under predict maximum surge pressures.

Traditionally, solid expandable liners have been run without any centralizers due to the perceived risk involved, since typical centralizers would impose extra restrictions on the pipe body, which would require additional force to expand. Also, the centralizers may break during running in hole.

Recently, an innovative ceramic centralizer was evaluated and implemented in the field. The ceramic centralizer consists of three individual pads affixed to the expandable casing 120 degrees offset to each other. (The pad itself is made of carbon fiber ceramic composite material that is characterized by strong toughness)<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Theory and Application of a New Generalized Model for Torque and Drag. 2008 SPE 114867 <sup>2</sup> Halliburton

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por bendecirme cada día con el don de la vida,

A mi madre por brindarme la bondad, la humildad y su amor incondicional,

A mi padre por aportarme la valentía, la perseverancia y la motivación constante,

A mis abuelos por su sabiduría,

A mi familia por su apoyo,

A mis amigos Clarita, Felipe, Christian, David, Diegol, Mafe, Jose por impulsar y contribuir a ser mejor persona,

A Andrea por su compañía y ser un soporte durante este proceso,

A mis amigos Diego, Jhonba por su amistad incondicional,

Al Ingeniero Nicolás por el conocimiento y acompañamiento brindado.

**CAMILO ANDRES PALOMINO CONTRERAS**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la esperanza de seguir adelante cada día,  
A mi madre y padre por brindarme la humildad su amor y apoyo incondicional,  
A mi familia por aportarme la valentía, la perseverancia y la motivación constante,  
A mi prima jeimy por su sabiduría,  
A mis conocidos por su apoyo,  
A mis amigos diego, jhonba, diegol, Christian, clara, David, diego ave, por  
impulsar y contribuir a ser mejor persona  
A mi cachetona tata por su compañía y ser el soporte más fuerte durante  
este proceso,  
A mis amigos por su amistad incondicional,  
Al Ingeniero Nicolás por el conocimiento y acompañamiento brindado.

**JOSE FERNANDO MARTINEZ AMAYA**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	18
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	19
1.1.1.DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.2.3.ANTECEDENTES.....	20
1.1.2.JUSTIFICACIÓN.....	21
1.2.OBJETIVOS.....	22
1.2.1.Objetivo General.....	22
1.2.2.Objetivos Específicos.....	22
2. GENERALIDADES.....	23
2.1. TORQUE.....	24
2.1.1. Torque friccional.....	26
2.1.2. Torque Mecánico.....	28
2.1.3. Torque en la broca de perforación.....	28
2.2. ARRASTRE.....	28
2.2.1. FACTORES DE FRICCION.....	30
2.3. MODELOS NUMERICOS.....	33
2.3.1. Modelo simplificado Johancsik (1983).....	33
2.4. MODELOS ANALÍTICOS PARA EL TORQUE Y ARRASTRE.....	36
2.4.1. Modelo generalizado de torque y arrastre (Aadnoy, 2008).....	36
2.5. FACTORES PARA CONSIDERAR EN LA REDUCCION DE TORQUE Y ARRASTRE.....	44
2.5.1 Tensión o Compresión.....	44
2.5.2. Carga o Peso.....	45
2.5.3. Fatiga.....	45
2.5.4. Pandeo.....	46
2.5.6. Vibración.....	47
2.6. FUERZA DE ARRASTRE Y CENTRALIZACION EN LA TUBERIA.....	48
2.7. CENTRADORES DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO.....	50

2.7.1. CENTRALIZACIÓN .....	51
2.7.2. TIPOS DE CENTRALIZADORES .....	55
3. HISTORIA, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGIA CRB .....	56
3.1 DESARROLLO DE METODOLOGÍA.....	57
3.1.1. BENEFICIOS.....	60
3.1.2. APLICACIONES.....	60
3.2. DISEÑO.....	64
3.2.1. INFORMACION DE DISEÑO .....	64
3.1.2. ESPECIFICACIONES DE CRITERIO DE DISEÑO.....	65
3.3. PROCEDIMIENTO CRB PROTECH.....	66
3.3.1. Instrumentos de Medición de parámetros de Temperatura.....	66
3.3.2. Materiales en el proceso de SandBlasting .....	67
3.3.3. Evacuación y Purga del Equipo.....	68
3.3.4. Prueba de Limpieza.....	68
3.3.5. Verificación del Perfil de Anclaje .....	68
3.3.6. Disposición y Colocación de Moldes .....	69
3.3.7. Inyección del Material.....	69
3.3.8. Pruebas de calidad de aleta o Blade.....	70
3.3.9. Prueba de Pull Test.....	71
3.3.10. Protección de los centradores .....	71
3.4. PRUEBAS DE CAMPO PRÁCTICAS ANTES DE USARSE EN UN POZO.....	77
4. ESTUDIOS DE PRESION REALIZADOS A LOS DISPOSITIVOS .....	78
4.1. CFD (computational fluids dynamics) MODELO Y MALLADO.....	80
4.2. FLUIDO NEWTONIANO.....	84
4.3. ANCHO DE HOJA .....	85
4.4 LONGITUD DE HOJA.....	86
4.5. EFECTOS DE LA EXCENTRICIDAD EN LA CAIDA DE PRESION.....	87
4.6. FLUIDO NO NEWTONIANO Y EFECTO DE LA ROTACION EN LA TUBERIA	
88	
4.7.EFECTO DE LA ROTACION.....	90
4.8.CASOS DE ESTUDIO .....	95

5. ESTUDIO DE SIMULACION A ESCALA DE POZO EN CORRIDA DE CASING REAL.....	97
5.1. INSTALACIÓN CASING RESING BLEND.....	97
5.2.ENTRADAS DE SIMULACIÓN.....	101
5.3.HOOK LOAD (Kip).....	101
5.4.TORQUE PROFILE MEASURED DEPTH.....	103
5.5.STANDOFF.....	105
5.6.RESULTADOS.....	106
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
7. BIBLIOGRAFIA.....	110

## **LISTA DE FIGURAS**

<b>FIGURA 1: Análisis grafico de torque y arrastre .....</b>	<b>25</b>
<b>FIGURA 2 Fuerza normal y axial. ....</b>	<b>29</b>
<b>FIGURA 3 Diagrama de ojos de llave.....</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 4 Elemento de sarta para el modelo de torque y arrastre con tubería flexible (soft string). ....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 5 Diagrama de adnoy.....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 6 Comportamiento de torque y arrastre .....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 7 Efecto de la rotación de la tubería sobre la fricción axial de la sarta de perforación .....</b>	<b>42</b>
<b>FIGURA 8 Efecto de la centralización de la tubería de revestimiento en la velocidad de flujo. ....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURA 9 Distribución de los fluidos en el anular.....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 10 Perfil Stand-off sin centralizadores.....</b>	<b>50</b>
<b>FIGURA 11 Variación relativa del promedio crítico del Número de Reynolds como una función de la excentricidad. ....</b>	<b>52</b>
<b>FIGURA 12 Centralizadores.....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 13 Efecto de una baja eficiencia de desplazamiento de cemento. ...</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 14 Resina en el momento antes de la aplicación.....</b>	<b>58</b>
<b>FIGURA 15 CRB stop-collares se fijan entre sí en los dos extremos del centrador bow-spring, CRB Stop-collar desvia la carga lejos del centrador bow-sprin.....</b>	<b>61</b>
<b>FIGURA 16 La tubería de perforación es empujada por la presión del pozo causando la pega diferencial. ....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 17 Las aletas o hojas en forma de C están unidos alrededor de la tubería, ofreciendo cobertura de 360° grados y previene que la tubería entre en contacto con las paredes del pozo.....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 18 Diseños de la aleta u hoja .....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 19 Patrones de instalación del CBR.....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 20 Detalles de la selección de la aleta u hoja.....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 21 Preparación superficial Sandblasting.....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 22 Prueba de Dureza Shore D.....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 23 Verificación Calibre y Altura del Blade y/o Aleta. ....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 24 Las tres principales fases del proceso de instalación .....</b>	<b>71</b>
<b>FIGURA 25 Diseño básico del centralizador de fibra de carbono con compuestos cerámicos (Izquierda), fuente: Centralizador ya instalado en la tubería (Derecha).....</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 26 Centralizador en la tubería en forma espiral. ....</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 27 Centralizador Después de la prueba de desgaste. ....</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 28 Centralizador Después del pull test con 180,000 libras fuerza..</b>	<b>74</b>

<b>FIGURA 29 Comparación de la reducción del factor de fricción y torque, entre el acero y CRB. ....</b>	<b>74</b>
<b>.FIGURA 30 Esquema de la situación de un liner de 5.5 in con centralizador. ....</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 31 Registro USIT con y sin CRBs.....</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 32 Patín para prueba de desgaste (Izq.), Patín para pruebas preliminares (Der.).....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURA 33 SOD con giro de 30° (Izq.). SOD unido a la tubería (Der). ....</b>	<b>82</b>
<b>FIGURA 34 Mallado por flujo en un anular excéntrico son SOD (Izq.). Mallado para tubería con SOD dispuesto en el casing (Der). ....</b>	<b>82</b>
<b>FIGURA 35 Zonas de mallas.....</b>	<b>82</b>
<b>FIGURA 36 Variación de la presión en dirección axial producto del flujo en el anular. ....</b>	<b>84</b>
<b>FIGURA 37 Perfiles de velocidad para un blade recto SOD. ....</b>	<b>84</b>
<b>FIGURA 38 Caída de presión adicional producto de geometrías del blade. ..</b>	<b>85</b>
<b>FIGURA 39 Efecto del ancho de la hoja en la caída de presión adicional.....</b>	<b>86</b>
<b>FIGURA 40 Efecto del largo de la hoja en la caída de presión adicional.....</b>	<b>86</b>
<b>FIGURA 41 Efecto de la excentricidad en el gradiente de pérdida de presión anular para un fluido newtoniano. ....</b>	<b>87</b>
<b>FIGURA 42 Efecto de la excentricidad para un blade recto (0° de giro).....</b>	<b>88</b>
<b>FIGURA 43 Efecto de la excentricidad para un blade con ángulo de giro = 30° .....</b>	<b>88</b>
<b>FIGURA 44 Efecto de la excentricidad en un fluido no Newtoniano.....</b>	<b>89</b>
<b>FIGURA 45 Variación de las pérdidas de presión del anular con la ley de potencia n. ....</b>	<b>90</b>
<b>FIGURA 46 Caídas de presión teniendo en cuenta el efecto de excentricidad (fluido no newtoniano).....</b>	<b>90</b>
<b>FIGURA 47 Variación de la caída de Presión anular de la tubería en rotación en régimen laminar. ....</b>	<b>91</b>
<b>FIGURA 48 Variación de la caída presión anular de la tubería en rotación en régimen turbulento.....</b>	<b>92</b>
<b>FIGURA 49 Efecto de la tubería en rotación con SOD. ....</b>	<b>92</b>
<b>FIGURA 50 Regresión lineal para el ajuste del modelo para diferentes hojas. ....</b>	<b>93</b>
<b>FIGURA 51 Proceso de Instalación de Casing Resin Blend.....</b>	<b>98</b>
<b>FIGURA 52 Esquema Casing 11 ¾ . Schematic Wellplan. ....</b>	<b>99</b>
<b>FIGURA 53 Efecto de la geometría e inclinación del pozo. ....</b>	<b>100</b>
<b>FIGURA 54 Efecto de la Fuerza lateral o side force. ....</b>	<b>100</b>
<b>FIGURA 55 Efecto Dogleg Severity en la Measured Depth .....</b>	<b>100</b>
<b>FIGURA 56 Hook load (kip) Sin Centralizadores. ....</b>	<b>103</b>
<b>FIGURA 57 Hook Load (Kip) 24 CRB Protech 11 ¾" x 13 ½" .....</b>	<b>103</b>

<b>FIGURA 58 Torque Profile Measured Depth Sin Centralizadores. ....</b>	<b>104</b>
<b>FIGURA 59 Torque Profile Measured Depth 24 CRB Protech 11 3/4" x 13 1/2".</b>	
<b>.....</b>	<b>104</b>
<b>FIGURA 60 Stand-off Profile CRB Protech 11 3/4" x 13 1/2". ....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1</b>	<b>Factores de fricción dimensiones del sistema de estudio. ....</b>	<b>42</b>
<b>TABLA 2</b>	<b>Ilustra la tolerancia estrecha entre el pozo abierto y el revestimiento, la tecnología CRB ofrece diferencia respecto a los sistemas tradicionales de centralización. ....</b>	<b>62</b>
<b>TABLA 3</b>	<b>Parámetros requeridos para realizar el proceso de instalación. ...</b>	<b>66</b>
<b>TABLA 4</b>	<b>Parámetros para ejecutar el proceso de sandblasting. ....</b>	<b>66</b>
<b>TABLA 5</b>	<b>Materiales para el Sandblasting.....</b>	<b>67</b>
<b>TABLA 6</b>	<b>Componentes que intervienen en material CRB. ....</b>	<b>69</b>
<b>TABLA 7</b>	<b>Propiedades físicas – Proguard Resina compuesta CRB. ....</b>	<b>76</b>
<b>TABLA 8</b>	<b>Especificaciones geométricas stand-off device.....</b>	<b>80</b>
<b>TABLA 9</b>	<b>Reología del fluido no newtoniano. ....</b>	<b>88</b>
<b>TABLA 10</b>	<b>Efecto-Paramétrico. ....</b>	<b>94</b>
<b>TABLA 11</b>	<b>Caso de estudio 1.....</b>	<b>95</b>
<b>TABLA 12</b>	<b>Caso de estudio 2.....</b>	<b>96</b>
<b>TABLA 13</b>	<b>Caso de estudio 3.....</b>	<b>96</b>
<b>TABLA 14</b>	<b>Datos de simulación. (Halliburton) .....</b>	<b>101</b>
<b>TABLA 15</b>	<b>Hook Load.....</b>	<b>102</b>
<b>TABLA 16</b>	<b>Resultados Con y Sin CRB.....</b>	<b>104</b>
<b>TABLA 17</b>	<b>Resultados de la simulación. ....</b>	<b>106</b>

## 1. INTRODUCCION

La centralización es el punto crítico, donde se decide evaluar sistemas alternativos capaces de actuar como los centralizadores tradicionales, para tuberías de revestimiento (Casing). Cada año, miles de pozos se perforan para la producción de petróleo y gas. El aumento en la demanda de petróleo ha conducido a un incremento en el número de pozos perforados, así como la profundidad donde se encuentran estos pozos. Es importante obtener una adecuada centralización para lograr una mejor distribución y homogenización de la lechada de cemento; con el fin de garantizar la corrida de revestimiento (Casing), resolver los problemas que se asocian a los pozos de diámetro reducido (slim hole), pozos desviados y de alcance extendido, de esta manera mitigar los riesgos que acarrea una mala centralización (altos arrastres, mala calidad del trabajo de cementación, entre otros). Se han desarrollado métodos que a través de los años han evolucionado, para disminuir las fuerzas de arrastre. Técnicamente, no hay manera de que el torque y arrastre se logren eliminar debido a que las superficies sin fricción no existen. El arrastre es directamente proporcional a la fuerza normal, el coeficiente de fricción y el radio sobre el cual se genera el torque. La variación y manipulación de cualquiera de estos componentes logra la reducción del torque y arrastre, los cuales son parámetros críticos durante la perforación direccional, principalmente en pozos horizontales y de alcance extendido.

Pocos estudios han explorado las pérdidas de presión que surgen de los centralizadores adheridos a la sarta de perforación o casing, las cuales se suponen que son despreciables. La excentricidad entre el pozo, los dispositivos de centralización, la rotación, y los complicados diseños geométricos de estos dispositivos, aumentan la dificultad de los cálculos de pérdidas de presión por fricción. Las estimaciones de caída de presión por los componentes durante el proceso de perforación son críticas y de vital importancia. Algunos de estos dispositivos se diseñan para mejorar la eficiencia de desplazamiento, o para reducir el torque y arrastre durante las operaciones de perforación y completamiento.

## **1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

### **1.1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Una compañía prestadora de servicios en busca de reducir costos en lodos, implementó una nueva tecnología; se requería de un producto que permitiera centralizar y superar ciertas tolerancias durante la corrida del revestimiento, de esta forma desarrolló una resina, la cual otorga una buena centralización y posee un coeficiente de fricción muy bajo.

El proceso comienza trasladando la tubería, específicamente el casing, a la base de Operación, posteriormente se hace un proceso de Sandblasting que consiste en un tratamiento micro-abrasivo en las zonas específicas donde se va a disponer los centralizadores, seguidamente se ponen los moldes sobre la tubería y la resina es inyectada mediante una bomba, dándole un tiempo de fraguado cercano a las 2 horas.

Se diseñó un simulador marca registrada WELLPLAN™, que entre otras cosas es vital para simular procesos de cementación y corridas del revestimiento, en particular la herramienta Torque and Drag Analysis Software que es fundamental para evaluar el impacto de las cargas previstas relacionadas con el torque y arrastre.

Esta tecnología carece de un análisis planificado frente a las cargas reales, a pesar de no ser una ciencia tan reciente no cuenta con estudios que la respalden, debido a que sus comienzos fueron empíricos y prácticos, por tal razón este trabajo de investigación surge como una respuesta a esta necesidad; la cual busca mediante la recopilación y análisis de información comprender dicha tecnología

### **1.2.3. ANTECEDENTES**

A través de los tiempos, posterior a la perforación es indispensable revestir el pozo para dar estabilidad al mismo y así garantizar el éxito de las operaciones posteriores; es por ello que se hace fundamental velar por una buena centralización durante la corrida del revestimiento, ello implicó el surgimiento e implementación de los centralizadores rígidos y semiflexibles. Estos favorecen el Standoff y previenen que se recueste contra la pared del pozo, evitando defectos en la continuidad del cemento en el espacio anular.

Los centralizadores rígidos y semiflexibles habían sido la única opción de la que disponía la industria durante los procesos de cementación hasta hace unos pocos años, cuando surgieron los centradores no convencionales a partir de resinas, los cuales brindan una nueva alternativa y con mayores beneficios.

En Colombia hasta el momento esta tecnología era desconocida e innovadora, no obstante en el mundo ya ha sido probada con resultados satisfactorios, pero sin poder cuantificar realmente su eficiencia.

### 1.1.2. JUSTIFICACIÓN

Al surgir la necesidad de garantizar una buena centralización durante la corrida del revestimiento, en operaciones de cementación y al no encontrarse cubiertas ciertas necesidades dinámicas por los centralizadores convencionales, surgen unos reductores de fricción para bajas tolerancias, compuestos principalmente por carbono y material cerámico, que proporcionan una buena centralización, mejoran la distribución de flujo, disminuye los ECD's y poseen un coeficiente de fricción muy bajo.

Estos reductores de fricción requieren de una información general de la cual no se dispone para posteriormente ser simulados en operaciones de cementación y mantenimiento de pozos, por lo que se convierte en un interrogante el cual nos urge satisfacer. Dentro de la corrida de revestimiento los factores más relevantes son el torque y el arrastre que se verán afectados por dichos reductores de fricción, es por ello que se pretende y se hace indispensable:

- Desarrollar, tabular y analizar datos dinámicos de torque y arrastre, a través de WELLPLAN™ Torque and Drag Analysis Software - Halliburton.
- Recopilar los resultados históricos obtenidos para las configuraciones, más usadas de los reductores de fricción no convencionales en la corrida del revestimiento.
- Definir el procedimiento de la tecnología para su implementación y lograr sus mejores resultados.
- Cuantificar la eficiencia y aportes al implementar la tecnología previamente descrita, respecto a los centralizadores convencionales una vez corrida la simulación.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Simular y comparar los reductores de fricción no convencionales CRB (Casing Resin Blend) a partir de resinas y los convencionales, mediante el estudio de torque y arrastre durante la corrida del revestimiento; a través del simulador WELLPLAN™, empleando la herramienta Torque and Drag Analysis Software.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- 1.2.2.1. Evaluar mediante la simulación los efectos sobre las cargas torsionales y axiales, con y sin los reductores de fricción no convencionales CRB a partir de resinas.
- 1.2.2.2. Determinar el impacto de los reductores de fricción no convencionales en la distribución de flujo, los ECD's.
- 1.2.2.3. Determinar el impacto de los reductores de fricción no convencionales en la caída de presión que se presentan para las diferentes configuraciones.
- 1.2.2.4. Determinar el procedimiento y pruebas necesarias para la implementación de los reductores de fricción no convencionales CRB a partir de resinas.

## 2. GENERALIDADES

El estudio de la magnitud de las cargas torsionales y friccionales (arrastre) presentes durante las operaciones en un pozo son de gran ayuda para la selección apropiada de los elementos tubulares. En particular, se da énfasis en un estudio del torque y arrastre para la selección optima de la sarta de perforación. Sin embargo también es útil para las tuberías de revestimiento para los liners o tuberías de revestimiento cortas.

Se han desarrollado métodos, que se han mejorado con los años, para mitigar las fuerzas de arrastre. Las limitaciones generadas por el fenómeno de torque y arrastre en dichos pozos son encontradas usualmente durante las fases de perforación y completamiento. Los trabajos de completamiento son incluidos en el diseño base del pozo debido de que han existido numerosos casos donde los pozos han sido satisfactoriamente perforados pero no han podido ser satisfactoriamente completados.

Para calcular las fuerzas aplicadas sobre el casing se requiere el uso de un modelo matemático que permita predecir las cargas o esfuerzos que pueden ser aplicados de forma segura sobre el casing durante su instalación, experiencia a través de los años ha mostrado que el uso de estos modelos en las fases de perforación y completamiento tiene sus ventajas. El modelo más usado para estimaciones de torque y arrastre está basado en el propuesto por Johansick (1983), debido a su simplicidad y disponibilidad general. Experiencia en campo obtenida de la literatura, indica que en algunos casos estos modelos analíticos generan resultados inexactos por lo cual se le deben hacer algunas modificaciones dependiendo donde se esté aplicando.

La evaluación o modelación del torque y arrastre en las tuberías se realiza con varios propósitos:

- Para seleccionar la tubería con suficiente resistencia al torque y a la carga axial.
- Determinar los requerimientos del equipo.
- Optimizar la trayectoria en pozos desviados.
- Analizar el efecto de desgaste en tuberías.

## FORMULACION TEORICA

En un pozo vertical, el cálculo de torque y arrastre no es significativo debido a que la tubería se ubica teóricamente en el centro del pozo sin contacto con las paredes, y no se generan fuerzas además de las de tensión y compresión en la tubería. Sin embargo, en un pozo desviado, se producen fuerzas adicionales debido al contacto de la tubería con las paredes del pozo. Dichas fuerzas adicionales también son acumulativas y mientras mayor sea la longitud del pozo, se pueden generar fuerzas mayores.

