

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE REDUCTORES DE
FRICCIÓN DURANTE LA CORRIDA DE REVESTIMIENTO EN POZOS
HORIZONTALES CON ALCANCE EXTENDIDO**

**GLORIA STEPHANÍA CAMARGO ANTOLÍNEZ
ALFONSO ANDRÉS GÓMEZ ROMÁN**

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

2014

**EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE REDUCTORES DE
FRICCIÓN DURANTE LA CORRIDA DE REVESTIMIENTO EN POZOS
HORIZONTALES CON ALCANCE EXTENDIDO**

**GLORIA STEPHANÍA CAMARGO ANTOLÍNEZ
ALFONSO ANDRÉS GÓMEZ ROMÁN**

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero de petróleos

Director

Ing. HERNEY DELGADO MARTÍNEZ

Codirectores:

Ing. JAVIER URDANETA DURAN

Ing. MAURICIO TARACHE

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

2014

DEDICATORIA

A Dios por darme sabiduría y fortaleza para superar todos los obstáculos a lo largo de mi carrera, y por darme la bendición de recorrer este camino con tantas buenas personas a mi lado.

A mis padres, que son las personas que más amo en el mundo, por las cuales siempre doy lo mejor de mí, quienes son mi mayor ejemplo de tenacidad y superación y son quienes me inspiran a salir adelante. Son ellos los que más me han apoyado, gracias a los cuales he logrado todo lo que me he propuesto, ya que son mi fuerza, y son sus enseñanzas y su guía la razón por la cual soy la persona que soy el día de hoy. Y seguirán siendo para ellos todos mis triunfos de ahora en adelante.

A mi familia, especialmente mi Tío Lucho y mi Tía Fanny, por tanto apoyo, por creer siempre en mí, por demostrarme cada día su amor incondicional y por hacer tan suyas tanto mis derrotas como mis triunfos.

A mi nona, por todo su amor, todas sus palabras de consuelo y todas sus oraciones para que Dios siempre iluminara mi camino.

A mi Tía Gloria, por su gran amor y sus oraciones que me ayudaron a ir siempre de la mano de Dios.

A mi prima Lizeth por su amor, sus buenos consejos y su apoyo incondicional.

A mi Hermano Cristian y mis primitos Daniel, Felipe y Sarita, para los que espero siempre ser un gran apoyo y sobre todo un buen ejemplo a seguir.

A Marvin que siempre fue uno de mis mayores apoyos. Te agradezco tu buena energía, tus consejos, tu cariño, y sobre todo que siempre me brindaste palabras de aliento cuando las necesitaba.

A mi amigo Ricky por estar siempre dispuesto a escucharme, a darme buenos consejos, a resolver mis dudas y a apoyarme incondicionalmente, sin importar la distancia.

A mi compañero Ponty por aguantarme, y siempre hacerme reír.

A abril, por ser mi fiel compañera a lo largo de toda mi carrera.

A todas las personas que me brindaron su ayuda en cualquier momento de mi carrera, con una explicación o solo con un buen consejo.

STEPHANÍA

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, que por su amor, apoyo y constantes esfuerzos me han permitido lograr lo que me he propuesto, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

A mis amigos, por transformar cada sencillo momento en una experiencia inolvidable.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Herney Delgado Martínez por su colaboración en la realización de este trabajo de grado.

Al ingeniero Miguel Angel Martínez por ayudarnos a dar el primer paso para iniciar este proyecto.

A los Ingenieros de Halliburton: Carlos Mario Gonzales, Mauricio Tarache y Javier Urdaneta, por su tutoría, su orientación y toda su colaboración en la realización de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, a todo el personal docente y administrativo de la escuela de ingeniería de petróleos, por sus valiosos aportes durante nuestras etapas académicas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. GENERALIDADES	21
1.1 POZOS HORIZONTALES CON ALCANCE EXTENDIDO (ERW).....	21
1.2 FUNDAMENTOS DEL TORQUE Y ARRASTRE.....	25
1.2.1 Torque.	26
1.2.2 Arrastre.....	27
1.2.3 Fricción.	28
1.2.4 Factor de boyanza	30
1.2.5 Pandeo.	31
1.2.6 Parámetros que influyen en el torque y arrastre.....	32
2. MODELOS MATEMÁTICOS	34
2.1 MODELO DE TUBERÍA FLEXIBLE.....	35
2.2 MODELO DE TUBERÍA RÍGIDA O STIFF STIRNG.....	38
2.3 MODELO GENERALIZADO DE AADNOY 2D.	39
2.4 MODELO ANALÍTICO DE AADNOY 3D.....	44
3. REDUCTORES DE FRICCIÓN	48
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA	48
3.2 BENEFICIOS.....	50
4. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN UN POZO VIRTUAL	51
4.1 DESCRIPCIÓN DEL POZO VIRTUAL	51
4.2 PROCEDIMIENTO PARA MODELAR LA CORRIDA DEL REVESTIMIENTO EN EL POZO VIRTUAL	53

4.3 PROCEDIMIENTO PARA MODELAR LA CORRIDA DE REVESTIMIENTO CON LOS CENTRALIZADORES PROTECH CRB.....	58
4.4 RESULTADOS	60
4.4.1 Modelamiento sin crb.....	60
4.4.2 Modelamiento con crb.....	63
4.4.3 Análisis de resultados.....	65
5. CONCLUSIONES	75
6. RECOMENDACIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS.....	81

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Secciones de un pozo con alcance extendido.	22
Figura 2. Tipos básicos de pozo de alcance extendido.	23
Figura 3. Torque y arrastre en un pozo con alcance extendido.	26
Figura 4. Torque al rotar la tubería.	27
Figura 5. Diagrama de cuerpo libre en una sección inclinada.	28
Figura 6. Fricción en un pozo inclinado.	29
Figura 7. Fricción estática y dinámica.	30
Figura 8. Pandeo	31
Figura 9. Fuerzas en una sección curva en el modelo de Johancsik.	36
Figura 10. Diagrama de fuerzas pozo inclinado en el modelo de Aadnoy 2D.	40
Figura 11. Fuerzas en un sección curva en el modelo de Aadnoy 2D.	41
Figura 12. Resumen del uso de los ángulos en las zonas de build up y drop off.	43
Figura 13. Descomposición de los vectores unitarios.	45
Figura 14. Fuerzas en una sección curva para el modelo de Aadnoy 3D.	46
Figura 15. Herramienta de reductores de fricción.	49
Figura 16. Diferentes distribuciones de los CRB.	49
Figura 17. Configuración del pozo virtual.	52
Figura 18. Ecuaciones usadas según las secciones del pozo virtual.	54
Figura 19. Ubicaciones de las variables para el cálculo del cambio absoluto en la dirección.	55
Figura 20. Ubicación del PROTECH CRB en la tubería.	59
Figura 21. Torque subiendo tubería sin CRB.	61
Figura 22. Torque bajando tubería sin CRB.	61
Figura 23: Fuerza axial subiendo tubería sin CRB.	62
Figura 24: Fuerza axial bajando tubería sin CRB.	62
Figura 25: Torque subiendo tubería con CRB.	63

Figura 26: Torque bajando tubería con CRB.	64
Figura 27: Fuerza axial subiendo tubería con CRB.	64
Figura 28: Fuerza axial bajando tubería con CRB.	65
Figura 29. Reducción del torque subiendo la tubería, por el uso de la herramienta	66
Figura 30. Reducción del torque bajando la tubería, por el uso de la herramienta.	67
Figura 31. Gráfica de los coeficientes de fricción en el torque subiendo la tubería.	68
Figura 32. Gráfica de los coeficientes de fricción en el torque bajando la tubería.	69
Figura 33. Reducción en el Hook Load por el uso de la herramienta bajando la tubería.....	70
Figura 34. Reducción en el Hook Load por el uso de la herramienta subiendo la tubería.....	70
Figura 35. Reducción en el arrastre bajando la tubería según el modelo de Aadnoy.....	71
Figura 36. Reducción en el arrastre subiendo la tubería según el modelo de Aadnoy.....	72
Figura 37 Gráfica de los coeficientes de fricción en el arrastre subiendo la tubería.	73
Figura 38. Gráfica de los coeficientes de fricción en el arrastre bajando la tubería.	74

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Formulas arrastre modelo de Aadnoy 2D.	43
Tabla 2. Formulas torque modelo Aadnoy 2D.....	44
Tabla 3. Formulas arrastre modelo de Aadnoy 3D.	47
Tabla 4. Formulas torque modelo Aadnoy 3D.....	47
Tabla 5. Movimiento axial y traslacional.	56
Tabla 6. Sarta de completamiento.	57
Tabla 7. Porcentajes de reducción del torque.....	67
Tabla 8. Factores de fricción promedio usados en el ajuste del torque.	68
Tabla 9. Porcentaje de reducción en el Hook Load.	71
Tabla 10. Porcentaje de reducción del arrastre según el modelo de Aadnoy.....	72
Tabla 11. Factores de fricción promedio usados en el ajuste del arrastre.	73

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Modelo de tubería flexible o Soft String.	81
ANEXO B. Modelo generalizado de AADNOY 2D	85
ANEXO C. Modelo analítico de Aadnoy 3D	95
ANEXO D. Procedimiento para la instalación de Protech CRB	103

NOMENCLATURA

Ai	Área interna de la tubería
Ao	Área interna del pozo
Cs	Corrección del factor de fricción
D	Arrastre
di	Diámetro externo de la tubería
Di	Diámetro interno del pozo
F	Fuerza axial
Ff	Fuerza de fricción
g	gravedad
HKLD	HookLoad o peso en el gancho
K	Valor que indica la dirección del movimiento de la sarta (1 o -1)
L	Longitud
m	Masa
MD	Profundidad medida
N	Fuerza Normal
R	Radio
RPM	Revoluciones por minuto
s	Longitud de un segmento de tubería
T	Torque
TVD	Profundidad vertical real
Vh	Velocidad axial
Vr	Velocidad tangencial de la tubería
w	Peso nominal de la tubería incluido la boyanza
α	Azimut
β	Factor de boyanza
θ	Cambio absoluto en la dirección del pozo
μ	Coeficiente de fricción

- ρ Densidad
- ϕ Inclinación
- ψ Ángulo entre V_h y V_r /Movimiento combinado

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE REDUCTORES DE FRICCIÓN DURANTE LA CORRIDA DE REVESTIMIENTO EN POZOS HORIZONTALES CON ALCANCE EXTENDIDO*.

AUTORES: ALFONSO ANDRÉS GÓMEZ ROMÁN; GLORIA STEPHANÍA CAMARGO ANTOLÍNEZ**.

PALABRAS CLAVE: TORQUE, ARRASTRE, REVESTIMIENTO, REDUCTOR DE FRICCIÓN.

DESCRIPCIÓN:

La industria petrolera ha enfocado gran parte de su atención en el desarrollo de nuevas tecnologías para ampliar el panorama energético, permitiendo que se explote el crudo ubicado en lugares a los que antes no se tenía acceso. Entre estos avances están los pozos horizontales de alcance extendido, que brindan acceso privilegiado a secciones horizontales largas con el uso de una sola instalación en superficie.

En la perforación de los pozos horizontales se presentan diferentes inconvenientes, y estos se exacerban cuando se trata de un pozo de alcance extendido; en el caso de este proyecto se abordaron dos de estos problemas: el torque y el arrastre. Dichos problemas pueden generar que la tubería se pegue, o genere tanto peso en el arrastre que no sea posible llevarla a fondo, entre otros. Como solución a estos problema se creó una herramienta que brinda una reducción en la fricción, y por ende en estos dos factores.

El desarrollo de este proyecto comprendió una recopilación teórica de los modelos matemáticos que predicen el torque y el arrastre cuando se está corriendo revestimiento, además del estudio de uno de ellos para simular un caso hipotético diseñado por los autores, con el fin de demostrar el porcentaje de reducción que ofrece la herramienta. Además de esto, en la investigación se desarrolló una metodología que expone la manera como se instalan estos reductores sobre la tubería, entre otras consideraciones que hay que tener en cuenta antes y después de hacer esto.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Herney Delgado Martínez.

ABSTRAC

TITLE: TECHNICAL EVALUATION OF THE IMPLEMENTATION OF FRICTION REDUCERS DURING CASING RUNNING ON HORIZONTAL EXTENDED REACH WELLS*.

AUTHORS: ALFONSO ANDRÉS GÓMEZ ROMÁN; GLORIA STEPHANÍA CAMARGO ANTOLÍNEZ**.

KEYWORDS: TORQUE, DRAG, CASING, FRICTION REDUCERS.

DESCRIPTION:

The oil industry has focus great part of its attention developing new technologies to amplify the energetic panorama, allowing us to exploit oil from places we could not access before. Between these breakthroughs we can find horizontal extended reach wells, which give privileged access to large horizontal portions using only one surface location.

There are several inconvenient while drilling horizontal wells, including major problems on extended reach wells; on this project we approach two of these: torque and drag. They can generate a stuck pipe, or they might cause so much drag weight that makes it impossible for the pipe to get to the bottom, among other issues. As a solution to these problems it was created a tool that gives some friction reduction, getting rid of the problems mentioned before.

The development of this project included a theoretical recompilation of the math models that predict torque and drag while running casing down hole. In addition it was run a study of one of them to simulate a hypothetic case designed by the authors, with the objective of proving how much the tool reduces torque and drag. Besides, in this research it was developed a methodology that shows the way the tool is installed on the pipe and additional procedures that are needed to take in consideration before and after the installation.

*Project Grade

** Faculty of Physicochemical Engineering, Petroleum Engineering, Director: Ing. Herney Delgado Martínez.

INTRODUCCIÓN

La corrida del revestimiento en pozos horizontales con alcance extendido es generalmente identificada como una operación desafiante, que frecuentemente se da como consecuencia del difícil manejo del torque y el arrastre, por ende, se han desarrollado diferentes tecnologías que permiten mitigar estos factores, entre ellas, se encuentran los centralizadores PROTECH CRB.

En este proyecto de grado se analizan los pozos horizontales con alcance extendido y los diferentes factores que otorgan torque y arrastre durante la operación; se estudian los diferentes modelos matemáticos de torque y arrastre; se describe la tecnología de centralizadores PROTECH CRB y se desarrolla una metodología para su implementación; finalmente, se aplica el modelo analítico de Aadnoy 3D en un pozo virtual con el fin de evidenciar los beneficios ofrecidos por la herramienta.

Al finalizar este ejercicio, se planteara una forma para incluir los centralizadores PROTECH CRB en los modelos matemáticos de torque y arrastre, se realizara un análisis comparativo entre las predicciones arrojadas por el simulador WELLPLAN y el modelo de Aadnoy 3D, y se propondrá una metodología para su implementación basada en normas API, ISO y NTC.

1. GENERALIDADES

1.1 POZOS HORIZONTALES CON ALCANCE EXTENDIDO (ERW).

Debido a nuevos retos en el área de perforación, se ha perfeccionado la capacidad para desarrollar pozos de alto ángulo cada vez más largos y de trayectorias con mayor complejidad, que permiten contactar múltiples depósitos aislados con un solo pozo.

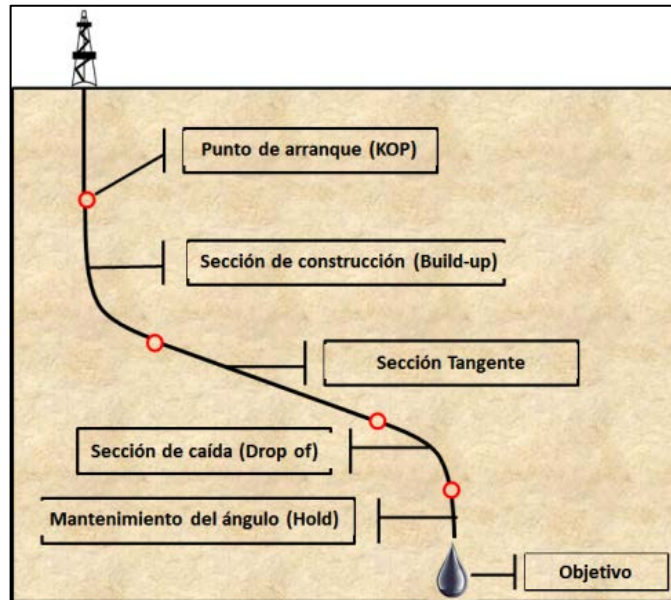
Un pozo horizontal con alcance extendido o ERW por sus siglas en inglés, hace referencia a un pozo con una relación de desviación horizontal – profundidad vertical verdadera (HD/TVD) de más de 2.0, es decir, su extensión horizontal supera por lo menos en el doble la extensión vertical. Este parámetro ofrece una relación cualitativa de la complejidad del pozo, en el cual, a mayor valor de HD/TVD mayor será la dificultad al perforarlo y completarlo.

Los pozos horizontales con alcance extendido se encuentran formados por una serie de geometrías o secciones básicas, como se observa en la primera figura, cada una de las cuales cumple con una función específica y será usada dependiendo de las características de la formación (temperatura y presión), propiedades de las rocas y las capacidades de los equipos, que ajustaran la trayectoria del pozo. Las secciones básicas son:

- Vertical: va desde la superficie hasta el punto de arranque o KOP (Kick Off Point) a partir del cual se inicia la desviación del eje vertical.
- Construcción de ángulo o Build-up: conecta la sección vertical con una sección tangente.
- Tangente: otorga alcance horizontal manteniendo un ángulo constante.
- Caída de ángulo: permite contactar la zona de interés verticalmente.

- Mantenimiento del ángulo: contacta el objetivo.

Figura 1. Secciones de un pozo con alcance extendido.



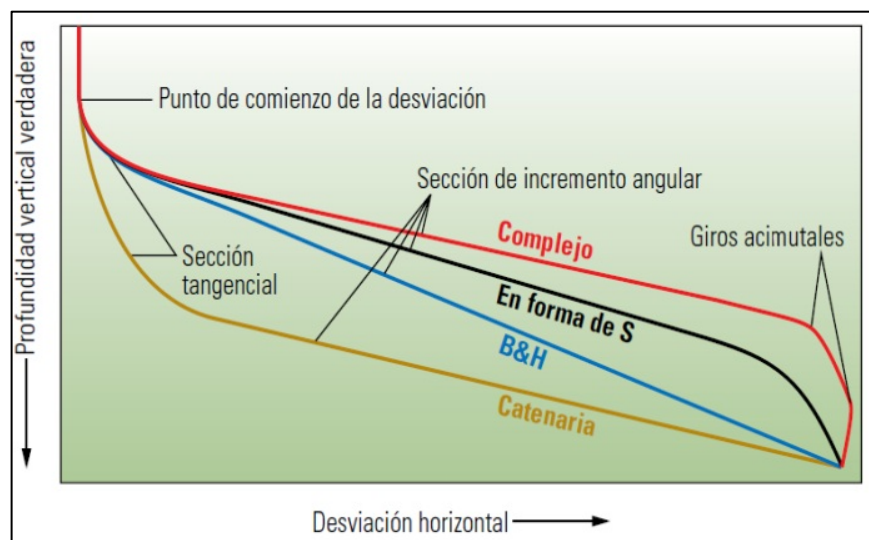
Fuente: modificado de A-A.H. El-Sayed* and F. Khalaf, * GUPCO/Cairo U., and S.M. Ghzaly, GUPCO. "Casing Design Considerations for Horizontal Wells". SPE, 1991.

De acuerdo a la ubicación del objetivo y a la geología de la zona, en el diseño de un pozo ERW puede variar la ubicaciones de las secciones anteriormente nombradas, de acuerdo a esto se pueden establecer cuatro tipos básicos de pozos con alcance extendido: Complejo, en forma de S, B&H y Catenario, como se observa en la figura 2.

- B&H: son perforados con un ángulo constante una vez establecida la sección tangencial a partir del KOP.
- Catenario: es una variación del B&H, en el cual la tasa de crecimiento angular crece progresivamente, son usados para reducir problemas de torque.

- Tipo S: se caracteriza por un ángulo mayor en las zonas tangenciales que en los pozos B&H seguida de una sección de caída de ángulo para llegar al objetivo verticalmente.
- Complejos: se caracterizan por una tercera dimensión generada por cambios en el azimut, éste tipo de pozos permiten al operador contactar un mayor número de objetivos con un solo pozo.

Figura 2. Tipos básicos de pozo de alcance extendido.



Fuente: BENNETZEN, Bjarne et al. "Pozos de alcance extendido". Artículo de Oilfield Review. Otoño 2010:22, no 3.

Debido a los grandes desafíos durante la perforación y completamiento de pozos horizontales con alcance extendido, es necesario realizar una planeación exhaustiva de la operación, con el fin de analizar los diferentes riesgos que puedan amenazar la factibilidad y el éxito del proyecto. Entre las etapas para la planeación de un pozo ERW se encuentran la revisión de datos de pozos vecinos (OWR), el diseño preliminar del pozo (PWD) y el diseño detalle del mismo (DWD). Cada uno de éstos se divide en tareas más específicas que permiten crear un programa de perforación detallado.

La revisión de datos de pozos vecinos (OWR) permite a los operadores la identificación de aspectos claves del diseño del pozo ERW. Luego, se genera un diseño preliminar del pozo (PWD) para establecer la factibilidad, los riesgos, los requerimientos de equipos, las necesidades de los contratistas, el alcance de los trabajos y una estimación de costos para el proyecto. Un diseño de pozo detallado (DWD) es un PWD refinado que incluye las especificaciones finales en materia de sarta de perforación, tubería de revestimiento y equipo de perforación, las licitaciones para los contratistas y una estimación mejorada de costos¹.

Cada una de estas etapas desarrolla ciertas actividades de vital importancia para llegar a la perforación y el completamiento total del pozo, enfocadas en un riesgo que pudiese perjudicar la operación. En la etapa inicial, se tienen en cuenta la historia del diseño de los pozos, el desempeño de la perforación, el tipo de fluidos de perforación usados y su rendimiento, el éxito de la cementación, el torque y el arrastre de la perforación, así como todos los parámetros que se pudiesen usar como referencia para el nuevo diseño. Cabe resaltar que entre dichos parámetros, el cálculo y análisis de los coeficientes de fricción, partiendo del torque y el arrastre registrado, es vital en el desarrollo de las siguientes etapas, pues es un valor que se toma como base para el diseño de diagramas de torque y arrastre para el nuevo pozo ERW. Hay que destacar que la importancia de este último parámetro radica en que un alto torque y arrastre podría ser una causa para que la operación tuviera que detenerse, pues podría presentarse atascamiento de la tubería entre otros graves problemas.

Por otro lado, al igual que en la perforación convencional el diseño hidráulico del pozo se encuentra limitado por el gradiente de fractura, la presión del yacimiento y las pérdidas por fricción en el anular. En pozos verticales y desviados, el gradiente de fractura y las pérdidas por fricción aumentan con la profundidad, el primero de

¹ Bennetzen, Bjarne et Al. Pozos de alcance extendido. Traducción del artículo publicado en Oilfield Review. Otoño de 2010: 22, no. 3.