### 2.1. TORQUE

El torque **T** de una fuerza **F** que actúa sobre algún punto de un cuerpo rígido, en una posición **r**, respecto de cualquier origen **o**, por el que puede pasar un eje perpendicular, sobre el cual se produce la rotación del cuerpo, al producto vectorial entre la posición **r** y la fuerza aplicada **F**.

$$T = r * F \quad (1)$$

T: Torque

r: Radio de acción

F: Fuerza aplicada

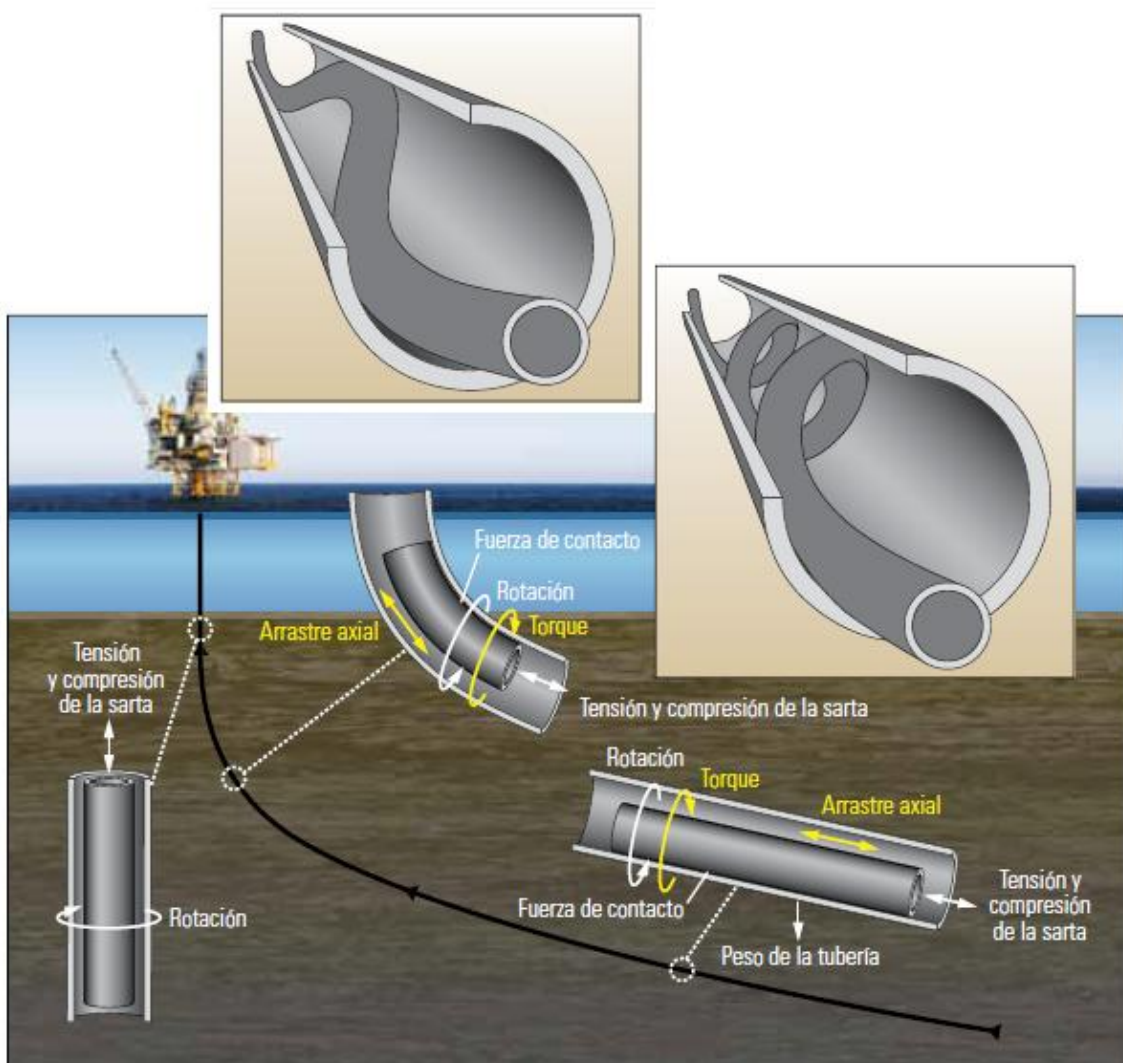
La reducción de los materiales de fricción tales como los polímeros pueden tener un efecto positivo significativo en la reducción de los requerimientos de torque.

El torque es una carga rotacional generada por diferentes fuentes dentro del pozo:

- torque friccional.
- torque mecánico.
- torque en la broca.

En algunos casos se puede producir un torque fluctuante debido a vibraciones en la sarta de perforación. El torque únicamente se genera cuando la tubería está siendo rotada. En la figura 1 Se analiza el comportamiento de la tubería y los efectos que esta sufre durante su recorrido.

**FIGURA 1: Análisis grafico de torque y arrastre**



*Fuente:*

([http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish10/aut10/01\\_wells.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish10/aut10/01_wells.pdf))

El torque es una medida de la resistencia a la rotación, Causada por la fricción entre la tubería de revestimiento o la sarta de perforación y la pared del pozo. El arrastre es una medida de la resistencia al movimiento ascendente o descendente. La magnitud del torque y del arrastre, observada en el tubular, es una función de la tensión o la compresión y del área en contacto con el pozo. Cuando las tuberías están centradas correctamente en un pozo vertical, el contacto con la pared del pozo es insignificante, y el torque y el arrastre son esencialmente nulos (izquierda).

Durante una sección de incremento angular, la columna de perforación o la tubería de revestimiento experimentan grados variables de torque y arrastre porque es presionada contra el lado superior de la pared del pozo y se encuentra en estado de compresión o tensión (centro). En la sección tangencial del pozo, las tuberías se encuentran en pleno contacto con la parte inferior del pozo y en cierto estado de compresión o tensión (derecha). La magnitud del torque y el arrastre, creados a lo largo de esta sección del pozo, es básicamente una función del peso de la tubería de revestimiento. La flexión se produce cuando las fuerzas de compresión resultantes del arrastre pliegan la tubería contra la pared del pozo, generando una configuración sinusoidal (inserto, extremo superior). Con el tiempo si las cargas continúan creciendo, la tubería se curvará helicoidalmente (inserto, extremo inferior), y en ese momento el movimiento descendente se detendrá. ([http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish10/aut10/01\\_wells.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish10/aut10/01_wells.pdf)).

### **2.1.1. Torque friccional**

Es una carga friccional que es generada debido a las cargas de contacto entre la sarta de perforación o casing y el casing de la sección anterior o las paredes del pozo. Este debiera ser el único torque generado en un pozo perfectamente limpio

cuando se rota por encima del fondo. La magnitud de esta componente del torque es determinada por lo siguiente:

- Tensión o compresión en la sarta de perforación

Mientras mayor sea la tensión en la sarta, mayor es la fuerza de contacto. En la sección desviada, la tensión puede ser suficientemente grande para superar la fuerza de gravedad, entonces la fuerza de contacto debe estar en el lado alto del pozo. El peso sobre la broca puede también afectar la tensión en la sarta y por lo tanto el torque friccional.

- Severidad de la pata de perro (Dogleg severity)

Patatas de perro severas pueden incrementar las fuerzas de contacto. Esto es un aspecto importante en el pozo donde la tensión es también alta. El efecto de altas patas de perro no es tan crítico en pozos donde las tensiones son mucho menores.

- Tamaño del pozo y la tubería

El tamaño del espacio anular entre la tubería de perforación y el pozo puede afectar las fuerzas de contacto. Un espacio anular pequeño puede incrementar la rigidez efectiva de la tubería y por lo tanto incrementar las fuerzas de contacto.

- Peso de la tubería

Sartas muy pesadas pueden resultar en una mayor fuerza de contacto.

- Inclinación

La inclinación del pozo puede afectar las fuerzas de contacto, mayores inclinaciones resultan en una componente mayor del peso de la tubería perpendicular al pozo. Sin embargo, las inclinaciones muy altas el torque puede decrecer, la mayoría del peso de la tubería es tomado por la pared del pozo, y por lo tanto la tensión en la sarta y la fuerza de contacto asociada puede descender.

- Lubricación o factor de fricción

La lubricación es ampliamente controlada por el lodo de perforación y el tipo de formación.

### **2.1.2. Torque Mecánico**

El torque mecánico es generado por la interacción de la sarta de perforación (drillstring) y el ensamble de fondo (BHA – Bottom Hole Assembly) con los ripios de la formación (derrumbes del hoyo o hinchamientos), formaciones inestables o pega diferencial (differential sticking). Esto también es visto regularmente cuando componentes del BHA tienen excesiva interacción con la formación.

### **2.1.3. Torque en la broca de perforación**

El torque en la broca es un resultado directo de la interacción entre la broca y las formaciones que están siendo perforadas. El torque resultante puede depender fuertemente del diseño de las brocas con PDC (Polycrystalline Diamond Compact) generalmente generan más torque que las brocas tricónicas.

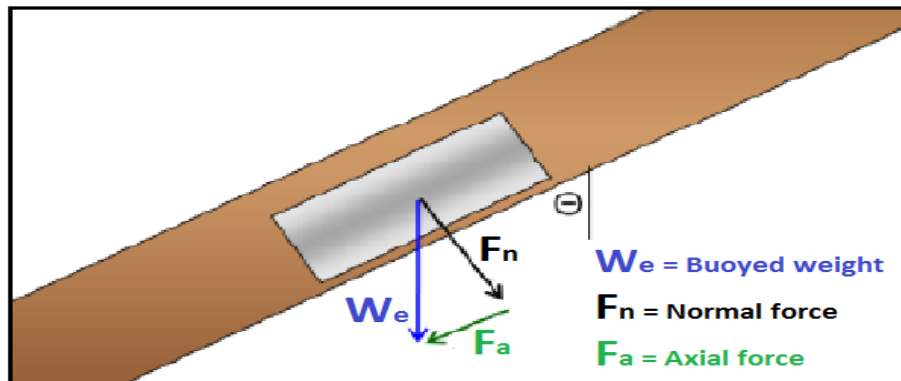
## **2.2. ARRASTRE**

En comparación con los pozos verticales los pozos de alcances extendidos y horizontales presentan una serie de retos adicionales relacionados con la corrida de la tubería de revestimiento. La diferencia fundamental es el hecho del cambio de trayectoria vertical con un ángulo de desviación el cual no permite el

deslizamiento de la tubería por acción de la gravedad sino que se debe aplicar una fuerza adicional para lograrlo. El arrastre es una fuerza mecánica, generada por la interacción entre un cuerpo rígido y un fluido. Para que exista arrastre el cuerpo debe estar en contacto con el fluido. Debe haber un movimiento relativo entre el fluido y el sólido. Esta resistencia que impide la aceleración del cuerpo se llama fuerza de arrastre.

En la figura 2 Se muestran las fuerzas normal y axial que actúan durante el recorrido de la tubería. El arrastre es una fuerza axial generada de forma similar al torque (mayores fuerzas de contacto, mayor torque), y básicamente toma el lugar del torque cuando la rotación de la sarta se detiene y la tubería se únicamente en dirección axial. Al igual que con el torque, hay una componente friccional, así como una componente mecánica. El arrastre siempre va operar en la dirección opuesta en la cual la tubería está siendo movida.

**FIGURA 2 Fuerza normal y axial.**



*Fuente: (SPE 150317 Casing Centralization in Horizontal and Extended Reach Wells*

*Alfredo Sanchez, Christian F. Brown, SPE, Top-Co LP, Whitney Adams, Devon Energy)*

La fuerza normal y axial puede ser calculada como:

$$F_n =$$
$$W_e * \sin(\theta)$$

(2)

$$F_a =$$
$$W_e * \cos(\theta)$$

(3)

Para la corrida de la tubería de revestimiento, la fuerza axial  $F_a$ , debe ser mayor que la fuerza de arrastre  $F_d$ . La fuerza de arrastre teóricamente se calcula como:

$$F_d =$$
$$\mu * F_n$$

(4)

Donde  $\mu$  es el factor de fricción efectivo el valor de este factor varia entre 0.2 – 0.6 (SPE 150317). El área sombreada del grafico muestra las inclinaciones donde la fuerza de arrastre excede la de la fuerza axial.

### 2.2.1. FACTORES DE FRICCIÓN

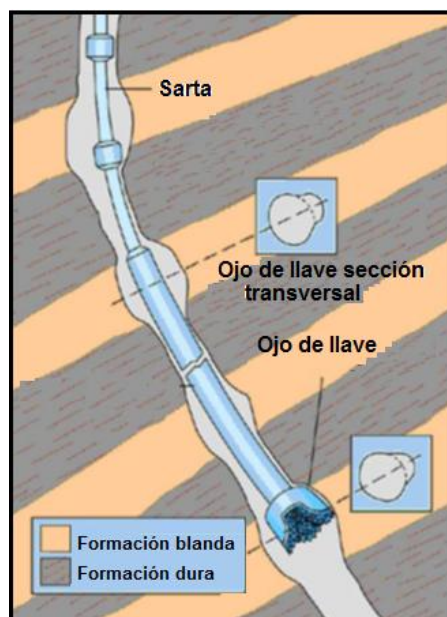
En las perforaciones de pozos de alcance extendido, el factor de fricción realmente no es un factor de fricción puro. Es una fusión de factores, debido a que es usado para tomar en cuenta un número de cosas adicionales a la fricción, incluyendo:

- La lubricidad el sistema de lodo de perforación.
- La rigidez de la tubería.
- Los ripios de la formación.
- Ojos de llave (key seats).
- Interacción de los estabilizadores y centralizadores.

- Pega diferencial.
- Severidad de la pata de perro (conocida y oculta).
- Efecto pistón hidráulico.

Es importante notar que los factores de fricción solo deslizando (slack-off), subiendo o bajando (pick-up) y al rotar la tubería no son los mismos, sin embargo puede ser que aparezcan como tal en la naturaleza. A menudo, la industria utiliza un factor de fricción simple para una sección de hoyo dada. De hecho, muchos modelos de torque y arrastre únicamente permiten la entrada de un solo valor. Un modelo de cálculo de torque y arrastre más preciso debiera considerar factores de fricción diferente para cuando la tubería está apoyada, bajando o subiendo y en rotación. La mayoría de los programas para la predicción de torque y arrastre modelan la sarta como un miembro flexible donde la rigidez de la tubería no es tomada en cuenta (soft string model). En la figura 3 Se muestran las diferentes formaciones por las que debe pasar la tubería y los problemas que esta sufre sobre su recorrido. La sarta es modelada como un cable capaz de transmitir cargas axiales, pero no momentos flectores. En este caso la rigidez de la tubería es sustituida por el incremento de los factores de fricción. Por lo tanto, el casing trabajara con factores de fricción más altos que las tuberías más flexibles (tubería de perforación – drillpipe). Además, sartas de perforación de mayor diámetro poseen factores de fricción más altos que las de diámetros más pequeños. Es importante recordar que los factores de fricción no son necesariamente intercambiables entre diferentes programas de cálculo. El factor de fricción adimensional calculado por un programa puede ser diferente para otras herramientas computacionales.

**FIGURA 3 Diagrama de ojos de llave**



*Fuente : key seats (Fuente: <http://www.oilfield.slb.com> )*

Adicionalmente, es importante que el modelo matemático este bien calibrado con resultados de campo, y que el usuario, además de estar familiarizado con este, conozca las realidades de las operaciones de perforación y el completamiento de pozos.

Cuando la tubería está deslizando (slack-off), en particular, existen otros fenómenos que deben ser tomados en cuenta cuando se analiza lo que está sucediendo en fondo de pozo. El casing tiende a socavar (plough) las paredes del hoyo cuando estamos atravesando secciones de mucho ángulo. Esto no debe ser confundido con algo relacionado al arrastre por fricción. El socavamiento o arado (ploughing) es más probable que ocurra cuando la zapata está atravesando zonas de construcción de ángulo o cambios de sección (giros), especialmente en zonas profundas de altos ángulos. El socavamiento puede variar, dependiendo de la centralización de la zapata, el tamaño del hoyo y la severidad de la pata de perro. Una vez que la zapata ha atravesado la zona de alto ángulo o cambio de sección, entonces el peso de la tubería en la superficie retomara a los valores esperados de acuerdo a los factores de fricción.

## **DEFINICIONES GENERALES EN TORQUE Y ARRASTRE**

- **Tensión en la sarta (string – tensión)**

Se refiere a menudo a la rotación de la sarta cuando está rotando fuera del fondo del hoyo (ROB tensión-rotating off- bottom tensión), esto es el peso de la sarta en el hoyo sin tomar en cuenta el arrastre medido cuando rotando. Si tomamos en cuenta el peso del bloque viajero, se le conoce como el peso cuando se rota fuera del fondo del hoyo (ROB weight - rotating off - bottom weight) y este valor se mide directamente en el tablero de control del perforador en el taladro.

- **Tension levantando (Pick-up Tension)**

Se refiere a la medición del peso de la sarta en el pozo más el arrastre (sin rotación). Se le llama peso levantado (PUW – Pick-up weight) si se toma en cuenta el peso del bloque viajero.

- **Tensión deslizando (Slack off tensión)**

Se refiere al peso de la sarta en el hoyo sin tomar en cuenta el arrastre (sin rotación). También se le llama peso deslizando (SOW – Slack-off weight) cuando adicionamos el peso del bloque viajero.

- **Torque arriba del fondo (OBT – Off-bottom- Torque**

Esta es una medición del torque cuando rotamos arriba del fondo del hoyo menos la componente del torque en la broca.

## **2.3. MODELOS NUMERICOS**

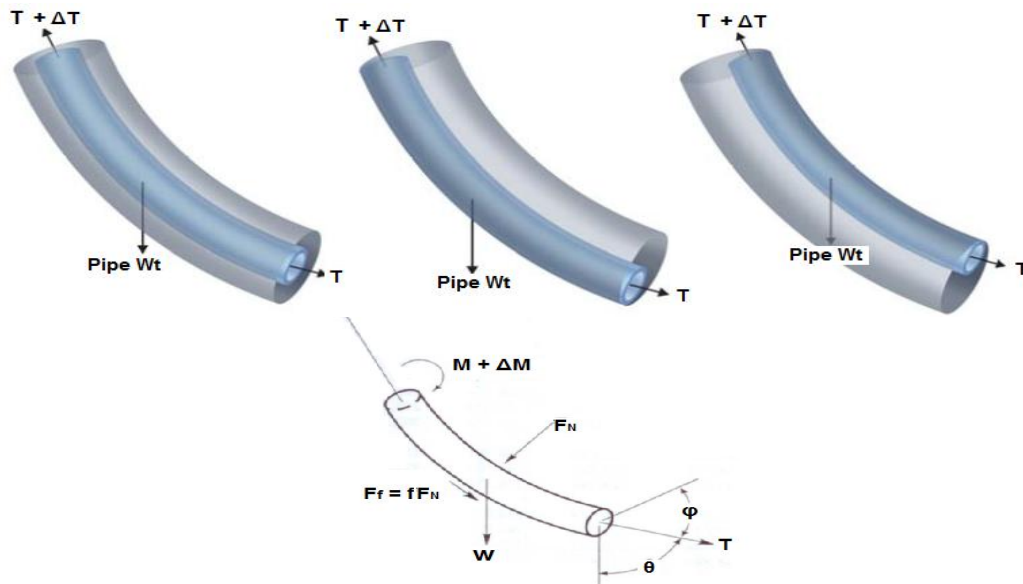
### **2.3.1. Modelo simplificado Johancsik (1983)**

El modelo de torque y arrastre más utilizado para evaluar la magnitud de las cargas actuantes en una tubería es un modelo de tubería flexible (soft-string) desarrollado por Johancsik et al (1983). Observando la figura 4 Se especifican la dirección de las fuerzas actuantes sobre la tubería. La sarta de perforación es

modelada como una tubería o cable capaz de transmitir cargas axiales pero no momentos flexionantes. La fricción es el producto de las fuerzas normales y los coeficientes de fricción. La fuerza normal en cada nodo de cálculo tiene dos componentes:

- El peso de la tubería sumergida en el lodo de perforación
- La fuerza de reacción lateral resultante de la tensión de la sarta a través de secciones curvas del hoyo.

**FIGURA 4 Elemento de sarta para el modelo de torque y arrastre con tubería flexible (soft string).**



Fuente: (Economides et al., 1998)

Las ecuaciones de esas fuerzas son:

$$F_N = [ ( T \Delta \phi \sin(\phi_p) )^2 + ( T \Delta \phi + W \sin(\phi_p) )^2 ]^{1/2} \quad (5)$$

$$\Delta T = W \cos(\phi_p) \pm fF_N$$

(6)

$$\Delta M = fF_N \cdot R$$

(7)

$$F_F =$$
$$fF_N$$

(8)

Dónde:

$F_N$ : Fuerza normal (lbf)

$T$ : Tensión axial, en la parte inferior de la sarta (lbf)

$W$ : Peso flotado de la sarta (lbf/ft)

$F_F$ : Fuerza de fricción actuando en la sarta (lbf)

$M$ : Torsión de la sarta (lbf – ft)

$\phi_p$ : Angulo promedio de severidad

$\phi$ : Angulo máximo de inclinación

$R$ : Radio de curvatura (in)

$f$ : Factor de fricción adimensional

## **2.4. MODELOS ANALÍTICOS PARA EL TORQUE Y ARRASTRE**

El cálculo del torque y arrastre puede llegar a ser un factor crítico cuando se quiere determinar la trayectoria deseada del pozo puede actualmente ser perforada y completada. Los modelos de torque y arrastre consideran la trayectoria del pozo, la configuración de sarta de perforación, patas de perro, factores de fricción y profundidad de los revestidores para predecir las fuerzas de torque y arrastre en un pozo. El modelado del torque y arrastre es usado para varios propósitos, incluyendo:

- Evaluación y optimización de trayectoria para minimizar el torque y arrastre.
- Ajuste de la trayectoria para minimizar efectos locales, como lo pueden llegar a ser las excesivas fuerzas normales.
- Estimar fuerzas normales generadas para ser utilizadas como datos de entrada para programas de cálculo de desgaste en las tuberías y centralizadores.
- Identificar las limitaciones o dificultades para alcanzar ciertas profundidades, tanto para la perforación como para la bajada de casing.
- Comparar las cargas estimadas a través del modelo con la resistencia de los componentes de la sarta de perforación (axial, torsional o lateral).
- Determinar los requerimientos de torque y por ende la capacidad del taladro de perforación.

### **2.4.1. Modelo generalizado de torque y arrastre (Aadnoy, 2008)**

El siguiente modelo puede ser usado para calcular el torque y arrastre en secciones curvas cuando la sarta de perforación está siendo subida o bajada dentro del hoyo. En la figura 5 Se muestran algunos tipos de geometrías que pueden ser analizados por este método. En el primer y segundo cuadrante se muestra la sarta de perforación en operaciones de subida y bajada respectivamente en una sección cóncava hacia abajo (tumbando ángulo), el

tercer y cuarto cuadrante muestra la sarta de perforación en operaciones de subida y bajada respectivamente en una sección cóncava hacia arriba (construyendo ángulo). (MODELADO NUMÉRICO DEL FENÓMENO DE TORQUE Y ARRASTRE EN TUBERÍAS DE COMPLETACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO Y GAS, G. PINEDA, M.J. MARTINEZ, V.L. CICCOLA, Z.E. CHACON).

Para las ecuaciones usadas en este modelo definimos lo siguiente:

- $F_1$ : Fuerza al final de la sección curva ( en sentido horario )
- $F_2$ : Fuerza al principio de la sección curva ( en sentido horario )
- $\alpha_1$ : Angulo formado desde la horizontal ( eje x ) hasta la parte final de la sección curva ( en sentido horario )
- $\alpha_2$ : Angulo formado desde la horizontal (eje x ) hasta la parte inicial de la sección curva ( en sentido horario )
- $\mu$  : Ceficiente de fricción entre la tubería y el hoyo
- W: Peso de la tubería por unidad de longitud, incluyendo la flotación

$$F_2 = f(\alpha_2) + (F_1 - f(\alpha_1))e^{K\mu(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

(9)

Donde;

$$f(\alpha) = \frac{wR}{1+\mu^2} \{(1 - \mu^2)Sena - 2K\mu Cosa\}$$

(10)

Siendo k:

- 1, si la tubería hace contacto con el lado interior del hoyo
- -1, si la tubería hace contacto con el lado exterior del hoyo

Si  $F + wRSen\alpha > 0$  , la fuerza normal está incrementando (aumento de la tensión) y la sarta se verá obligada a establecer contacto con el lado convexo (interno) del hoyo. Si  $F + wRSen\alpha < 0$  , la fuerza normal está decreciendo (disminución de la tensión) y la sarta se verá obligada a establecer contacto con el lado cóncavo (externo) del pozo.