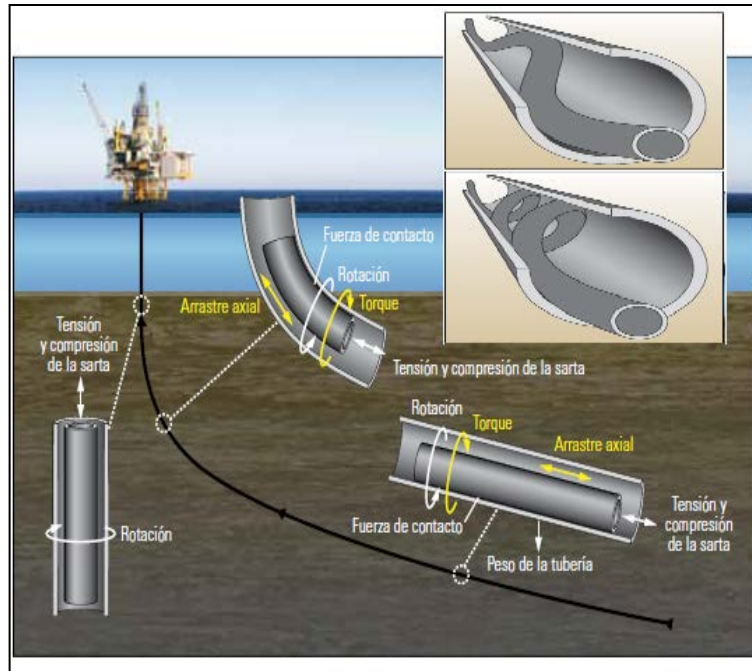
éstos con un ritmo más acelerado que el segundo. Analizando los mismos parámetros para un pozo ERW, cuando éste se vuelve esencialmente horizontal se observa que el gradiente de fractura permanece constante pues la profundidad no cambia, mientras que las ECD continúan aumentando directamente proporcional a la longitud del pozo, lo que conlleva a un conflicto entre reducir las densidades del lodo, las tasas de flujo o la velocidad de penetración, analizando los efectos de cada uno de éstas variables se concluye que la mejor opción es modificar los factores que producen la fricción, ya que se relaciona directamente con éstos factores, lo que se puede conseguir mediante el incremento del área de flujo, es decir aumentar el diámetro del pozo o reducir el tamaño de la columna de perforación.

1.2 FUNDAMENTOS DEL TORQUE Y ARRASTRE.

El análisis del torque y el arrastre en un pozo vertical no es significativo debido a que se asume que la tubería se encuentra centrada en el pozo sin contacto con las paredes, por ende no se generan fuerzas adicionales a la tensión y compresión de la sarta. Sin embargo, por las diferentes geometrías que se pueden encontrar en un pozo ERW, se generan fuerzas adicionales debido al continuo contacto entre la sarta con las paredes del pozo. La magnitud de dichas fuerzas y la longitud del pozo son variables directamente proporcionales, por lo que son parámetros críticos en un pozo ERW.

Las cargas generadas pueden superar la capacidad rotativa del equipo de perforación y en casos de atascamiento, la suma de esfuerzos sobre la sarta pueden romperla, lo que obliga al operador a abandonar el pozo. En la figura 3 se pueden observar las diferentes fuerzas que actúan en un pozo ERW.

Figura 3. Torque y arrastre en un pozo con alcance extendido.



Fuente: BENNETZEN, Bjarne et al. "Pozos de alcance extendido". Artículo de Oilfield Review. Otoño 2010:22, no 3.

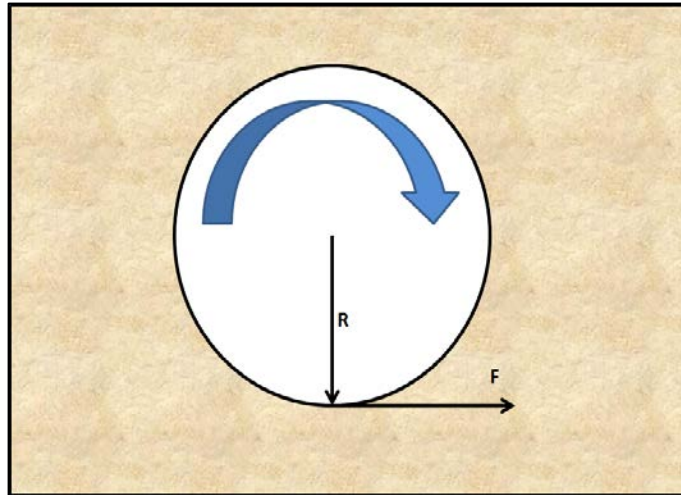
1.2.1 Torque.

El torque o momento de una fuerza se define como el producto vectorial entre el vector posición del punto de aplicación de la fuerza por el vector fuerza, como se observa en la figura 4. En perforación, el torque hace referencia al momento requerido para rotar la sarta y debe superar la fricción rotacional entre la tubería y las paredes del pozo y la broca.

En un pozo se pueden encontrar tres clases de torque: friccional, mecánico y en la broca. El primero se genera debido a la fricción entre la sarta y el revestimiento de la sección anterior o el hoyo abierto. El torque mecánico se produce por la interacción entre la sarta y los ripios de la formación, formaciones inestables o por pega diferencial. Y finalmente el torque en la broca es resultado del contacto entre la broca y formaciones que están siendo perforadas.

El torque es directamente proporcional al radio de la tubería, al coeficiente de fricción y a la fuerza normal entre la sarta y las paredes del pozo.

Figura 4. Torque al rotar la tubería.



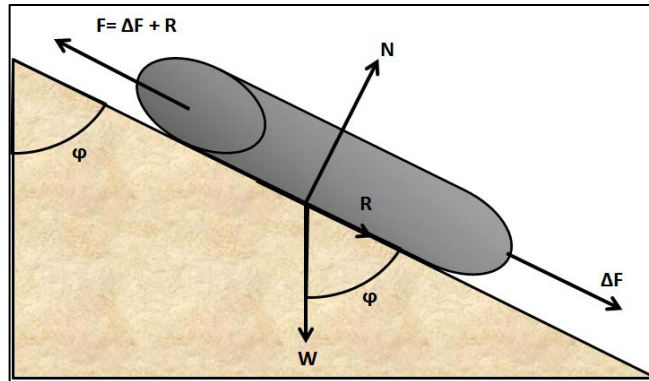
Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

1.2.2 Arrastre.

La fuerza de arrastre se define como la diferencia entre el peso libre rotante de la tubería y la fuerza requerida para moverla hacia superficie o fondo de pozo, es una medida de la resistencia al movimiento ascendente o descendente que siempre va a operar en dirección contraria al movimiento de la sarta. Al igual que el torque posee una componente friccional y una mecánica.

El arrastre subiendo la tubería generalmente es mayor al peso libre rotante o HOOK LOAD, mientras que descendiendo la tubería es menor. La fuerza de arrastre es usada para superar la fricción axial en el pozo, fenómeno asociado a pozos desviados.

Figura 5. Diagrama de cuerpo libre en una sección inclinada.



Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

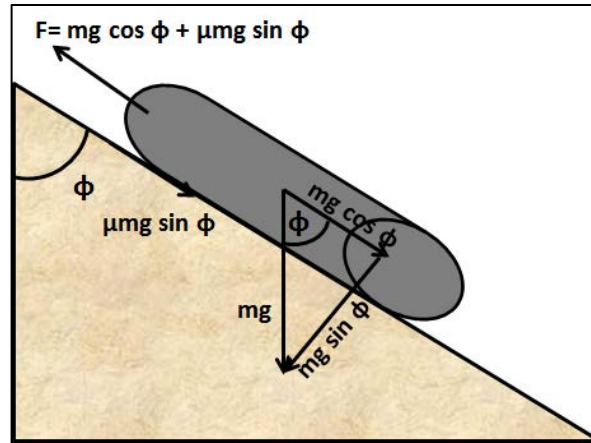
1.2.3 Fricción.

La fricción es la fuerza que se opone al movimiento de dos superficies en contacto y es independiente de la velocidad con la que se desplaza cada objeto. En operaciones de bajada de tubería, la fuerza de fricción puede llegar a ser crítica, por lo tanto debe ser cuantificada y monitoreada. La fricción es proporcional a la fuerza de contacto con que las dos superficies son empujadas entre sí. Para relacionar la fuerza de fricción y la superficie de contacto se usa el coeficiente de fricción, que es propio de cada superficie.

$$\mu = \frac{F_f}{F_n}$$

La figura 6 muestra las fuerzas que actúan sobre una tubería, cuando esta se está deslizando sobre una superficie. El coeficiente de fricción expresa la fuerza de fricción como un porcentaje de la fuerza normal, que es la fuerza de igual magnitud y dirección que la fuerza ejercida sobre la superficie, pero en sentido contrario; y como se observa en la figura esta siempre es opuesta al movimiento de la sarta.

Figura 6. Fricción en un pozo inclinado.

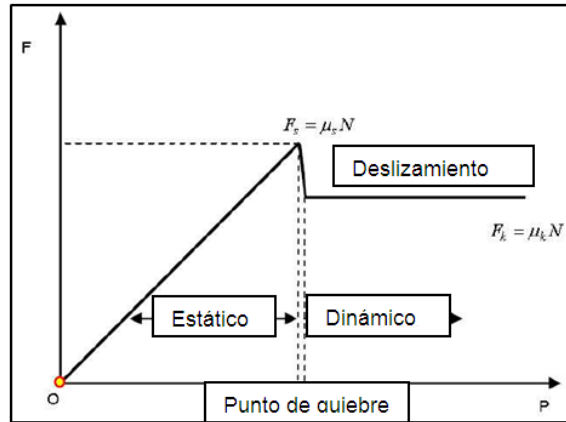


Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

Existen dos clases de fricción, la fricción estática y la dinámica; generalmente la fuerza de fricción estática es mayor a la dinámica (figura 7), esto se debe a la ubicación e interacción entre las rugosidades de las dos superficies. La fricción estática ofrecerá una resistencia al movimiento y contrarrestará cualquier fuerza aplicada mientras esta no supere un máximo a partir del cual se iniciará el movimiento. Una vez el objeto se encuentra en movimiento, será la fricción dinámica la que ofrezca resistencia al desplazamiento. Los coeficientes de fricción dinámica y estática no tienen el mismo valor.

El factor de fricción es un parámetro clave en el modelamiento del torque y el arrastre, ya que caracteriza la interacción entre las superficies, lo cual define la base del modelo. El factor de fricción aplicable a cualquier situación es una función de muchas variables, entre las que podemos encontrar: tipo de fluido, composición y lubricidad, tipo de formación, material y rugosidad del revestimiento. Cuando un pozo está completado solo en una sección, es necesario usar dos factores de fricción, uno para la zona revestida y otro para la zona con hueco abierto.

Figura 7. Fricción estática y dinámica.



Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

1.2.4 Factor de boyanza

La boyanza se define como el efecto que produce el fluido de perforación dentro del pozo, que desplaza el acero, con lo que el peso de una sarta será igual al peso de esta en el aire menos el peso del volumen de lodo desplazado.

$$\beta = 1 - \frac{\rho_{mud}}{\rho_{string}}$$

Si existe una diferencia entre las densidades del fluido dentro de la tubería y el anular, como cuando se cambia el lodo por un fluido de control, el factor de boyanza se debe calcular con la siguiente expresión:

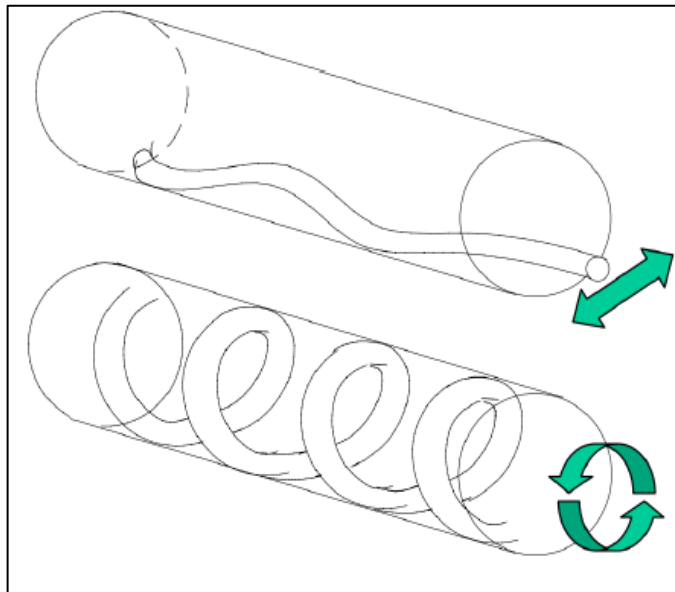
$$\beta = 1 - \frac{\rho_o A_o - \rho_i A_i}{\rho_{string} (A_o - A_i)}$$

Donde A_o : área de la tubería dentro del anular, y A_i : área dentro de la tubería.

1.2.5 Pandeo.

Cuando las fuerzas de compresión pliegan la tubería, ésta tiende a moverse de lado a lado como una serpiente, lo que se denomina pandeo sinusoidal. Cuando la compresión aumenta rápidamente la tubería tiende a moverse en forma de espiral, lo que se llama pandeo helicoidal. El pandeo dependerá de la rigidez de la sarta y del diámetro exterior de los diferentes componentes en relación con el diámetro del pozo y del revestimiento.

Figura 8. Pandeo



Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

Tener en cuenta el pandeo a la hora de perforar un pozo ERW es de gran importancia, ya que las fuerzas de compresión podrían ser tan grandes que el arrastre y el torque que se presentaran serian un factor determinante para detener la operación.

1.2.6 Parámetros que influyen en el torque y arrastre.

Los valores medidos en campo de torque y arrastre se ven alterados por otras contribuciones, algunas de éstas pueden ser modeladas, mientras que otras deben ser agrupadas en el factor de fricción. La combinación de los efectos de todos estos parámetros da como resultado el torque y arrastre total durante la operación.

En general, se pueden separar los factores que generan arrastre en aquellos que se encuentran relacionados con la limpieza del pozo y los asociados al tipo o patrón del pozo. Entre los primeros están:

- Tipo de lodo: los lodos base agua ofrecen una menor lubricación que los lodos base aceite, se pueden añadir lubricantes para reducir el torque y el arrastre, aunque algunos lubricantes pueden provocar daños a la formación y afectar la producción.
- Propiedades de la formación: algunas formaciones tienen propiedades lubricantes debido a su química y al tamaño de grano, entre otros.
- Fuerzas viscosas hidrodinámicas.
- Pobre limpieza del pozo: la acumulación de ripios crea una obstrucción mecánica en el pozo que puede generar un atascamiento de la tubería, éste problema se puede solucionar con un buen diseño hidráulico y la selección del lodo apropiado.
- Inestabilidad de las paredes del pozo, hinchamiento de arcillas y pozos con baja tolerancia.
- Pegas diferenciales.

Ahora, entre los factores que se relacionan con el patrón del pozo podemos encontrar:

- Rigidez de la sarta y del BHA: el BHA es rígido y los centralizadores pueden interactuar con la formación, lo que genera altos valores de fricción, especialmente cuando el BHA se encuentra en una pata de perro.
- Peso de la sarta: el uso de una sarta liviana puede ser beneficioso en pozos con alcance extendido.
- Rugosidad de la tubería.
- Superficie de contacto.
- Patadas de perro.
- Ojos de llave: cuando una herramienta pasa a través de una zona con un alto grado de desviación, se producen grandes fuerzas laterales y probablemente ocurra un ojo de llave, lo que puede atascar la tubería.
- Tortuosidad: ocurre cuando el patrón del pozo deja de ser una línea recta o curva que se asumió con el método de la mínima curvatura, entre dos puntos de estudio. Se observa una variación en las patas de perro entre los puntos de estudio, lo cual se debe a deslizamientos o rotaciones de la tubería mientras se realizaban ajustes en el sistema rotativo, fluctuación en WOB o cavernas.

2. MODELOS MATEMÁTICOS

El torque y arrastre excesivo durante la bajada del revestimiento es una de las mayores limitaciones en perforación extendida y horizontal. Los modelos matemáticos de torque y arrastre usados hoy en día, están principalmente basados en las ecuaciones presentadas por Johancsik en 1984, poco trabajo se ha hecho para mejorar este modelo.

Los modelos matemáticos han sido importantes para evadir los problemas presentados durante la perforación o la bajada de revestimiento, permitiendo que los pozos lleguen más lejos. Con pozos de alcance extendido, los yacimientos pueden ser drenados de manera más eficiente y se puede reducir el número de instalaciones, pues una misma puede drenar un área mayor.

Estos modelos consideran la trayectoria del pozo, la configuración de la sarta, patas de perro y factores de fricción para predecir las fuerzas de torque y arrastre en un pozo. Este modelamiento tiene varios propósitos:

- En la fase de planeamiento el torque y el arrastre son parámetros claves en la construcción del pozo. Los modelos son usados para revisar si la trayectoria propuesta puede ser completada exitosamente.
- Ayudar a la evaluación y la optimización de la trayectoria planteada para minimizar los efectos del torque y el arrastre.
- Estimar las fuerzas generadas, lo que puede ayudar al cálculo del desgaste del equipo.
- Identificar las limitaciones para alcanzar ciertas profundidades.
- En la etapa de post perforación el análisis detallado puede ayudar a revelar la verdadera causa de los problemas, si estos llegaron a presentarse, permitiendo

hacer cambios en los procedimientos operacionales, de manera que se eviten problemas en los siguientes pozos.

Además de las mencionadas anteriormente, las razones por las cuales el análisis del torque y el arrastre es importante, son muchas; Y se basan en lograr que se perforen de la mejor manera pozos cada vez más extendidos alcanzando objetivos más difíciles.

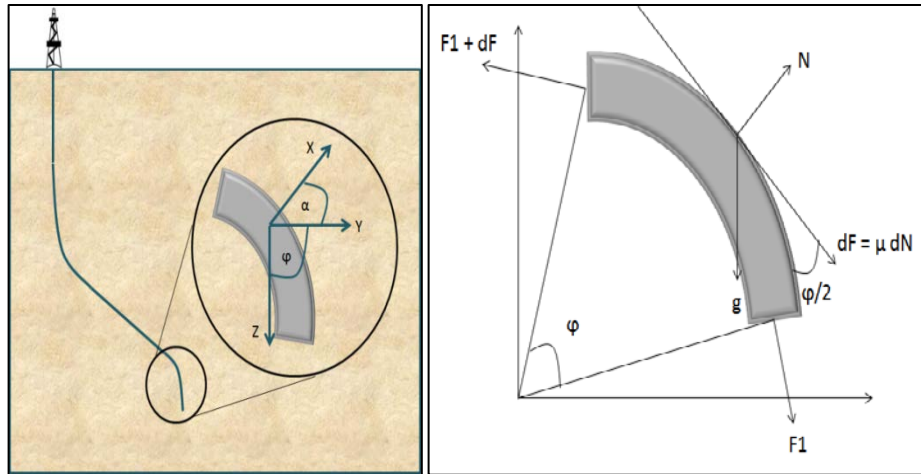
2.1 MODELO DE TUBERÍA FLEXIBLE.

El modelo predictivo de Johancsik et al (1984) parte de la suposición de que el torque y arrastre en pozos direccionales son causados principalmente por la fuerza de fricción o de deslizamiento, que se define como el producto entre la fuerza normal y el coeficiente de fricción. Johancsik modela la sarta como una tubería o cable capaz de transmitir cargas axiales pero no momentos flexionantes, por lo que en una sección curva las fuerzas laterales producidas por la rigidez de la tubería son despreciables.

La fuerza normal entre la tubería y las paredes del pozo dependen de diversos factores, pero por la sencillez y simplicidad del modelo solo se tuvieron en cuenta dos: el peso de la tubería sumergida en el fluido de perforación y el efecto de la tensión en zonas con curvatura; en la figura 9 se puede observar cada una de ellas y su contribución a la fuerza normal.

El coeficiente de fricción, definido con anterioridad, representa las condiciones promedio de un pozo en particular, agrupando un número de factores como el grado de lubricación en diferentes regiones de pozo y las superficies en contacto, por ende, su determinación juega un papel fundamental para la aplicación, precisión y exactitud del modelo.

Figura 9. Fuerzas en una sección curva en el modelo de Johancsik.



Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

Mediante el balance de fuerzas que actúan sobre un segmento de tubería que se encuentra en una sección curva del pozo con un ángulo de desviación φ y un ángulo de azimut α , conociendo el peso nominal de la tubería w y la longitud del arco R , Johancsik obtienen las siguientes ecuaciones:

$$dF = \pm\mu((F_1 d\alpha \sin \varphi)^2) + (F_1 d\varphi + wR \sin \varphi d\varphi)^2)^{1/2}$$

Considerando que $d\approx\Delta$ y $wRd\varphi=W$ o peso de un segmento de tubería incluida la boyanza, adicionando el peso proyectado de la sarta, Johancsik concluye que el arrastre puede ser calculado por:

$$F_2 = F_1 + W \cos \varphi \pm\mu((F_1 d\alpha \sin \varphi)^2) + (F_1 d\varphi + wR \sin \varphi d\varphi)^2)^{1/2}$$

Analizando la ecuación anterior se tiene que: F_1 es la fuerza en el fondo del segmento analizado y la fuerza de fricción puede ser positiva o negativa de acuerdo a la dirección del movimiento, donde "+" o positivo significa que la sarta

está siendo retirada del pozo y “-” o negativo que se está llevando la tubería a fondo.

Debido a las diferentes geometrías presentes en un pozo con alcance extendido la formula general de Johancsik puede simplificarse, en otras palabras, obtiene una ecuación para cada geometría: vertical, build-up y drop-of.

Ya que una zona vertical no presenta ninguna curvatura $\Delta\alpha$ y $\Delta\varphi$ son cero y la ecuación se reduce a:

$$F_2 = W \cos \varphi \pm \mu W \sin \varphi$$

Para un Build up:

$$F_2 = F_1 \pm \mu((F_1\Delta\alpha)^2 + (W)^2)^{1/2}$$

Finalmente para un Drop-of:

$$F_2 = F_1 \pm W \cos \varphi \pm (F_1\Delta\varphi + W \sin \varphi)$$

El modelo de Johancsik permite, mediante un proceso iterativo y datos de torque y arrastre, calcular el coeficiente de fricción, el cual puede ser usado en las predicciones de pozos vecinos. Se debe tener en cuenta que el cálculo inicia en el fondo del pozo y va hasta superficie, por ende, es importante conocer detalladamente la sarta de perforación, la geometría, el estudio y actualización de los diferentes datos del pozo.

El modelo de tubería flexible o Soft String sirvió como punto de partida para los nuevos modelos de torque y arrastre, los cuales han añadido parámetros importantes como las revoluciones por minuto, el cambio total en la dirección del

pozo y correcciones al coeficiente de fricción por el contacto con las paredes del pozo, los cuales serán explicados más adelante. Por otro lado, debido a su importancia el modelo es deducido en el anexo A.

2.2 MODELO DE TUBERÍA RÍGIDA O STIFF STRING.

Ho en 1986 realizó una serie de cambios al modelo de Johancsik con el fin de ajustar mejor los resultados y de tener en cuenta los efectos de algunos parámetros despreciados en el Soft String. El autor resalta un importante error del modelo de Johancsik, ya que cuando la sarta se divide en elementos infinitesimales, viola el equilibrio de momento en dirección lateral, por lo que para algún segmento de la tubería el torque asumido será incorrecto, pero analizando las ecuaciones con la teoría de gran deformación, la transferencia de torque que aparentemente tenía errores, pasa a ser una simplificación correcta.

Ho resalta una serie de limitaciones del modelo base, en la que se destaca la falta de rigidez de la sarta, la cual es independiente del espacio entre la tubería y la pared del pozo, por lo que con el modelo Soft String no se puede resaltar los efectos de un pozo de diámetro reducido o de baja tolerancia. Como resultado de lo dicho anteriormente, el modelo base generalmente subestima el torque y el arrastre, y sobrestima el coeficiente de fricción.

La base de los cambios planteados por Ho, es añadir a los cálculos el efecto de la rigidez de la sarta, especialmente en las botellas. Con esta actualización se puede observar el efecto de los centralizadores y su ubicación, para determinar el grado de excentricidad del revestimiento, información relevante para una buena cementación del pozo.

Finalmente, a pesar de presentar mejoras con respecto a los modelos Soft String por tener en cuenta la rigidez de las barras, todas las fuerzas internas y las características geométricas de la trayectoria del pozo; este modelo tiene una hipótesis errónea sobre el contacto, donde supone que la línea central de la tubería siempre se encuentra paralela al eje del pozo (sin deformación relativa) y que por la gravedad, siempre está en continuo roce con la pared inferior del pozo. Esta hipótesis está lejos de ser válida si el pozo tiene una fuerte tortuosidad y DLS en su geometría.

Por otra parte, las ecuaciones del modelo están escritas para una sección de corte con una rigidez dada y el autor no da detalles sobre cómo manejar las discontinuidades. Además, sobre el coeficiente de fricción de los pozos, el autor asume siempre el mismo factor en traslación axial y en rotación, sin tener en cuenta la influencia de la velocidad de estos dos movimientos.

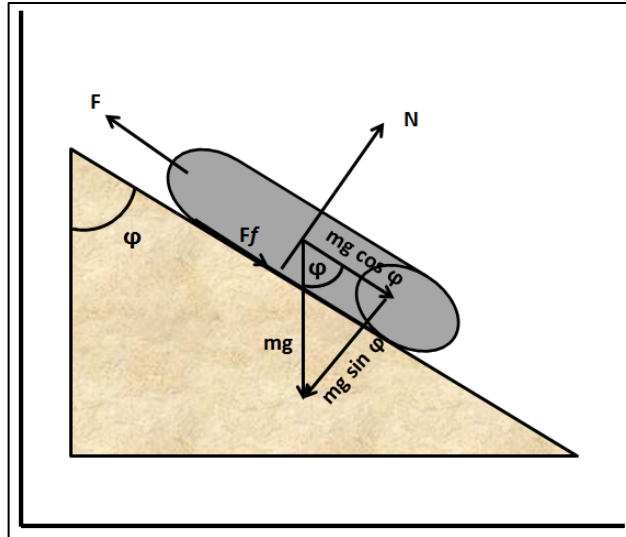
2.3 MODELO GENERALIZADO DE AADNOY 2D.

Aadnoy desarrollo en 1998 un modelo de torque y arrastre en dos dimensiones basado en el modelo de sarta flexible o Soft String de Johancsik, que puede ser aplicado para los siguientes casos: 1) las ecuaciones de arrastre pueden ser usadas si se está retirando la tubería del pozo o llevando a fondo, también puede ser usada para coiled tubing, registros, completamiento y operaciones de workover; 2) las ecuaciones de torque aplican para cuando la tubería está siendo rotada durante la perforación y también para la combinación de movimientos axiales y rotacionales. No considera la rigidez de la sarta ya que su contribución a la tensión es mínima y puede ser despreciada².

Mediante el análisis de un segmento de tubería de peso nominal w , con inclinación ϕ y de longitud ΔS , se puede encontrar una expresión para la fuerza de arrastre y el torque en una sección recta (figura 10).

² (A. K. AADNOY Bernt 2001)

Figura 10. Diagrama de fuerzas pozo inclinado en el modelo de Aadnoy 2D.



Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

$$F_2 = F_1 + w\Delta s(\cos \varphi \pm \mu \sin \varphi)$$

$$T = r\mu|w\Delta s \sin \varphi|$$

Para una sección de construcción de ángulo, un segmento de tubería de longitud $R\Delta\phi$ y peso nominal, usando un sistema de coordenadas cilíndricas (r,t) se describen las diferentes fuerzas que actúan sobre él (figura 11).

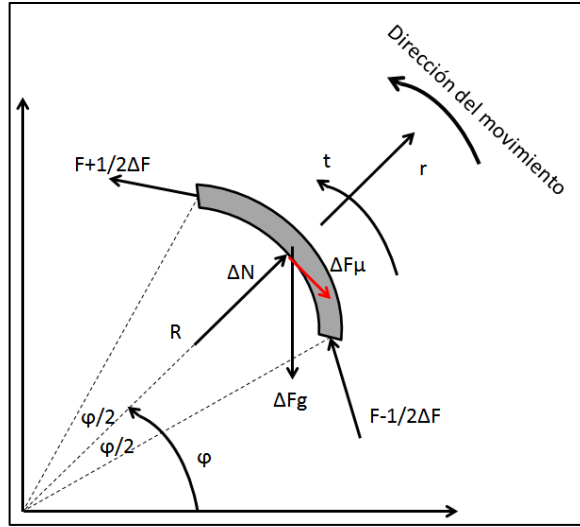
Partiendo de los balances de fuerza y despejando la fuerza de arrastre, se obtiene la siguiente expresión:

$$F_2 = f(\varphi_2) + (F_1 - f(\varphi_1)) \cdot e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

Donde $f(\varphi)$ es igual a:

$$f(\varphi) = \frac{wR}{1 + \mu^2} \{(1 - \mu^2)\sin\varphi - 2k\mu\cos\varphi\}$$

Figura 11. Fuerzas en un sección curva en el modelo de Aadnoy 2D.



Fuente: Modificada por autor. BERNT, Aadnoy, et al. "Design of oil wells using analytical friction". Journal of Petroleum Science and Engineering 32 (2001) 53– 71

Del mismo modo, se tiene de la definición de torque:

$$T(\varphi) = r\mu \int_{N(\varphi_1)}^{N(\varphi)} |dN|$$

Solucionando la integral y reorganizando términos, si la tubería se desplaza y se rota simultáneamente, el torque es:

$$T = r\mu \left| (F_1 - f(\varphi_1)) \frac{1}{k\mu} (e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} - 1) + f_{lim}(\varphi_2) - f_{lim}(\varphi_1) \right|$$

Con $f_{lim}(\varphi)$:

$$f_{lim}(\varphi) = \frac{-2wR}{1 + \mu^2} (\cos\varphi + k\mu\sin\varphi)$$

Si la tubería no se está desplazando axialmente μ tiende a cero, por consiguiente:

$$\lim_{\mu \rightarrow 0} \left(\frac{1}{k\mu} (e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} - 1) \right) = \varphi_2 - \varphi_1$$

El torque sin movimiento axial es:

$$T = r\mu |(F_1 - wR \sin \varphi_1)(\varphi_2 - \varphi_1) - 2wR(\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1)|$$

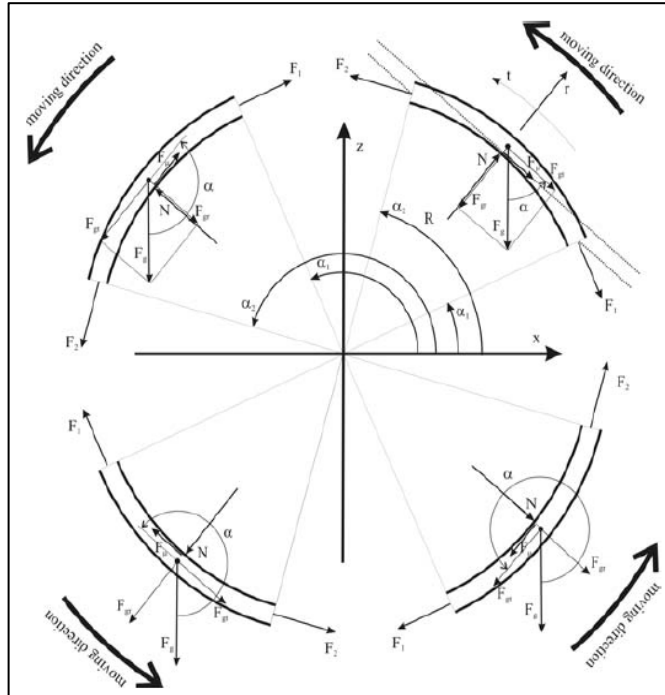
Aadnoy presenta un diagrama (figura 12) donde resume el uso de los ángulos en las fórmulas de secciones curvas de acuerdo a si se está construyendo o destruyendo ángulo, es decir, si se va a trabajar un Build-up o un Drop-off respectivamente.

De acuerdo al gráfico, se tiene que los cuadrantes I y II representan Drop-off y los cuadrantes III y IV representan Build-up, por lo que se debe efectuar una corrección para los ángulos en éste último tipo de geometría, es decir:

$$\varphi_{Build-up} = 360 - \varphi$$

Resumiendo, el modelo generalizado de Aadnoy presenta ecuaciones para torque y arrastre en secciones rectas y curvas cuando se combinan movimientos rotacionales y axiales simultáneamente o cada uno por separado, y el factor k indica la dirección del movimiento, en el anexo B se encuentra la deducción del modelo.

Figura 12. Resumen del uso de los ángulos en las zonas de build up y drop off.



Fuente: modificado por el autor. BERNT, Aadnoy. "Theory and Application of a new Generalized Model for Torque and Drag". SPE. 2008.

Tabla 1. Formulas arrastre modelo de Aadnoy 2D.

Modelo Generalizado de Aadnoy 2D	
Arrastre	
Sección curva	Sección recta
$F_2 = f(\varphi_2) + (F_1 - f(\varphi_1)) \cdot e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)}$	$F_2 = F_1 + w\Delta s(\cos\varphi \pm \mu \sin\varphi)$
$f(\varphi) = \frac{wR}{1 + \mu^2} \{ (1 - \mu^2)\sin\varphi - 2k\mu\cos\varphi \}$	

Fuente: modificado por el autor. BERNT, Aadnoy. "Theory and Application of a new Generalized Model for Torque and Drag". SPE. 2008.

Tabla 2. Formulas torque modelo Aadnoy 2D.

Modelo Generalizado de Aadnoy 2D	
Torque	
Sección curva tubería estatica	Sección recta
$T = r\mu (F_1 - wR \sin \varphi_1)(\varphi_2 - \varphi_1) - 2wR(\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) $	$T = r\mu w\Delta s \sin \varphi $
Sección curva movimiento axial y rotación	
$T = r\mu \left (F_1 - f(\varphi_1)) \frac{1}{k\mu} (e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} - 1) + f_{lim}(\varphi_2) - f_{lim}(\varphi_1) \right $	
$f_{lim}(\varphi) = \frac{-2wR}{1 + \mu^2} (\cos \varphi + k\mu \sin \varphi)$	

Fuente: modificado por el autor. BERNT, Aadnoy. "Theory and Application of a new Generalized Model for Torque and Drag". SPE. 2008.

2.4 MODELO ANALÍTICO DE AADNOY 3D.

En el nuevo modelo en tres dimensiones el autor incluye los efectos de la combinación de movimientos rotacionales y axiales mediante la descomposición de la capacidad de fricción en la velocidad tangencial de la tubería V_r y la velocidad axial V_h ; también agrega a la predicción el cambio absoluto en la dirección del pozo θ , el cual incluye la inclinación y el azimut geográfico.

De acuerdo con lo anterior, ψ el ángulo entre la V_h y V_r incluirá los efectos de las RPM con que se rota la tubería y la velocidad con la que se desplaza, ψ se calcula a través de la siguiente ecuación:

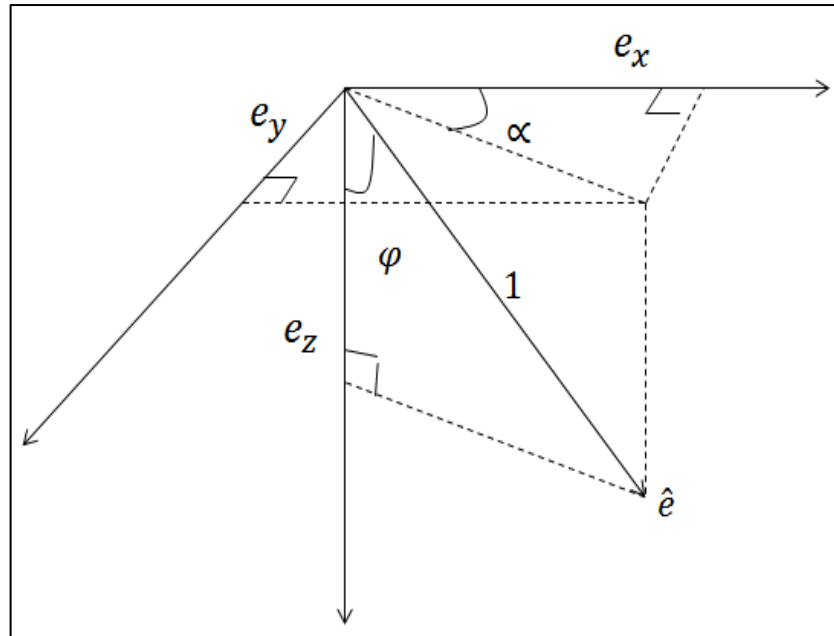
$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{V_h}{V_r} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{60V_h \left(\frac{m}{s} \right)}{2\pi RPM r} \right)$$

Para el cambio absoluto en la dirección del pozo (θ), se toman dos puntos de referencia en la sarta P1 y P2, el producto escalar de dos vectores unitarios de cada punto e_1 y e_2 será igual al coseno del cambio absoluto, descomponiendo

cada uno de los vectores unitarios en las tres dimensiones como se muestra en la figura 13 y simplificando se obtiene una expresión para θ :

$$\cos \theta = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) + \cos \alpha_1 \cos \alpha_2$$

Figura 13. Descomposición de los vectores unitarios.



Fuente: Modificada por autor. BERNT, Aadnoy. "A 3D Analytical Model for Wellbore Friction". SPE. 2010.

Debido a que en una sección recta no hay cambio en la inclinación ni en el azimut, $\Delta\varphi=0$ y $\Delta\alpha=0$ ³ las ecuaciones descritas en el modelo de dos dimensiones pueden ser usadas adicionándoles el ángulo entre la velocidad tangencial de la tubería y la velocidad radial, luego el arrastre y torque están descritos por:

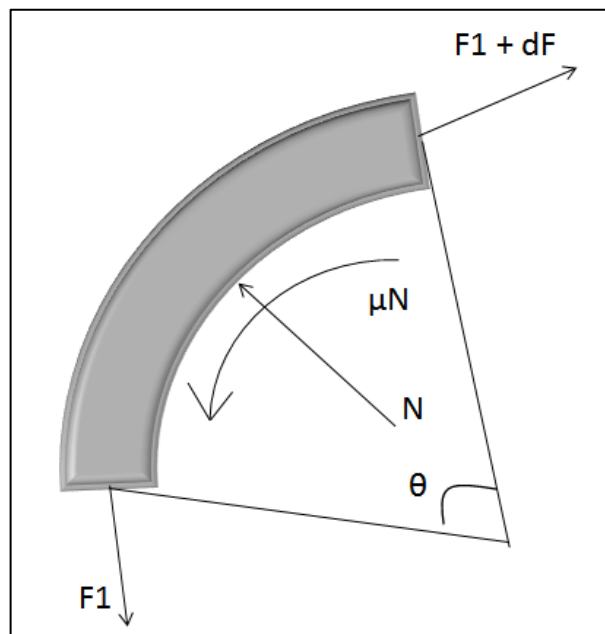
$$F_2 = F_1 + w\Delta L(\cos \varphi \pm \mu \sin \varphi \sin \psi)$$

$$T_2 = T_1 + \mu r w \Delta L \sin \varphi \cos \psi$$

³ (Terje 2011)

En secciones curvas las fuerzas laterales entre la sarta y las paredes del pozo depende de la tensión y de la fuerza de deslizamiento entre ellas. Cerca del tope del pozo, la tensión tiene una mayor influencia sobre la fuerza de deslizamiento que el peso, en la sección analizada; por ende, el peso de la tubería puede ser despreciado para calcular el efecto de la tensión y luego añadido al resultado final⁴, de acuerdo a lo anterior y a los balances de fuerzas del segmento mostrado, el arrastre y torque pueden ser estimados por las siguientes ecuaciones (figura 14).

Figura 14. Fuerzas en una sección curva para el modelo de Aadnoy 3D.



Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

$$F_2 = F_1 + F_1(e^{\pm\mu(\theta_2-\theta_1)} - 1) \sin \psi + w\Delta TVD$$

$$T_2 = T_1 + \mu r F_1 |\theta_2 - \theta_1| \cos \psi$$

⁴ (Terje 2011)

A continuación se presenta una tabla resumen de las diferentes fórmulas del modelo en tercera dimensión:

Tabla 3. Formulas arrastre modelo de Aadnoy 3D.

Modelo analítico de Aadnoy 3D	
Arrastre	
Sección recta	Sección curva
$F_2 = F_1 + w\Delta L(\cos \varphi \pm \mu \sin \varphi \sin \psi)$	$F_2 = F_1 + F_1(e^{\pm\mu(\theta_2-\theta_1)} - 1) \sin \psi + w\Delta TVD$

Fuente: TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

Tabla 4. Formulas torque modelo Aadnoy 3D.

Modelo analítico de Aadnoy 3D	
Torque	
Sección recta	Sección curva
$T_2 = T_1 + \mu r w \Delta L \sin \varphi \cos \psi$	$T_2 = T_1 + \mu r F_1 \theta_2 - \theta_1 \cos \psi$

Fuente: TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

Teniendo en cuenta que el modelo analítico de Aadnoy en tercera dimensión reúne la mayor cantidad de parámetros para la simulación del torque y arrastre, será la base de trabajo de éste proyecto de grado y su deducción detallada se encuentra en el anexo C.

3. REDUCTORES DE FRICCIÓN

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

Debido a los diferentes retos que se presentan durante la perforación de pozos horizontales con alcance extendido, se han creado, investigado e innovado una serie de herramientas que permitan mitigar los diferentes factores que ponen en riesgo el éxito de la operación; dentro de éste grupo de nuevas tecnologías encontramos los centralizadores PROTECH CRB, que nacen como alternativa a los centralizadores convencionales que son inadecuados para un pozo ERW, ya que representan grados extras de rigidez, lo que conlleva a un aumento en las fuerzas necesarias para operar, limitan la tolerancia del pozo, y pueden romperse durante las corridas y generar atascamientos de la sarta⁵.

El centralizador rígido “PROTECH CRB” (CASING-RESIN BLEND), se fija directamente a la tubería mediante la inyección de una mezcla compuesta básicamente por resina-cerámica-fibra de carbono en un molde, que se ubica sobre una zona tratada con arena abrasiva para garantizar la adherencia del material. La fibra de carbono provee soporte estructural y resistencia al centralizador, mientras que el material cerámico, el carburo de silicio, y el nitruro de titanio otorgan resistencia al impacto y a la abrasión⁶.

Ya que la mezcla se encuentra en estado líquido al iniciar el proceso de instalación, será el molde el que defina la geometría y posición de la aleta, por ende la forma y disposición del centralizador en la sarta dependerá de los requerimientos del cliente.

⁵ (ZHOU Shaohua 2010)

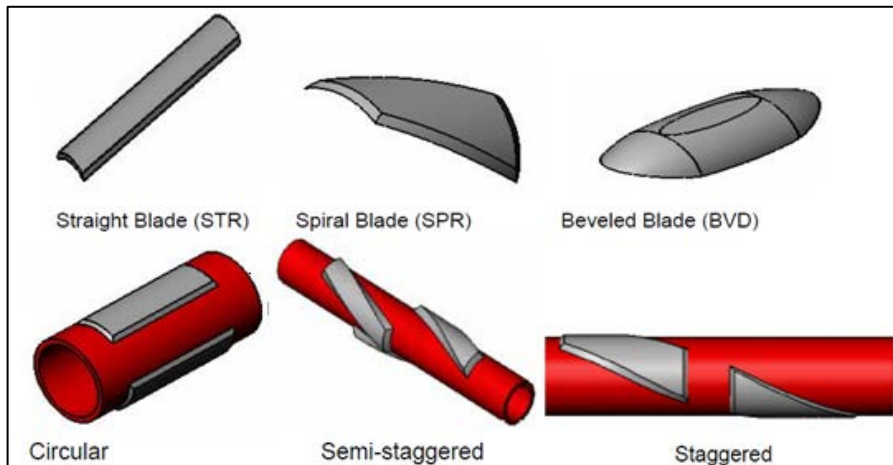
⁶ (F. Acosta 2009)

Figura 15. Herramienta de reductores de fricción.



Fuente: R.Baynham, D. Levie, et al. "A Novel Concept For Casing Centralization In Lean Profile Applications". Italia, Marzo 2003.

Figura 16. Diferentes distribuciones de los CRB.



Fuente: F. Acosta, E. Webb, Halliburton, F. Zausa. "Carbon-Fiber Ceramic Products-An Innovative Solution That Allows Centralization-Desing Versatility". Italia, Marzo 2009.

La versatilidad de la tecnología permite su implementación en otras aplicaciones como: Cuñas de desviación, limpiadores de ripios, protección de la tubería, cualquier aplicación que requiera una reducción de fricción, casing-tubing, producción en aguas ultra profundas, liners expandibles y aplicaciones especiales de perforación⁷.

⁷ (F. Acosta 2009)

3.2 BENEFICIOS

- Diseño y ajuste según las especificaciones del cliente y las necesidades de la operación.
- Puede ser instalado en cualquier grado de tubería.
- Proporciona patrones de flujos suaves y continuos debidos a la ausencia de bandas alrededor del casing.
- Ideal para secciones curvas ya que el material provee un bajo coeficiente de fricción.
- Reduce la rigidez de la sarta.
- Puede ser usado en pozos convencionales o en aplicaciones especiales como pozos con baja tolerancia o alcance extendido.
- Alta resistencia a la abrasión y al impacto a -25°F.
- Resistentes a la corrosión, CO₂ y H₂S.
- Permite una distribución más homogénea del cemento.

4. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN UN POZO VIRTUAL

Luego de analizar y comparar los modelos matemáticos expuestos en este proyecto de grado, se ha seleccionado el modelo analítico de Aadnoy 3D, para predecir el impacto de los centralizadores PROTECH CRB durante la corrida del revestimiento en un pozo de estudio, ya que incluye variables analizadas por los otros modelos, e incorpora el efecto de la combinación de movimientos rotacionales y axiales y las variaciones en la inclinación y en el azimut geográfico, aumentando el número de variables estudiadas y con ello la precisión de los datos obtenidos.