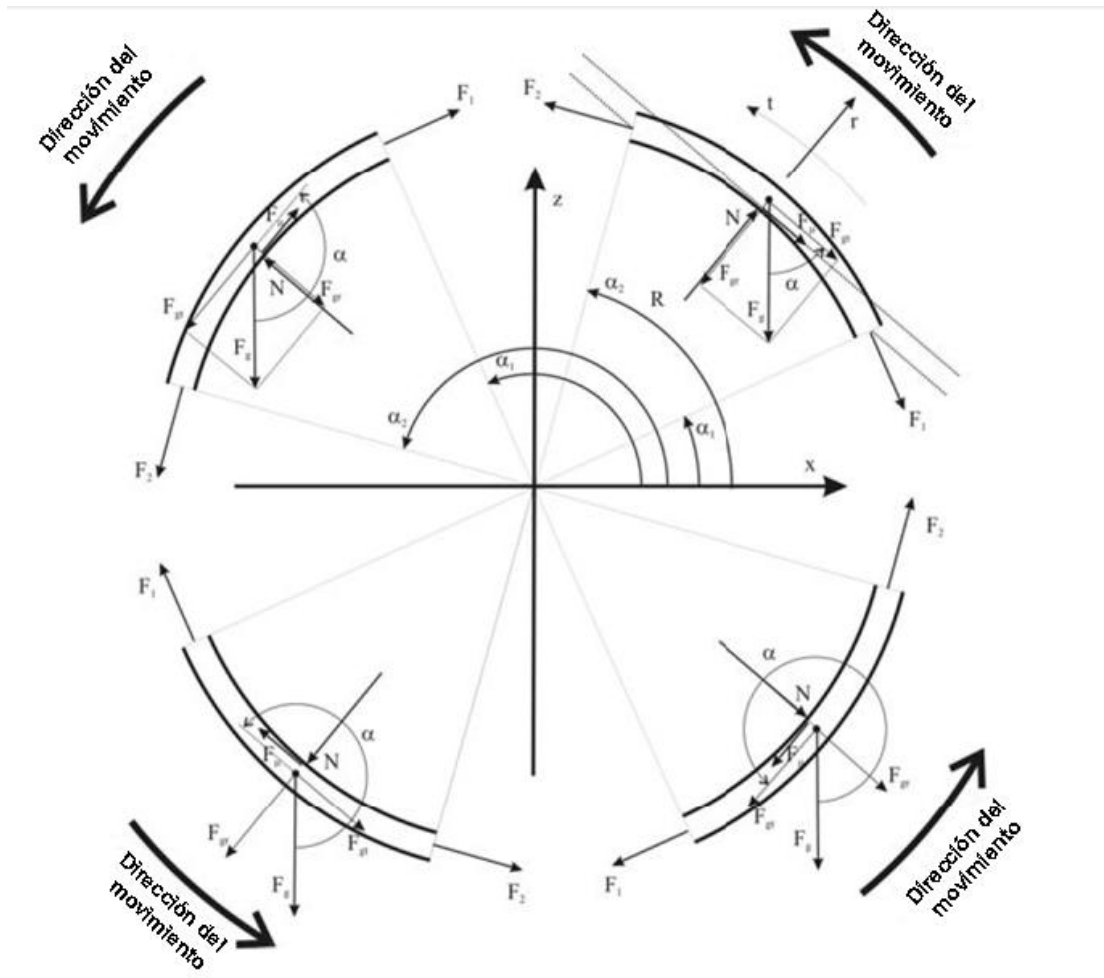
En la figura 5 Se muestra los cuadrantes en que se divide y se muestra la dirección del movimiento de la tubería durante su recorrido según Adnoy.

Cuando la sarta está estática, está definida por:

$$T = r\mu\{(F_1 - wRSen\alpha_1)(\alpha_2 - \alpha_1) - 2wR(Cos\alpha_2 - Cos\alpha_1)\}$$

(11)

**FIGURA 5 Diagrama de adnoy.**



*Fuente : Simetría cuando se construye o se tumba ángulo (aumento o disminución de inclinación) en operaciones de subida y bajada de tuberías (el ángulo alfa es complementario al ángulo usado convencionalmente para medir la inclinación desde la vertical). (MODELADO NUMÉRICO DEL FENÓMENO DE TORQUE Y ARRASTRE EN TUBERÍAS DE COMPLETACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO Y GAS, G. PINEDA, M.J. MARTINEZ, V.L. CICCOLA, Z.E. CHACON).*

El torque en una sección curva cuando se está subiendo o bajando y rotando simultáneamente está dado por:

$$T = r\mu\{(F_1 - f(\alpha_1))\frac{1}{K\mu}(e^{K\mu(\alpha_2-\alpha_1)} - 1) + f_{lin}(\alpha_2) - f_{lin}(\alpha_1)\}$$

(12)

Donde;

$$f_{lin}(\alpha) = \frac{-2wR}{1+\mu^2}(Cos\alpha + K\mu Sen\alpha)$$

(13)

Para secciones rectas las ecuaciones se reducen a:

$$F_2 = F_1 + w\Delta s(\pm\mu Sen\alpha + Cos\alpha)$$

(14)

$T$

$$= r\mu(w\Delta s Sen\alpha)$$

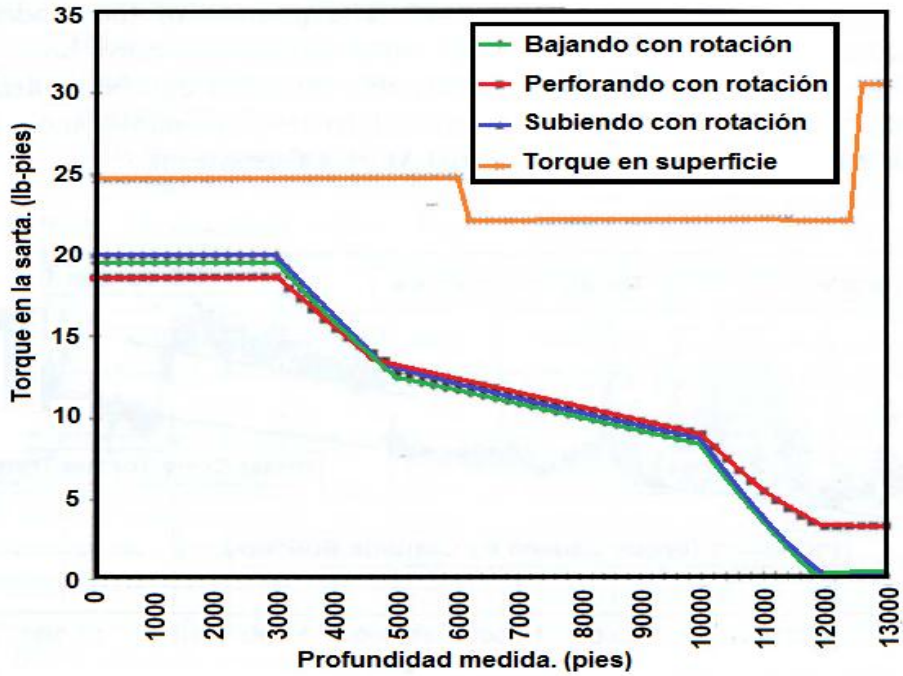
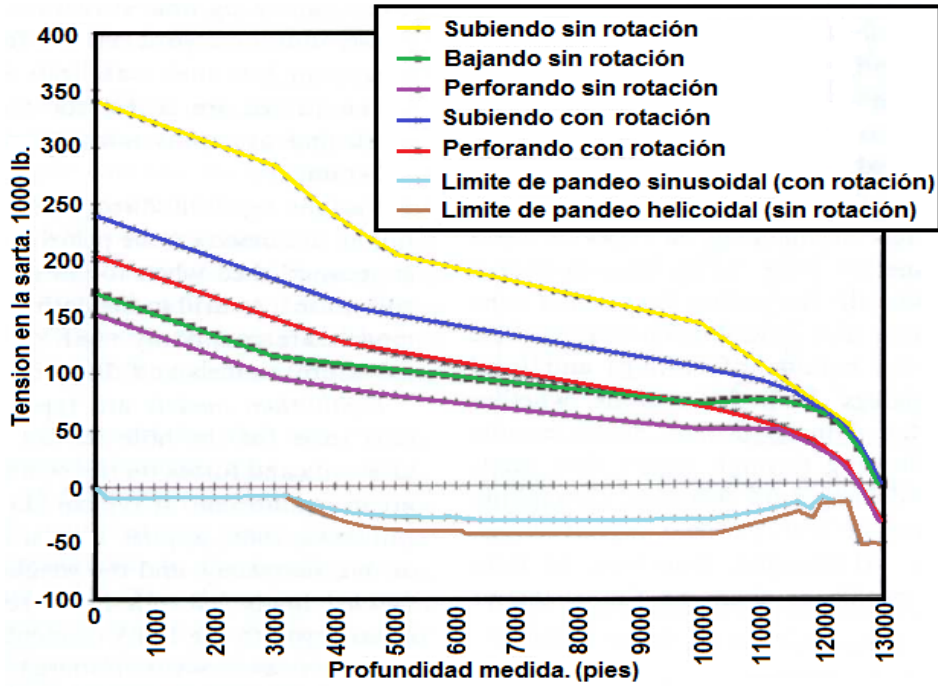
(15)

La práctica en el campo, muestra que si una sarta se rota, su arrastre axial es menor. Para considerar esto en los modelos matemáticos, se utiliza un vector de velocidad como resultado de la aplicación de rotación en la tubería. Esta velocidad tiene dos componentes: la velocidad circunferencial debida a la rotación de la tubería y la velocidad axial, que es relacionada a la velocidad del viaje y ritmo de perforación en el caso de sartas de perforación. La dirección de la fuerza friccional se asume que actúe en la dirección opuesta a la de la velocidad resultante. Por lo que al incrementar la rotación de una tubería, incrementara la velocidad circunferencial. A la vez esta decrece la velocidad axial. Esto trae consigo una disminución en la fuerza friccional.

Para fines de diseño, el cálculo de torque y arrastre se debe incluir los factores de fricción críticos. De esta manera se garantiza que la tubería sea introducida, rotada, deslizada y jalada.

En la figura 6 Se muestra el modelo de torque y arrastre, como análisis de cargas, que es generalmente mostrado en un gráfico de carga axial y torsional Vs profundidad.

FIGURA 6 Comportamiento de torque y arrastre



Fuente: (bibliografía)

## Consideraciones generales

Si los factores de fricción derivan de datos del campo existentes, los modelos basados en tubería flexible (soft-string) generan resultados con una precisión razonable para muchos tamaños de sarta y curvaturas de hoyo. Sin embargo, debido a que los modelos basados en tubería flexible no consideran la rigidez de la tubería, esta precisión puede degradarse en incremento en el diámetro de la sarta y el incremento en la curvatura del hoyo. Ambos incrementos producen mayores fuerzas normales e incrementos en el torque y el arrastre. Las propiedades del fluido de perforación usado en el pozo deben ser similares a las usadas durante la fase de planificación. Sin embargo, en casos donde no existe experiencia previa se pueden usar como puntos de partida los valores mostrados en la tabla 1. (Johansick 1982, Rasmussen 1991).

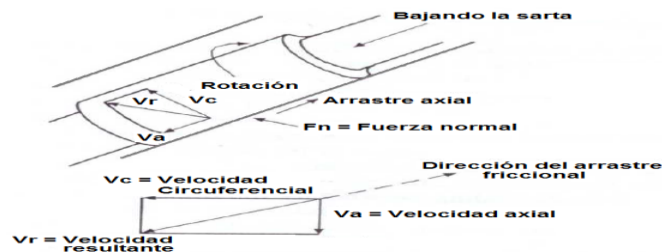
**TABLA 1 Factores de fricción dimensiones del sistema de estudio.**

Fluido de perforación	Fricción en el casing	Fricción en la formación
Base aceite	0.16 – 0.20	0.17 – 0.25
Base agua	0.25 – 0.35	0.25 – 0.40
Salmuera	0.30 – 0.40	0.30 – 0.40

*Fuente: Johansick 1983 y Rasmussen 1991.*

Experiencia en campo ha mostrado que el arrastre axial de la sarta se ve reducido cuando la misma está siendo rotada. Modelos de torque y arrastre toman en cuenta esto, en la figura 7 Se utilizan vectores de velocidad (Dellinger 1980).

**FIGURA 7 Efecto de la rotación de la tubería sobre la fricción axial de la sarta de perforación**



*FUENTE: Dellinger 1980*

El vector velocidad resultante  $V_r$  de un punto en contacto sobre la sarta de perforación es el vector suma de dos componentes, la velocidad circunferencial  $V_c$  (causada por la rotación) y la velocidad axial  $V_a$  (afectada por la tasa de perforación o la rapidez de subida de tubería). La dirección de la fuerza friccional resultante se asume opuesta al vector velocidad resultante  $V_r$ ; por lo tanto, las componentes de este vector serán en proporción a las resultantes del vector velocidad. La magnitud de la fuerza friccional resultante es simplemente el producto de la fuerza  $F$  el coeficiente de fricción  $f$ , y este no varía con la velocidad. Debido a que la magnitud del vector suma de estos componentes es una cantidad fija, si la componente circunferencial aumenta la componente axial debe decrecer. Lógicamente, si la velocidad de rotación de la sarta aumenta esto incrementa la componente circunferencial lo que hace que disminuya la fricción axial.

La planificación de un pozo debe incluir un análisis de troque y arrastre utilizando el caso más desfavorable (factores de fricción más altos) para asegurar que la sarta de perforación pueda avanzar, rotar, deslizar si se necesita perforación direccional, y ser sacada fuera del hoyo. Se debe realizar un modelado similar para asegurar la bajada de casing a las profundidades planificadas y que los mismos puedan sacarse del hoyo de ser necesario. El torque y la tensión/compresión calculados de cualquier punto de la sarta deben ser comparados con la resistencia torsional, a la tensión y al pando de la sarta de las herramientas de juntas.

Los resultados de un análisis de torque y arrastre son usualmente expresados gráficamente con el torque y/o la tensión en la sarta en un eje y la profundidad medida (MD – measured depth) en el otro eje.

## 2.5. FACTORES PARA CONSIDERAR EN LA REDUCCION DE TORQUE Y ARRASTRE

- Tensión o Compresión.
- Cargas.
- Fatiga.
- Pandeo.

### 2.5.1 Tensión o Compresión

Tensión mecánica es el valor de la distribución de fueras por unidad de área en el entorno de un punto dentro de un cuerpo o material continuo. Un caso particular es el de tensión uniaxial, que se define en una situación en que se aplica una fuerza  $F$  uniformemente distribuida sobre un área  $A$ . En este caso, la tensión mecánica uniaxial se representa por un escalar designado como  $\delta$  (sigma) y dado por:

$$\delta = \frac{F}{A}$$

(16)

$\delta$ : Tensión mecánica uniaxial (psi)

$F$ : Fuerza aplicada uniformemente (lb-f)

$A$ : Área (pulgadas cuadradas)

Compresión es una presión que tiende a causar en algunos casos una reducción de volumen, siempre manteniendo una masa constante. Cuando se somete un material a una fuerza de flexión, cizallamiento o torsión actúan simultáneamente

tensiones de tracción y compresión. En la perforación de un pozo, cuando existe mayor tensión en la sarta de perforación, es porque existe un problema como pata de perro (dog leg) es decir, a mayor tensión mayor pata de perro.

### **2.5.2. Carga o Peso**

El peso es la medida de la fuerza que ejerce la gravedad sobre la masa de un cuerpo. Normalmente, se considera respecto de la fuerza de gravedad terrestre. El peso depende de la posición relativa de los cuerpos y de su masa. En el caso de tubería dentro del agujero, su posición vertical, horizontal o inclinada dependiendo del diseño del pozo. El peso puede afectar a la sarta porque permite que la tubería sufra el contacto con la pared inferior del pozo logrando que esta sufra desgaste, de la misma manera si no se maneja bien el peso dentro del pozo se pudiera sufrir de un posible pandeo de tubería.

### **2.5.3. Fatiga**

Es el daño estructural progresivo localizado permanente, que se produce cuando un material se somete a repetidos ciclos de tensión. Daños por fatiga se acumulan en puntos de alta tensión y en última instancia forman la grieta de fatiga.

Las fuentes más comunes de la fatiga por tensión son:

- La rotación de la tubería, mientras exista una parte de la tubería doblada o pandeada.
- Presión
- Vibraciones

### **Resistencia a la Falla por Fatiga**

La falla por fatiga debido al efecto de rotación de la tubería es un problema que merece ser analizado, más aún cuando las condiciones de operación pueden

aproximarse a valores críticos de: severidad en el agujero, velocidad de rotación y esfuerzo axial en la tubería. Estos esfuerzos ocurren cuando existen espacios anulares estrechos, desgaste excesivo y la sarta se encuentra sometida a tensión.

El criterio utilizado para determinar estos valores críticos fue el sugerido por Lubinski, el cual consiste en una ecuación empírica que sugiere que la máxima carga lateral que la junta del tubo puede resistir antes de dañarse es de 2000 lbs, por lo tanto la siguiente ecuación permite determinar la máxima severidad permisible bajo esta condición a lo largo del pozo.

$$C = \frac{108000 * F}{L * T}$$

(17)

Dónde:

C: Máxima severidad permisible (°/100 ft)

F: Carga lateral sobre la junta del tubo (lb-f)

L: La mitad de la longitud de un tubo de perforación (pulgadas)

T: Carga de tensión al tubo (lb-f)

#### **2.5.4. Pandeo**

Según *K&M Technology Group, Drilling Design and Implementation for Extended Reach and Complex Wells – 3rd edition, 2003, p. 26-131*. El pandeo es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos alargados y rígidos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes, transversales a la dirección principal de compresión. Se traduce en la aparición de una flexión adicional en la tubería cuando se halla sometida a la acción de esfuerzos axiales de cierta importancia.

Eventualmente, a partir de cierto valor de la carga axial de compresión, denominada carga crítica de pandeo, puede producirse una situación de

inestabilidad elástica y entonces fácilmente la deformación aumentará produciendo tensiones adicionales que superarán la tensión de rotura, provocando la ruptura del material.

- **Pandeo Sinusoidal**

Muestra la forma y manera gradual como ocurre el pandeo, mientras la tubería de perforación es puesta en compresión provocando una reducción de peso hacia la broca, tendiendo a vibrar axialmente.

- **Pandeo Helicoidal**

Ocurre cuando la tubería se adhiere a las paredes del agujero. Se podría evitar al rotar la tubería. Si existe este tipo de pandeo lo recomendable es evitar rotar la tubería y de este modo se reduce el riesgo que sufra daños por fatiga.

### **2.5.6. Vibración**

Las vibraciones son inevitables en una perforación. Sin embargo, su grado de severidad y su efecto sobre el proceso de perforación dependen del diseño de la parte inferior de la sarta, y en gran medida, de los parámetros de perforación.

- **Tipos de vibraciones y sus causas**

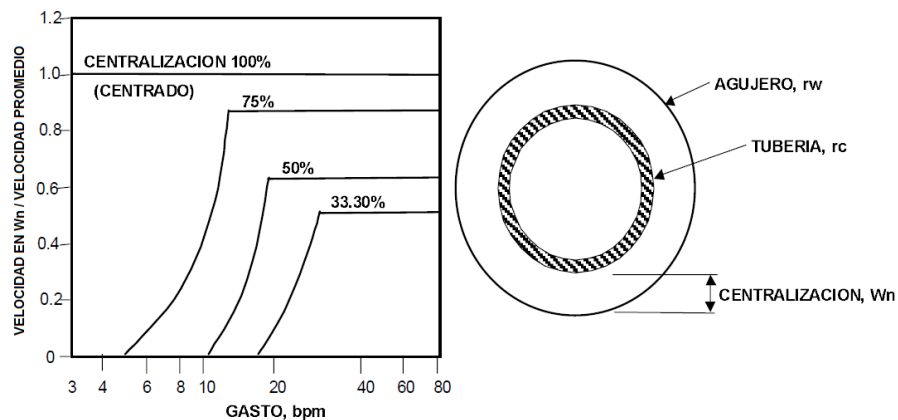
- ✓ Axial: Movimiento a lo largo del eje de la columna de perforación.
- ✓ Lateral: Perpendicular a la columna de perforación.
- ✓ Torsional: Es una vibración angular alrededor del eje de la columna de perforación.

## 2.6. FUERZA DE ARRASTRE Y CENTRALIZACION EN LA TUBERIA

Existen fuerzas que resisten el arrastre del lodo en los planos de contacto que existen con la pared del pozo y la tubería. Cuando la tubería no está centrada, los efectos de las fuerzas que resisten el arrastre del lodo no será uniforme a través del área de flujo en el espacio anular, esta diferencia aumenta con la descentralización y la probabilidad de que el lodo se canalice en el lado angosto del espacio anular. Un indicador del grado de descentralización es el porcentaje de centralización (Standoff), se han llevado a cabo investigaciones que han mostrado que el grado de descentralización requiere incrementar la velocidad de flujo para iniciar el movimiento del lodo en lado angosto del espacio anular.

En la figura .8. se muestra como la descentralización de la tubería afecta la velocidad de flujo en el lado angosto del espacio anular en relación al gasto de fluido en la parte más amplia. Cuando la tubería no se encuentra centrada, los efectos de las fuerzas que resisten el arrastre no serán uniformes a través del área de flujo en el espacio anular. Esta diferencia aumenta con la descentralización y existe la posibilidad de que el lodo no sea removido en la parte angosta del espacio anular.

**FIGURA 8 Efecto de la centralización de la tubería de revestimiento en la velocidad de flujo.**



Fuente: (<http://www.cedip.edu.mx/tomos/tomo07.pdf>).

### Porcentaje de descentralización:

$$\% \text{ descentralización} = \frac{100 * W_n}{r_w - r_c}$$

(18)

$W_n$ : Separación entre la pared del agujero y la tubería

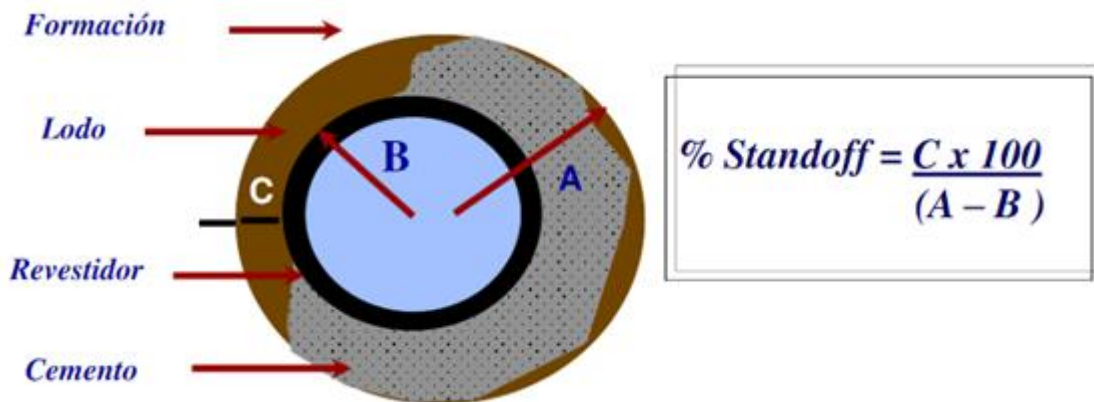
$r_w$ : Radio de pozo

$r_c$ : Radio exterior de la tubería.

**Standoff:** Separación permitida entre el hoyo y el revestimiento para garantizar una buena cementación. Según API el valor recomendado es 67 %.

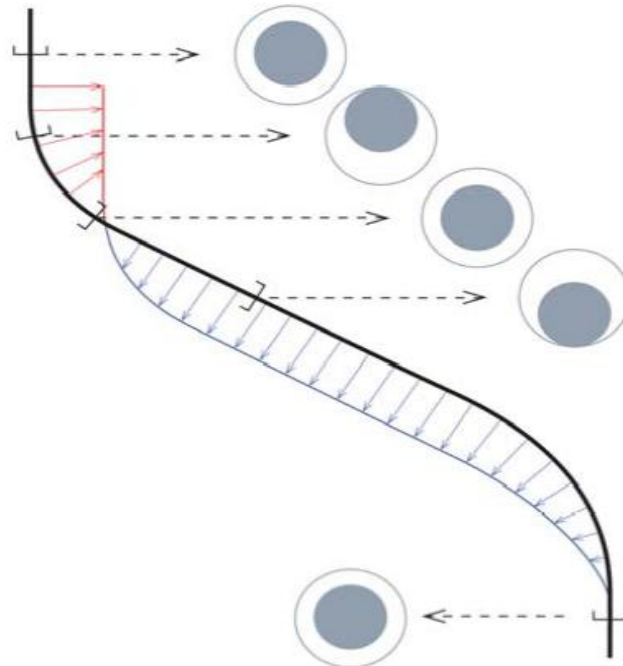
Para una mejor comprensión del standoff, en la figura 9 Se denota la distribución de los fluidos en el anular y como se analiza el cálculo de standoff y en la figura 10 Se toma en cuenta como la tubería tiende a recostarse durante las diferentes secciones del recorrido.

**FIGURA 9 Distribución de los fluidos en el anular.**



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/88152844/Cementacion-Primaria-de-Pozos-Moleiro>

**FIGURA 10 Perfil Stand-off sin centralizadores.**



Fuente: (SPE 150345)

## 2.7. CENTRADORES DE TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

Los centradores son accesorios de tuberías de revestimiento (Casing). Son importantes para garantizar una buena cementación. Mediante ellos se logra un espacio concéntrico que permite el flujo continuo de la lechada de cemento, reduciendo la resistencia al flujo uniformemente alrededor de la tubería. La colocación de los centradores es importante en todos los pozos, especialmente en los pozos profundos y altamente desviados.