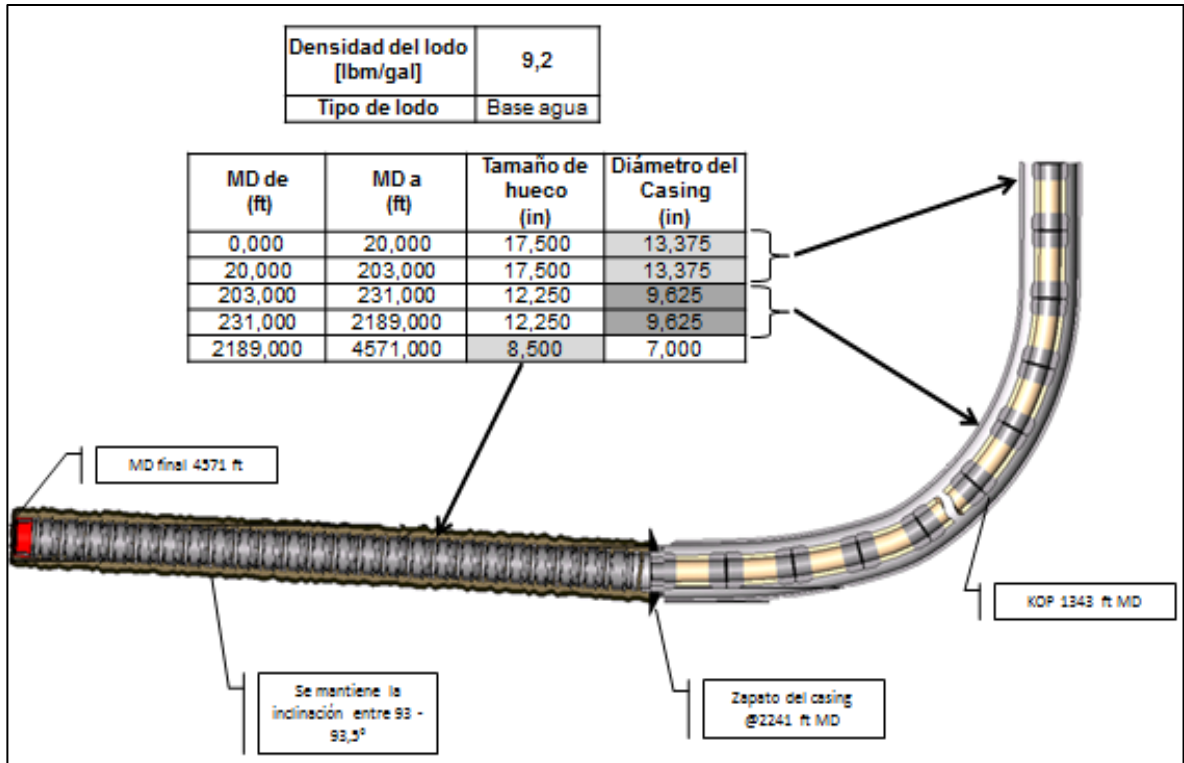
Debido a que no se cuenta con información de un pozo específico en Colombia, se plantea un pozo virtual con características que permitan evidenciar de mejor manera los efectos que tiene la herramienta en la disminución del torque y el arrastre. El tipo de pozo idóneo para mostrar este impacto es un pozo horizontal con alcance extendido, ya que alcanzar grandes desplazamientos horizontales representa un reto en el control del torque y el arrastre.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL POZO VIRTUAL

Se diseñó un pozo horizontal con alcance extendido, tipo B&H, es decir, que mantiene un ángulo constante una vez establecida la sección tangencial, en la figura 17 se pueden apreciar las características del pozo.

El pozo virtual tiene una profundidad total de 4571 ft MD, una profundidad vertical real o TVD de 1291.35 ft y un desplazamiento horizontal o HD de 3550 ft. Como se definió con anterioridad, un pozo con alcance extendido es aquel donde la relación de desviación horizontal – profundidad vertical verdadera (HD/TVD) es mayor de

Figura 17. Configuración del pozo virtual.



2.0, es decir, que su extensión horizontal supera por lo menos en el doble la extensión vertical. Según lo anterior, se observa que el caso de estudio cumple con la relación establecida.

$$\frac{HD}{TVD} = \frac{3550 \text{ ft}}{1291.35 \text{ ft}} = 2.75$$

La simulación de la corrida de revestimiento en el pozo virtual se realizó con ayuda de la herramienta EXCEL, los resultados fueron comparados con información suministrada por los codirectores del proyecto de grado, datos obtenidos a partir del software WELLPLAN, con el fin de ajustar el modelo analítico de Aadnoy 3D y posteriormente observar los efectos del uso de centralizadores PROTECH CRB.

De acuerdo con lo anterior se modelaron los siguientes casos:

1. Corrida de liner de 7" en el pozo virtual.
2. Corrida de liner de 7" en el pozo virtual usando 30 centralizadores PROTECH CRB de 7" X 8.2".

4.2 PROCEDIMIENTO PARA MODELAR LA CORRIDA DEL REVESTIMIENTO EN EL POZO VIRTUAL

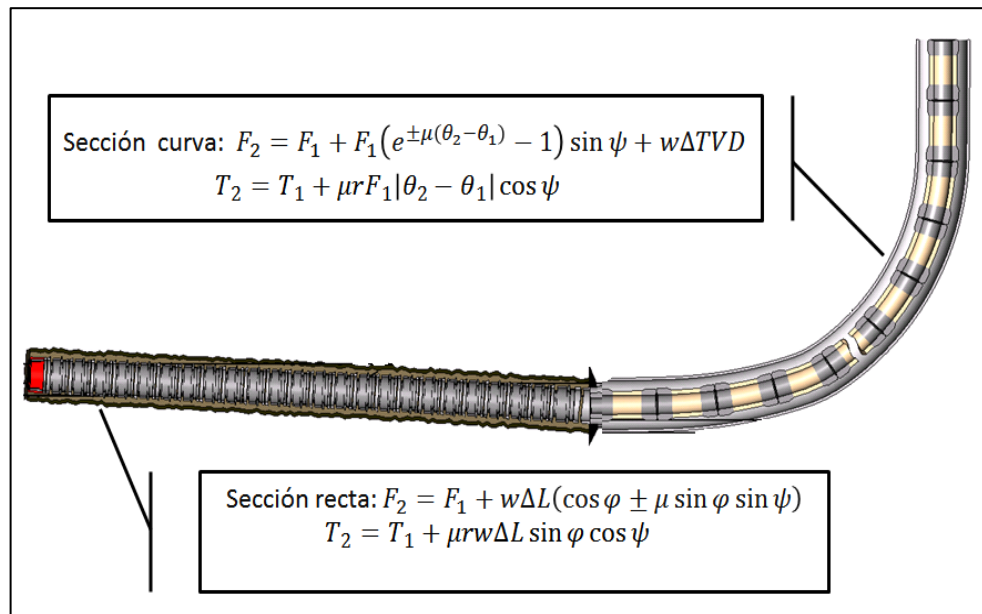
Teniendo en cuenta las características del pozo virtual señaladas en la sección anterior, el procedimiento para la predicción del torque y arrastre con el modelo analítico de Aadnoy 3D es el siguiente:

A. Identificar las secciones del pozo: Un pozo horizontal con alcance extendido puede tener 2 tipos de geometría secciones rectas o curvas, de acuerdo a ello se tienen ecuaciones diferentes. Para el pozo virtual, se tiene una sección recta vertical que va desde la superficie hasta 1343 ft MD, luego una sección curva de Build-up hasta 1463 ft MD y finalmente una sección recta inclinada hasta 4571 ft MD.

El caso particular de las secciones verticales es clave para el desarrollo del modelamiento del pozo virtual, ya que teóricamente la inclinación en la sección vertical es 0, no habrá aumento en el torque a lo largo de ésta, por ende, una curva Build-up puede ser usada para cubrir esa transición⁸. Teniendo en cuenta la aclaración del autor, para el caso de estudio el orden de uso de las ecuaciones es: ecuación para sección curva desde superficie hasta 1343 ft MD y la ecuación para sección recta desde superficie hasta 4571 ft MD.

⁸ (U. S. AADNOY Bernt 1998)

Figura 18. Ecuaciones usadas según las secciones del pozo virtual.



B. Calculo del cambio absoluto en la dirección “ θ ”: De acuerdo a la variación en la inclinación y el azimut del pozo se debe calcular el cambio absoluto en la dirección con la siguiente ecuación.

$$\cos \theta = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2$$

Es importante recordar que el cálculo de las variables se desarrolla de fondo a superficie, por ende y a manera de ejemplo, se presentan en la siguiente figura la ubicación de las celdas en la hoja de cálculo para introducir la ecuación correctamente, donde el sub índice 1 indica los valores de fondo y el sub índice 2 los valores del tope del segmento analizado.

Vale la pena aclarar, que todos los ángulos usados en éste modelo matemático deben estar en radianes.

Figura 19. Ubicaciones de las variables para el cálculo del cambio absoluto en la dirección.

TABLA DE DATOS DEL POZO VIRTUAL					
MD (ft)	TVD (ft)	Incl (°)	Azim Grid (°)	θ °	θ rad
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4400	0.0077
169.0000	168.9983	0.4400	79.6500	0.1896	0.0033
203.0000	202.9975	0.3646	104.7315	0.1561	0.0027
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1210.0000	1126.3180	46.3600	303.4700	3.9870	0.0696
1271.0000	1166.8820	50.2600	302.3600	5.8950	0.1029
1343.0000	1210.0451	56.0400	300.9100	0.7183	0.0125
1463.0000	1276.6441	56.5400	301.5300	3.3697	0.0588
1514.0000	1303.4999	59.9000	301.2300	4.6878	0.0818
1575.0000	1331.9280	64.5300	300.4000	4.7603	0.0831
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4445.0000	1297.5287	92.6700	294.2900	0.30561	0.0053
4505.0000	1294.7023	92.7300	294.0900	0.38076	0.0066
4571.0000	1291.3459	93.1000	294.0000		

Diagrama de anotaciones:

- Sección curva: abarca las filas de MD 0.0000 hasta 1575.0000.
- Sección recta: abarca las filas de MD 1575.0000 hasta 4571.0000.
- Variables de anotación:
 - ϕ_1 : apunta a la columna MD de la fila 4505.0000.
 - ϕ_2 : apunta a la columna TVD de la fila 4505.0000.
 - α_1 : apunta a la columna Incl de la fila 4505.0000.
 - α_2 : apunta a la columna Azim Grid de la fila 4505.0000.
 - θ : apunta a la columna θ ° de la fila 4505.0000.

C. Calculo del ángulo entre las velocidades axiales y tangenciales de la tubería “ ψ ”: este ángulo indica el estado de movimiento que presenta la sarta, si su valor es 0° se encuentra solo rotando y si es igual a 90° solo existe traslación de la tubería.

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{V_h 60}{2\pi r RPM} \right)$$

Cabe señalar que los RPM y la velocidad de la sarta dependen de la geometría y del estado mecánico del pozo. Por ello, para el pozo virtual se pueden calcular seis diferentes ángulos que dependen de la sección, el estado mecánico y la dirección del movimiento de la sarta.

Tabla 5. Movimiento axial y traslacional.

MOVIMIENTO AXIAL Y TRASLACIONAL					
BAJANDO REVESTIMIENTO-BUILD UP			SUBIENDO REVESTIMIENTO-BUILD UP		
Vh	M/S	0,035	Vh	M/S	0,088
RPM		11	RPM		5,6
INCLINADO			INCLINADO		
Vh	M/S	0,12	Vh	M/S	0,43
RPM		4,6	RPM		1,35
HUECO ABIERTO-INCLINADO			INCLINADO		
Vh	M/S	0,18	Vh	M/S	0,23
RPM		1,65	RPM		2,25

D. Calculo del factor de boyanza “β”: el fluido de perforación usado para el modelamiento de la corrida del revestimiento fue un lodo base agua con una densidad de 9.2 lb/gal, se debe calcular el factor de boyanza, asumiendo que la totalidad de la sarta se encuentra compuesta del mismo tipo de acero con densidad igual a 7850 Kg/m³ o 65.51 lb/gal.

$$\beta = 1 - \frac{\rho_{mud}}{\rho_{string}} = \frac{9.2 \frac{lb}{gal}}{65.51 \frac{lb}{gal}} = 0.86$$

E. Calculo del peso nominal de la tubería incluida el factor de boyanza “w”: a continuación se presenta la descripción detallada de la sarta de revestimiento, con la cual se debe calcular el factor “w”, multiplicando el peso nominal de cada tubería por el factor de boyanza.

Tabla 6. Sarta de completamiento.

SARTA DE COMPLETAMIENTO					
TIPO	LONGITUD (FT)	MD (FT)	OD (IN)	ID (IN)	PESO (LB/FT)
Drill Pipe	1095,28	1095,3	5	4	25,6
Heavy Weight	213,96	1309,2	5	3	49,3
Drill Collar	300,87	1610,1	6,5	2,25	83,5
Heavy Weight	425,7	2035,8	5	3	49,7
Drill Pipe	200	2235,8	4,5	3,826	16,6
Casing	2385,5	4635	7	6,4	26

F. Establecer las condiciones iniciales del modelamiento F1 y T1: para el cálculo del arrastre la condición inicial F1 es igual al peso del BHA, que para el pozo virtual es igual a 64165.5 Lb o 285.5 KN. La condición inicial para el cálculo del torque depende de si se está impartiendo o no torque a la broca, debido a que la sarta de completamiento del caso virtual no posee broca, el torque inicial o T1 es 0.

G. Coeficiente de fricción: cuando el coeficiente de fricción es un valor de entrada, el modelo matemático describe el cálculo de las fuerzas de torque y arrastre mediante un cálculo directo. Es posible realizar el cálculo opuesto, donde el coeficiente de fricción es determinado a partir de datos de torque y arrastre, partiendo de coeficientes asumidos e iterando para igualar los resultados⁹.

De acuerdo con lo anterior, se tomaron los valores de WELLPLAN como datos de entrada de torque y arrastre, para realizar el cálculo inverso, con el fin de ajustar el modelo de Aadnoy 3D, para que este en capacidad de simular de mejor manera el comportamiento del torque y arrastre en pozos vecinos, si esto fuese necesario.

⁹ (C.A Johancsik 1984)

El objetivo final es obtener los factores de fricción que permitían el ajuste del modelo de Aadnoy 3D para las diferentes corridas de revestimiento y realizar una comparación entre ellos, que permita evidenciar la reducción del torque y el arrastre.

4.3 PROCEDIMIENTO PARA MODELAR LA CORRIDA DE REVESTIMIENTO CON LOS CENTRALIZADORES PROTECH CRB

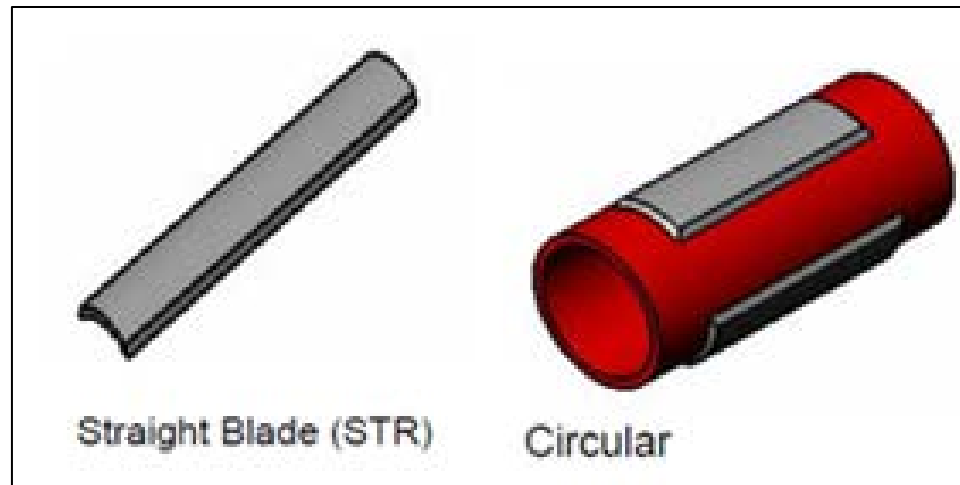
Para modelar el torque y el arrastre en la corrida de liner de 7" con el uso de 30 centralizadores PROTECH CRB, se lleva a cabo el mismo procedimiento descrito anteriormente, pero es necesario hacer una corrección en el diámetro de la tubería y un ajuste en el factor de fricción donde se ubican los centralizadores.

A. Corrección del diámetro: al instalar la herramienta a la tubería, el diámetro externo aumenta hasta 8.2", por lo cual es necesario incluir este nuevo diámetro en las ecuaciones entre las profundidades de 0 a 2364 ft MD, que es donde están ubicados los 30 centralizadores.

B. Ajuste en el factor de fricción: ya que los centralizadores PROTECH CRB se pueden ubicar sobre la tubería con un sinfín de geometrías, diámetros, ángulos y longitudes entre otras características; se modeló la herramienta en posición vertical (Straight Blade), lo que modifica el diámetro de la tubería y por ende el área de contacto en las profundidades donde se ubica la herramienta.

Para realizar la corrección del factor de fricción teniendo en cuenta las diferencias en el área de contacto entre la herramienta y el pozo, se considera el aporte de los autores Maidla y Wojtanowicz (1987), quienes discutieron posibles correcciones al factor de fricción para los cálculos del torque y el arrastre y sus diferentes aplicaciones en pozos con baja tolerancia, acumulación de ripios y retortas con espesores inusuales.

Figura 20. Ubicación del PROTECH CRB en la tubería.



Fuente: R.Baynham, D. Levie, et al. "A Novel Concept For Casing Centralization In Lean Profile Applications". Italia, Marzo 2003.

Los autores basaron el factor de corrección C_s , en el ángulo de la superficie de contacto, el cual puede variar entre 0 y 90°, y que depende principalmente de los diámetros del pozo y la sarta, descrito por la siguiente ecuación.

$$C_s = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{(D_i^2 - d_i^2)^{0.5}}{d_i} \right) \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) + 1$$

Donde D_i representa el diámetro interno del pozo y d_i el diámetro externo de la tubería. En el caso del pozo virtual d_i representa en algunas secciones el diámetro teniendo en cuenta la herramienta.

4.4 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la hoja de cálculo, comparados con los datos suministrados de WELLPLAN basados en el modelo de tubería flexible de Johancsik.

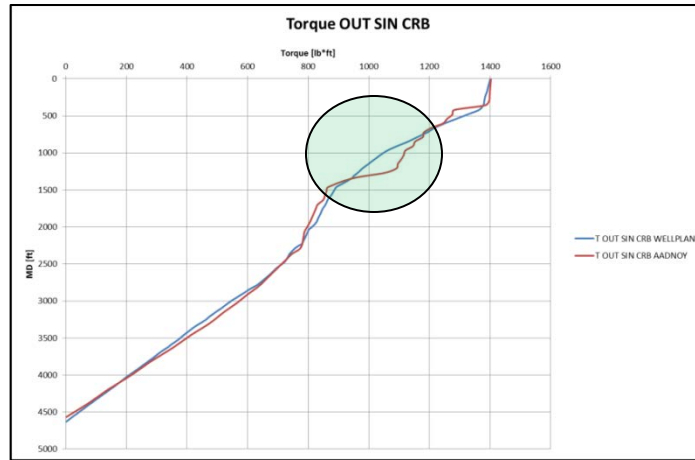
4.4.1 Modelamiento sin crb.

Como se mencionó en la sección anterior, el método usado en este proyecto de grado fue el proceso iterativo para obtener los coeficientes de fricción, lo que dio como resultado una serie de coeficientes de acuerdo a la dirección de movimiento de la sarta y a la variable calculada, que en teoría deberían ser iguales. A menudo, los coeficientes de fricción que son necesarios para ajustar los valores a la data real de arrastre son diferentes a los que se necesitan para ajustar los datos de torque. Algunas veces, es necesario usar diferentes factores dependiendo de la dirección del movimiento de la sarta. Los factores de fricción pueden cambiar incluso entre una corrida y otra.¹⁰ Esto es solo una manera de hacer que el modelo se ajuste, pero podría evidenciar que algo está mal en su planteamiento.

Las siguientes graficas: profundidad (ft MD) versus el torque (lbf*ft) y profundidad (ft MD) versus la fuerza axial (lbf), subiendo y bajando tubería, evidencian el ajuste de datos y los coeficientes de fricción promedio usados.

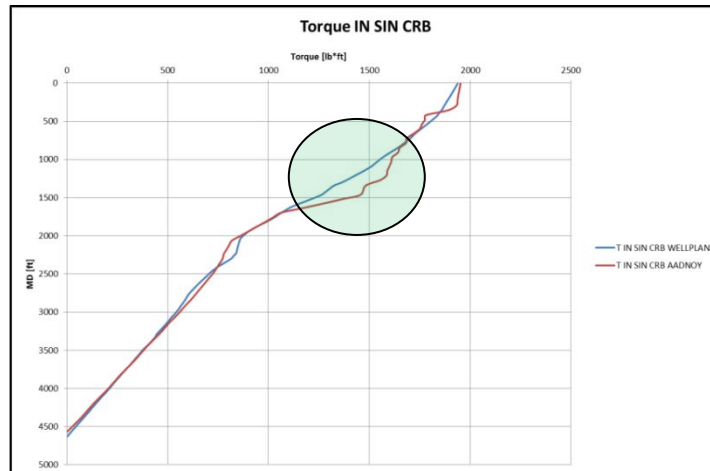
¹⁰ (Terje 2011)

Figura 21. Torque subiendo tubería sin CRB



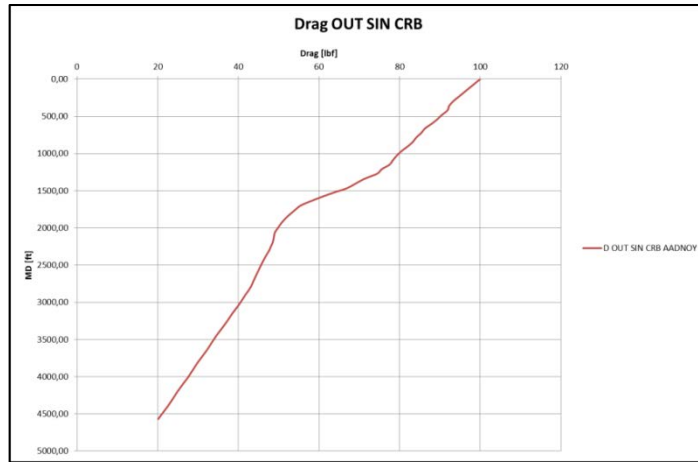
	μ
0-1343 ft MD	0,21
1463-4571 ft MD	0,61

Figura 22. Torque bajando tubería sin CRB



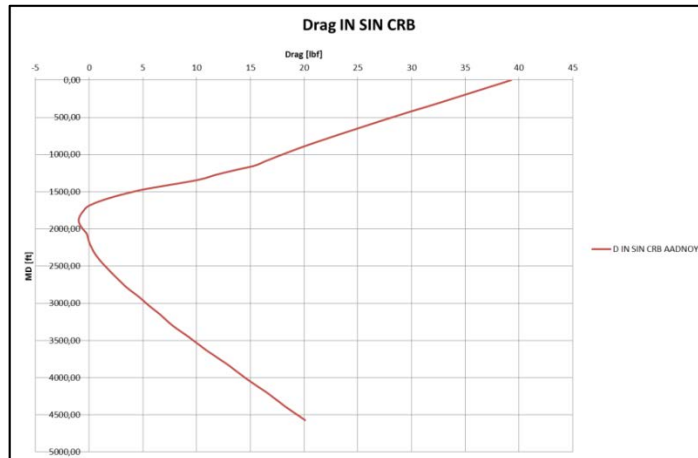
	μ
0-1343 ft MD	0,42
1463-4571 ft MD	0,57

Figura 23: Fuerza axial subiendo tubería sin CRB.



	μ
0-1343 ft MD	0,24
1463-4571 ft MD	0,55

Figura 24: Fuerza axial bajando tubería sin CRB.



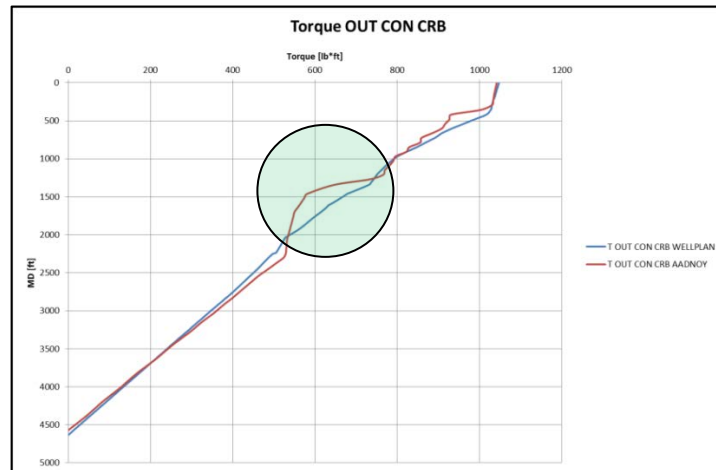
	μ
0-1343 ft MD	0,13
1463-4571 ft MD	0,31

4.4.2 Modelamiento con crb.

Los coeficientes de fricción obtenidos en la corrida sin los CRB sirven como punto de partida para el proceso iterativo del modelamiento con el uso de la herramienta, a estos se les realiza la corrección por el área de contacto y luego se desarrolla una nueva serie de iteraciones, en la que se tiene en cuenta el tipo de material que constituye los centralizadores, el cual posee un coeficiente de fricción menor al del acero, por lo que solo la corrección del área de contacto no es suficiente.

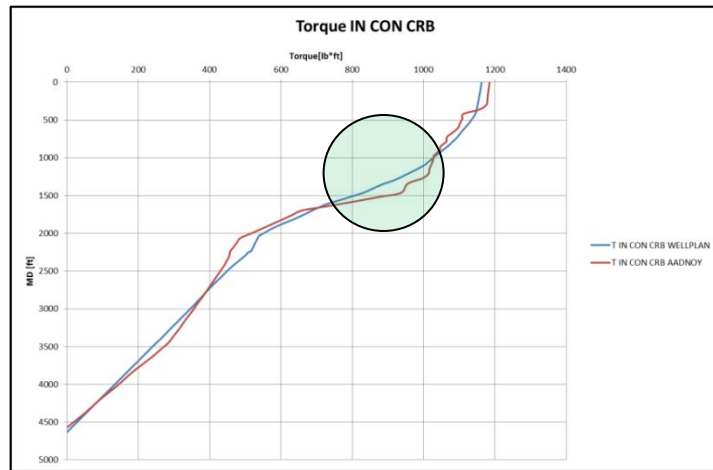
En la siguientes gráficas, se muestran los resultados y coeficientes de fricción promedio finales con el uso de los centralizadores PROTECH-CRB.

Figura 25: Torque subiendo tubería con CRB.



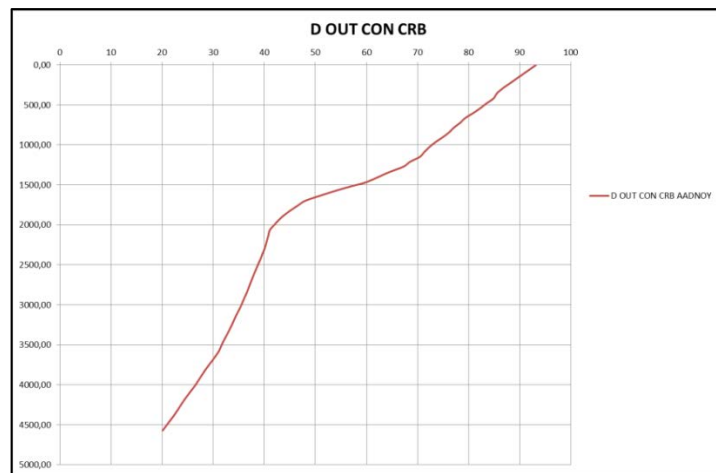
	μ
0-1343 ft MD	0,24
1463-4571 ft MD	0,39

Figura 26: Torque bajando tubería con CRB.



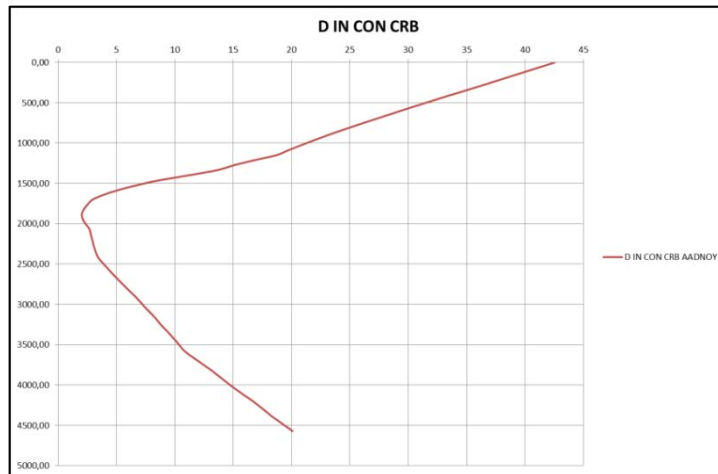
	μ
0-1343 ft MD	0,19
1463-4571 ft MD	0,35

Figura 27: Fuerza axial subiendo tubería con CRB.



	μ
0-1343 ft MD	0,22
1463-4571 ft MD	0,44

Figura 28: Fuerza axial bajando tubería con CRB.



	μ
0-1343 ft MD	0,11
1463-4571 ft MD	0,26

4.4.3 Análisis de resultados.

En las gráficas anteriores se puede observar los coeficientes de fricción promedios obtenidos para el ajuste del modelo luego de una gran serie de iteraciones. Es evidente como el uso de la herramienta reduce el torque, aspecto que se corrobora al obtener coeficientes de fricción menores comparados con la corrida de revestimiento sin los centralizadores. El proceso de ajustar el modelo podría ser mejorado, pero se reduce a la finalidad de su uso y a la calidad de los datos de entrada que se tiene. En este caso el propósito principal es hacer una evaluación técnica de la implementación de los reductores de fricción que se evidencia al comparar los coeficientes obtenidos de los modelamientos y no hacer una validación de la exactitud del modelo como tal.

Como se puede observar en la graficas de torque, existe un cambio brusco en la tendencia de la gráfica a la profundidad de 1343 ft MD, lugar donde finaliza la sección curva e inicia la sección recta. Ya que el modelo de Aadnoy 3D está conformado por dos sets de ecuaciones que depende de la geometría, se puede afirmar que el cambio brusco en la tendencia depende de la profundidad límite de las secciones que no permite realizar un buen ajuste de datos, al no existir una ecuacione que modele la transición entre secciones.

Por otro lado, ubicar el límite que determine si una sección del pozo es curva o recta es un inconveniente que tiene un gran impacto en los resultados del modelamiento. En este trabajo se tuvo en cuenta el ángulo de inclinación como criterio para determinar la geometría del pozo.

Ahora bien, el objetivo principal de este proyecto fue evaluar el porcentaje de reducción que ofrecían los centralizadores haciendo uso del modelo de Aadnoy 3D y comparar los resultados con los obtenidos por WELLPLAN. Dichas reducciones pueden ser apreciadas en las siguientes graficas:

Figura 29. Reducción del torque subiéndola tubería, por el uso de la herramienta

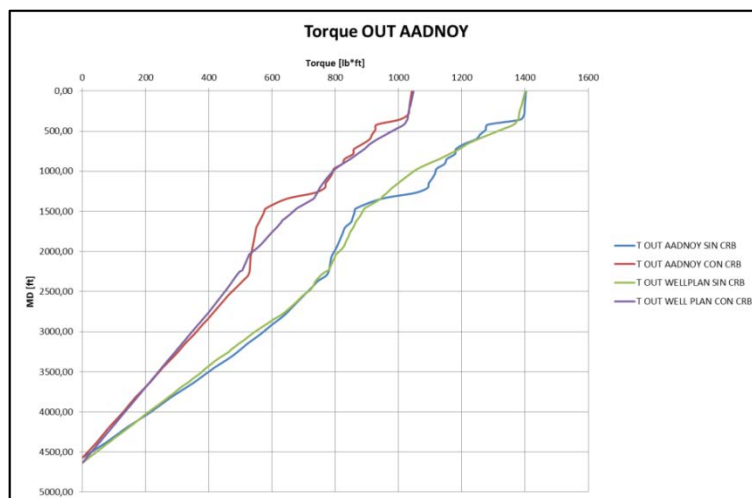


Figura 30. Reducción del torque bajando la tubería, por el uso de la herramienta.

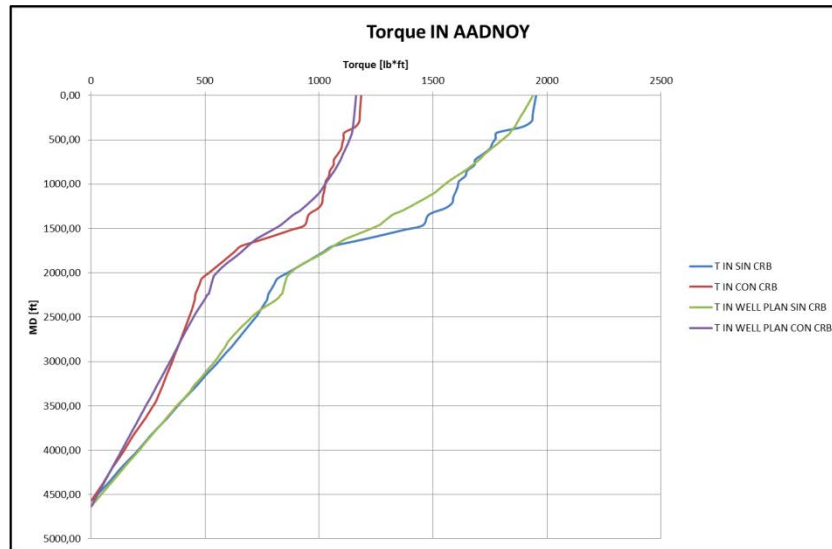


Tabla 7. Porcentajes de reducción del torque

WELLPLAN			AADNOY 3D		
Reductor de Fricción CRB-Proetch®	Torque (ft-lb)		Reductor de Fricción CRB-Proetch®	Torque (ft-lb)	
	Triping Out	Triping In		Triping Out	Triping In
0	1400.7	1938.8	0	1402.9	1952.6
30 CRB 7" x 8.2"	1047.4	1162.6	30 CRB 7" x 8.2"	1041.9	1184.9
Reduccion Propuesta	353.3	776.2	Reduccion Propuesta	361.0	767.6
Porcentaje (%)	25.2	40.0	Porcentaje (%)	25.7	39.3

Así mismo como se puede apreciar la reducción respecto al torque, se puede ver respecto al factor de fricción.

Tabla 8. Factores de fricción promedio usados en el ajuste del torque.

TORQUE	0-1343 ft MD	1463-4571 ft MD
μ SUBIENDO SIN CRB	0,21	0,61
μ SUBIENDO CON CRB	0,24	0,39
μ BAJANDO SIN CRB	0,42	0,57
μ BAJANDO CON CRB	0,19	0,35

Figura 31. Gráfica de los coeficientes de fricción en el torque subiendo la tubería.

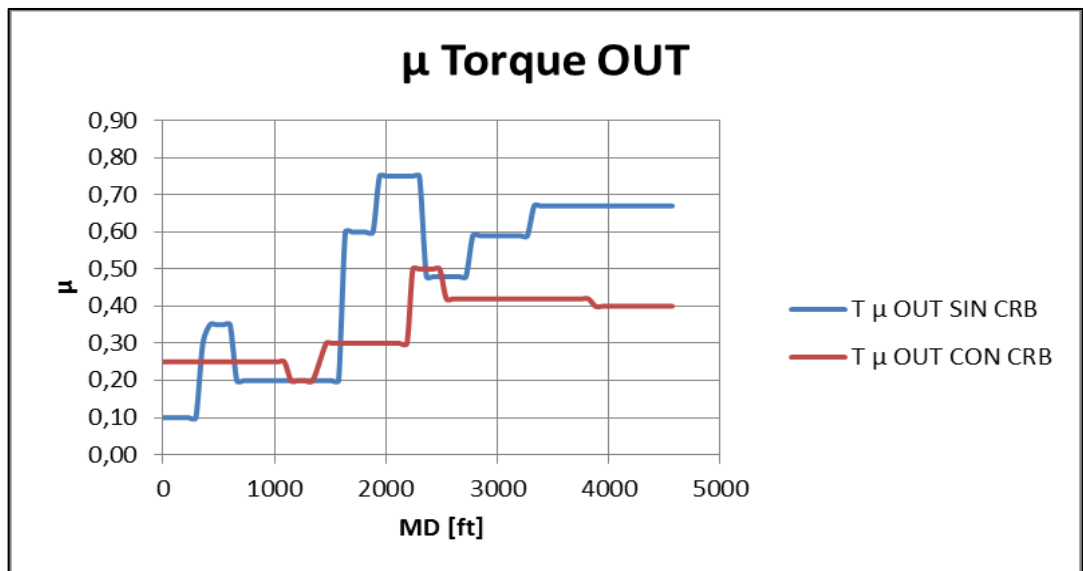
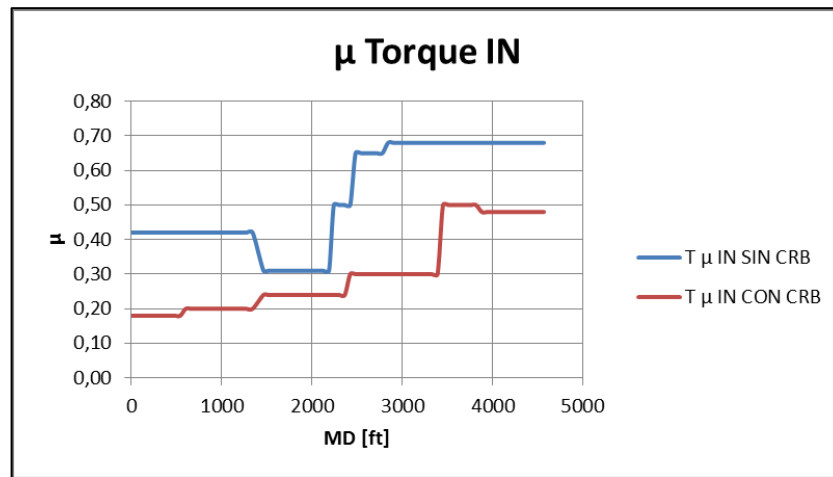


Figura 32. Gráfica de los coeficientes de fricción en el torque bajando la tubería.



La forma de interpretar el arrastre por WELLPLAN es graficando el Hook Load, que se define como la suma de las fuerzas que influyen sobre la sarta, incluyendo el peso de la misma, el factor de boyanza y en pozo desviados, la influencia de la fuerza de arrastre causada por los movimientos de la tubería dentro del pozo. Es importante resaltar que el Hook Load es inversamente proporcional al arrastre, por lo que al pasar la tubería por secciones curvas u horizontales el arrastre aumentara y el HookLoad disminuirá.¹¹

En las siguientes graficas se ve el Hook Load y la reducción ofrecida por la herramienta, se observa como a partir de los 1500 ft, el valor del Hook Load disminuye cuando se baja la tubería al pozo, de igual forma, en el gráfico de arrastre se observa un aumento significativo. Los valores negativos de Hook Load indican que el arrastre es tan grande que no permite el movimiento de la sarta.

¹¹ (LIU 2013)

Figura 33. Reducción en el Hook Load por el uso de la herramienta bajando la tubería.

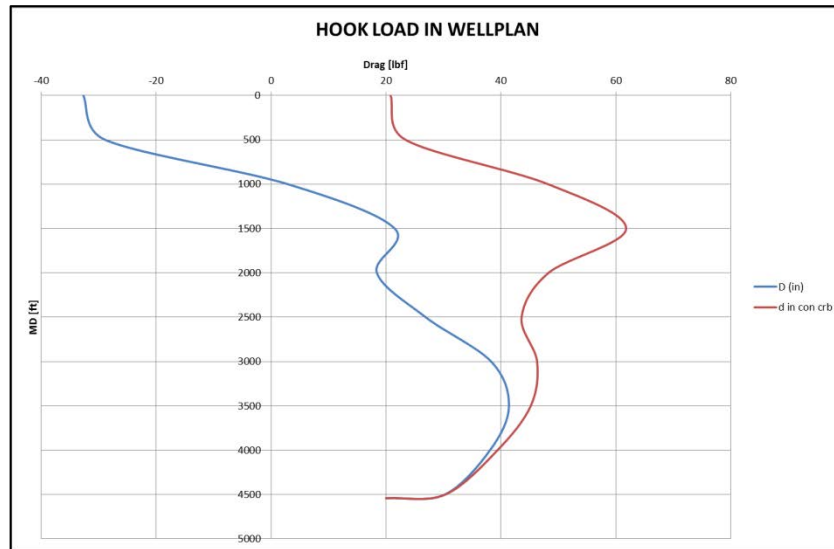


Figura 34. Reducción en el Hook Load por el uso de la herramienta subiendo la tubería.

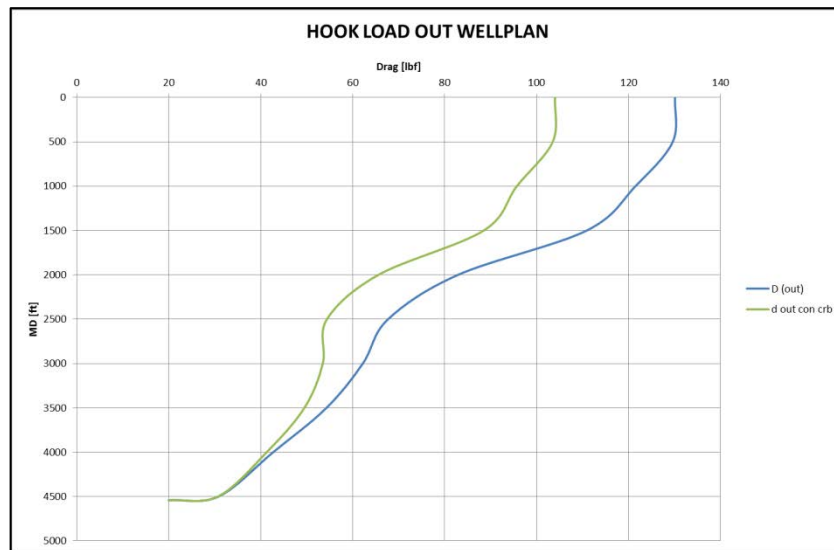


Tabla 9. Porcentaje de reducción en el Hook Load.

WELLPLAN		
Reductor de Friccion CRB-Proetch®	Hook load (ft-lb)	
	Tripping Out	Tripping In
0	130.1	-32.7
30 CRB 7" x 8.2"	104	20.8
Reduccion Propuesta	26.1	-53.5
Porcentaje (%)	20.1	163.6

Por otra parte el modelo de Aadnoy 3D calcula los valores del arrastre y en las siguientes graficas se puede observar los cambios que suceden cuando se usa la herramienta.

Figura 35. Reducción en el arrastre bajando la tubería según el modelo de Aadnoy.

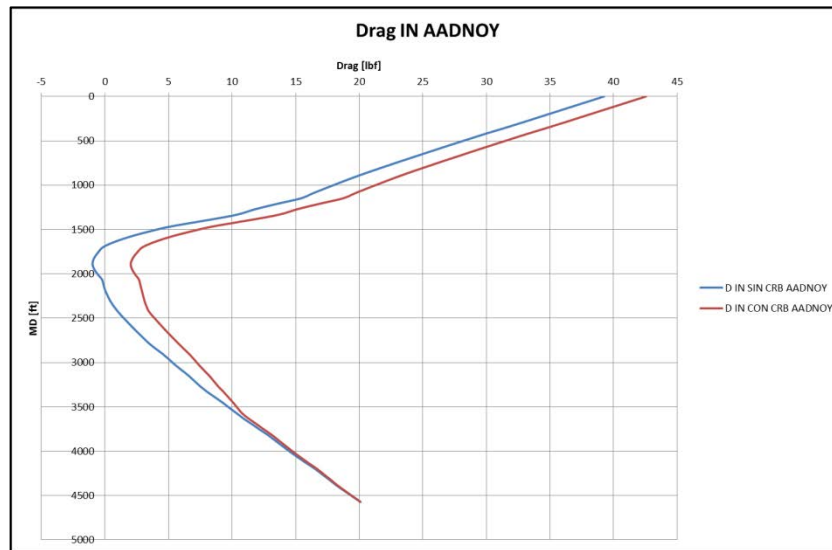


Figura 36. Reducción en el arrastre subiendo la tubería según el modelo de Aadnoy.

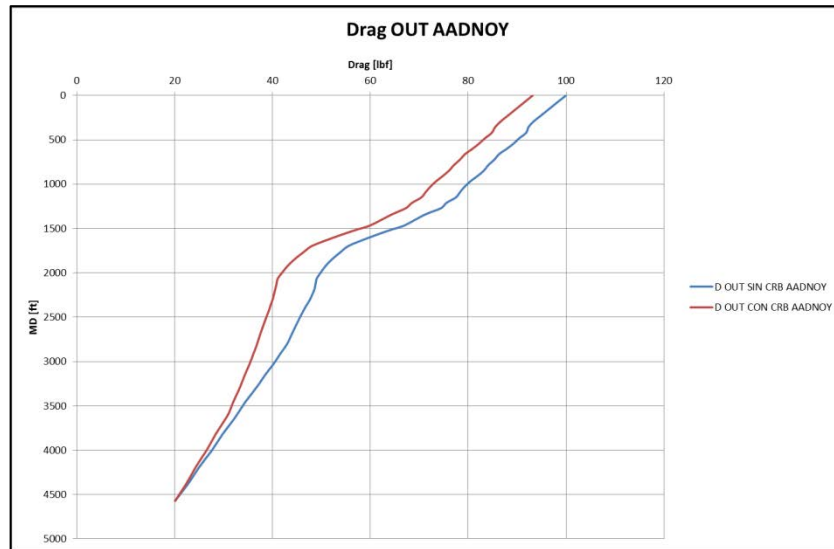


Tabla 10. Porcentaje de reducción del arrastre según el modelo de Aadnoy.

AADNOY 3D		
Reductor de Fricción CRB-Proetch®	Drag (ft-lb)	
	Tripping Out	Tripping In
0	99.9	39.3
30 CRB 7" x 8.2"	93.17	42.6
Reduccion Propuesta	6.8	-3.3
Porcentaje (%)	6.8	-8.4

Igual que en el caso del torque esta reducción también se aprecia en el factor de fricción cuando se analiza el arrastre, así como se observa en las tablas y las figuras siguientes.

Tabla 11. Factores de fricción promedio usados en el ajuste del arrastre.

ARRASTRE	0-1343 ft MD	1463-4571 ft MD
μ SUBIENDO SIN CRB	0,24	0,55
μ SUBIENDO CON CRB	0,22	0,44
μ BAJANDO SIN CRB	0,13	0,31
μ BAJANDO CON CRB	0,11	0,26

Figura 37 Gráfica de los coeficientes de fricción en el arrastre subiendo la tubería.