La selección y distribución de centradores para una aplicación en particular de tubería de revestimiento requiere básicamente de un balance de fuerzas entre la carga de arrastre o friccional impuesta por la acción del tubo sobre el agujero o sobre otra tubería y la resistencia que opone el material del centrador.

Las bases de diseño para estudiar la colocación de centradores en una tubería de revestimiento son el aspecto mecánico tubo-centrador y su resistencia a las

cargas impuestas por el contacto entre tubo-tubo o tubo-agujero. Y no obedece a un aspecto hidráulico como se pensaría, debido al objetivo que tienen los centradores.

Para diseñar el espaciamiento óptimo de centradores en las tuberías, es necesario calcular la carga lateral o de arrastre efectiva, utilizando el criterio de la severidad de la pata de perro de Lubinsky (*Maximum Permissible Dog-Legs in Rotary Boreholes*). Y considerando los cambios de curvatura en el agujero, así como el efecto de flotación sobre el peso de la tubería.

El procedimiento de cálculo para obtener la distribución óptima de centradores por ensayo y error consiste en suponer un determinado espaciamiento de los centradores comprendido entre dos puntos. Después se calcula la carga lateral ejercida sobre el centrador. Esta carga se compara la fuerza restauradora del centrador. Si el resultado no es satisfactorio deberá suponerse otro espaciamiento y repetir el procedimiento. Para mantener la tubería alejada de la pared del pozo, la fuerza ejercida por un centrador contra el agujero es la fuerza restauradora.

### **2.7.1. CENTRALIZACIÓN**

Un aspecto muy importante es centrar la tubería de revestimiento para mejorar el desplazamiento del lodo o cemento. Para lograr una buena cementación es muy importante colocar uniformemente la lechada de cemento en el espacio anular, y que en el diseño de la lechada de cemento no hay agua libre y no se asienten partículas.

La centralización es esencial para proporcionar un área uniforme que será la ruta abierta de flujo hacia el espacio anular. Si la tubería no está centrada, impedirá el movimiento del lodo en la parte baja del pozo. Debido a las diferencias en el patrón de flujo, no hay un régimen de flujo o ritmo de flujo eficiente que pueda remover el lodo atrapado. La experiencia de campo indica que un 67% de Standoff es necesario para lograr la mejor oportunidad de remover el lodo de la parte estrecha del anular. Esto fue confirmado por Wilson y Sabins (1988) quienes en un estudio de laboratorio observaron que a pesar de un control estricto

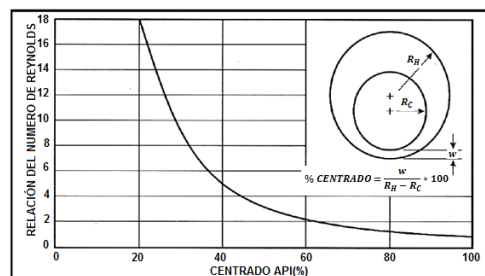
sobre el lodo, existía contaminación del lodo y una pobre eficiencia de desplazamiento cuando el centrado API en una tubería era menor del 60%, el espaciador y las características de la lechada de cemento. El centrado de la tubería de revestimiento es complicado cuando la desviación del agujero es alta debido al incremento de la carga sobre los centradores. Los centradores de barra sólidos son los recomendados cuando se cementa en pozos estrechos (Slim-hole). Los centradores deberán incluir un cojinete que permita el movimiento rotacional y recíprocos de la tubería sin que se muevan los centradores. El número requerido y el posicionamiento de los centradores pueden ser determinados con precisión mediante simuladores de cómputo. En la figura 11 Se observa como la relación del número de Reynolds influye en la centralización de la tubería. Un diseño adecuado de los centralizadores contribuye a la atenuación de los desafíos que comúnmente se encuentran en los pozos horizontales o desviados.

1. Los altos niveles de arrastre.
2. Altos niveles de torque.
3. Pandeo o Buckling.
4. Secciones de lavado (washout).
5. Formaciones débiles.

El programa de diseño de centralización tiene un papel importante con respecto a los siguientes objetivos:

1. Alcanzar la profundidad total (TD) de una manera segura y rentable.
2. Mantener la integridad del pozo a largo plazo.

FIGURA 11 Variación relativa del promedio crítico del Número de Reynolds como una función de la excentricidad.



Fuente: (<http://www.cedip.edu.mx/tomos/tomo07.pdf>).

Los centradores no proporcionan una centralización perfecta entre las paredes del pozo y la tubería, pero incrementan sustancialmente las condiciones de separación, mientras que una tubería sin centradores se apoyara contra la pared del pozo. En la figura .12. Se observan los diferentes tipos de centradores existentes. Aunque estos accesorios aparentan ser obstrucciones innecesarias. El tipo flexible posee una habilidad mucho mayor para proporcionar la separación en el lugar en que el pozo se ha ampliado. El rígido provee una separación más efectiva donde el diámetro del pozo es más cerrado.

**FIGURA 12 Centralizadores.**



*Fuente: (SPE Deepwater Drilling and Completions Conference).*

Las consideraciones de mayor importancia son:

- La posición.
- Método de instalación.
- Distancia.

Los centradores deberán ser los adecuados y en número suficiente para que, de acuerdo a su colocación en los intervalos que presenten una cementación requerida. La correcta ubicación requiere consultar el registro de calibración del agujero, ya que permite colocar los centradores donde el calibre del agujero presente las mejores condiciones para su buen funcionamiento, y que no queden en donde existan derrumbes o cavernas mayores a su diámetro.

En las cementaciones primarias, el éxito de una buena operación está en función de la centralización de la tubería de revestimiento para obtener un desplazamiento

uniforme de los fluidos. En algunos casos, los centradores pueden incrementar las posibilidades de bajar la tubería hasta el fondo; por ejemplo, donde existe el problema de pega por presión diferencial. (<http://www.cedip.edu.mx/tomos/tomo08.pdf>)

El espaciamiento entre centradores bien determinado por el ángulo de desviación y el radio de excentricidad tolerable. El espaciamiento máximo permisible está dado por la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{(D^4-d^4)Y}{3.056^{-6} W \sin \alpha}\right)^{1/4}$$

(19)

*L*: Distancia entre centradores (ft)

*D*: Diámetro exterior de la tubería (pg)

*d*: Diámetro interior de la tubería (pg)

*W*: Peso unitario de la tubería (lbs/ft)

$\alpha$ : Angulo de desviación del agujero

*Y*: Deflexión de descentralización (pg)

**Dónde:**

*Y* =

$$\frac{(radio\ agujero - radio\ tubería) - Wn}{Wn} \quad (20)$$

$$Wn = (1 - \% excentricidad) * (radio\ agujero - radio\ tubería)$$

(21)

**Se debe utilizar como mínimo un centrador:**

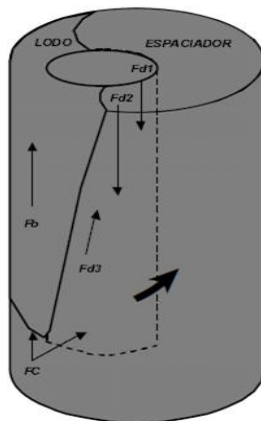
- ✓ En la zapata
- ✓ Dos tramos arriba de la zapata

- ✓ Cada tramo y 30 metros arriba y debajo de la zona de interés
- ✓ Cada tramo en cualquier parte donde la adherencia es crítica.

Una pobre eficiencia de desplazamiento se muestra en la figura 13 Donde se deja normalmente un volumen substancial de lodo en la interface formación-cemento-tubería como puede observarse en la figura y puede conducir a problemas durante la terminación y vida de producción del pozo. La tendencia del cemento a canalizarse a través del lodo es una función de:

- ✓ Las propiedades de flujo o reología del lodo y cemento.
- ✓ La geometría del espacio anular.
- ✓ La densidad del lodo y cemento.
- ✓ El gasto de flujo.
- ✓ Los movimientos de la tubería de revestimiento.

**FIGURA 13 Efecto de una baja eficiencia de desplazamiento de cemento.**



$F_{d1}, F_{d2}, F_{d3}$ : Fuerzas de arrastre

$F_b$ : Fuerza de flotación

$F_c$ : Fuerza de inercia

Fuente: (<http://www.cedip.edu.mx/tomos/tomo08.pdf>)

### 2.7.2. TIPOS DE CENTRALIZADORES

Los tres centralizadores más utilizados mostrados en la figura 14 Son los de:

- Arco estándar.
- Arco doble.
- Centralizador rígido.

Los arcos estándar se fabrican con un collar superior e inferior se suelda en arcos doblados a un tamaño específico. Estos centralizadores se usan mejor en aplicaciones verticales y cortas. Los arcos dobles son similares, con diferencia en la forma del arco. Estos arcos son significativamente más fuertes y se ejecutan normalmente en pozos verticales y desviados. Los centralizadores rígidos, están soldados a los lados. Estos centralizadores generalmente son usados en pozos horizontales, debido a que no pueden aplanarse.

American Petroleum Institute (API), define tres fuerzas en los centralizadores:

- La fuerza de arranque se define como: La fuerza máxima requerida para insertar un centralizador en un diámetro de pozo especificado.
- La fuerza de funcionamiento está definido por la fuerza máxima requerida para mover un centralizador a través de un pozo de diámetro especificado.
- La fuerza de recuperación se define como: La fuerza ejercida por un centralizador contra la tubería de revestimiento para mantenerla alejada de la pared del pozo.

### **3. HISTORIA, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGIA CRB**

La profundidad, las altas temperaturas, las secciones desviadas en pozos horizontales o de alcance extendido son algunas de las complicaciones con las que los operadores se enfrentan a cada día. Además de diámetros reducidos (Slimhole), multilaterales ERD o de ambientes agresivos y la necesidad de centralizadores versátiles es importante.

Los centralizadores tipo arco convencionales se han utilizado con éxito en algunos pozos horizontales, sin embargo, al aumentar la longitud de la sección horizontal, se han implementado centralizadores especiales, tales como de tipo arco de baja fuerza motriz y centralizadores rígidos. Este desafío en este tipo de perfiles

(Slimhole), ha sido la motivación para introducir un método diferente en la centralización de la tubería de revestimiento (Casing).

A finales de 1990 una compañía de operaciones durante la perforación de pozos se encontró con numerables problemas. Resultando la idea de una hoja o aleta (blade) como un centralizador, el cual es unido directamente a la tubería. Fue así como se inició el desarrollo de esta tecnología. La primera aplicación comercial del uso de centralizadores usando compuestos de resinas fue en 1999.

### **3.1 DESARROLLO DE METODOLOGÍA**

Con el fin de garantizar la corrida de revestimiento (Casing) y resolver los problemas que este asocia a los perfiles delgados (Slimhole), desviado, de alcance extendido y reducir al mínimo los riesgos debidos a la falta de una centralización adecuada (altos arrastres, mala calidad del trabajo de cementación, entre otros...), es importante para obtener una adecuada centralización para lograr la mejor distribución y homogenización de la lechada de cemento.

La centralización es el punto crítico, se decide evaluar sistemas alternativos capaces de actuar como los centralizadores tradicionales para el perfil de carcasa estándar. La solución más fácil y probablemente más económica fue el de obtener el efecto de centralización por medio de bandas unidas directamente en las tuberías.

Para alcanzar la meta se hicieron algunas consideraciones sobre los aspectos técnicos directamente relacionados con el material que pueda ser utilizado para preparar las bandas y los problemas operativos relacionados con cuándo, dónde y cómo instalar estas bandas.

Con respecto a las bandas que están conformadas de compuestos de resina las siguientes funciones fueron consideradas como críticas:

- Propiedades de alta resistencia, posibles efectos respecto al impacto y torque.
- Resistencia elevada a la abrasión.
- Alto grado de adherencia evitando desprendimiento y posibles problemas.
- Mayor elasticidad de la tubería permitiendo deformaciones de la tubería sin comprometer la rigidez de esta.
- Debe ser fácilmente desintegrado si accidentalmente se desprende y cae en el pozo, bloqueando la posibilidad de fiar la tubería a la profundidad deseada.

Las características anteriormente eran casi alcanzables en una resina de dos componentes normalmente utilizados para reparaciones metálicas especiales y de protección. Modificaciones y mejoras adicionales a la resina compuesta eran necesarias para alcanzar las características requeridas. En particular en la figura 15 Se observa el fluido justo antes de la aplicación, proporcionando unos beneficios adicionales e interesantes si se compara con el centrador convencional.

- Se puede aplicar, en forma y dimensionado como las necesidades reales.
- Que puede estar situado en cualquier posición a lo largo de la tubería.

**FIGURA 14 Resina en el momento antes de la aplicación.**



*Fuente: (R. Baynham, D. Ievie, Protech srl)*

Es posible aumentar el número y espesor de las bandas donde se espera que exista la mayor reducción de contacto y donde las fuerzas de fricción sean superiores. Un procedimiento adecuado se estableció para implementar el uso de

los, en función de las necesidades, tanto en el sitio de equipo de locación (Pozo) o en un almacén. Esta posibilidad puede ser muy importante cuando se espera ubicaciones remotas de difícil acceso y particularmente condiciones climáticas severas.

Una tecnología innovadora que resuelve muchos de los problemas mencionados anteriormente es la implementación de centralizadores de fibra de carbono con compuestos cerámicos. A diferencia de muchos centralizadores convencionales (rígidos – metálicos), esta tecnología ofrece la posibilidad de:

1. Personalizar la tecnología para trabajos específicos.
2. Proporciona un menor coeficiente de fricción.
3. Utilizar en pozos de diámetro reducido (Slimhole).
4. Lograr fluidez, sin interrupciones durante la circulación de fluidos.
5. Proporciona resistencia a la abrasión y al impacto.

La introducción de esta tecnología innovadora contribuye a garantizar una mejor y más homogénea distribución de la lechada de cemento y permitir cierta versatilidad en el diseño del pozo y a su vez reducir riesgos asociados, lo cual afecta el costo total del proyecto a realizar.

El centralizador de fibra de carbono con compuestos cerámicos es un sólido formado mecánicamente y es unido químicamente a la tubería. El proceso de unión patentado tiene la opción de elegir tamaño, forma o ubicación de los centralizadores. El material también puede ser usado para otras aplicaciones como: bandas de desgaste, cuñas de desviación y áreas de aplicaciones generales de reducción de fricción.

Casing Resin Blade (CRB), fue específicamente diseñado para usarlo como centralizador de tubería de revestimiento (Casing), ya que contenía fibra de carbono, que actúa similar a la barra de esfuerzo en el hormigón para proporcionar soporte estructural y resistencia. La mezcla cerámica de carburo de silicio y nitruro de titanio, proporciona resistencia al impacto y a la abrasión. Las aletas (blades) son unidas directamente a la tubería por medio de un proceso que

incluye la preparación de la tubería. El proceso incluye limpiar la tubería mediante un chorro de arena a alta presión (Sand-Blasting), la instalación del molde de aluminio y la inyección del material compuesto.

### **3.1.1. BENEFICIOS**

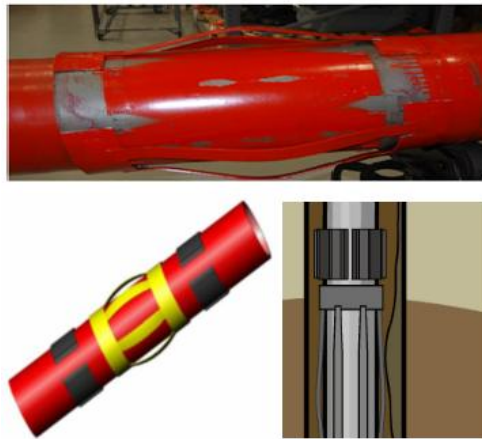
La versatilidad del diseño y las propiedades mecánicas de la fibra de carbono y el material cerámico permite que esta tecnología tenga diferentes usos en los métodos de centralización. Algunos de esos beneficios son:

- Especificaciones del trabajo del cliente.
- Diseñado para adaptarse a aplicaciones específicas.
- Se puede instalar sobre cualquier grado de tubería incluyendo aleaciones.
- Proporciona flujo suave sin interrupciones a la circulación de fluidos.
- Ideal para secciones desviadas del pozo debido a que proporciona un bajo coeficiente de fricción.
- Reduce la rigidez del centralizador.
- Se puede usar en pozos convencionales o de diámetro reducido (Slimhole)
- Proporciona resistencia a la abrasión extrema y resistencia al impacto.
- El material compuesto es fácil de instalar.
- Facilidad de inyección / trabajabilidad
- Tiempo de secado corto

### **3.1.2. APLICACIONES**

La versatilidad del diseño es el gran diferenciador entre los programas de centralización convencional y la tecnología de fibra de carbono con compuestos cerámicos (CRB). La entrada para desarrollar esta tecnología era la respuesta a los problemas que tenían los centralizadores convencionales, por lo cual esta tecnología se desarrolló. Su objetivo esencial se muestra en la figura 16 La cual consistía en ajustes fijos de menos de un centímetro entre el diámetro del pozo ID y el diámetro de la tubería de revestimiento (Casing) OD.

**FIGURA 15 CRB stop-collares se fijan entre sí en los dos extremos del centrador bow-spring, CRB Stop-collar desvia la carga lejos del centrador bow-sprin.**



*Fuente: (F. acosta. E. Webb, F. Zausa, Halliburton)*

Los perfiles de perforación inclinados, son enormes oportunidades si son manejados correctamente. La tecnología de fibra de carbono con compuestos ceramicos, ha sido la solución a muchos problemas con la ventaja de trabajar en espacios reducidos entre las paredes del pozo y el OD del casing, no solamente para pozos verticales. En los últimos años las operaciones de perforación han sido desviadas al incremento de programas de perforación de alcance extendido en las cuales se tienen las nuevas expectativas económicas.

El uso de centralizadores convencionales incrementa la rigidez de la tubería la cual en un pozo vertical no representa un problema mayor sin embargo en pozos desviados el espacio entre las paredes del pozo y el casing (espacio anular) es más crítico. Usando la tecnología CRB elimina las conexiones premium y reduce la rigidez de la tubería ofreciéndole una mayor flexibilidad.

La tabla 2 Es un ejemplo de un programa con CRB stop-collares con los centralizadores de arco. La primera columna muestra la tubería anterior, la segunda columna muestra el tamaño del pozo, y la tercera columna muestra el revestimiento que se utiliza.

**TABLA 2 Ilustra la tolerancia estrecha entre el pozo abierto y el revestimiento, la tecnología CRB ofrece diferencia respecto a los sistemas tradicionales de centralización.**

<b>Example Lean – Profile Program</b>					
<b>Previous Casing, in.</b>	<b>Hole, in.</b>	<b>Casing Liner, in.</b>	<b>Stand Off, In. (mm)</b>	<b>Drift Size, in.</b>	<b>OD difference; Blade-Hole, in. (mm)</b>
<b>20-18 5/8</b>	<b>17 1/2</b>	<b>16</b>	<b>9/16 (14.5)</b>	<b>17 1/8</b>	<b>3/8 (9.51)</b>
<b>16</b>	<b>14 3/4</b>	<b>13 3/8</b>	<b>9/16 (14.5)</b>	<b>14 1/2</b>	<b>1/4 (6.35)</b>
<b>13 3/8</b>	<b>12 7/8</b>	<b>11 3/4</b>	<b>3/16 (4.75)</b>	<b>12 1/8</b>	<b>1/8 csg; 3/4 hole (19)</b>
<b>11 3/4</b>	<b>10 5/8</b>	<b>9 5/8</b>	<b>3/8 (9.51)</b>	<b>10 3/8</b>	<b>1/4 (6.35)</b>
<b>9 5/8</b>	<b>8 1/2</b>	<b>7</b>	<b>5/8 (15.85)</b>	<b>8 1/4</b>	<b>1/4 (6.35)</b>
<b>9 5/8</b>	<b>8 1/2</b>	<b>7 3/4</b>	<b>1/4 (6.35)</b>	<b>8 1/4</b>	<b>1/4 (6.35)</b>
<b>9 7/8</b>	<b>8 1/2</b>	<b>7</b>	<b>5/8 (18.85)</b>	<b>8 1/4</b>	<b>1/4 (6.35)</b>

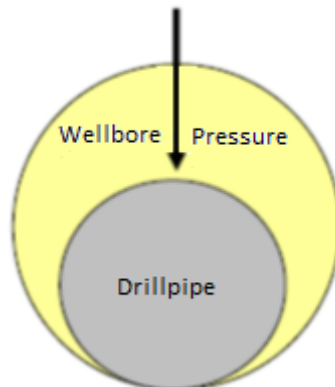
*Fuente: F. acosta. E. Webb, F. Zausa, Halliburton) (modificada por el autor).*

La pegadura por presión diferencial es otro problema común que ocurre cuando se está bajando tubería en un pozo con una mayor presión que la presión de la formación. La tubería se presiona contra la pared del pozo y debido a eso, una parte de su circunferencia tendrá solamente la presión de la formación mientras el resto continúa empujando debido a la presión del pozo.

Como resultado la tubería se queda atrapada contra la pared del pozo como se muestra en la figura 17 y se requiere una enorme cantidad de fuerza para eliminarla. Debido a esto una vez más la versatilidad de la tecnología de fibra de carbono con compuestos cerámicos permite la instalación en forma de aletas o hojas (C) como se observa en la figura 18 las cuales proporcionan un amortiguador entre las paredes del pozo y el casing, y a su vez un flujo en suspensión continua a través de aletas o hojas (blades) en el pozo. Esta práctica

se volvió popular y proporciona una nueva herramienta para ayudar a superar la pega diferencial.

**FIGURA 16** La tubería de perforación es empujada por la presión del pozo causando la pega diferencial.



*Fuente: F. acosta. E. Webb, F. Zausa, Halliburton*

**FIGURA 17** Las aletas o hojas en forma de C están unidos alrededor de la tubería, ofreciendo cobertura de 360° grados y previene que la tubería entre en contacto con las paredes del pozo.



*Fuente: F. acosta. E. Webb, F. Zausa, Halliburton*

La Perforación de alcance extendido (ERD), son pozos donde se desvía de la trayectoria vertical para permitir un desplazamiento horizontal para llegar a cierta zona objetivo. Con esta técnica el pozo se extiende horizontalmente en el yacimiento a una distancia mucho mayor que la posible con pozos convencionales perforados direccionales lo que permite un mayor contacto entre el yacimiento y

el pozo. Algunos de estos problemas en este proceso de perforación y completamiento son los factores de fricción, torque y arrastre.

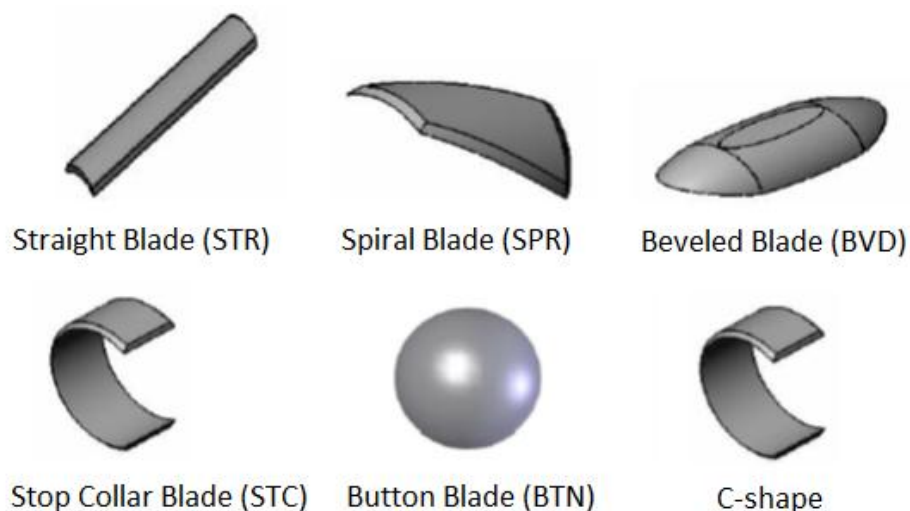
La tecnología de la fibra de carbono con compuestos cerámicos pueden reducir la fricción entre las paredes del pozo y la tubería, por lo cual a su vez reduce el torque y arrastre, lo cual permite las perforaciones extendidas con una mayor facilidad. Otras aplicaciones de la tecnología incluye bandas de desgaste, cuñas de desviación, dispositivos de protección y aplicaciones generales de reducción de fricción.

### 3.2. DISEÑO

#### 3.2.1. INFORMACION DE DISEÑO

Una serie de diferentes hojas o aletas (blades) se pueden seleccionar en base a los requerimientos de trabajo o de lo que se va a implementar. Sin embargo los patrones de diseño de las aletas (Blades), están limitadas a la imaginación del operario e ingeniero, las más utilizadas e implementadas se muestran en la figura .19. Para resolver las complicaciones encontradas durante los trabajos de perforación y completamiento.