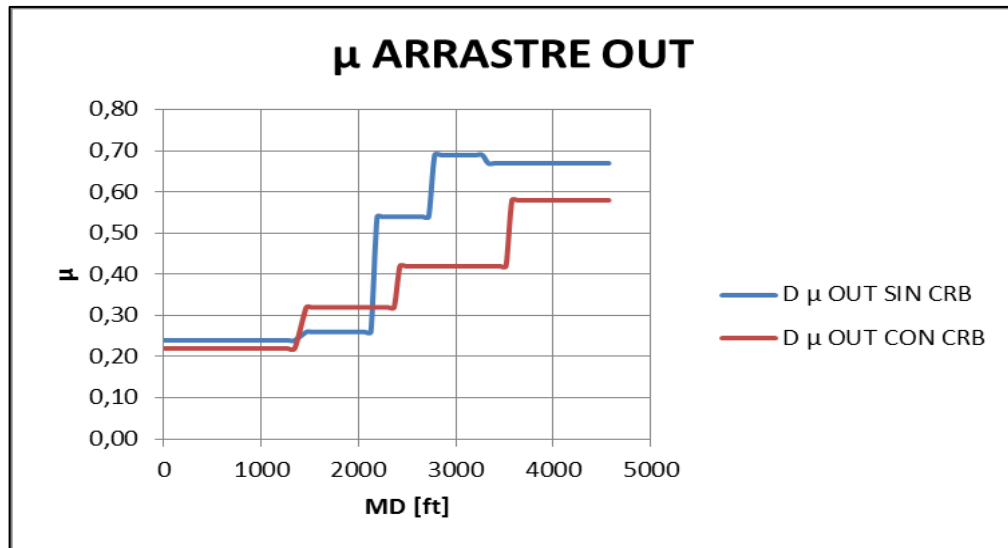
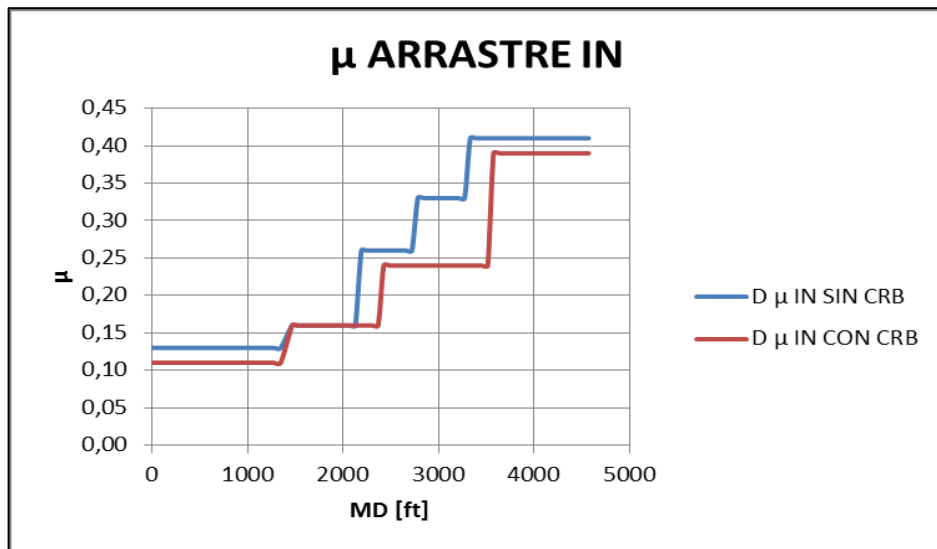


Figura 38. Gráfica de los coeficientes de fricción en el arrastre bajando la tubería.



Como se pudo observar en las anteriores gráficas, es posible ajustar el modelo para que arroje resultados similares a los predichos por WELLPLAN, sin embargo, el método usado para hacer este ajuste puede generar preguntas. Primero, los pesos estáticos de la sarta en el fondo del pozo no dependen del factor de fricción, solo en el peso unitario de la tubería, el peso del lodo y en la profundidad vertical, por ende es necesario ajustar el modelo desde el inicio con el valor tomado por el simulador. Segundo, los pesos bajando y subiendo tubería son medidos con poleas móviles en la corona y en el bloque viajero, por lo tanto, se ven afectados por la fricción que se genera en dichas poleas. Esta fricción genera un porcentaje de error en las mediciones, por lo que el peso al subir la tubería es un poco menor y al bajarla un poco mayor, respecto al peso real.

5. CONCLUSIONES

Entre los modelos matemáticos para la predicción del torque y arrastre, los modelos de tubería flexible son los más usados debido a su sencillez y a que engloban un mayor número de variables, lo que aumentan la precisión de los resultados obtenidos; dentro de este grupo, el más actualizado es el modelo analítico de Aadnoy 3D, el cual fue empleado en la realización de este proyecto de grado.

El modelo analítico de Aadnoy está conformado por dos sets de ecuaciones para las secciones curvas y rectas del pozo, por ende, la ubicación de los límites que determinan la geometría de la sección, es un factor clave que genera un impacto significativo en los resultados obtenidos.

La corrección del factor de fricción por el área de contacto es una buena aproximación para modelar el torque y el arrastre cuando se hace uso de los centralizadores PROTECH CRB, pero también hay que tener en cuenta que por el tipo de material usado para estos centralizadores se va a presentar una reducción adicional en el factor de fricción que es independiente de la corrección del área de contacto.

El uso de centralizadores PROTECH CRB es una excelente alternativa para el completamiento de pozos horizontales con alcance extendido debido a la reducción del torque y el arrastre.

Los resultados de torque y arrastre obtenidos a través del modelo analítico de Aadnoy 3D fueron similares a los arrojados por el software WELLPLAN, lo que demuestra aplicabilidad del modelo.

El modelo 3D tiene cierta inexactitud para la parte baja de la sarta con baja tensión, puesto que la fuerza lateral debido al peso de la sarta no se tiene en cuenta.

6. RECOMENDACIONES

Profundizar en un análisis detallado que permita reconocer las secciones de un pozo, de manera que siempre que se trabaje el modelo se separen las secciones bajo el mismo criterio.

Desarrollar una correlación que permita tener en cuenta el efecto del material del que están hechos los centralizadores PROTECH CRB en el factor de fricción, con el fin de obtener un porcentaje de reducción fijo en el coeficiente que pueda ser aplicado a todos los pozos en futuras predicciones.

Plantear una ecuación que permita modelar la transición entre secciones, que disminuya el cambio brusco en los resultados y permita realizar un mejor ajuste del modelo.

Seguir las diferentes etapas planteadas en el procedimiento para la instalación de los centralizadores PROTECH CRB, puede presentar la diferencia entre un buen y un mal resultado en el uso de la herramienta.

BIBLIOGRAFÍA

AADNOY Bernt, ANDERSEN Ketil. «Desing of oil wells using analyticl friction models .» *Journal of Petroleum Science and Engineering* , 2001: 53-71.

AADNOY Bernt, FAZAELIZADEH Mohammad, HARELAND Geir. «A 3D Analitical Model for Wellbore Friction.» *Journal of Canadian Petroleum Technology* 49, nº 10 (Octubre 2010): 25-36.

AADNOY Bernt, LARSEN Kenneth, BERG Per. *Analysis of stuck pipe in deviated boreholes*. Stravanger, Norway: Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003.

AADNOY Bernt, STAVANGER y DJURHUUS Joannes. «Theory and Application of a New Generalized Model for Torque and Drag.» *SPE international*, 2008.

AADNOY Bernt, U. Stavanger, ANDERSEN Ketil. «Friction Analysis for Long-Reach Wells .» *IADC/SPE Drilling Conference* , 1998.

AADNOY Brent, KAARSTAD Eirik, MIRHAJ Seyed. «Improveente of Torque-and-Drag Modeling in Long-Reach Wells.» *Modern Applied Science*, 2011.

AARRESTAD, Thor Viggo y BLIKRA, Harald. «Torque and Drag-Two Factors in Extended-Reach Drilling.» *SPE*, nº 27491 (Septiembre 1994).

ARBELAEZ, M. N. y TARAZONA, H. «Optimizacion del diseño de revestimiento de pozos.» Bucaramanga: Universidad industrial de Santander-Escuela de Ingeniería de Petróleos. , 1991.

BENNETZEN, Bjarne et al. «Pozos de alcance extendido.» *Artículo de Oilfield Review*, Otoño 2010:22: no 3.

BERRY, M. Y DOUSETT, J. «Mechanical Methods of Reducing Torque and Drag in Extendes-Reach Wells Facilitate.» *SPE*, nº 93782 (Abril 2005).

C.A Johancsik, D.B Friesen y Rapier Dawson. «Torque and Drag in Directional Wells - Prediction and Measurement.» *Journal of Petroleum Technology*, Junio 1984.

F. Acosta, E. Webb, F. Zausa. «Carbon-Fiber ceramic products-An Innovative solution that allows Centralization-Desing Versatility. .» 2009.

H-S Ho, NL Petroleum Services. «An improved Modeling Program for Computing the Torque and Drag in Directional and Deep Wells. .» *SPE 18047*, 1988.

LIU, Gefei. www.pvisoftware.com. 24 de Septiembre de 2013. <http://www.pvisoftware.com/blog/tag/hook-load/> (último acceso: 18 de Diciembre de 2013).

MASON, Colin J., LOPEZ, Jesse, MELING, Sigve Sigve Meling, MUNGER, Robert, BP Exploration y FRASER, Barry, Avanteq. «Casing Runing Challenges for Extended-Reach Wells.» *Spe, One petro*, nº 84447 (Octubre 2003): 14.

MASON, Colin J., y LARRY G. et al WILLIAMS. «Reinventing the Wheel - Reducing Friction in High-Angle Wells.» *SPE*, nº 63270 (Octubre 2000).

MCCORMICK, John E. y EVANS, Chan D. «Ten Year Evolution and Field History of Desing Changes for a Torque and Drag Reduction Performance Drilling Sub.» *SPE*, nº 145987 (Septiembre 2011).

Mohammad, FAZAELIZADEH. *Real Time Torque and Drag Analysis during Directional Drilling*. Calgary, Alberta: University of Calgary, 2013.

QUISPE, Christian J. y REMACHE, Guillermo S. «Herramientas reductoras de torque y arrastre de nueva generacion en Perforacion Direccional, Sistema LoTAD, y su aplicacion en el campo de Sacha de Petroproduccion.» *Trabajo de grado*. Guayaquil-Ecuador: Escuela Superior Politecnica del Litoral, 2009.

R. Baynham, D. Levie, A. Calderoni, C., y olaschi & F. Zausa. «A Novel Concept for Casing Centralization in Lean Profile Applications .» 2003.

SANCHEZ, Alfredo y BROWN F, Christian. «Casing Centralization in Horizontal and extended Reach Wells.» *Spe 150317, One Petro.*, Marzo 2012.

T., Edelverto Hernandez. *Conceptos Básicos Sobre Cementaciones y Perforación Direccional*. Bucaramanga, 1983.

Terje, TVEITDAL. *Torque & drag analyses of North Sea Wells using new 3D model*. Stavanger, 2011.

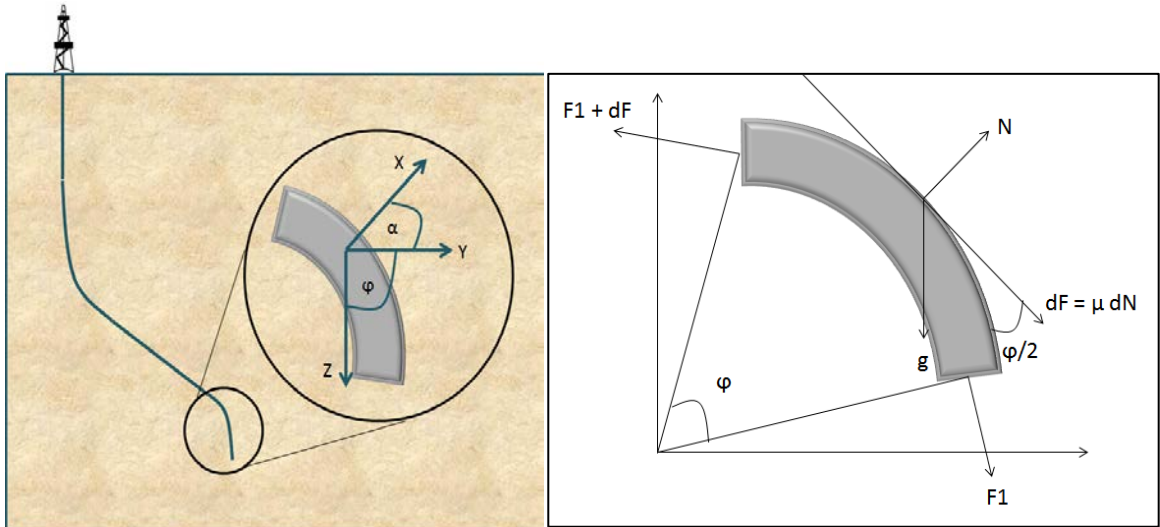
ZHANG, Yi. «Modeling of Casing Running in High Angle Wells.» *The University of Tulsa, Drilling Research Projects*, Noviembre 2006.

ZHOU Shaohua, ARAMCO Saudi, KAMAL Mansoor. «Application of Innovative Ceramic Centralizer for Solid Expandable Liner .» *SPE 137028*, 2010.

ANEXOS

1. ANEXO A. Modelo de tubería flexible o Soft String.

Secciones de un pozo con alcance extendido.



Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

Mediante el balance de fuerzas que actúan sobre un segmento de tubería que se encuentra en una sección curva del pozo con un ángulo de desviación ϕ y un ángulo de azimut α , y conociendo el peso nominal de la tubería w y la longitud del arco R , Johancsik obtienen las siguientes ecuaciones:

$$dN_v = (F_1 + dF) \sin\left(\frac{d\phi}{2}\right) + F_1 \sin\left(\frac{d\phi}{2}\right) + wR \sin \phi d\phi$$

Teniendo en cuenta que para ángulos (radianes) pequeños:

$$\sin\left(\frac{d\phi}{2}\right) \approx \left(\frac{d\phi}{2}\right)$$

Asimismo, debido a que se está analizando un elemento infinitesimal, dF_1 y $d\varphi/2$ tienden a cero, se obtiene la resultante de la fuerza normal en dirección vertical.

$$dN_v = 2F_1 \left(\frac{d\varphi}{2} \right) + wR \sin \varphi d\varphi$$

En dirección horizontal la fuerza normal está dada por:

$$dN_h = (F_1 + dF) \sin \left(\frac{d\varphi}{2} \right) \sin \varphi + F_1 \sin \left(\frac{d\varphi}{2} \right) \sin \varphi$$

Simplificando de acuerdo a lo descrito anteriormente:

$$dN_h = F_1 d\alpha \sin \varphi$$

En dirección tangencial al punto de análisis se tiene el siguiente balance de fuerzas:

$$(F_1 + dF) \cos \left(\frac{d\varphi}{2} \right) - F_1 \cos \left(\frac{d\varphi}{2} \right) \pm \mu |dN_t| = 0$$

Para ángulos pequeños se tiene que:

$$\cos \left(\frac{d\varphi}{2} \right) \approx 1$$

Por definición, un diferencial de fuerza de fricción está dado por:

$$dF = \pm \mu |dN_t|$$

La fuerza normal total es igual a la suma vectorial de las fuerzas normales horizontales y tangenciales:

$$dN_t = ((F_1 d\alpha \sin \varphi)^2) + (F_1 d\varphi + wR \sin \varphi d\varphi)^2)^{1/2}$$

Reemplazando en la definición de fuerza de fricción:

$$dF = \pm \mu ((F_1 d\alpha \sin \varphi)^2) + (F_1 d\varphi + wR \sin \varphi d\varphi)^2)^{1/2}$$

Considerando que $d\approx\Delta$ y $wRd\varphi=W$ o peso de un segmento de tubería incluida la boyanza, adicionando el peso proyectado Johancsik concluye:

$$F_2 = F_1 + W \cos \varphi \pm \mu ((F_1 d\alpha \sin \varphi)^2) + (F_1 d\varphi + wR \sin \varphi d\varphi)^2)^{1/2}$$

Analizando la ecuación anterior se tiene que F_1 es la fuerza en el fondo del segmento, la fuerza de fricción puede ser positiva o negativa de acuerdo a la dirección del movimiento, donde + significa que la sarta está siendo retirada del pozo y - que se está llevando la tubería a fondo.

Debido a las diferentes geometrías presentes en un pozo con alcance extendido la formula general de Johancsik puede simplificarse, en otras palabras, se obtiene una ecuación para cada geometría: vertical, build-up y drop-of.

Ya que una zona vertical no presenta ninguna curvatura $\Delta\alpha$ y $\Delta\varphi$ son cero, luego la ecuación se reduce a:

$$F_2 = W \cos \varphi \pm \mu W \sin \varphi$$

Para un Build up:

$$F_2 = F_1 \pm \mu((F_1 \Delta \alpha)^2 + (W)^2)^{1/2}$$

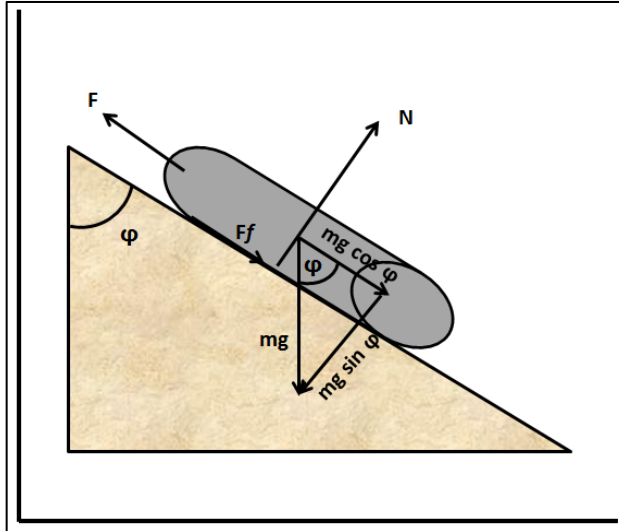
Finalmente para un Drop-of:

$$F_2 = F_1 \pm W \cos \varphi \pm (F_1 \Delta \varphi + W \sin \varphi)$$

2. ANEXO B. Modelo generalizado de AADNOY 2D

1. TORQUE Y ARRASTRE EN UNA SECCIÓN RECTA.

Diagrama de fuerzas pozo inclinado para el modelo de Aadnoy 2D.



Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

Del diagrama de cuerpo libre para un segmento de tubería en un plano con inclinación ϕ se tienen las siguientes sumatorias de fuerzas:

$$\sum F_x = F = mg \cos \varphi + F_f$$
$$\sum F_y = N = mg \sin \varphi$$

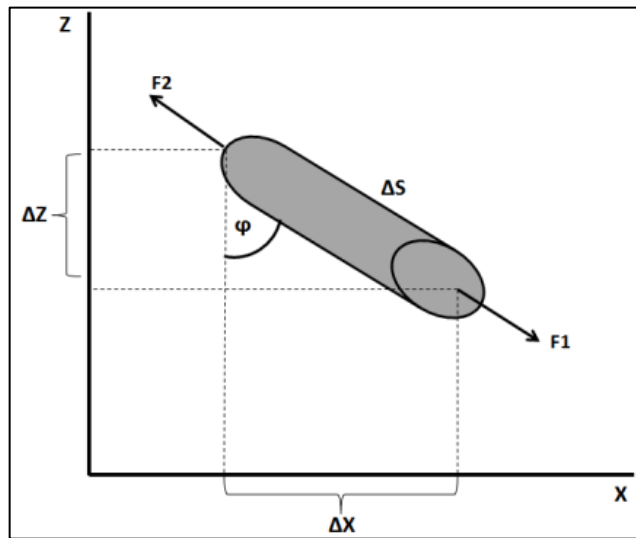
Reemplazando la definición de fuerza de fricción en las ecuaciones y teniendo en cuenta que según la dirección de desplazamiento de la tubería la fuerza de fricción es - si se lleva la tubería a fondo o + a superficie:

$$F_f = \mu N$$

$$\sum F_x = F = mg \cos \varphi \pm \mu mg \sin \varphi$$

Conociendo el peso nominal de la tubería w y el segmento de tubería ΔS , la fuerza de arrastre para una sección recta inclinada es:

Longitud del segmento de la tubería analizado.



Fuente: Modificada por autor. BERNT, Aadnoy, et al. "Design of oil wells using analytical friction". Journal of Petroleum Science and Engineering 32 (2001) 53– 71

$$F_2 = F_1 + w\Delta s(\cos \varphi \pm \mu \sin \varphi)$$

El primer término en el paréntesis define el peso de la sarta y el segundo la fuerza de fricción adicional requerida para mover la tubería. El cambio en la fuerza cuando se inicia un desplazamiento ya sea hacia arriba o abajo puede ser calculado substrayendo el peso $w\Delta s \cos \varphi$ de las fuerzas definidas anteriormente¹².

¹² (A. K. AADNOY Bernt 2001)

Cabe resaltar que el peso axial de la tubería siempre es igual al peso nominal multiplicado por la altura proyectada y es independiente de la inclinación del pozo¹³.

Partiendo de la definición de torque:

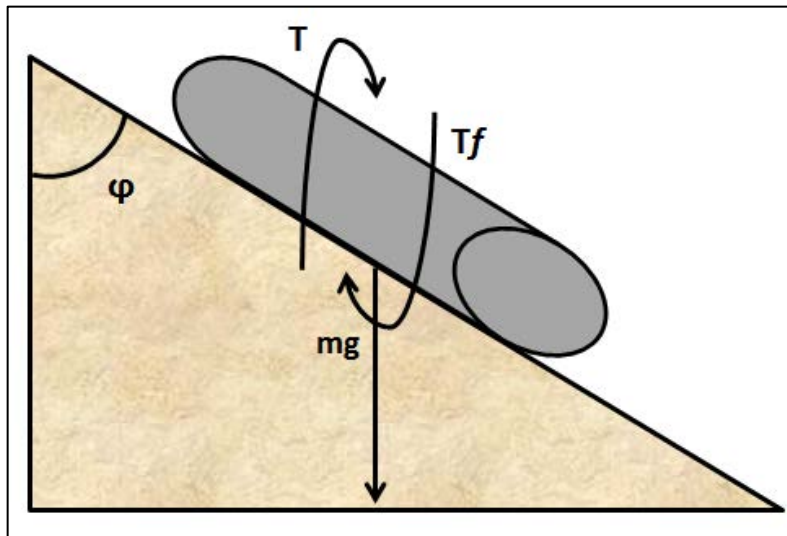
$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F}$$

Cuya magnitud está dada por:

$$T = rF \sin \varphi$$

Aplicando el mismo principio para un segmento de tubería en un plano inclinado el torque es:

Torque en un segmento inclinado para el modelo de Aadnoy 2D.



Fuente: Modificada por autor. BERNT, Aadnoy, et al. "Design of oil wells using analytical friction". Journal of Petroleum Science and Engineering 32 (2001) 53– 71

¹³ (U. S. AADNOY Bernt 1998)

$$T = Tf$$

$$Tf = Ff \cdot r$$

Reemplazando por la definición de fuerza de fricción y normal:

$$N = mg \sin \varphi$$

$$Ff = \mu N$$

$$T = \mu mg \sin \varphi r$$

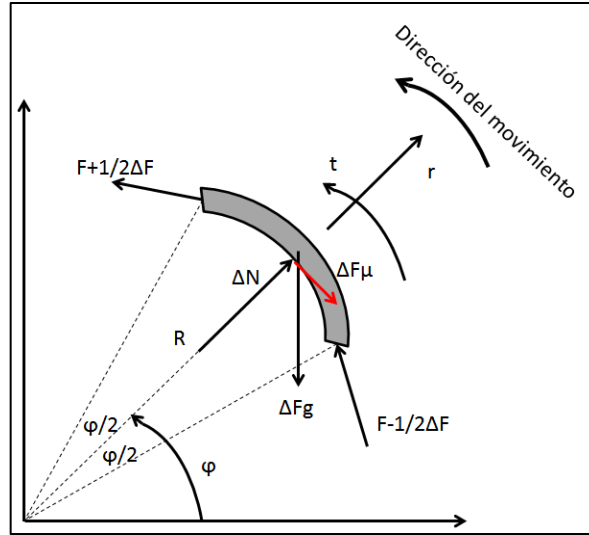
Conociendo el peso nominal de la tubería w y la longitud del segmento analizado ΔS , el torque para una sección inclinada es:

$$T = r\mu|w\Delta s \sin \varphi|$$

2. TORQUE Y ARRASTRE EN SECCIONES CURVAS (BUILD-UP O DROP OFF).

Para un segmento de tubería de longitud $R\Delta\phi$ y peso nominal, usando un sistema de coordenadas cilíndricas (r,t) se describen las diferentes fuerzas que actúan sobre él

Fuerzas en un sección curva en el modelo de Aadnoy 2D.



Fuente: Modificada por autor. BERNT, Aadnoy, et al. "Design of oil wells using analytical friction".
Journal of Petroleum Science and Engineering 32 (2001) 53– 71

El peso se descompone en ΔF_{gr} y ΔF_{gt} :

$$\Delta F_{gr} = -wR\Delta\varphi \sin \varphi$$

$$\Delta F_{gt} = -wR\Delta\varphi \cos \varphi$$

Del balance de fuerzas en r y t se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum F_t = \left(F + \frac{1}{2}\Delta F\right) \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) - \left(F - \frac{1}{2}\Delta F\right) \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \Delta F_{gt} - \Delta F_{\mu}$$

$$\sum F_r = -\left(F + \frac{1}{2}\Delta F\right) \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) - \left(F - \frac{1}{2}\Delta F\right) \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \Delta F_{gr} + \Delta N$$

Insertando la definición de fuerza de fricción y simplificando cada balance:

$$\sum F_t = 0 \leftrightarrow \Delta F \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \Delta F_{gt} - \mu|\Delta N| = 0$$

$$\sum F_r = 0 \leftrightarrow \Delta F \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \Delta F_{gr} - \Delta N = 0$$

Despejando ΔN e igualando las ecuaciones:

$$\Delta F \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = -\Delta F_{gt} + k\mu\left(2F \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) - \Delta F_{gr}\right)$$

Donde k es 1 si $\Delta N \geq 0$ o k es -1 si $\Delta N < 0$, es decir que k es + si la tubería se desplaza hacia superficie o - si se desplaza a fondo.

Teniendo en cuenta que $\cos\left(\frac{d\varphi}{2}\right) \approx 1$, $\sin\left(\frac{d\varphi}{2}\right) \approx \frac{d\varphi}{2}$ y $\Delta \rightarrow d$:

$$dF = \{wR \cos \varphi + k\mu(F + wR \sin \varphi)\}d\varphi$$

Reorganizando términos:

$$\frac{dF}{d\varphi} - k\mu F = wR \cos \varphi + \mu wR \sin \varphi$$

Definiendo las funciones P y Q se puede resolver la ecuación:

$$P(\varphi) = -k\mu$$

$$Q(\varphi) = wR \cos \varphi + \mu wR \sin \varphi$$

$$I(\varphi) = e^{\int P(\varphi)d\varphi} = e^{\int -k\mu} = e^{-k\mu\varphi}$$

Conociendo la fuerza anterior F_1 y la inclinación anterior ϕ_1 :

$$F_2 = \frac{F_1 I(\varphi_1)}{I(\varphi_2)} + \frac{1}{I(\varphi_2)} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} I(\varphi) Q(\varphi) d\varphi$$

$$F_2 = \frac{F_1 e^{-k\mu\varphi_1}}{e^{-k\mu\varphi_2}} + \frac{1}{e^{-k\mu\varphi_2}} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} e^{-k\mu\varphi} (wR \cos \varphi + \mu wR \sin \varphi) d\varphi$$

$$F_2 = F_1 e^{-k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} + wR e^{k\mu\varphi_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} e^{-k\mu\varphi} (\cos \varphi + \mu \sin \varphi) d\varphi$$

$$F_2 = F_1 e^{-k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} + wR e^{k\mu\varphi_2} \left[\frac{e^{-k\mu\varphi}}{1 + \mu^2} (-\mu \cos \varphi + \sin \varphi - \mu^2 \sin \varphi - \mu \cos \varphi) \right]_{\varphi_1}^{\varphi_2}$$

$$F_2 = F_1 e^{-k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} + \frac{wR e^{k\mu\varphi_2}}{(1 + \mu^2)} [e^{-k\mu\varphi} ((1 - \mu^2) \sin \varphi - 2\mu \cos \varphi)]_{\varphi_1}^{\varphi_2}$$

Reemplazando los límites:

$$F_2 = F_1 e^{-k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} + \frac{wR e^{k\mu\varphi_2}}{(1 + \mu^2)} [((1 - \mu^2) \sin \varphi_2 - e^{-k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} \sin \varphi_1 - 2\mu (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) e^{-k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)})]$$

Reorganizando términos para simplificar la ecuación se tiene que el arrastre para una sección curva es:

$$F_2 = f(\varphi_2) + (F_1 - f(\varphi_1)) \cdot e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

Donde $f(\phi)$ es igual a:

$$f(\varphi) = \frac{wR}{1 + \mu^2} \{(1 - \mu^2) \sin \varphi - 2\mu \cos \varphi\}$$

Del mismo modo, se tiene de la definición de torque:

$$T(\varphi) = r\mu \int_{N(\varphi_1)}^{N(\varphi)} |dN|$$

La fuerza normal está dada por:

$$dN = (F + wR\sin\varphi) \cdot d\varphi$$

Con F definido para una sección curva:

$$F_2 = f(\varphi_2) + (F_1 - f(\varphi_1)) \cdot e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

Solucionando la integral y reorganizando términos el torque si la tubería se desplaza y se rota simultáneamente es:

$$T = r\mu \left| (F_1 - f(\varphi_1)) \frac{1}{k\mu} (e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} - 1) + f_{lim}(\varphi_2) - f_{lim}(\varphi_1) \right|$$

Con $f_{lim}(\varphi)$:

$$f_{lim}(\varphi) = \frac{-2wR}{1 + \mu^2} (\cos\varphi + k\mu\sin\varphi)$$

Si la tubería no se está desplazando axialmente μ tiende a cero, por consiguiente:

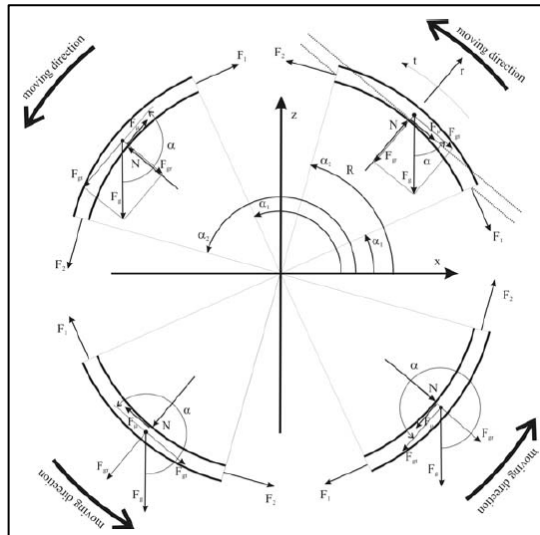
$$\lim_{\mu \rightarrow 0} \left(\frac{1}{k\mu} (e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} - 1) \right) = \varphi_2 - \varphi_1$$

El torque sin movimiento axial es:

$$T = r\mu|(F_1 - wR\sin\varphi_1)(\varphi_2 - \varphi_1) - 2wR(\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1)|$$

Aadnoy presenta un diagrama donde resume el uso de los ángulos en las fórmulas de secciones curvas de acuerdo a si se está construyendo o destruyendo ángulo, es decir, si se va a trabajar un Build-up o un Drop-off respectivamente.

Resumen del uso de los ángulos en las zonas de build up y drop off.



Fuente: modificado por el autor. BERNT, Aadnoy. "Theory and Application of a new Generalized Model for Torque and Drag". SPE. 2008.

De acuerdo al gráfico, se tiene que los cuadrantes I y II representan Drop-off y los cuadrantes III y IV representan Build-up, por lo que se debe efectuar una corrección para los ángulos en éste último tipo de geometría, es decir:

$$\varphi_{Build-up} = 360 - \varphi$$

Resumiendo el modelo generalizado de Aadnoy presenta ecuaciones para torque y arrastre en secciones rectas y curvas cuando se combinan movimientos rotacionales y axiales simultáneamente o cada uno por separado, y el factor k indica la dirección del movimiento.

Formulas usadas en arrastre para Aadnoy 2D.

Modelo Generalizado de Aadnoy 2D	
Arrastre	
Sección curva	Sección recta
$F_2 = f(\varphi_2) + (F_1 - f(\varphi_1)) \cdot e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)}$	$F_2 = F_1 + w\Delta s(\cos\varphi \pm \mu \sin\varphi)$
$f(\varphi) = \frac{wR}{1 + \mu^2} \{(1 - \mu^2)\sin\varphi - 2k\mu\cos\varphi\}$	

Formulas usadas en torque para Aadnoy 2D.

Modelo Generalizado de Aadnoy 2D	
Torque	
Sección curva tubería estatica	Sección recta
$T = r\mu (F_1 - wR\sin\varphi_1)(\varphi_2 - \varphi_1) - 2wR(\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1) $	$T = r\mu w\Delta s \sin\varphi $
Sección curva movimiento axial y rotación	
$T = r\mu \left (F_1 - f(\varphi_1)) \frac{1}{k\mu} (e^{k\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} - 1) + f_{lim}(\varphi_2) - f_{lim}(\varphi_1) \right $	
$f_{lim}(\varphi) = \frac{-2wR}{1 + \mu^2} (\cos\varphi + k\mu\sin\varphi)$	

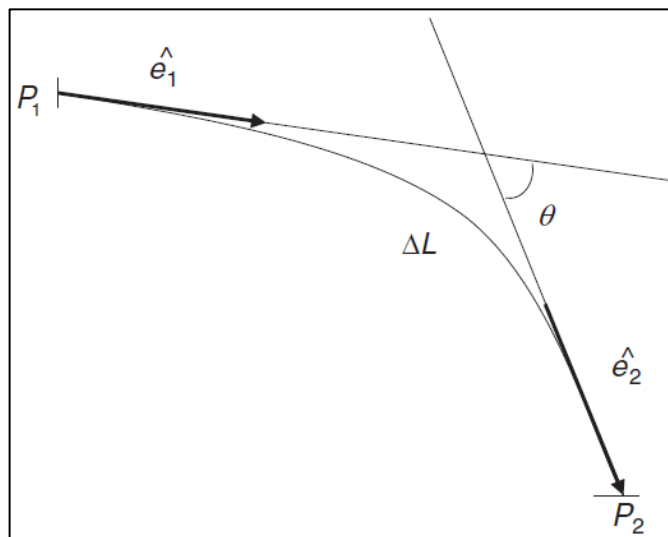
Fuente: modificado por el autor. BERNT, Aadnoy. "Theory and Application of a new Generalized Model for Torque and Drag". SPE. 2008.

3. ANEXO C. Modelo analítico de Aadnoy 3D

1. CAMBIO ABSOLUTO EN LA DIRECCIÓN.

Para el cálculo del cambio absoluto en la dirección se parte del planteamiento de dos vectores unitarios en los puntos de estudio P1 y P2:

Cambio de dirección total en un segmento de tubería analizado.



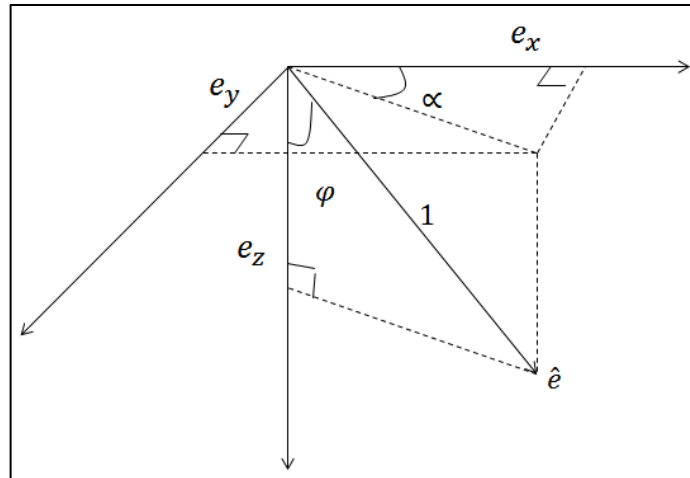
Fuente: Modificada por autor. BERNT, Aadnoy. "A 3D Analytical Model for Wellbore Friction". SPE. 2010.

El ángulo θ es igual al producto escalar de los vectores unitarios e_1 y e_2 :

$$e_1 \cdot e_2 = |e_1||e_2| \cos \theta = \cos \theta$$

De acuerdo con la siguiente imagen el producto escalar de los vectores e_1 y e_2 puede ser escrito como:

Descomposición de los vectores unitarios.



Fuente: Modificada por autor. BERNT, Aadnoy. "A 3D Analytical Model for Wellbore Friction". SPE. 2010.

$$e_1 \cdot e_2 = e_{1x} \cdot e_{2x} + e_{1y} \cdot e_{2y} + e_{1z} \cdot e_{2z} = \cos \theta$$

Los componentes de cada vector unitario en referencia a la inclinación y azimut es:

$$e_x = \sin \varphi \cos \alpha$$

$$e_y = \sin \varphi \sin \alpha$$

$$e_z = \cos \varphi$$

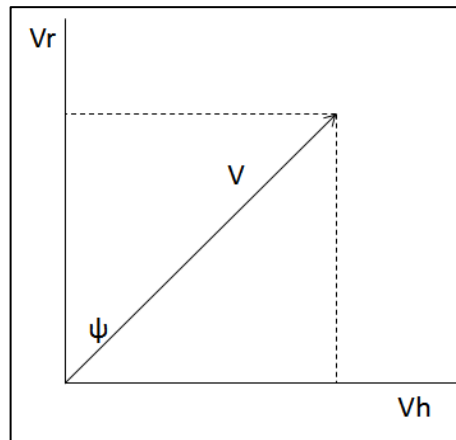
Reemplazando la descomposición del vector en la ecuación general y reorganizando términos se obtiene que:

$$\cos \theta = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2$$

2. MOVIMIENTO COMBINADO: ROTACIÓN Y TRASLACIÓN.

De acuerdo con el siguiente gráfico, para una velocidad tangencial V_r y una velocidad axial V_h , el ángulo ψ entre la velocidad tangencial y la sumatoria total V es igual a:

Descripción del ángulo ψ .



Fuente: BERNT, Aadnoy. "A 3D Analytical Model for Wellbore Friction". SPE. 2010.

$$V_r = \frac{2\pi r(m)}{60} RPM$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{V_h}{V_r} = \tan^{-1} \left(\frac{V_h 60}{2\pi r RPM} \right)$$

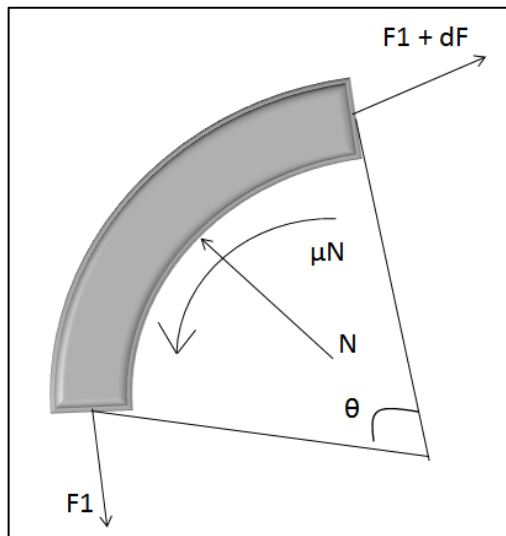
Para la anterior ecuación:

- $\Psi=0^\circ$, solo rotación.
- $\Psi=90^\circ$, solo traslación.

3. TORQUE Y ARRASTRE EN SECCIONES CURVAS

En secciones curvas las fuerzas laterales entre la sarta y las paredes del pozo depende de la tensión y de la fuerza de deslizamiento entre ellas. Cerca del tope del pozo la tensión tiene una mayor influencia sobre la fuerza de deslizamiento que el peso en la sección analizada; por ende el peso de la tubería puede ser despreciado para calcular el efecto de la tensión y luego añadido al resultado final¹⁴.

Fuerzas en una sección curva para el modelo de Aadnoy 3D.



Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

De acuerdo al grafico anterior, realizando un balance de fuerzas en dirección x y z se tiene:

$$\text{En } x: dF = \mu F d\theta$$

$$\text{En } z: dN = F d\theta$$

¹⁴ (Terje 2011)

Reorganizando términos e integrado:

$$\int_{F_1}^{F_2} \frac{dF}{F} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \mu d\theta$$

$$F_2 = F_1 e^{\pm\mu|\theta_2 - \theta_1|}$$

Luego se agrega el término del peso de la sarta, que es el peso nominal incluida la boyanza multiplicado por la profundidad verdadera, el arrastre para una sección curva es:

$$F_2 = F_1 e^{\pm\mu|\theta_2 - \theta_1|} + w\Delta TVD$$

Para una tubería en rotación, la fuerza de contacto es la misma y la fuerza de fricción se encuentra en dirección tangencial, el torque es:

$$T_2 = T_1 + \mu r N = T_1 + \mu r F_1 |\theta|$$

4. TORQUE Y ARRASTRE EN UNA SECCIÓN RECTA

Debido a que en una sección recta no hay cambio en la inclinación ni en el azimut, $\Delta\varphi=0$ y $\Delta\alpha=0$ (Tveitdal 2011) las ecuaciones descritas en el modelo de dos dimensiones pueden ser usadas adicionándoles el ángulo entre la velocidad tangencial de la tubería y la velocidad radial, luego el arrastre y torque están descritos por:

$$F_2 = F_1 + w\Delta L(\cos \varphi \pm \mu \sin \varphi)$$

$$T_2 = T_1 + \mu r w \Delta L \sin \varphi$$

5. TORQUE Y ARRASTRE EN UNA SECCIÓN RECTA CON MOVIMIENTO COMBINADO

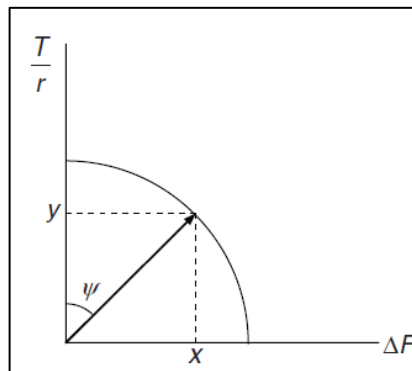
Para una sección recta, el arrastre y la fuerza de fricción en dirección tangencial son:

$$\Delta F = \mu w \Delta L \sin \varphi$$

$$\frac{T}{r} = \mu r w \Delta L \sin \varphi$$

Para una sarta en movimiento traslacional o solo rotacional, las fuerzas de fricción son iguales para el arrastre axial y rotacional. Para movimiento combinado, la fuerza de fricción resultante es constante, luego el arrastre y torque para una tubería con movimientos combinados (Aadnoy 2010., et al):

Relación entre el torque y el arrastre para una sección recta.



Fuente: BERNT, Aadnoy. "A 3D Analytical Model for Wellbore Friction". SPE. 2010.

$$F_2 = F_1 + w \Delta L (\cos \varphi \pm \mu \sin \varphi \sin \psi)$$

$$T_2 = T_1 + \mu r w \Delta L \sin \varphi \cos \psi$$

6. TORQUE Y ARRASTRE EN UNA SECCIÓN CURVA CON MOVIMIENTO COMBINADO

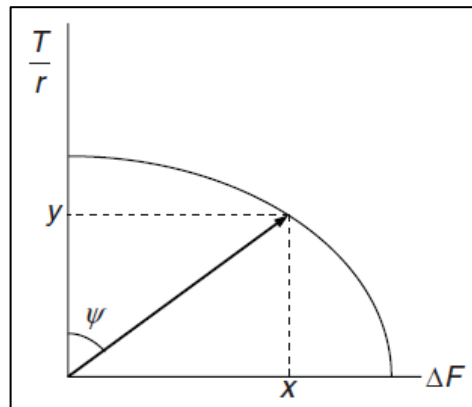
Las fuerzas de fricción para una sección curva se puede expresar como:

$$\Delta F = F_1(e^{\pm|\theta|} - 1)$$

$$\frac{T}{r} = \mu F_1|\theta|$$

Para este caso la fuerza de fricción resultante no es constante para movimiento combinado, esto es causado por el efecto exponencial, de la gráfica se tiene:

Relación entre el torque y arrastre para una sección curva.



Fuente: BERNT, Aadnøy. "A 3D Analytical Model for Wellbore Friction". SPE. 2010.

$$\left(\frac{y}{\frac{T}{r}}\right)^2 + \left(\frac{x}{\Delta F}\right)^2 = 1$$

El arrastre y el torque para movimiento combinado puede ser expresado como:

$$F_2 = F_1 + F_1(e^{\pm\mu(\theta_2 - \theta_1)} - 1) \sin \psi + w\Delta TVD$$

$$T_2 = T_1 + \mu r F_1 |\theta_2 - \theta_1| \cos \psi$$

Formulas usadas en arrastre para Aadnoy 3D.

Modelo analítico de Aadnoy 3D	
Arrastre	
Sección recta	Sección curva
$F_2 = F_1 + w\Delta L(\cos \varphi \pm \mu \sin \varphi \sin \psi)$	$F_2 = F_1 + F_1(e^{\pm\mu(\theta_2-\theta_1)} - 1) \sin \psi + w\Delta TVD$

Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

Formulas usadas en el torque para Aadnot 3D.

Modelo analítico de Aadnoy 3D	
Torque	
Sección recta	Sección curva
$T_2 = T_1 + \mu r w \Delta L \sin \varphi \cos \psi$	$T_2 = T_1 + \mu r F_1 \theta_2 - \theta_1 \cos \psi$

Fuente: Modificada por autor. TVEITDAL, Terje. "Torque and drag analyses of North Sea Well using new 3D model". Tesis de maestría. 15 junio 2011.