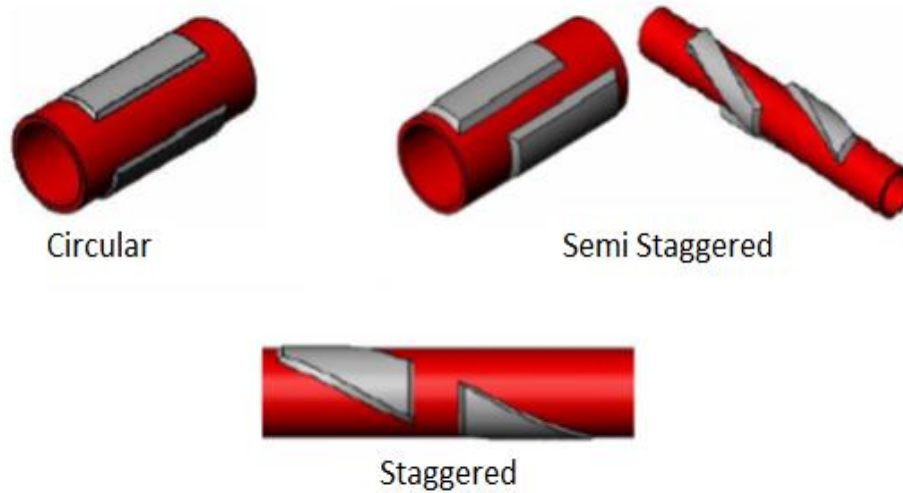
**FIGURA 18 Diseños de la aleta u hoja**



*Fuente: F. acosta. E. Webb, F. Zausa, Halliburton)*

Ademas, la posición de las aletas en la tubería estara en la discreción del trabajo y el patrón de instalación puede ser : circular,escalonado, semi-escalonado. Esto depende del tipo de aplicación. Que se observan en la figura 20.

**FIGURA 19 Patrones de instalación del CBR.**

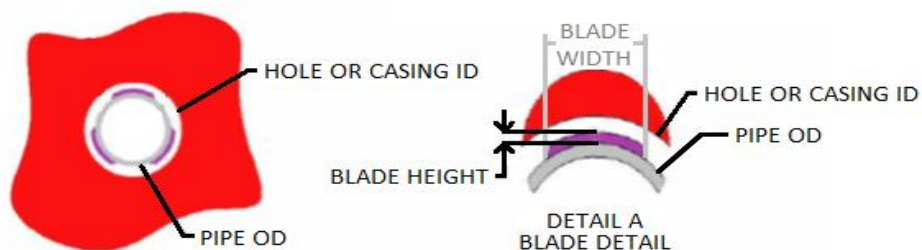


*Fuente: F. acosta. E. Webb, F. Zausa, Halliburton*

### 3.1.2. ESPECIFICACIONES DE CRITERIO DE DISEÑO

Una vez que el tamaño de la tubería se establece sobre la aplicaciones a realizar . En la figura 21 Se selecciona la aleta o hoja con sus especificaciones que incluye longitud, anchura, espesor y dependiendo de lo que se pretende, el patron de instalacion de las aletas o hojas.

**FIGURA 20 Detalles de la selección de la aleta u hoja.**



*Fuente: F. acosta. E. Webb, F. Zausa, Halliburton*

### 3.3. PROCEDIMIENTO CRB PROTECH

El procedimiento para la implementación de los reductores de fricción CRB, es un proceso complejo y minucioso, puesto que cada paso que lo conforma debe realizarse de manera impecable para garantizar el éxito de las etapas posteriores.

En la industria petrolera es bien sabido que antes de ejecutar cualquier labor, se debe realizar una reunión operacional con la firma contratista, donde se evalúan los riesgos operacionales; de esta forma minimizar los peligros latentes y prever planes de contingencia. Previo al inicio de la fase de operación se hace una inspección y/o revisión a los datos de trabajo y a las variables de ejecución. La tabla 3 Presenta los parámetros requeridos para el proceso.

**TABLA 3 Parámetros requeridos para realizar el proceso de instalación.**

Datos Casing	Datos Ingeniería
Diámetro Casing	# de Juntas
Grado Tubería	Diseño
Tipo de Rosca	Drift del Casing interior
Libraje por pie	OD final del CSG con CRB

Fuente: Autores

#### 3.3.1. Instrumentos de Medición de parámetros de Temperatura

La temperatura y los parámetros ambientales son fundamentales para el desarrollo óptimo del Sandblasting y garantizar una micro-abrasión e inyección de resina optima, es por ello que es fundamental y sustancial cuantificar dichas variables. Por esto se hace uso de:

- **Hidrómetro:** mide condiciones ambiente de un área. (Bulbo húmedo temperatura ambiente, %de humedad)
- **Medidor de Temperatura**

Los parámetros de la tabla 4 que se tienen en cuenta para disponer y ejecutar el proceso de Sandblasting en la superficie de la tubería son, Bulbo húmedo, Bulbo seco, Porcentaje de humedad y temperatura del casing y estos deben estar en estas magnitudes:

**TABLA 4 Parámetros para ejecutar el proceso de sandblasting.**

<b>Bulbo Seco</b>	<b>Porcentaje de Humedad</b>	<b>Temperatura del casing</b>
-------------------	------------------------------	-------------------------------

	<b>en el ambiente. %</b>	
> 3°C del Dpoint	< 75%	>15°C

Fuente: Autores

Al igual que la temperatura es necesario, velar y salvaguardar el roscado del pin y el box del casing, durante el Sandblasting para un buen acople.

### 3.3.2. Materiales en el proceso de SandBlasting

Para realizar esta operación que consiste en la proyección de partículas abrasivas a gran velocidad (65 - 110 m/s), que al impactar con la pieza tratada, produce la eliminación de los contaminantes de la superficie es necesario emplear los materiales enunciados en la tabla 5.

**TABLA 5 Materiales para el Sandblasting.**

<b>Material</b>	<b>Características</b>
Oxido de aluminio G- 16	Su finalidad es dar el perfil de anclaje debido a su naturaleza abrasiva, finos acabados, pulimentos y mecanizados.
Granate Garnet 20/40	Tiene como propósito limpiar el área sandblastada, remplazando la sílice en el granallado que al impactar con la pieza tratada, produce la eliminación de los contaminantes de la superficie.

Fuente: Autores

Se debe tener las normas de seguridad especificadas antes de realizar este tipo de procedimiento, en la figura 22 Se observa la adecuada preparación de la superficie de la tubería aplicando. El Oxido de aluminio G-16 y el Granate Garnet 20/40 se emplean en ese orden respectivamente en el proceso de Sandblasting y al ser productos libres de sílice no contaminan el medio ambiente.

**FIGURA 21 Preparación superficial Sandblasting.**



Fuente: Halliburton.

### **3.3.3. Evacuación y Purga del Equipo**

Para realizar el proceso de Sandblasting, es necesario “purgar” los filtros y componentes del equipo, cuya finalidad es eliminar cualquier presencia de fluidos (agua-aceite) que me afecten el proceso; esta etapa de evacuación debe prolongarse entre 15-30 minutos para corroborar la ausencia de contaminantes.

Es indispensable verificar que el equipo de Sandblasting no arroja fluidos que puedan perjudicar el procedimiento; el control se ejecuta situando un trapo blanco en la boquilla aspersora que garantiza la expulsión de aire seco (para este propósito se emplea una boquilla número 5 y el tiempo de revisión varía entre 5 y 10 minutos.)

Si por factores externos se alteran los requisitos de equilibrio (bulbo seco) en alguna fase del proceso se debe suspender inmediatamente la operación, hasta que se restablezcan las condiciones de garantía, por tal motivo es recomendable realizar el Sandblasting en un área de trabajo poco variable, que mantenga los parámetros de operación en el rango óptimo.

### **3.3.4. Prueba de Limpieza**

A toda la tubería se le realiza una limpieza de barrido con aire para remover las partículas de polvo que puedan poner en riesgo el éxito de la operación, posteriormente se lleva a cabo la prueba Dust test para comparar la limpieza del área. Si a prueba no sale apta o no coinciden los grados de limpieza (1° o 2°) se aplica de nuevo granate en el área sandblastada para que el impacto del granallado logre un buen acabado superficial y simultáneamente una correcta terminación, por último se emplea una lupa para revisar el Sandblasting.

### **3.3.5. Verificación del Perfil de Anclaje**

La cinta press-o-fil es utilizada para medir el perfil de anclaje el cual debe ser > 3.5 milésimas de pulgada, para cuantificar este parámetros se frota la cinta colocada en el área sandblastada con una plumilla. Posteriormente para determinar el valor se pone la cinta en el rugosímetro previamente calibrado en 8 milésimas de

pulgada cuya lectura debe ser mayor a 3.5 milésimas de pulgada de lo contrario se debe repetir el Sandblasting.

### 3.3.6. Disposición y Colocación de Moldes

Los moldes son de material plástico, resisten más de 160°C; una vez dispuestos los moldes se tienen 4 horas para inyectar. Primero se disponen la cinta doble cara (CINTA 3M4462) en los límites del área donde estará el molde, posteriormente se pone la cinta gris (CINTA 3M3939) para asegurar moldes y evitar que haya fugas al inyectar la resina.

### 3.3.7. Inyección del Material

En la tabla 6 Se muestran los componentes que tienen participación en esta etapa.

**TABLA 6 Componentes que intervienen en material CRB.**

Componente	Especificación
Resina	Conformada principalmente en silicona, material cerámico y fibra de carbono su temperatura media debe estar entre 35°C y 40°C.
Catalizador	Es un acelerador del proceso y fraguado de la resina, cuando entra en contacto con esta, produce una reacción exotérmica lo cual incrementará la temperatura >115°C
Circuito de Lavado	Purga el equipo y mantiene la temperatura de la resina constante. Para el proceso de lavado se emplea Metil-etil-cetona.

*Fuente: Autores*

Antes de inyectar la resina es necesario lavar el equipo con Metil-etil-cetona, para eliminar cualquier residuo de inyecciones anteriores. Posteriormente se desmonta la tubería y se homogeniza la resina y el catalizador a través del Static Mixer, donde la presión de mezcla debe estar en un rango entre 1200 psi – 1500 psi.

Es indispensable antes de inyectar la resina en los moldes, tomar dos muestras de la misma o bien llamados baches de 2 litros, para corroborar la calidad y estado de

la mezcla, de esta forma eliminar la incertidumbre en el proceso y por ende garantizar un buen fraguado. Por último se procede a inocular la mezcla en los moldes a tasa de inyección constante, en el mismo orden en que estos fueron dispuestos.

### **3.3.8. Pruebas de calidad de aleta o Blade**

Una vez inyectada la resina y cumplido el tiempo de fraguado, se procede a desmontar el molde de la resina para verificar la calidad y el estado de la aleta o blade. Se inicia con la prueba de dureza que se realiza con un durómetro, cuyo rango de calidad es de  $D > 80$  Sh (Shores). Ver Figura 23.

**FIGURA 22 Prueba de Dureza Shore D**



*Fuente: Halliburton.*

De igual forma se hace necesario verificar el calibre y altura de la aleta ver figura 24, puesto que el diámetro hueco del pozo es una medida que no se puede manipular, completamente inalterable, por tal razón hay que corroborar que las aletas no superen esta medida y coincidan con los valores de diseño; para lo cual se hace uso de un calibrador y un compás ver figura 3.

**FIGURA 23 Verificación Calibre y Altura del Blade y/o Aleta.**



*Fuente: Halliburton*

### 3.3.9. Prueba de Pull Test

Esta prueba es la más importante del procedimiento, con ella se cuantifica y evidencia el éxito del proceso, ya que se constata la adhesión de las aletas o blades al revestimiento. La prueba consiste en introducir de 15 a 20 mm un dolling en la resina fraguada, dejarlo 24 horas para garantizar un buen acople y someterlo a una prueba de tracción, la cual debe soportar 1500 psi de arrastre.

Si el dolling no soporta los 1500 psi, el blade no es apto para la corrida de revestimiento y es necesario repetir todo el proceso. Esta prueba se debe realizar periódicamente conforme los lotes de inyección vayan saliendo.

### 3.3.10. Protección de los centradores

La protección de los centradores en una de las etapas importantes en el proceso, pero irónicamente es una fase que presenta carencia e insuficiencia, puesto que los mecanismos de protección son bastantes primitivos, elementales y rudimentarios. Se basan principalmente en sogas y cintas que no ofrecen mayor amparo y garantía de conservación durante la fase final de transporte.

El procedimiento de instalación de la o blade se resume en la figura 25, en las siguientes fases:

**FIGURA 24** *Las tres principales fases del proceso de instalación*



*Fuente: Halliburton. 1) El sandblasting; 2) La máquina de inyección; 3) El centralizador instalado. (R. Baynham, D. levie, Protech srl*

## **Arenado (Sand-Blasting)**

- Cada tubería se debe limpiar y pulir el área donde se instalara el centrador eliminando una capa de pintura por medio de un chorro de arena a alta presión. El Sand-Blasting crea un perfil de anclaje que mejora la adhesión mecánica de la aleta u hoja a la tubería.
- El perfil de anclaje se comprueba con un micrómetro y cinta T-TEX. El mínimo requerido es de 0.003 pulgadas o 80 micrómetros.

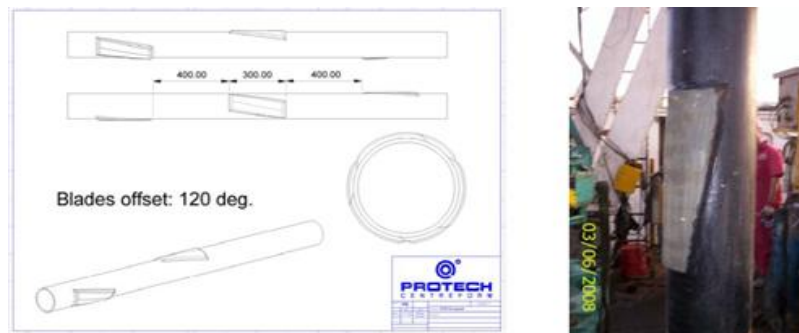
## **Montaje del molde y la inyección del material compuesto**

- Un molde adecuado, depende del tamaño y forma seleccionada. Una vez el molde se une a la tubería, el material compuesto se inyecta por medio de un orificio de llenado.
- Una vez que el material cumpla con su tiempo de secado, se retira del molde y el producto final se inspecciona visualmente y se hacen ciertas pruebas para comprobar que se cumplieron con las especificaciones de diseño.

En la figura 26 y 27 Se observa un diseño básico para la centralización de la tubería de revestimiento, se caracteriza de la siguiente manera.

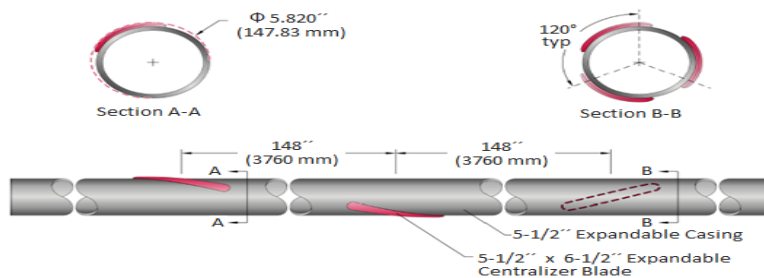
- Cada hoja (blade) es de 0.25 mm de espesor
- Cada hoja (blade) es de aproximadamente 1 pie de largo.
- Espaciamiento de 120° entre cada centralizador.
- Espaciamiento de 1.3 pies entre cada centralizador.
- La cobertura total del sistema es de 5,6 pies.

**FIGURA 25** *Diseño básico del centralizador de fibra de carbono con compuestos cerámicos (Izquierda), fuente: Centralizador ya instalado en la tubería (Derecha).*



*Fuente: (SPE 137028).*

**FIGURA 26** *Centralizador en la tubería en forma espiral.*



*Fuente: (SPE 137028)*

Para calificar el producto para el despliegue en el campo, se deben obtener y evaluar los siguientes datos de prueba. En primer lugar para evaluar el riesgo de una posible rotura del centralizador durante la marcha en el pozo. El producto fue sometido a pruebas de dureza y demostró que es un material con alta dureza. En la figura 28. La prueba de desgaste se puede representar de la siguiente manera

- Rotación de 30 rpm (revoluciones por minuto) durante 4,5 horas.
- Correr durante 10,5 horas.
- Espesor inicial 11,8 mm.
- Espesor final 11,4 mm.
- Desgaste 0,4 mm.

**FIGURA 27 Centralizador Después de la prueba de desgaste.**



*Fuente: (SPE 137028)*

En la figura 29 El producto también fue sometido a pruebas de tenacidad para verificar su implementación, Como se muestra en la figura, no es posible incluso con 180,000 libras de fuerza removerlo una vez que se ha unido a la tubería correctamente.

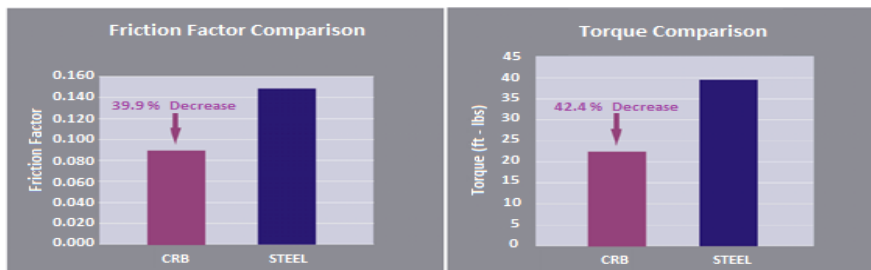
**FIGURA 28 Centralizador Después del pull test con 180,000 libras fuerza.**



*Fuente: (SPE 137028)*

Otras pruebas de superficie como las mostradas en la figura 30 Se llevaron a cabo para evaluar tanto la fricción y el torque en comparación con el acero. En la figura, los centralizadores demuestran una fricción y torque menor en comparación con el otro. Por lo tanto, se concluye que la utilización del centralizador facilita en gran medida el ejecutarlo en el revestimiento.

**FIGURA 29 Comparación de la reducción del factor de fricción y torque, entre el acero y CRB.**



*Fuente: (SPE 137028)*

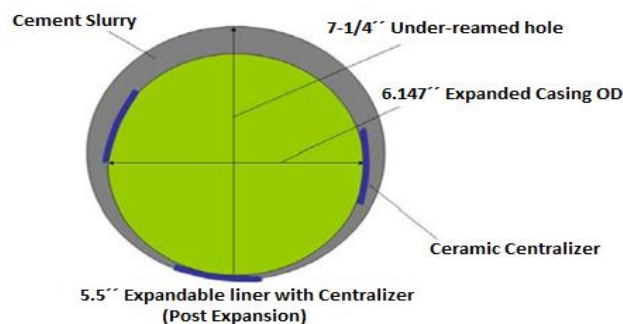
Además de los ensayos mencionados anteriormente, el producto también se sometió a ensayo de corrosión. La condición de prueba se describe a continuación fue para simular posibles condiciones de fondo en un ambiente muy corrosivo. (SPE 137028).

- Temperatura de ensayo = 200 ° F
- Presión de prueba = 500 psig
- Composición líquida = 10% NaCl salmuera
- Composición del gas = 5% de CO<sub>2</sub>, 15% de H<sub>2</sub>S, el 80% de N<sub>2</sub>
- Duración de la prueba = 6 días Después de la evaluación, se concluyó que el centralizador sería ideal para un revestimiento expansible debido a las siguientes características:

1. Los valores muy altos de adhesión a sustrato.
2. Resistencia a los impactos.
3. Alta dureza.
4. Flexibilidad.
5. Bajos coeficiente de fricción con reducción del torque y arrastre.

Cabe señalar que por lo general la lechada de cemento se bombea antes de que el revestimiento se expanda y por lo tanto, el cemento es colocado alrededor del revestimiento centralizado antes de la expansión, Como se muestra en la figura 31

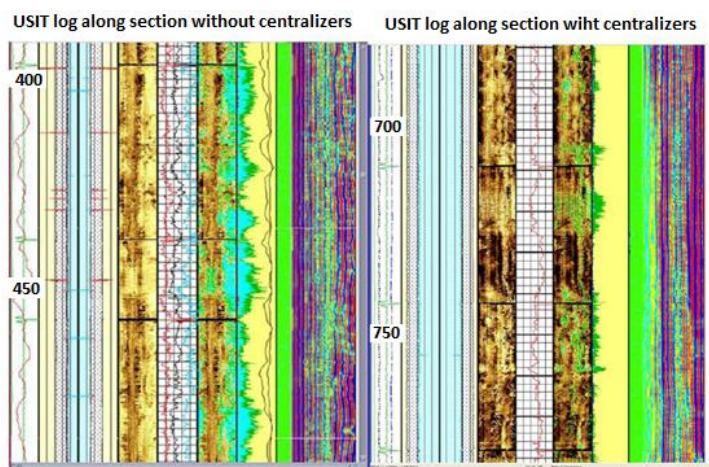
.FIGURA 30 Esquema de la situación de un liner de 5.5 in con centralizador.



Fuente: (SPE 137028)

Posteriormente La adherencia al cemento se comprueba mediante registros USIT ver figura 32, comprobando de esta manera la efectividad de usar los centralizadores no convencionales CRB respecto a no usarlos o usar los convencionales. Adicional a esto en la tabla 7 Se observa las propiedades físicas de la resina con compuestos cerámicos.

**FIGURA 31 Registro USIT con y sin CRBs.**



Fuente: (SPE 137028)

**TABLA 7 Propiedades físicas – Proguard Resina compuesta CRB.**

Test	Method	Value	Improvement
Direct Tensile Strength	ISO 527	38 Mpa	81%
Compressive Strength	EN 196-1	145 Mpa	48%
Flexural Strength	ISO 178-93	116 Mpa	22%
Impact Strength	ISO 179-93	11KJ/sq m	NA
Specific Gravity (Mixed Material)	ISO 2811-1	1.675	NA
Glass Transition Temperature		152° C following post cure	
Surface Conductivity		10 <sup>10</sup> – 10 <sup>12</sup> W	NA
Dielectric Strength	ASTM D149	>20 KV@1mm	NA
Abrasion Resistance		6 mg loss	60%
Static Coefficient of friction		0.18	NA
Hardness	Shore D	88	None
Adhesion to:			
Aluminium	ISO 4624	>20 Mpa – (Glue Failure)	NA
Carbon Steel	ISO 4624	>20 Mpa – (Glue Failure)	NA

Epoxy Glass Fibre Composite	ISO 4624	>20 Mpa – (Fibre Delamination)	NA
Viscosity: A Component (25°C)	ISO 9371B	30000 – 35000 mPa s	NA
Viscosity: B Component (25°C)	ISO 9371B	3400 – 5000 mPa s	NA

*Fuente: Halliburton.*

### 3.4. PRUEBAS DE CAMPO PRÁCTICAS ANTES DE USARSE EN UN POZO

Se necesita algún tipo de prueba práctica en campo para realizarle al material de resina compuesta antes de que realmente sea utilizado como centralizador en el pozo. Las características fundamentales que deben ser probadas son: la adhesión debido al riesgo de perder centralizadores en el pozo debido a que si no se posee el equipo para reemplazarlo se compromete el tiempo de la operación, mientras que la segunda característica para verificar es la resistencia al desgaste.

Una prueba práctica para evaluar estos factores se realiza para tratar de simular el desgaste y la resistencia irregular que el centralizador se encontraría mientras que desciende en el pozo. Se suministra un análisis de las fuerzas laterales de los programas, que se utilizaron como una línea guía para identificar las cargas requeridas para probar la resistencia al desgaste. Estas fuerzas se transformaron en valores de carga por cm<sup>2</sup> para determinar el centralizador, tamaño de muestra y los pesos necesarios para simular cargas laterales y las fuerzas que actúan sobre la tubería. Las pruebas se realizaron con centralizadores en forma miniatura ver figura 33 para aplicarles las pruebas y de esta forma sea más sencillo.

**FIGURA 32 Patín para prueba de desgaste (Izq.), Patín para pruebas preliminares (Der.)**



*Fuente: (R. Baynham, D. levie, Protech srl)*

#### 4. ESTUDIOS DE PRESION REALIZADOS A LOS DISPOSITIVOS

Las estimaciones de caída de presión por los componentes durante el proceso de perforación son críticas y de vital importancia. Durante las operaciones de perforación y cementación, muchos dispositivos de centralización, como centralizadores, rimadores, son ampliamente utilizados. Algunos de estos dispositivos se diseñan para mejorar la eficiencia de desplazamiento, o para reducir el torque y arrastre durante las operaciones de perforación y completamiento.

Pocos estudios han explorado las pérdidas de presión que surgen de estos dispositivos dispuestos en la sarta de perforación o casing, las cuales se suponen que son despreciables. La excentricidad entre el pozo y los dispositivos de centralización, la rotación, y los complicados diseños geométricos de estos dispositivos (irregulares y complejos), aumentan la dificultad de los cálculos de pérdidas de presión por fricción.

El siguiente estudio examina el efecto de los diferentes parámetros geométricos de los dispositivos comúnmente utilizados: la excentricidad, la rotación de los dispositivos, velocidad de flujo y las propiedades reológicas en la pérdida de presión anular utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD). Para flujo laminar, se utiliza la ecuación de Navier-Stokes 3D. El flujo turbulento se basa en el modelo k-w. En este estudio se presentó los resultados de la alteración y los efectos de varios modelos de reología en el perfil de flujo y las pérdidas de presión anulares.

La pérdida de presión en el anular por estos dispositivos puede ser insignificante, aunque en ocasiones el aumento de las pérdidas de presión producto de la gran cantidad de dispositivos de centralización es potencialmente perjudicial para la operación, se destaca la importancia de considerar las pérdidas de presión que se encuentran en el uso de estos dispositivos.

La mayor parte de las pérdidas por fricción se producen en la boquilla de la broca, y el resto se produce en la sarta de perforación. La pérdida por fricción es fácil de calcular después de que se conocen las propiedades del lodo. Sin embargo, varios dispositivos adicionales están unidos a la sarta de perforación o al revestimiento. Uno de esos dispositivos es el “stand-off device” (SOD), que puede incluir centralizadores, estabilizadores, rimadores, y dispositivos de reducción de fricción (Samuel, 2007).

Pozos cada vez más difíciles se están perforando hoy en día con un margen estrecho entre los poros y las presiones de fractura. Cuando se utilizan este tipo de dispositivos separadores de suaveo y las presiones surgencia de también deben tenerse en cuenta y se debe mantener dentro de los límites establecidos de la operación. Generalmente, la caída de presión anular causada por estos dispositivos es pequeña y se supone que es insignificante; sin embargo, para profundidades mayores, esta hipótesis subestima las pérdidas de presión con mayor caudal y una mayor cantidad de dispositivos stand-off (Samuel & Yao, Annular Pressure-Loss Predictions for Various Standoff Devices., 2008). Cuantificar las pérdidas por el uso de los centralizadores o reductores de fricción se hace necesario en virtud de prevenir problemas en operaciones de suaveo y surgencia.

En este trabajo, para el análisis de la caída de presión hemos considerado centralizadores sólidos rígidos como SOD (stand off device). Estos centralizadores están equipados con un collar con bisagras para mantener el casing en el centro del pozo. Por lo general constan de 4 a 8 hojas y permiten una cierta separación entre el borde del centralizador y el casing para reducir el torque y arrastre durante el viaje o las operaciones reciprocantes. La dificultad asociada con los cálculos de caída de presión es que estos dispositivos tienen diferentes formas, tamaños y configuraciones. Con geometrías complejas, una solución analítica no es posible, en consecuencia, se requiere un análisis numérico. El análisis caso de tubería de perforación concéntrica y el revestimiento ha sido realizada por (Yao & Samuel, 2008), y no se considera el efecto de la excentricidad y la rotación.

Cuando se utilizan este tipo de centralizadores rígidos, se les trata como tool-joints y la caída de presión a través de estos dispositivos se calcula considerando como partículas sólidas, incluso cuando sea complicada la geometría externa. Los efectos de la rotación son importantes debido a que el lodo de perforación es un fluido no newtoniano y muestra una disminución en la viscosidad al estar en presencia de este fenómeno. En este estudio se presenta los cálculos de caída de presión para fluidos newtonianos y no newtonianos con la ayuda de CFD (computational fluids dynamics); en condiciones de flujo laminar y flujo turbulento.

#### 4.1. CFD (computational fluids dynamics) MODELO Y MALLADO.

Para el presente estudio, se realizó un análisis de mecánica de fluidos usando un paquete de software comercial. Un tipo de SOD se utilizó para el análisis en este estudio. La geometría total de la simulación se muestra en la figura.34. en la que una SOD se une al casing. La Tabla 8 Enumera la geometría del “blade” considerado. Los SOD considerados tienen cuatro hojas, y se analizaron varios ángulos de giro de menores de 45 °.

**TABLA 8 Especificaciones geométricas stand-off device**

SOD OD (in)	SOD ID (in)	SOD Largo (in)	Blade Ancho (in)	Espacio radial (in)
<b>8.25</b>	5.5	8	0.5	1/3

*Fuente: (IADC/SPE 112544)*

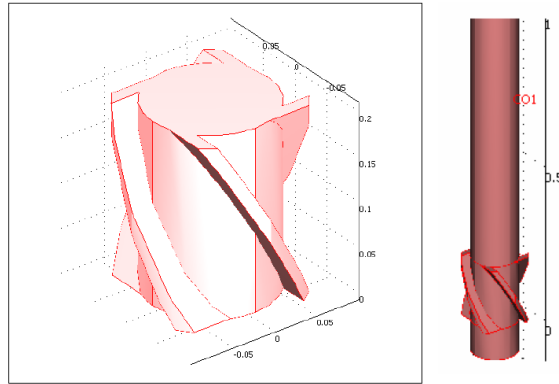
Para obtener resultados precisos, las simulaciones deben ser independientes de tamaño de malla. Por consiguiente, malla fina debe ser utilizado en las regiones estrechas. Para este propósito, en el área cerca de las hojas (blades) y los límites de tubería se utiliza mallas finas adicionales, en comparación con el resto de la geometría ver figura 35 Y figura 36 El número de puntos de malla utilizadas en las simulaciones osciló entre 200.000-300.000 aproximadamente, para el caso de la tubería con rotación.

La simulación de la tubería en requiere un gran número de puntos de malla cerca de la tubería interior y exterior debido a que los gradientes de velocidad son más altos en estas regiones. Los puntos de malla son aproximadamente 1,5 millones; por lo tanto para reducir el tiempo de simulación, toda la geometría se divide en tres secciones. En la primera sección, se realizan simulaciones para las condiciones de velocidad desarrolladas en el espacio anular.

La velocidad de salida de la primera sección sirve como la velocidad de entrada a la segunda sección, que contiene una SOD unido al tubo interior. La tercera sección tiene el mismo anular como la primera sección, pero su aumento de la longitud es suficiente para crear un perfil de velocidad completamente desarrollado. La longitud de la tercera parte es de aproximadamente 0,3 m a 1 m. La longitud requerida para un flujo totalmente desarrollado depende del número de Reynolds (Bird, 2002). El mallado generado para la simulación son principalmente hexaedro o piramidal triangular. Sólo las ecuaciones de balance de momento se resuelven y, debido a que la temperatura se supone que es constante, y el balance de energía no es necesario (en caso de fluido no newtoniano y turbulencia). Las simulaciones se llevaron a cabo hasta que la presión media en la entrada y la salida se mantuvo constante con iteraciones. Esto se hace para minimizar el error en la predicción de la caída de presión.

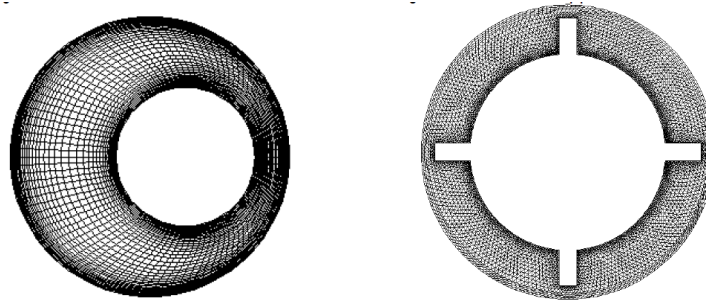
Para aumentar la confianza y exactitud en los resultados simulados, su precisión se cotejará con los resultados analíticos disponibles para casos concéntricos. En el caso de la excentricidad, ya que no existe solución analítica disponible, se redujo continuamente el tamaño de la malla hasta que se observó un cambio en la caída de presión para confirmar la exactitud de la solución.

**FIGURA 33 SOD con giro de 30° (Izq.). SOD unido a la tubería (Der).**



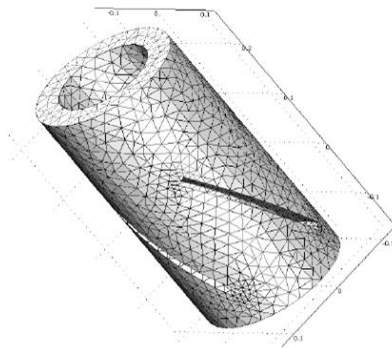
*Fuente: (IADC/SPE 1125)*

**FIGURA 34 Mallado por flujo en un anular excéntrico son SOD (Izq.). Mallado para tubería con SOD dispuesto en el casing (Der).**



*Fuente: (IADC/SPE 112544)*

**FIGURA 35 Zonas de mallas.**



*Fuente: (IADC/SPE 11254)*

### **Flujo de fluido a través del anular.**

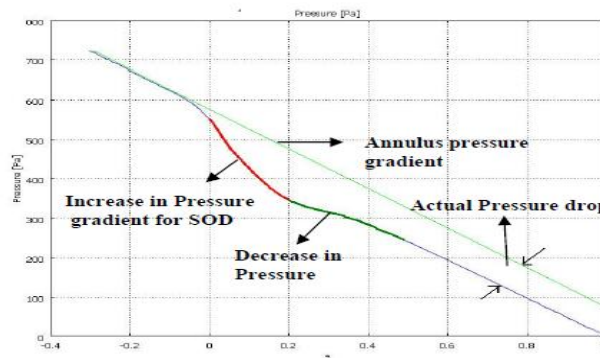
El flujo de fluido en el espacio anular con tubería concéntrica puede ser modelado por ecuaciones diferenciales (3D-ecuaciones de Navier Stokes para la continuidad y el equilibrio del momento) y, finalmente, puede ser resuelto de forma explícita para la velocidad o el perfil de presión.

Sin embargo, los diversos casos de excentricidad y centralización, requiere métodos numéricos para calcular el campo de flujo y perfil de presión. Es necesario analizar la forma en que la velocidad y el perfil de presión varían si un frente de velocidad completamente desarrollado se acerca al SOD.

Como la velocidad del frente se aproxima al SOD, se observa una aceleración de fluido debido a la reducción en el área de la sección transversal. Cuando el fluido sale de la SOD, la velocidad comienza a disminuir. Por consiguiente, el fluido se somete a la aceleración y deceleración durante el flujo a través de la SOD. Debido a la superficie adicional de la hoja de SOD, que aumenta la caída de presión por fricción y la variación de la presión resultante de la aceleración y desaceleración tienden a cancelarse entre sí. Este proceso se muestra en la presión y los perfiles de velocidad que se ilustran en las siguientes figuras, respectivamente, para un caso simulado en particular.

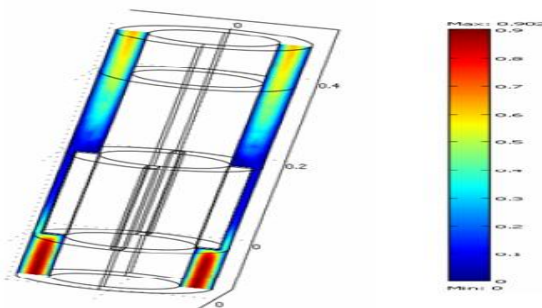
En la figura 37 Se observan las variaciones de presión. Como se muestra en el perfil de presión, la línea roja indica la ubicación de la SOD en la que se observó un aumento del gradiente de presión. Después de pasado el SOD, gradiente de presión disminuye y después de cierto período, el gradiente de presión alcanza un valor constante. La caída de presión adicional real es básicamente la diferencia entre la caída de presión del anular con el SOD y la caída de presión del anular sin SOD Ver figura 38 La longitud requerida para alcanzar las condiciones de flujo completamente desarrolladas depende del número de Reynolds.

**FIGURA 36** Variación de la presión en dirección axial producto del flujo en el anular.



Fuente: (IADC/SPE 112544)

**FIGURA 37** Perfiles de velocidad para un blade recto SOD.



Fuente: (IADC/SPE 112544)

## RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.

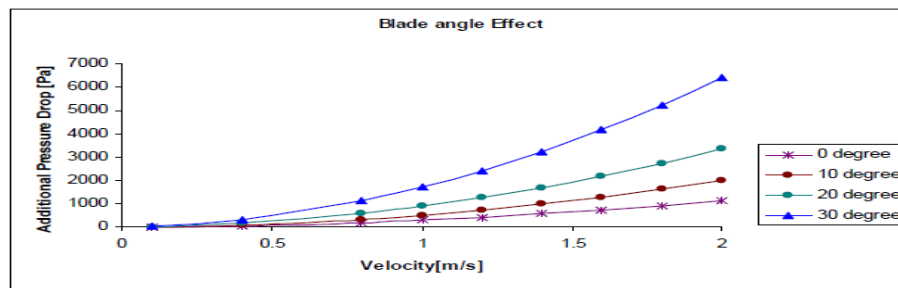
Para el cálculo de pérdidas de presión adicionales causados por un SOD, varias simulaciones fueron realizadas tanto con los fluidos newtonianos y no newtonianos. Los parámetros considerados para las simulaciones incluyen el ángulo de giro del “blade”, ancho de hoja, longitud de la hoja, la velocidad mayor del fluido, la excentricidad y la rotación de la tubería. Las pérdidas de presión en el anular también se calculan para el análisis completo.

### 4.2. FLUIDO NEWTONIANO

Para esta simulación se utiliza un fluido newtoniano con una densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup> y una viscosidad de 0,1 (Pa · s). Las simulaciones se realizaron para diversas SOD a diferentes velocidades de flujo del anular. Se estudiaron varios casos donde la tubería se encontraba en posiciones concéntricas y excéntricas. La

figura muestra una caída de presión adicional a la SOD cuando la tubería es concéntrica. Se puede ver en la figura que las pérdidas de presión aumentan cuadráticamente con la velocidad. Para estudiar el efecto del ángulo de giro del blade en la pérdida de presión. La figura 39 Muestra la caída de presión frente a la velocidad del fluido para varios ángulos de giro del blade; indica que el aumento en la pérdida de presión es mayor en el caso de ángulo de torsión de 20 ° a 30 °, en comparación con los ángulos de giro del blade de 0 ° a 10 °. Este hallazgo pone de manifiesto que las pérdidas de presión aumentan exponencialmente con el aumento en el ángulo de giro de la hoja.

**FIGURA 38 Caída de presión adicional producto de geometrías del blade.**

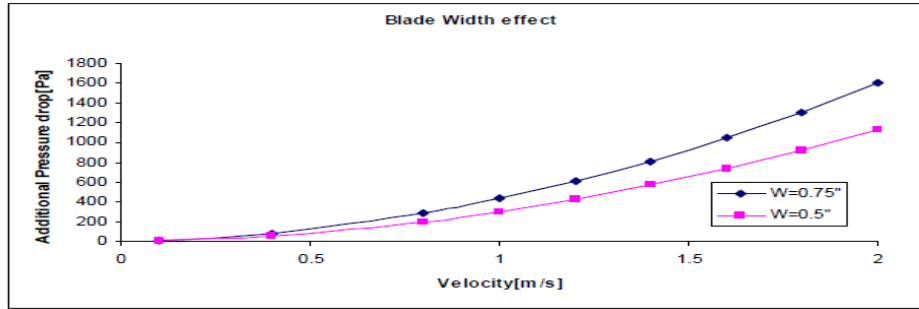


Fuente: (IADC/SPE 112544)

### 4.3. ANCHO DE HOJA

El aumento en ancho de la lámina se traducirá en una velocidad de flujo más alta en la región de SOD debido a la menor área de sección transversal disponible para el flujo de fluido. La reducción de área de la sección transversal del canal hace que la velocidad a través de la SOD resulte en un incremento de las pérdidas de presión por fricción como se esperaba. La figura 40 Muestra simulaciones para anchos de hoja de 0,75 pulgadas y 0,5 pulgadas, la siguiente figura muestra que las pérdidas de presión son mayores para el ancho de la hoja de 0,75 pulgadas que para 0.5 pulgadas.

**FIGURA 39 Efecto del ancho de la hoja en la caída de presión adicional.**

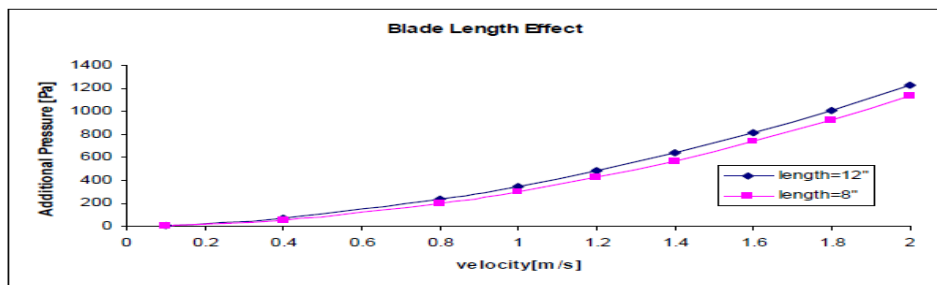


*Fuente: (IADC/SPE 112544)*

#### 4.4 LONGITUD DE HOJA

Se llevaron a cabo varias simulaciones para diferentes longitudes de “blade” manteniendo el ancho de la hoja constante. Estas simulaciones se repitieron durante varias anchuras de la lámina y velocidades del fluido constantes. La figura 41 muestra las pérdidas de presión para longitudes de blade de 12 pulgadas y 8 pulgadas; aumento en la longitud de la hoja resulta en un aumento en la pérdida de presión, y el porcentaje de aumento es apreciable en comparación con los casos en la variación de anchura de la lámina, lo que se le atribuye a las características observadas en la figura. El cambio en el gradiente de presión se produce en la entrada de la SOD y se ve afectada en gran medida por la anchura de la lámina. El aumento de la longitud de la hoja proporciona más superficie que aumenta las pérdidas por fricción, pero no cambia el gradiente de pérdida de presión.

**FIGURA 40 Efecto del largo de la hoja en la caída de presión adicional.**



*Fuente: (IADC/SPE 112544)*

#### 4.5. EFECTOS DE LA EXCENRICIDAD EN LA CAIDA DE PRESION

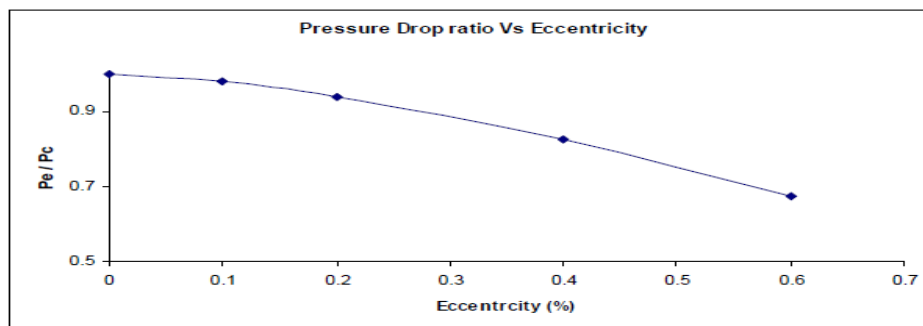
Los efectos de la excentricidad en el flujo de fluidos por el anular están bien estudiados (Peden, 1987). No existe una solución exacta, se utilizan soluciones aproximadas. Sin embargo, las simulaciones numéricas se han realizado para analizar los efectos excéntricos sobre el flujo de fluido en el anular utilizando SOD. La siguiente figura muestra una variación del gradiente de pérdida de presión en el anular con diferente  $\varepsilon$  excentricidad (%). La excentricidad se define por la siguiente ecuación. Y el gradiente de pérdida de presión disminuye con el aumento de la excentricidad (centralización).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{R_o - R_i} \quad (22)$$

Donde  $\delta$  es desviación (offset) del eje la tubería del eje exterior (hueco).

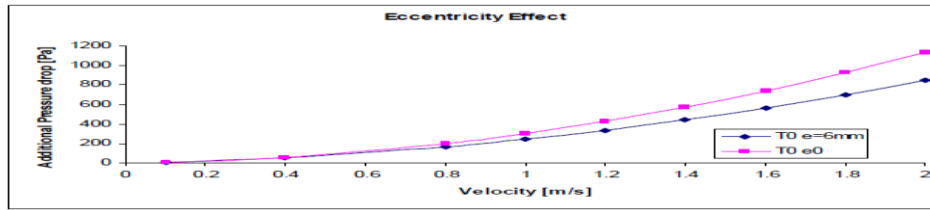
La figura 43 Muestra el efecto de la excentricidad en un blade recto ( $0^\circ$  de giro), y la figura 44 muestra el efecto de la excentricidad en un ángulo de trenzado o giro de la hoja de  $30^\circ$ . Hay una disminución en la pérdida de presión y la disminución de la pérdida de presión es mayor en el caso de la hoja torcida, en comparación con la hoja recta del dispositivo stand-off. Las simulaciones se llevan a cabo para una tubería cuya la excentricidad es de 3 mm ( $\varepsilon = 8,5\%$ ) y 6 mm (17%).

**FIGURA 41 Efecto de la excentricidad en el gradiente de pérdida de presión anular para un fluido newtoniano.**



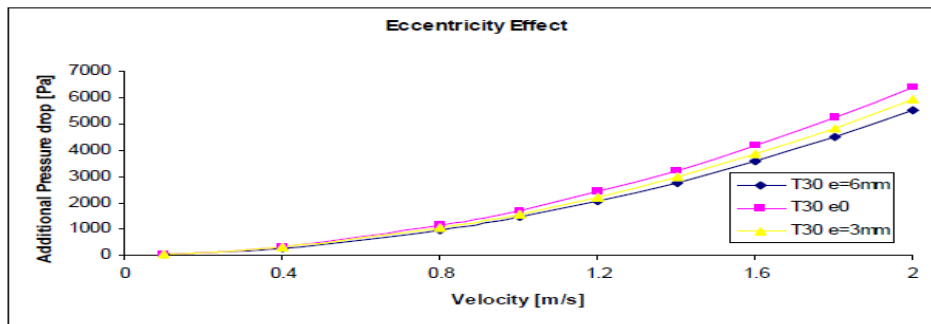
Fuente: (IADC/SPE 112544)

**FIGURA 42 Efecto de la excentricidad para un blade recto (0° de giro).**



Fuente: (IADC/SPE 112544)

**FIGURA 43 Efecto de la excentricidad para un blade con ángulo de giro = 30°**



Fuente: (IADC/SPE 112544)

#### 4.6. FLUIDO NO NEWTONIANO Y EFECTO DE LA ROTACION EN LA TUBERIA

El efecto de la excentricidad con fluido no newtoniano puede alterar la caída de presión por fricción. Para tener un caso base, se realizaron simulaciones iniciales para el flujo de fluido en el anular sin rotación de la tubería interior. La viscosidad del fluido se calcula por la tabla 9 y para un fluido no newtoniano se utiliza el modelo de ley de potencia. La densidad utilizada para el análisis es la misma que la del fluido newtoniano.

**TABLA 9 Reología del fluido no newtoniano.**

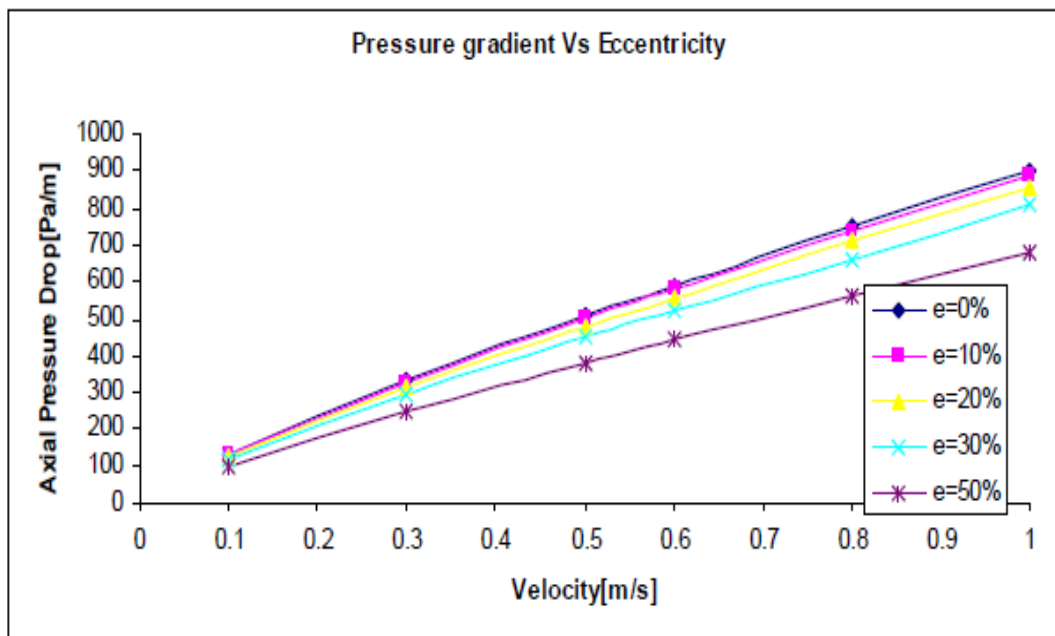
R600	R300	R200	R100	R6	R3	n	K (lbs-s/100 ft <sup>2</sup> )
123	70	50	29	4	3	0.83	0.407

Fuente: (IADC/SPE 112544)

La figura 45 Muestra efecto excéntrico para diversas velocidades del fluido en el anular. La figura 46 representa una caída de presión por fricción, con la variación del índice  $n$  en la ley de potencia. Al aumentar  $n$  disminuye las pérdidas de presión por fricción (Escudier et al. 2001). Esto está de acuerdo con las características adelgazamiento viscoso del fluido no newtoniano. En pequeñas excentricidades, se observa que el cambio en la pérdida de presión por fricción es mínimo, sin embargo, para excentricidades de mayor que 20%, se observó una disminución significativa en la pérdida de presión por fricción.

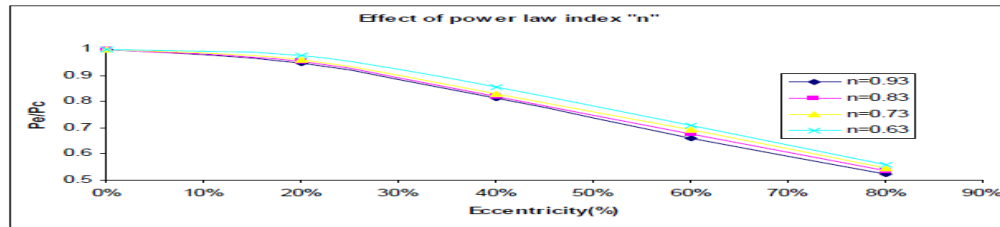
Como se ve las pérdidas de presión por fricción con mayor excentricidad y con SOD de los fluidos newtonianos, los fluidos no newtonianos también mostraron el mismo comportamiento. Para la hoja recta, la pérdida de presión por fricción adicional disminuye a medida que aumenta la excentricidad. A velocidades pequeñas, esta diferencia no es significativa, pero a velocidades más altas disminución es significativa y no se puede descuidar.

**FIGURA 44 Efecto de la excentricidad en un fluido no Newtoniano.**



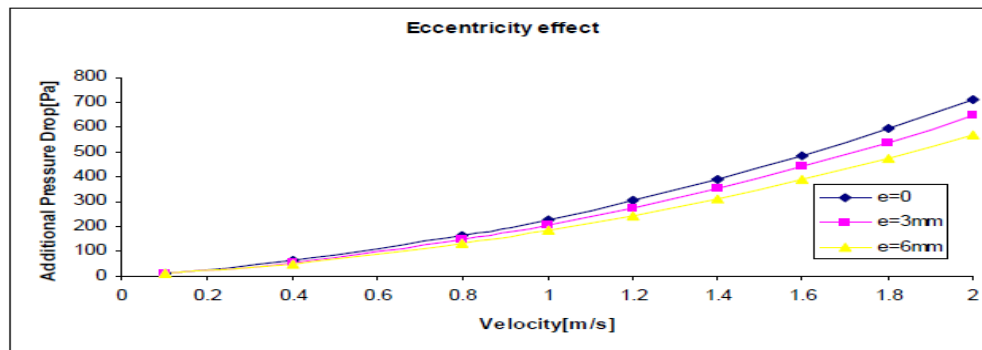
Fuente: (IADC/SPE 112544)

**FIGURA 45 Variación de las pérdidas de presión del anular con la ley de potencia  $n$ .**



Fuente: (IADC/SPE 112544)

**FIGURA 46 Caídas de presión teniendo en cuenta el efecto de excentricidad (fluido no newtoniano).**



Fuente: (IADC/SPE 112544)

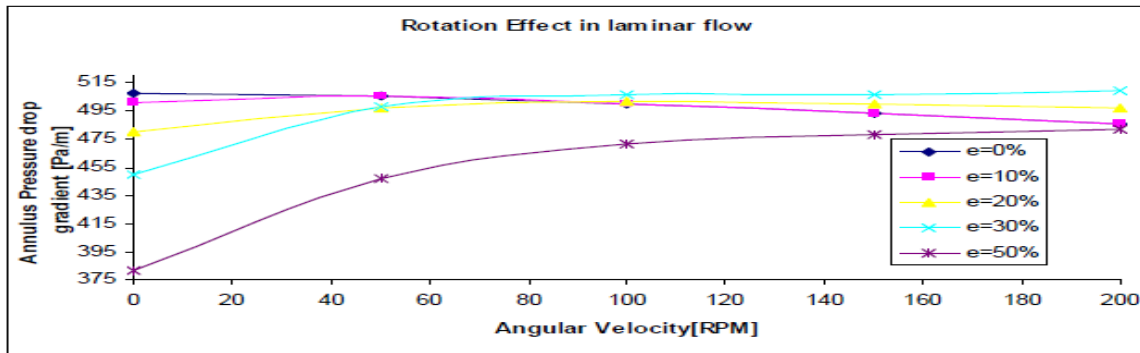
#### 4.7. EFECTO DE LA ROTACION

El uso de fluidos no newtonianos con características de adelgazamiento viscoso resultará en una disminución en el gradiente de presión anular. Sin embargo, esto es cierto en el caso a condiciones de la tubería concéntrica; pero con diferentes excentricidades y rotación de la tubería, el cambio en el gradiente de pérdida de presión anular es apreciable. Se llevaron a cabo extensas simulaciones para diferentes excentricidades y velocidades de rotación en el régimen de flujo laminar. La figura 48 muestra que para los casos concéntricos siempre hay una disminución de la gradiente de la caída de presión por fricción a medida que aumenta la rotación de la tubería.

Sin embargo, cuando aumenta la excentricidades, el gradiente de la caída de presión aumenta primero y luego disminuye con el aumento de la velocidad de

rotación de la tubería. El gradiente de presión es más alto a baja excentricidad. Además, es evidente que la rotación en la que se produce gradiente de presión máxima obtiene valores más altos como resultado de los efectos de fluidización por cizallamiento.

**FIGURA 47 Variación de la caída de Presión anular de la tubería en rotación en régimen laminar.**



Fuente: (IADC/SPE 112544)

Para estudiar el efecto de la rotación de la tubería de flujo de fluido en régimen turbulento, se utiliza de rotación y número de Reynolds se define como

$$T_a = \frac{\rho * R_i * \omega * D_h}{\mu_r} \quad (23)$$

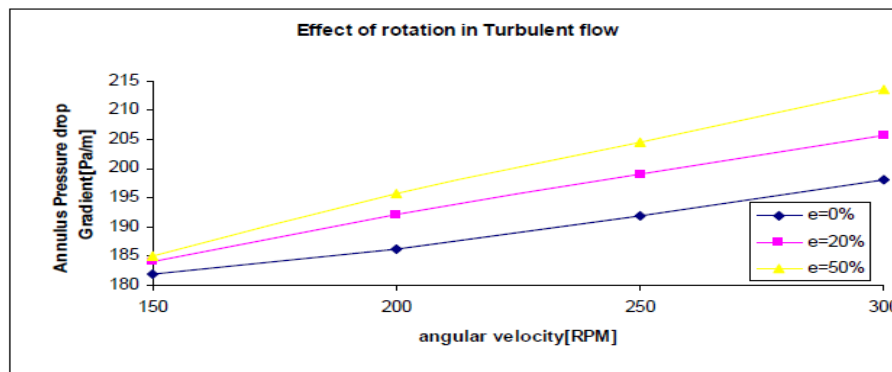
Al aumentar la rotación de la tubería aumenta de dilución por cizallamiento y por lo tanto después de alcanzar el umbral mínimo de velocidad de rotación, el régimen de flujo de fluido se convierte en turbulento debido a la disminución de la viscosidad y el aumento de la velocidad angular. Además, la viscosidad en la pared será mínima producto de la dilución por cizallamiento. Para analizar la turbulencia del fluido condiciones de flujo de la simulación se lleva a cabo con  $k = 0,1$  y  $n = 0,7$  y la velocidad de rotación mayor que 150. El modelo  $k-\omega$  se utiliza para simular la turbulencia.

La figura .49. muestra el gradiente de la caída de presión del anular (concéntrico) en condiciones de flujo turbulento con la velocidad del fluido axial mayor de 0,5 m / s. Un examen detallado muestra que con un aumento en la velocidad angular, hay

un aumento en el gradiente de la caída de presión. Este comportamiento se produce debido a la turbulencia en el flujo de fluido. (McCann et al 1995;. Hemphill y Ravi 2005).

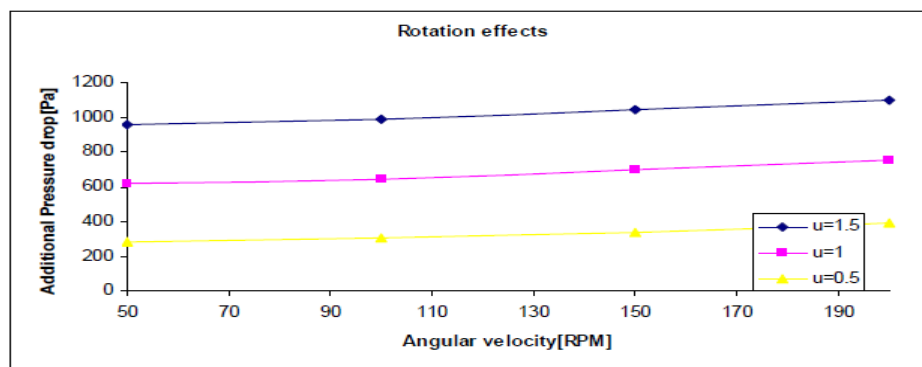
Se llevaron a cabo simulaciones adicionales para diversas rotaciones interiores de la tubería, junto con SOD unido a la tubería. El régimen de flujo en este caso ya no sigue siendo laminar debido a la rotación del blade. Por lo tanto, se observa un aumento de la caída de presión adicional con la rotación de la tubería. Se llevaron a cabo simulaciones para diferentes velocidades axiales y velocidad de rotación. Un examen detallado en la figura 50 Muestra que la caída de presión aumenta linealmente con la velocidad de rotación del tubo.

**FIGURA 48 Variación de la caída presión anular de la tubería en rotación en régimen turbulento.**



Fuente: (IADC/SPE 112544)

**FIGURA 49 Efecto de la tubería en rotación con SOD.**



Fuente: (IADC/SPE 112544)

## Discusión.

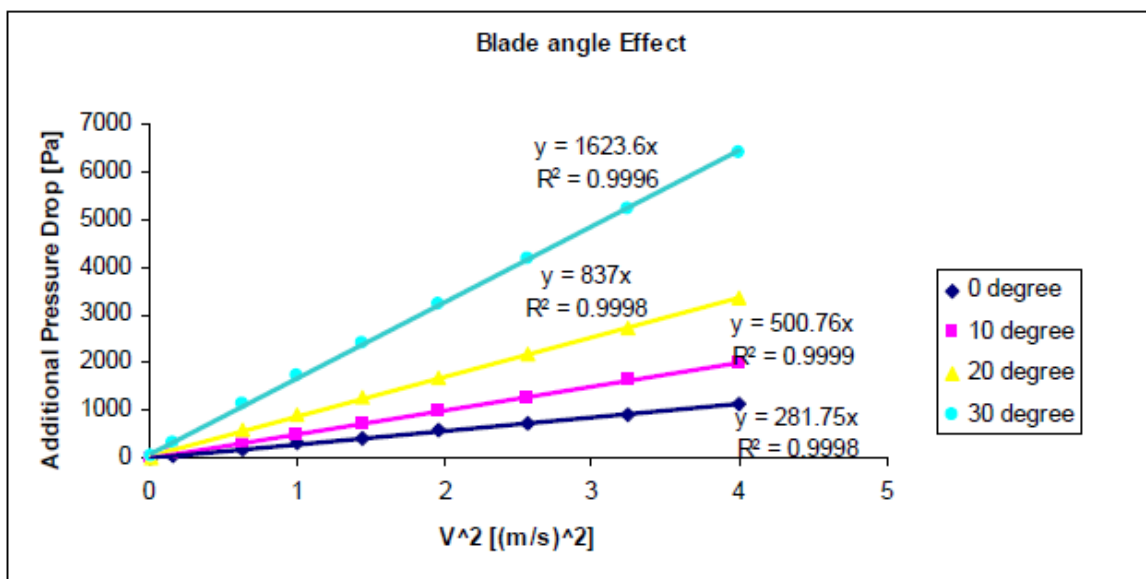
Los resultados de la simulación muestran que la presión cae debido a los SOD con aumento de la anchura del blade, longitud, velocidad y velocidad angular tubería. Disminuye cuando el SOD son excéntricos en el hueco. El efecto paramétrico de varias variables se muestra en la Tabla .10. El centralizador sólido rígido de blade recto con las especificaciones dadas , se da por el modelado de casos de base. Caída de presión adicional se modela como:

$$P_{add} = K(v, L, w, \omega, \varepsilon)V^2 \quad (24)$$

Donde K es el coeficiente de caída de presión y V la velocidad axial en el anular.

La estimación del valor de K está más allá del alcance de este tema. En este estudio, la estimación de los valores de K se limita a las simulaciones individuales. En la tabla 10 se mostraron los valores de K para varios casos con diferentes ángulos de blade, anchuras, longitudes y velocidades de rotación que se obtuvieron mediante regresión lineal, como se muestra en la figura 51.

**FIGURA 50 Regresión lineal para el ajuste del modelo para diferentes hojas.**



Fuente: (IADC/SPE 112544)

**TABLA 10**Efecto-Paramétrico.

<b>TABLA Efecto-paramétrico en la caída de presión adicional</b>		
<b>Angulo de la hoja</b>	<b>K</b>	<b>K (ratio)</b>
Angulo de giro = 0°	281.75	1
Angulo de giro = 10°	500.76	1.77
Angulo de giro = 20°	837	2.97
Angulo de giro = 30°	1623.6	5.76
<b>Ancho</b>		
Hoja recta espesor w=0.5 in	281.75	1
Hoja recta espesor w=0.75	406.2	1.45
<b>Excentricidad</b>		
Angulo de giro =30° ε=0	1623.6	1
Angulo de giro=30° ε=8.5%	1499	0.92
Angulo de giro=30° ε=17%	1397	0.86
<b>Largo</b>		
Hoja recta largo L=8 in	281.75	1
Hoja recta largo L=12 in	303	1.08
<b>Efecto de la rotación</b>		
	Incremento de la presión rpm = 50	Caída de presión adicional
Hoja recta v=0.5 m/s	203	0.7ω +241
Hoja recta v=1.0 m/s	518	0.89ω +566
Hoja recta v=1.5 m/s	393	0.97ω +898

*Fuente: (IADC/SPE 112544)*

A partir de los datos incluidos en la Tabla 10, se realizaron varios casos de estudio. El siguiente ejemplo numérico ayuda a ilustrar la utilidad práctica del estudio. Estudio de caso # 1 muestra que a pequeña velocidad de flujo anular, las pérdidas de presión adicionales que se le atribuye al SOD no son significativas. Sin embargo, un alto caudal en el anular la caída de presión es aproximadamente

1.6 psi / SOD. La excentricidad de la SOD se traduce en una reducción de la caída de presión en un 5 a un 10%.

En el caso de estudio 2, el número de dispositivos se duplica y los resultados de excentricidad en una diferencia de 42 psi, en comparación con el caso con excentricidad cero (a 2 m / s de velocidad). Estudio de caso # 3 muestra el efecto de rotación para fluidos no newtonianos. El Incremento de la caída de presión es significativo, y aumenta con el aumento de la velocidad.

#### 4.8. CASOS DE ESTUDIO

##### Caso de estudio # 1

Numero de SOD= 50; Espacio entre dos SOD adyacentes = 80 ft; Angulo del blade= 30°; longitud del blade= 12 in; Ancho del blade = 0.75 in; Densidad del Fluido newtoniano = 1000Kg/ft<sup>3</sup>; Viscosidad = 0.1 md.

TABLA 11 Caso de estudio 1.

TABLA				
Velocidad (m/s)	Perdida de presión sin SOD (psi)	Perdida de presión sin SOD e= 0 (psi)	Perdida de presión sin SOD e= 3 mm (psi)	Perdida de presión sin SOD e= 6 mm (psi)
0.5	94.85	99.35	97.29	93.71
1	189.71	207.73	203.28	196.27
1.5	284.56	325.1	317.69	306.92
2	379.42	451.49	440.5	425.53

*Fuente: (IADC/SPE 112544)*

##### Caso de estudio # 2

Numero de SOD= 80; Espacio entre dos SOD adyacentes = 80 ft; Angulo del blade= 30°; longitud del blade= 12 in; Ancho del blade = 0.75 in; Densidad del Fluido newtoniano = 1000Kg/ft<sup>3</sup>; Viscosidad = 0.1 md.

TABLA 12 Caso de estudio 2.

<b>TABLA</b>				
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Perdida de presión sin SOD (psi)</b>	<b>Perdida de presión sin SOD e= 0 (psi)</b>	<b>Perdida de presión con SOD e= 3 mm (psi)</b>	<b>Perdida de presión con SOD e= 6 mm (psi)</b>
0.5	151.77	158.98	155.67	149.94
1	303.53	332.36	325.24	314.03
1.5	455.3	520.16	508.32	491.07
2	607.07	722.38	704.8	680.84

*Fuente: (IADC/SPE 112544)*

### Caso de estudio # 3

Numero de SOD= 100; Espacio entre dos SOD adyacentes = 80 ft; Angulo del blade= 0°; longitud del blade= 8 in; Ancho del blade = 0.5 in; Fluido no newtoniano = 0.2 Pa – s  $n=0.83$ .

TABLA 13 Caso de estudio 3.

<b>TABLA</b>				
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Perdida de presión sin SOD e= 0 (psi)</b>	<b>Perdida de presión con SOD e= 0 (psi)</b>	<b>Perdida de presión con SOD e= 0, rpm=200 (psi)</b>	<b>Perdida de presión con SOD e= 0, rpm=200 (psi)</b>
0.5	189.71	190.9	2.9	4.09
1	379.42	382.71	5.8	9.09
1.5	569.13	575.45	8.7	15.02
2	758.84	769.1	11.6	21.86

*Fuente: (IADC/SPE 112544)*

La simulación CFD (computational fluids dynamics) y cálculos de caída de presión realizadas para SOD indican que los centralizadores sólidos pueden dar lugar a una caída de presión por fricción significativa a velocidades del fluido moderadas

y elevadas. Los fluidos newtonianos y no newtonianos resultan en pérdidas de presión similares cuando no hay rotación. Sin embargo, la rotación de la tubería y la rotación SOD afectan significativamente los cálculos de caída de presión. Con base en el análisis anterior, se puede concluir:

- La excentricidad disminuye el gradiente de la caída de presión del anular.
- La rotación de la tubería resulta en una disminución del gradiente de la caída de presión en el régimen de flujo laminar.
- Los casos excéntricos resultan en aumento de gradiente de caída de presión seguido de disminución, por lo tanto, existe una velocidad angular donde el gradiente de caída de presión alcanza el valor máximo. La velocidad angular a la que el gradiente máximo se produce también aumenta con el incremento de la velocidad del fluido.
- La pérdida de presión causada por los SOD disminuye con la excentricidad y es significativa con un aumento de velocidad de flujo.
- Los SOD unidos a la tubería interna, cuando se somete a rotación, pueden ocasionar un régimen de flujo turbulento y por lo tanto resulta en aumento de la velocidad angular que se traduce un aumento en la caída de presión adicional.
- Cálculo de caída de presión muestra que solo un dispositivo no causa pérdidas de presión importante. Sin embargo, cuando se utilizan gran cantidad de SOD las caídas de presión pueden ser significativas y no pueden ser descuidados.

## **5. ESTUDIO DE SIMULACION A ESCALA DE POZO EN CORRIDA DE CASING REAL**

### **5.1. INSTALACIÓN CASING RESING BLEND**

La implementación de esta tecnología inicia evaluando las tuberías que son aptas para este procedimiento, esto mediante un diagnostico basado en pruebas previamente realizadas; al discretizar las propiedades del casing , para realizar un proceso de Sandblasting el cual consiste en un tratamiento micro-abrasivo Ver

figura .52. en las zonas específicas donde se va a disponer los reductores de fricción. Al acondicionar la superficie mediante la abrasión con arena (Sandblasting), se sitúan los moldes sobre las zonas y la resina es inyectada mediante una bomba, ya previamente mezclado los productos químicos que la componen, dándole un tiempo de fraguado cercano a las 2 horas.

**FIGURA 51 *Proceso de Instalación de Casing Resin Blend.***

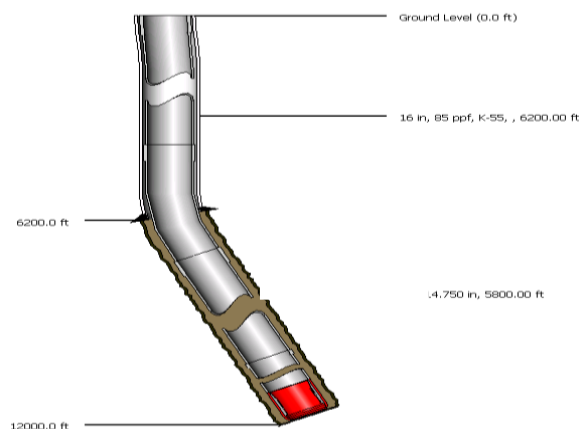


*Fuente: Halliburton.*

Las simulaciones realizadas tienen como objetivo, mostrar los resultados y cuantificar la eficiencia de obtenida al utilizar la tecnología CRB Protech en el casing de 11 ¾ a 12000 MD en el pozo ver figura .53. . Para ello se hace indispensable simular la corrida del revestimiento sin implementar la tecnología y empleando los reductores de fricción; los cuales tienen la siguiente disposición y configuración:

- 12 CRB Protech 11 ¾ x 13 ½ pulgadas, los cuales se sitúan en cada junta entre los 300 y los 800 fts.
- 12 CRB Protech 11 ¾ x 13 ½ pulgadas, que se disponen en los últimos 500 ft de tubería.

**FIGURA 52 Esquema Casing 11 3/4 . Schematic Wellplan.**

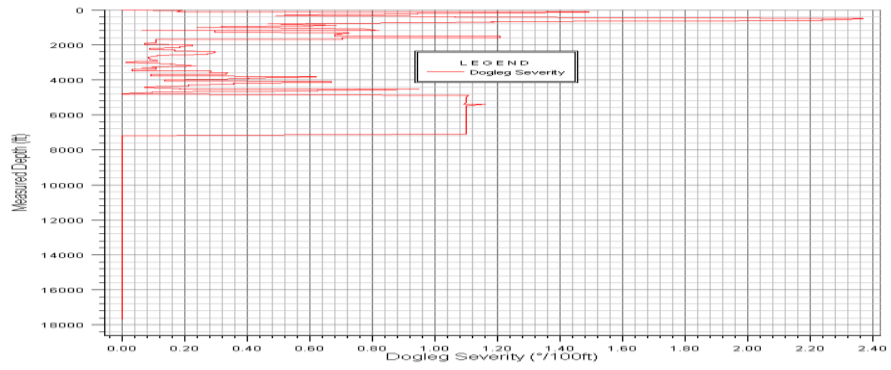


*Fuente: Halliburton.*

La geometría del pozo es la de un tipo jota “J”, la zona 1 o vertical zone hasta los 4800 ft MD donde se encuentra el KOP (kick of point), inmediatamente se inicia la construcción de de ángulo hasta los 7200 ft de la MD (Measured depth) o bien llamada zona de build up; por último se prolonga la zona tangencial o “hold zone” de mantenimiento de ángulo hasta los 12000 ft MD. La fuerza lateral es una fuerza paralela a la trayectoria del casing, producida por un la tubería y las paredes del pozo (cubierto o desnudo) en las curvas. La fuerza de viraje es generada por el deslizamiento de la tubería y es proporcional al ángulo de deslizamiento. El ángulo de deslizamiento describe la deformación de la superficie de contacto, el cual es muy significativo en los primeros 1600 fts de la Measured depth ver figura 54. El Dogleg severity consiste en una estimación normalmente descrita en grados por cada 100 pies o 30 pies, indicando la variación de la curvatura general del hoyo, entre dos estaciones de surveys direccionales consecutivas.

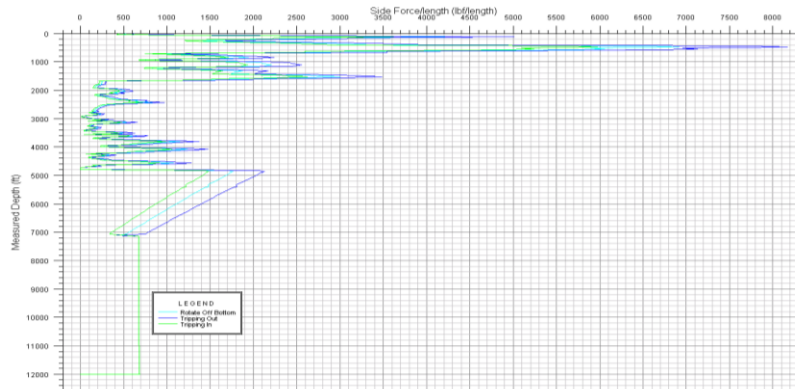
De acuerdo con una planificación de perforación de pozo, la severidad de pata de perro es sinónimo de la tasa de Giro y/o construcción de la curvatura de pozo, por tal razón está fuertemente ligado a la fuerza lateral (side force) y tiene su misma tendencia ver figura 56.

**FIGURA 53 Efecto de la geometría e inclinación del pozo.**



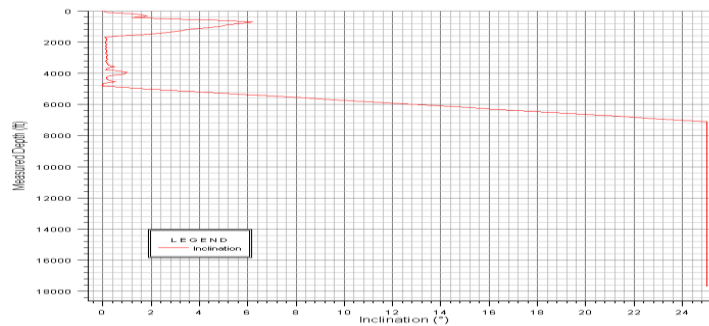
Fuente: Halliburton.

**FIGURA 54 Efecto de la Fuerza lateral o side force.**



Fuente: Halliburton.

**FIGURA 55 Efecto Dogleg Severity en la Measured Depth .**



Fuente: Halliburton.

## 5.2. ENTRADAS DE SIMULACIÓN

La tabla 14 Es la recolección y tabulación de los datos de entrada es una de las tareas más importantes cuando se aborda la solución de un problema real, ya que de ello depende la exactitud y veracidad de los resultados. La primera etapa es, la identificación de los límites o cotas del sistema; implica la recopilación de datos que describen las diferentes variables de entrada, obtenidos de campo y/o laboratorio. Los datos utilizados en la simulación de la corrida del revestimiento se presentan a continuación.

**TABLA 14 Datos de simulación. (Halliburton)**

<b>Entradas de la simulación</b>	
Peso del bloque (kip)	80
Rotación Bajando y Subiendo (ft/min)	10
Velocidad de corrida Bajando y Subiendo (ft/min)	40
Máxima Inclinación (°)	25.5
Máximo Azimut (°)	101.6
<b>Random Inc Dependent on Azimuth</b>	
Angle Change period (ft)	500
Depth Interval (ft)	30
Magnitud (°)	0.8
Circulación durante la corrida (gpm)	150
Lodo base aceite (ppg)	13.5
Temperatura (°F)	202
VP (cP)	50
YP (lbf/100ft <sup>2</sup> )	28

Fuente: (Halliburton)

## 5.3. HOOK LOAD (Kip)

La práctica en el campo muestra que el arrastre axial depende directamente de la velocidad del viaje y la carga del gancho; que se traduce en fuerza friccional opuesta al vector velocidad y a la dirección de desplazamiento.

El margen de sobretensión u overpull, consiste en una tensión adicional a ser aplicada cuando se está tratando de sacar una sarta pegada sin romper los límites de tensión de la tubería de perforación. Esta es la diferencia entre la carga de tensión máxima permisible de la sarta y la carga del gancho, por tal razón es conveniente que este margen sea más amplio; beneficio que me otorga el uso de los CRB, lo cual se puede concluir al comparar el Overpull margin (tripping out) en ambas simulaciones (con y sin el uso de la tecnología) dando como resultado un aumento de 20.2 kip en la tolerancia.

Existen dos factores primordiales para cuantificar el arrastre en una operación de corrida del revestimiento, los cuales son pick-up weight o peso de recogida y el slack-off o peso estacionario; como se observa en las figuras 57 y 58 Estos parámetros muestran un mejor comportamiento en la simulación de la corrida del revestimiento donde se usaron los reductores de fricción, puesto que los valores son mucho menores a los de la simulación sin CRB. Dichos datos se presentan en la tabla 15.

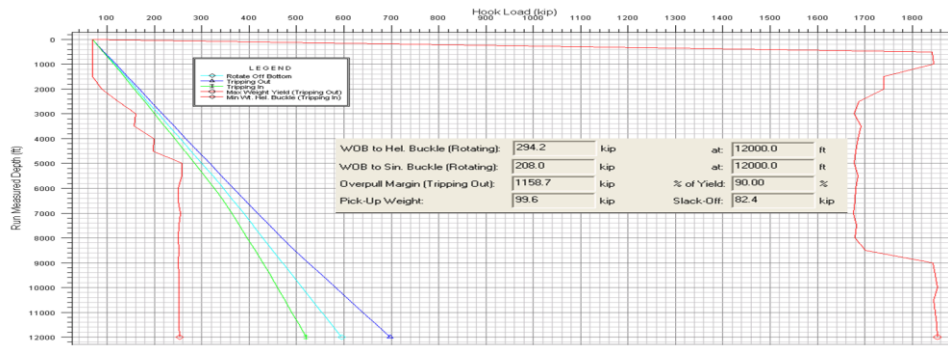
**TABLA 15 Hook Load**

<b>Simulación</b>	<b>Pick – up weight o peso de recogida. (Kip)</b>	<b>Slack off o peso estacionario (Kip)</b>
<b>Sin CRB</b>	99.6	82.4
<b>Con CRB</b>	88.8	74.6

Fuente: Halliburton.

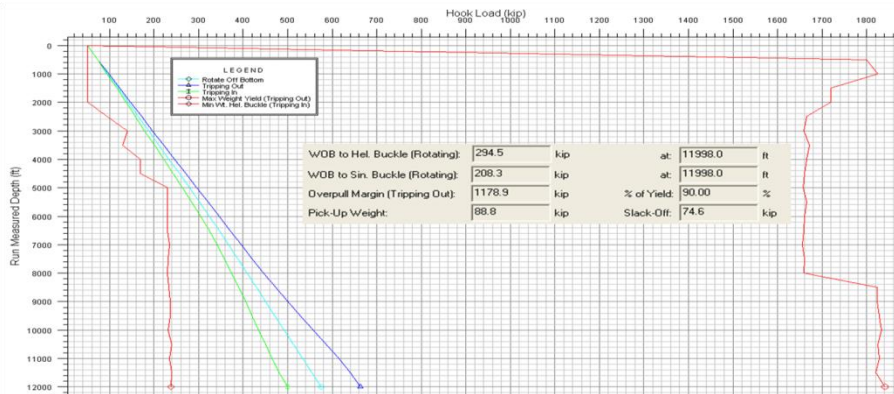
De lo anterior, se puede concluir que posee un módulo de Young ligeramente más bajo que el acero, de esta manera, su aplicación en los tubos no incrementa la rigidez de la sarta y el coeficiente de fricción es bajo lo que no aumenta la carga en el gancho, por el contrario minimiza la resistencia al viaje y desplazamiento; los que se refleja en una reducción en el arrastre ver figura 58.

**FIGURA 56 Hook load (kip) Sin Centralizadores.**



*Fuente: Halliburton.*

**FIGURA 57 Hook Load (Kip) 24 CRB Protech 11 3/4" x 13 1/2".**



*Fuente: Halliburton.*

#### 5.4. TORQUE PROFILE MEASURED DEPTH

La velocidad tangente a la circunferencia descrita por la rotación de la tubería está relacionada a la velocidad del viaje y al ritmo de la operación en la corrida del revestimiento. Se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal del casing, la dirección de la fuerza friccional se asume que actúa en la dirección opuesta a la de la velocidad resultante. Por lo que al incrementar la rotación de una tubería, incrementara la velocidad circunferencial y/o tangencial.

Este fenómeno físico ocurre en dos estadios de la operación; tripping in o viaje de entrada y tripping out o viaje de salida, ambas etapas son muy similares pues tienen la misma tendencia física, pero particularmente difieren en la magnitud del

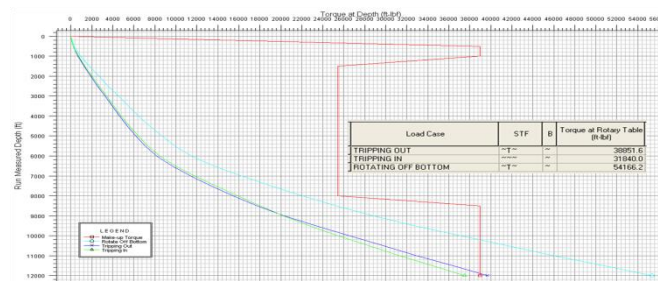
torque a una misma profundidad dependiendo del trayecto de la operación en el cual se encuentre (Tripping in – Tripping out). Estos parámetros tabla 16 Muestran un beneficio y un aporte significativo en la simulación de la corrida del revestimiento donde se usaron los reductores de fricción, puesto que los valores son mucho menores a los de la simulación sin CRB, Lo anterior se debe a que mitiga los efectos friccionales en el torque al reducir el área de contacto durante la rotación.

**TABLA 16 Resultados Con y Sin CRB.**

Simulación		Tripping In (ft-lb)	Tripping Out (ft-lb)	Rotating off Bottom (ft)
Sin CRB		31840	38851.6	54166.2
Con CRB	30371	36610.9	50803	

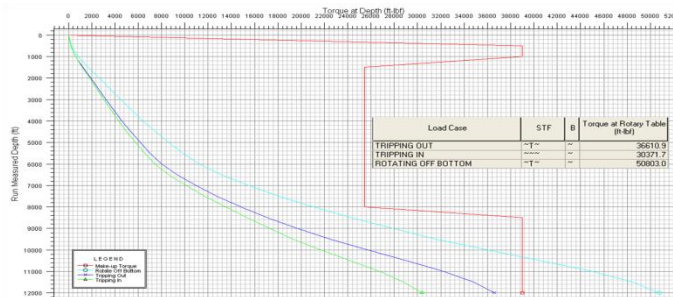
FUENTE :Autores

**FIGURA 58 Torque Profile Measured Depth Sin Centralizadores.**



Fuente: Halliburton.

**FIGURA 59 Torque Profile Measured Depth 24 CRB Protech 11 3/4" x 13 1/2".**



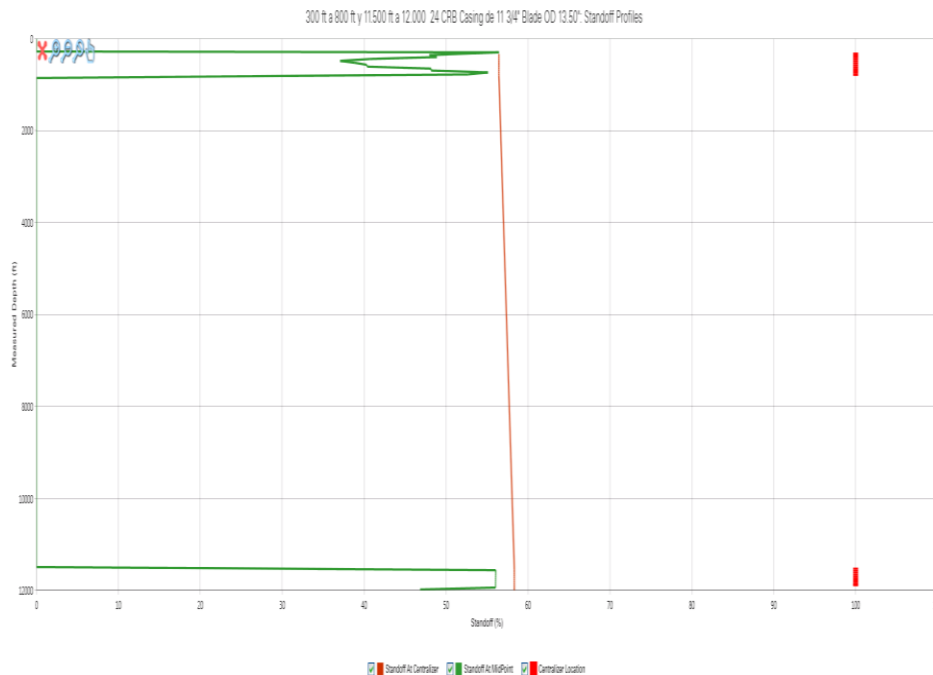
Fuente: Halliburton.

## 5.5. STANDOFF

Un indicador del grado de descentralización es el porcentaje “stand-off”. Cuando la tubería no está centrada, los efectos de las fuerzas que resisten el arrastre del lodo no será uniforme a través del área de flujo en el espacio anular. La descentralización de la tubería afecta la velocidad de flujo en el lado angosto del espacio anular, por esto se hace indispensable velar por una buena centralización y garantizar buen % de stand-off.

Como se observa en la figura 61 solo podemos tener un reporte del 55-60% stand-off y centralización en la primera sección y en los últimos 500 fts del casing, puesto que es en esta parte donde se encuentran localizados los 24 CRB Protech 11 3/4” x 13 1/2”.

**FIGURA 60 Stand-off Profile CRB Protech 11 3/4” x 13 1/2”.**



Fuente: Halliburton.

## 5.6. RESULTADOS

TABLA 17 Resultados de la simulación.

	Pick Up Weight (Kip)	Slack off Weight (Kip)	Tripping Out (ft-lb)	Tripping in (ft-lb)	Rotating off Bottom (ft)	Stand Off at Mid Point	Stand Off at Centralizer
Sin CRB	99.6	82.4	38851.6	31840	54166.2	0	0
CRB 13 ½" entre 300-800 ft y 500 ft fondo	88.8	74.6	36610	30371	50803	56	58
Reducción con 24 CRB	10.8	7.8	2241.6	1469	3363.2		

Fuente: Halliburton.

Esta tecnología a parte de brindar los anteriores beneficios también se caracteriza por:

- Alta capacidad de Adhesión: El material compuesto tiene capacidades de adhesión extremadamente altas ayudando a mitigar la posibilidad de deslizamiento.

- Bajo coeficiente de fricción: Este material posee un coeficiente de fricción muy bajo, el cual reduce significativamente el torque y arrastre, favoreciendo la corrida hasta TD.
- Área de flujo Optimizada: En pozos con restricciones anulares considerables, la posibilidad de espaciar las aletas a lo largo del tramo de tubería, resulta en mínima restricción al espacio anular, manteniendo el área de flujo
- Beneficios referentes a la ECD: El material es adherido directamente a la tubería sin ocupar la entera circunferencia permitiendo mantener una adecuada área de flujo y minimizando la interferencia hidráulica con significativos beneficios a la Densidad Equivalente de Circulación
- Aletas que ayudan en la corrida de la tubería: El diseño de las aletas permite una ligera angularidad en los filos de la aleta, lo cual ayuda significativamente en el objetivo de alcanzar la profundidad total
- Material No-Metálico, inerte: El cerámico compuesto de fibra de carbón es enteramente no metálico y consecuentemente inerte, evitando riesgos de corrosión, o desprendimiento de metal en el pozo.
- Material molible y perforable: La fibra es molible y perforable al igual que la formación. Además no posee alguna contraindicación acerca de disparar una zona centralizada. (disparable)
- Material amistoso para la tubería: La fibra de carbono desgasta la tubería 10 veces menos que el contacto con el acero.

- Resistente al impacto y duradero: Contiene fibra de carbono por sus esfuerzos tensiles y cerámicos por su dureza y durabilidad, lo que lo hace altamente resistente al impacto y duradero.
- Geometría flexible y colocación: La forma geométrica específica y el diseño de la fibra es ilimitado y puede ser creado para cada exigencia en particular además de poder ser colocado en cualquier parte del tubo.

## **6. CONCLUSIONES**

- ✓ La tecnología de fibra de carbono con compuestos cerámicos se convierte en la solución de los problemas tradicionales encontrados en la industria durante las etapas de perforación y completamiento como: pega diferencial, alto torque, perforación de alcance extendido y horizontal, perfiles delgados (Slimhole), altas presiones y temperaturas entre otros.
- ✓ Se garantiza el standoff y excentricidad en la tubería solo en las regiones donde se implemente los centradores CRB.
- ✓ La tecnología Casing Resin Blend CRB centraliza efectivamente la tubería y mejora la capacidad del operador para lograr un exitoso trabajo de cementación, lo que resulta en un buen aislamiento zonal, permitiendo el máximo de la zona de producción.
- ✓ Se observa a que aun mayor ancho, largo y Angulo de inclinación, en el diseño del centrador se observara un mayor gradiente en la caída de presión.
- ✓ El estudio de las configuraciones geométricas durante las caídas de presión en las que se puede instalar el centrador es de gran importancia en el momento de diseñar y plantear el programa de centralización.

- ✓ Para cuantificar la eficiencia en la reducción de torque y arrastre, es necesario identificar las variables que intervienen en la operación y cómo estas contribuyen al ser modificadas.

## **7. RECOMENDACIONES**

- El estudio de desgaste de los centralizadores Drill Resin blade DRB de la misma resina en tuberías de perforación mediante pruebas que permitan implementar una clasificación del desgaste que sufren los centralizadores para analizar la posibilidad de reutilizar tubería y de esta forma reducir costos y tiempo de operación.
- Estudio económico financiero de los gastos y beneficios de la implementación de los centradores CRB en comparación sin el uso de ellos, en áreas como, tiempos de perforación y corrida de revestimiento, en reducción de pega de tuberías, y porcentaje de cementaciones forzadas que se pueden evitar.
- Estudiar posibilidades alternativas donde se pueda implementar la tecnología de los compuestos cerámicos con fibra de carbono en áreas donde se aprovechen sus propiedades.
- Mejorar los modelos existentes de torque, arrastre e hidráulica para este tipo de dispositivos dependiendo de su geometría.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- **Título:** A novel concept for casing centralization in lean profile applications.  
**Autor:** R.Baynham, D. Levie. Protech srl. A.Calderoni, C.Molaschi & F.Zausa.  
**Fuente:** OMC 2003.
- **Título:** Advanced Casing Design with finite-element model of effective Dogleg severity, Radial Displacements and Bending loads.  
**Autor:** Albert R. McSpadden, SPE, and Oliver D. Coker III, SPE, Altus Well Experts Inc; G. Colin Ruan, SPE, NOV CTES.  
**Fuente:** SPE 141458.
- **Título:** Advances in Casing Centralization Using Spray Metal Technology.  
**Autor:** John Gammage, SPE, WearSox, L.P.  
**Fuente:** OTC 21979
- **Título:** Annular Pressure Loss Predictions for Various Stand-off Devices.  
**Autor:** Dongping Yao, University of Houston and Smuel G. Robello, Halliburton DED.  
**Fuente:** IADC/SPE 112544, Drilling Conferences.
- **Título:** Application of Innovative Ceramic Centralizer for Solid Expandable Liner.  
**Autor:** Shaohua Zhou, Saudi Aramco, Mansoor Kamal, Saudi Aramco and Tom Sanders, Weatherford.  
**Fuente:** SPE 137028.
- **Título:** Carbon-Fiber Ceramic Products-an innovative solution that allows centralization-design versatility.  
**Autor:** F. Acosta, E. Webb, Halliburton, F. Zausa, Eni (Agip)

**Fuente:** OMC 2009.

- **Título:** Casing Centralization in Horizontal and Extended Reach Wells.  
**Autor:** Alfredo Sanchez, Christian F. Brown, SPE, Top-Co LP, Whitney Adams, Devon Energy.  
**Fuente:** SPE 150317.
- **Título:** Casing Centralization in Horizontal and Extended Reach Wells.  
**Autor:** Alfredo Sanchez, SPE, Top-Co LP, whintney Adams, Devon Energy, 2012.  
**Fuente:** SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, 20-22 march 2012, vienna, Austria. Document ID 150317-MS.
- **Título:** Centralizer Selection and Placement Optimization.  
**Autor:** Gefei Liu, Pegasus Vertex, Inc. And Lawrence weber, Chevron Energy Technology Company, 2012.  
**Fuente:** SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, 20-21 June 2012, Galveston, Texas, USA. Document ID 150345-MS.
- **Título:** Comparing Soft-String and Stiff-String Methods Used to compute Casing Centralization.  
**Autor:** Lidia Gorokhova, Andrew Parry, Nicolas Flamant, Schlumberger  
**Fuente:** SPE/IADC 163424.
- **Título:** Dynamic Cementation: A Solution to Well Integrity Problems.  
**Autor:** Calvin Holt, Nilesh Lahoti, and Vince Fortier, SPE, Tesco Corporation.  
**Fuente:** SPE/IADC 163459.
- **Título:** Effect of Eccentricity and Rotation on Annular Frictional Pressure Losses With Standoff Devices.

**Autor:** Ajay Pratap Singh, University of Houston, and Robello Samuel, Halliburton.

**Fuente:** SPE 124190

- **Título:** Field Proven Solutions to the Challenges of centralizing solid expandable casing.

**Autor:** Douglas Farley, SPE, and Thad Scott, SPE, Weatherford International, Ltda.

**Fuente:** SPE 146507.

- **Título:** Ingeniería de cementaciones- Cedip

**Fuente:** [www.cedip.edu.mx/tomos/tomo07.pdf](http://www.cedip.edu.mx/tomos/tomo07.pdf).

- **Título:** Installation and Operational Performance of Horizontal Solid Expandable Openhole Production Liners in Maximum Reservoir Contact Wells – Case histories.

**Autor:** Tom Sanders, weatherford. Shaohua Zhou, Saudi Aramco, Patrick York, Weatherford ; Thomas Joulaud, VALLOUREC & MANNESMANN OIL & GAS, France; Jeffrey Teo and Raju Gandkiota, Weatherford.

**Fuente:** SPE 124965. Society of Petroleum Engineers.

- **Título:** Surge and Drag Analysis for Extended Reach Casing and Casing Flotation Operations with centralizers: A design challenge?.

**Autor:** G. Robello Samuel, Halliburton, and colin J. Mason, BP Exploration. 2007.

**Fuente:** SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 11-14 November 2007, Anaheim, California, U.S.A. Document ID : 110700-MS.

- **Título:** The Practice and Evolution of Torque and Drag Reduction: Theory and field Results.

**Autor:** John E. McCormick, Chad Evans, Joe Le, SPE, Weatherford International, TzuFang Chiu, SPE, The university of Texas at Austin, 2012.

**Fuente:** International Petroleum Technology Conference, 7-9 February 2012, Bangkok, Thailand. Document ID 14863-MS.

- **Título:** Theory and Application of a New Generalized Model for Torque and Drag.

**Autor:** Bernt S. Aadnoy, SPE, University of Stavanger and Joannes Djurhuus, SPE, U. of the Faroe Islands.

**Fuente:** IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition held in Jakarta, Indonesia, 25-27 August 2008. Document ID IADC/SPE 114684.

- **Título:** Using WELLPLAN R2003.11.0.1.

**Fuente:** Landmark Graphics Corporation, Landmark a Halliburton company.