4. ANEXO D. Procedimiento para la instalación de Protech CRB

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES.....	107
1.1	OBJETIVO	107
1.2	ALCANCE	107
1.3	REFERENCIAS.....	107
1.4	REQUISITOS DEL PERSONAL.....	109
1.5	SEGURIDAD Y CUIDADO AMBIENTAL POR REUNIÓN DE SEGURIDAD 109	
2.	INSPECCIÓN VISUAL Y DIMENSIONAL DE TUBERÍA.....	109
2.1	OBJETIVO	109
2.2	ALCANCE	109
2.3	DEFINICIONES.....	110
2.4	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO.	110
2.4.1	Equipos y materiales.....	110
2.4.2	Inspección visual y dimensional.....	110
3.	PREPARACIÓN DE TUBERÍA PARA SANDBLASTING	112
3.1	OBJETIVO	112
3.2	ALCANCE	113
3.3	DEFINICIONES.....	113
3.4	PROCEDIMIENTO.....	113
3.4.1	Equipos y materiales.....	113
3.4.2	Preparación de tubería para sandblasting	114
3.5	PRECAUCIONES DE SEGURIDAD	119
4.	SANDBLASTING O LIMPIEZA CON CHORRO.....	119
4.1	OBJETIVO	119
4.2	ALCANCE	120

4.3	DEFINICIONES.....	120
4.4	PROCEDIMIENTO.....	121
4.4.1	Equipos y materiales.....	121
4.4.2	Sandblasting.....	122
4.5	PRECAUCIONES DE SEGURIDAD	126
5.	COLOCACION DE LOS MOLDES.....	127
5.1	OBJETIVO	127
5.2	ALCANCE	127
5.3	PROCEDIMIENTO.....	127
5.3.1	Equipos y materiales.....	127
5.3.2	Colocación de moldes.....	128
5.4	PRECAUCIONES DE SEGURIDAD	128
6.	PREPARACION DE LA BOMBA E INYECCION.....	129
6.1	OBJETIVO	129
6.2	ALCANCE	129
6.3	DEFINICIONES.....	130
6.4	PROCEDIMIENTO.....	130
6.4.1	Equipos y materiales.....	130
6.4.2	Preparación de la bomba e inyección	130
6.5	PRECAUCIONES DE SEGURIDAD	131
7.	REMOCIÓN DE MOLDE.....	132
7.1	OBJETIVO	132
7.2	ALCANCE	132
7.3	PROCEDIMIENTO.....	132
7.3.1	Equipos y materiales.....	132
7.3.2	Remoción de molde.....	133
8.	PRUEBAS E INSPECCIÓN	133

8.1	OBJETIVO	133
8.2	ALCANCE	133
8.3	PROCEDIMIENTO.....	134
8.3.1	Equipos y materiales.....	134
8.3.2	Pruebas e inspección.....	134
9.	PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN	138
9.1	OBJETIVO	138
9.2	ALCANCE	138
9.3	PROCEDIMIENTO.....	138
10.	REGISTROS Y REPORTES.....	139
10.1	OBJETIVO	139
10.2	ALCANCE	139
10.3	PROCEDIMIENTO.....	139
11.	ANEXOS	140
11.1	OBETIVO	140
11.2	ALCANCE	140
11.3	ANEXOS	140

1. GENERALIDADES

1.1 OBJETIVO

El propósito de este método de trabajo es asegurar que todo el personal de HALLIBURTON tenga clara instrucción con aceptación relevante que permita la ejecución del trabajo.

1.2 ALCANCE

El alcance de este método de trabajo es definir los parámetros de control y la metodología para la instalación de los centralizadores PROTECH-CRB.

1.3 REFERENCIAS

Los siguientes documentos son usados como material de referencia para la implementación, procesamiento y registro del alcance expresado en este método de trabajo.

ISO 8501 - Preparación de sustratos de acero antes de la aplicación de pinturas y productos afines - Evaluación visual de la limpieza de la superficie - Parte 1: grados de oxidación y grados de preparación de sustratos de acero recubierto y de sustratos de acero después de la eliminación total de las capas anteriores.

ISO 8502 – Preparación de sustratos de acero antes de la aplicación de pinturas y productos afines - Pruebas para la evaluación de la limpieza de la superficie - Parte 3: Evaluación de polvo en las superficies de acero preparadas para la pintura (método de la cinta sensible a la presión).

ISO 8503 – Preparación de sustratos de acero antes de la aplicación de pinturas y

productos afines - Rugosidad de la superficie a limpieza de chorros de sustratos de aceros - Parte 5: Réplica método de la cinta para la determinación del perfil de la superficie.

ISO 8504 – Preparación de sustratos de acero antes de la aplicación de pinturas y productos afines - métodos de preparación de superficies - Parte 1: Principios generales.

API 5A5 – Inspección en campo de casing, tubing, drill pipe.

Norma Técnica Colombiana (NTC) 3891- Preparación de superficies metálicas. Limpieza con solventes.

Norma Técnica Colombiana (NTC) 3892 – Preparación de superficies metálicas. Limpieza con herramientas manuales.

Norma Técnica Colombiana (NTC) 3893 – Preparación de superficies metálicas. Limpieza con herramienta eléctrica.

Norma Técnica Colombiana (NTC) 3895 – Preparación de superficies metálicas. Limpieza con chorro a metal blanco.

Norma Técnica Colombiana (NTC) 3897 – Preparación de superficies metálicas. Limpieza por arenado suave.

Norma Técnica Colombiana (NTC) 3896 – Preparación de superficies metálicas. Limpieza con chorro grado comercial.

1.4 REQUISITOS DEL PERSONAL

Todo el personal debe tener las competencias, experiencia y la formación práctica para ejecutar la metodología planteada en éste procedimiento con la calidad y precisión esperada sin la necesidad de ser supervisado por una persona calificada por HALLIBURTON, demostrando sus habilidades teóricas y prácticas para la ejecución de la operación.

1.5 SEGURIDAD Y CUIDADO AMBIENTAL POR REUNIÓN DE SEGURIDAD

Todos los reglamentos aplicables de seguridad y medio ambiente del patio de tuberías y de los especificados por el cliente deberán seguirse. Estas normas deberán cumplir o exceder todas las leyes federales, estatales, las leyes y reglamentos que se requieren por la JSA Halliburton y el análisis de riesgos.

2. INSPECCIÓN VISUAL Y DIMENSIONAL DE TUBERÍA

2.1 OBJETIVO

Establecer los recursos y la secuencia necesaria para ejecutar las actividades operativas de inspección de tubería de revestimiento evaluando la condición y presencia de defectos en su superficie o en las conexiones.

2.1 ALCANCE

Evaluar la condición y presencia de defectos en las tuberías de revestimiento a los cuales se les instalara los centralizadores PROTECH CRB.

2.2 DEFINICIONES

- Corrosión: alteración o degradación del material por el ambiente en que trabaja o donde se encuentra almacenada.
- Agrietamiento Externo: indicación lineal de falta de material producida por fatiga o durante el proceso de fabricación.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO.

2.3.1 Equipos y materiales.

- Regla metálica de 12" graduada en incremento de 1/64".
- Galgas endurecidas de precisión de perfil de rosca.
- Calibrador mecánico de ID y OD.
- Caliper de precisión.
- Espejo de inspección.
- Marcador de pintura.

Nota: antes de cada inspección se debe hacer una revisión visual rápida de cada instrumento para descartar defectos. Cada cuatro meses se debe hacer la respectiva calibración de cualquier herramienta que la necesite, consignando en un libro fecha y nombre de la persona que la realiza.

2.3.2 Inspección visual y dimensional

PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
1	Verificar las características del tubo (diámetro, peso, grado, conexión).	Concuerta con la orden de venta. (Si/No). Informe final

PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
2	Búsqueda de daños mecánicos como corrosión, cortes o grietas. Revisar que el acople no presente ralladuras, corrosión o marcas de llave por encima del límite de las imperfecciones.	Marcar las imperfecciones encontradas; si son causa de rechazo, identificar el tubo, informar al cliente y supervisor y dejar constancia en el informe final.
3	Girar la tubería para identificar torceduras.	Cuantificarlas e informar al supervisor los tubos torcidos y proceder según sus indicaciones.
4	Correr el mandril correspondiente al diámetro para detectar cualquier alteración en la parte interna de la tubería, la herramienta debe pasar de forma libre y sin esfuerzo.	Estado y medición del diámetro interno de la tubería. Reportar en el informe final.
5	Inspección de roscas: buscar hilos golpeados, partidos o mellados en la longitud de hilos con cresta completa.	Estado de la rosca. Reportar en el informe final.
6	Inspección de la cara interna de las roscas con ayuda de un espejo.	Estado del interior de las roscas. Reportar en el informe final.

PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
7	Tomar evidencia fotográfica de todas las tuberías que serán sometidas al proceso de instalación de los centralizadores PROTECH-CRB.	Registro fotográfico del estado de la tubería al iniciar el proceso de instalación de los centralizadores PROTECH-CRB.
8	Identificar de acuerdo al resultado de la inspección, la tubería aceptada para la instalación de los centralizadores PROTECH-CRB o los elementos rechazados de acuerdo al siguiente formato de colores	<ul style="list-style-type: none"> • Elemento aceptado: banda de pintura de color blanco en cada extremo, junto al letrero OK. • Elemento rechazado: banda de pintura roja, junto al letrero RECHAZADO.
9	Llenar el formato de recepción e inspección de tubería.	Anexar a los documentos finales de la operación.

3. PREPARACIÓN DE TUBERÍA PARA SANDBLASTING

3.1 OBJETIVO

Establecer los procedimientos requeridos para preparar las superficies para realizar la limpieza por chorro o sandblasting y marcar la ubicación de los centralizadores PROTECH-CRB.

3.2 ALCANCE

Establecer las condiciones para realizar el sandblasting sobre la tubería y marcar la ubicación de los CRB.

3.3 DEFINICIONES

- Limpieza con solventes: procedimiento para remover materiales extraños perjudiciales tales como: aceite, grasa, manchas y compuesto de corte y otras contaminaciones de la superficie de acero mediante el uso de solventes, emulsiones, compuestos limpiadores, limpieza con vapor o materiales y métodos similares, los cuales determinan una acción solvente o limpiadora.
- Limpieza manual: método para la preparación de superficies metálicas antes de pintarlas, capaz de remover cascarilla delaminada desprendida, herrumbre y pintura desprendida con cepillo manual, lavado manual, raspado manual o por la combinación de estos métodos.
- Limpieza por chorro: método para la preparación de superficies metálicas antes de realizar cualquier procedimiento sobre las mismas, removiendo toda la pintura o materias extrañas mediante el uso de un abrasivo impulsado a través de tobera por aire comprimido o por una rueda centrifuga.

Nota: se pueden emplear fotografías u otros patrones visuales de la preparación de la superficie.

3.4 PROCEDIMIENTO

3.4.1 Equipos y materiales

- Cinta 3M 3939
- Cinta métrica
- Pintura roja

3.4.2 Preparación de tubería para sandblasting

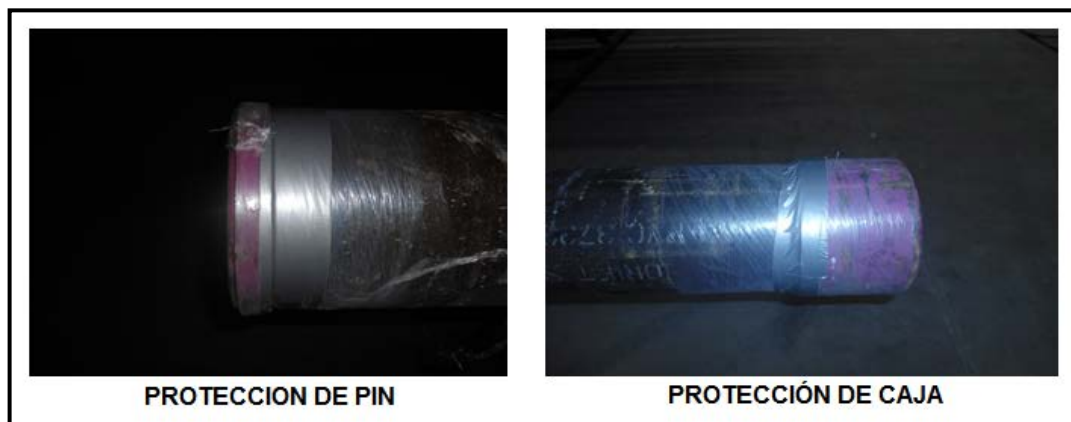
PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
1	Protección de caja y pin: se deben envolver con cinta 3M 3939 para evitar daños a la estructura durante la instalación de los centralizadores PROTECH-CRB.	Figura 1. Protección del pin y la caja.
2	<p>Limpieza de la superficie: cada área debe ser limpiada para proporcionar una superficie libre de grasa y suciedad.</p> <p>Nota: es responsabilidad del supervisor de la operación, decidir si la superficie se encuentra libre de ciertos contaminantes y si se puede omitir alguno de los pasos de limpieza sugeridos en este procedimiento.</p>	<p>Superficie de la tubería libre de cualquier sustancia contaminante que afecte la instalación de los centralizadores PROTECH-CRB.</p> <p>De acuerdo al tipo de contaminante se puede realizar limpieza por solventes o por herramientas eléctricas o manuales.</p>
2.1	Limpieza con solventes: posibles operaciones según la	Superficie de la tubería libre de cualquier sustancia contaminante, se debe reportar

PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
	<p>necesidad de la tubería.</p> <p>a. Fregado o cepillado con raspadores o cepillos humedecidos con solvente: el fregado final se debe realizar con solvente, cepillo y/o raspador limpio. De otra manera el aceite y las contaminaciones solo serán esparcidas en la superficie.</p> <p>b. Enjuague de la superficie con solvente: el enjuague final se debe realizar con solvente limpio.</p> <p>c. Empleo de vapor desengrasante usando hidrocarburos clorados estables como solventes.</p> <p>d. Uso de emulsiones o lacado con vapor usando detergentes o limpiadores, al final de tratamiento se debe lavar con agua caliente</p>	<p>el tipo de solvente y la operación usada para la limpieza.</p> <p>Tipos de solventes:</p> <p>a. De petróleo, alquitrán de hulla y terpentina.</p> <p>b. Aromáticos.</p> <p>c. Hidrocarburos clorados.</p> <p>d. Limpiadores alcalinos.</p> <p>e. Emulsiones limpiadoras.</p> <p>Revisar los valores límites de exposición a los diferentes solventes. Figura 3.</p>

PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
	o vapor.	
2.2	<p>Limpieza con herramientas manuales o eléctricas: posibles operaciones según las necesidades de la tubería.</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Martillo manual, descarchado manual o combinación de ellos: remoción de herrumbre estratificada. b. Pistolas de aguja, martillos desconectores, raspadores rotatorios, raspadores de uno o más pistones y mecanismo de limpieza por impacto. c. Cepillo de alambre, lijado manual, raspado manual o combinación: Cascarilla delaminada, desprendida o herrumbre no adherida. 	<p>Superficie de la tubería libre de cualquier sustancia contaminante, se debe reportar el tipo de herramienta usada.</p> <p>Nota: verificar periódicamente el estado (rigidez, limpieza y efectividad) de los cepillos, el afilado de los raspadores y en general un continuo mantenimiento de las diferentes herramientas usadas para la limpieza.</p>
3	<p>Marcaje del diseño en la tubería: se debe marcar con pintura de color ROJO la</p>	<p>Registrar las medidas pertinentes para la ubicación de cada aleta en el formato y anexarlo al informe final.</p>

PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
	ubicación de los centralizadores PROTECH-CRB de acuerdo a los diseños otorgados por el ingeniero de HALLIBURTON.	Imagen guía: Figura 2.

Protección del pin y la caja.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013.

Marcación de la ubicación de los CRB sobre la tubería.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso DE PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013.

Valores límites de exposición.

SUSTANCIA	Stel – TLV (mg/m ³)
Acetona	2375
Benceno	75
Butil Cellosolve	360
Tetracloruro de carbón	125
Ciclohexano	1300
Epicloridrin	20
Acetato de etilo	-
Etanol	-
Dicloruro de etileno	60
Etilen diamina	-
Alcohol furfurilico	60
Metanol	310
Cloruro de metilo	1740
Nafta alquitran hulla	-
Nafta de petróleo	-
Percloroetileno	1340
Isopropanol	1225
Hidrocarburos solventes	1050
Tolueno	560
Tricloroetileno	1080
Turpentina	840
Xileno	655
STEL-TLV (Threshold limit value-short term exposure limit) máxima concentración a la cual los trabajadores pueden estar expuestos por un periodo mayor a 15 min.	

Fuente: Norma Técnica Colombiana (NTC) 3891- Preparación de superficies metálicas. Limpieza con solventes.

3.5 PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

- Los incendios o exposiciones son inherentes a las operaciones de limpieza con solventes. No se debe realizar ningún trabajo hasta que se haya establecido las condiciones de seguridad necesarias.
- Se deben usar solventes seguros para la limpieza. Un solvente seguro aconsejado para ser usado debe tener un punto de inflamación mínimo de 38°C en clima caliente se deben usar materiales con un punto de inflamación más alto.
- Si se usan solventes aromáticos como xileno, tolueno o un hidrocarburo clorado se deben usar con una ventilación adecuada para mantener el contenido de vapores en el aire por debajo de la mínima concentración de toxicidad e inflamabilidad. No se debe usar gasolina por peligro de fuego o explosión. La gasolina que contenga plomo no se debe usar por el peligro adicional de la toxicidad de este.
- Se deben tomar las precauciones necesarias para prevenir quemaduras con álcalis o limpiadores ácidos o para prevenir dermatitis causadas por cromatos o ácido crómico. Se deben usar anteojos y vestidos de seguridad.
- Los procedimientos recomendados para el manejo y almacenamiento de químicos peligrosos se deben seguir incluyendo conexiones metálicas a tierra cuando se usa tolueno u otro solvente de bajo punto de inflamación.

4. SANDBLASTING O LIMPIEZA CON CHORRO

4.1 OBJETIVO

Establecer los procedimientos requeridos para realizar la limpieza por chorro abrasivo o sandblasting de superficies de acero estructural.

4.2 ALCANCE

Identificar los diferentes pasos para realizar una correcta limpieza con chorro abrasivo en las áreas donde se instalara lo centralizadores PROTECH-CRB, estableciendo las condiciones ambientales adecuadas, los abrasivos a usar y las pruebas que determinan el éxito de la operación.

4.3 DEFINICIONES

- Limpieza por chorro: método para la preparación de superficies metálicas antes de realizar cualquier procedimiento sobre las mismas, removiendo toda la pintura o materias extrañas mediante el uso de un abrasivo impulsado a través de tobera por aire comprimido o por una rueda centrifuga.
- Hidrómetro: instrumento usado para la medición del grado de humedad del aire o un gas determinado, por medio de sensores que perciben e indican su variación.
- Bulbo húmedo: La temperatura de bulbo húmedo, o simplemente temperatura húmeda, representa una forma de medir el calor en un sistema en el que interactúan un gas y un vapor, generalmente aire y vapor de agua. Es un valor de temperatura que toma en cuenta el efecto de la humedad ambiental y el correspondiente potencial de evaporación.
- Bulbo seco: La temperatura de bulbo seco, o simplemente temperatura seca, mide la temperatura del aire sin considerar factores ambientales como la radiación, la humedad o el movimiento del aire, los cuales tienen el potencial de afectar significativamente la sensación térmica.
- Porcentaje de humedad: hace referencia al porcentaje de agua que impregna un cuerpo o al vapor presente en la atmósfera.

Nota: se pueden emplear fotografías u otros patrones visuales de la preparación de la superficie.

4.4 PROCEDIMIENTO

4.4.1 Equipos y materiales

- Hidrómetro
- Medidor de temperatura
- Unidad de sandblasting
- Oxido de aluminio G-16
- Granate Garnet 20/40

Hidrómetro y medidos de temperatura.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”.
Julio 2013.

Arena de 20/40 y oxido de aluminio G-16.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013

Nota: antes de cada inspección se debe hacer una revisión visual rápida de cada instrumento para descartar defectos. La frecuencia de calibración será la recomendada por el fabricante del equipo o cuando esté presente fallas, consignando en un libro fecha y nombre de la persona que realiza dicha calibración.

4.4.2 Sandblasting

PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
1	Pre-inspección de la unidad de sandblasting: a. Mantenimiento del compresor de aire. b. Verificación del respirador. c. Verificación del filtro de aire de respiración. d. Verificación del separador de humedad.	Condición y mantenimiento de la unidad de sandblasting. Reportar cualquier anomalía en el formato y anexar al informe final.

PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
	<ul style="list-style-type: none"> e. Verificación de los controles. f. Verificación de la manguera de envío de arena. g. Verificación de acoples y boquilla. h. Purgado de la unidad: Verificar con un paño blanco y durante 10 minutos que salga aire seco y que no exista presencia de aceites o contaminantes. 	
2	<p>Revisión de condiciones ambientales: verificar los siguientes parámetros en periodos de 15 a 20 minutos antes de iniciar el sandblasting y hasta la inyección de la resina.</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Bulbo húmedo. b. Bulbo seco. c. Punto de rocío. d. Porcentaje de humedad. e. Temperatura de la tubería. 	<p>Reportar en el formato cada 15-20 minutos.</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Bulbo seco debe ser mayor en 3°C al punto de rocío. b. Porcentaje de humedad no debe exceder el 75%. c. La temperatura del revestimiento debe ser mayor a 15°C.
3	Realizar la limpieza con la arena 20/40 o equivalente. Debe estar	La superficie se debe tratar químicamente dentro de un periodo

PASO	DESCRIPCIÓN	RESULTADO/OBSERVACIONES
	seca y libre de contaminantes.	máximo de 24 horas, la colocación del molde no debe exceder 8 horas después del sandblasting.
4	Dar el perfil de anclaje con el óxido de aluminio G-16. La rata del chorro abrasivo puede variar según la necesidad.	Acabados de acuerdo a la norma ISO 8504-1 métodos para la preparación de un acabado blanco superficial SA3.
5	Prueba de Dust Test: comparación visual del estado de limpieza de la zona. Revisar con lupa el estado y color de la superficie (Gris claro).	ISO 8502-3 Evaluación 1. Evaluación de polvo en las superficies de acero, método de cinta sensible a la presión. Figura 7. Método DUST TEST para medir la limpieza del área y lupa para revisar el estado de la superficie.
6	Medición del perfil de anclaje: se coloca la cinta Testex sobre la superficie, se frota con una plumilla de vidrio y se mide el resultado con un rugosímetro calibrado en 8 milésimas de pulgada. Se realizara una prueba por cada tubo y la cinta será parte del informe final.	El perfil de anclaje debe ser mayor a 3.5 milésimas de pulgada. ISO 8502-3: el mínimo perfil de anclaje deberá ser igual o superior a 80 μ m. ISO 8503-5: no existe un máximo perfil de anclaje.

Aplicaciones generales de los tamaños de grano.

ESFÉRICAS		ANGULARES		APLICACIONES GENERALES
Tamaño (SAE)	Rugosidad	Tamaño	Rugosidad	
S-660	Rugosidad muy alta a alta	G-12	Rugosidad muy alta	<ol style="list-style-type: none"> 1- Remoción de escama espesa o tenaz. 2- Limpieza de fundidos de acero o hierro, de grandes dimensiones.
S-550 S-460 S-390	Rugosidad alta a mediana	G-14 G-16 G-18	Rugosidad alta	<ol style="list-style-type: none"> 1- Limpieza de fundidos medianos de acero. 2- Remoción de capas espesas de tinta u óxido. 3- Limpieza de fundidos espesos de hierro gris, nodular, etc. 4- Granallado de cilindro laminador. 5- Remoción de escamas de zoquetes, de chapas gruesas y placas.

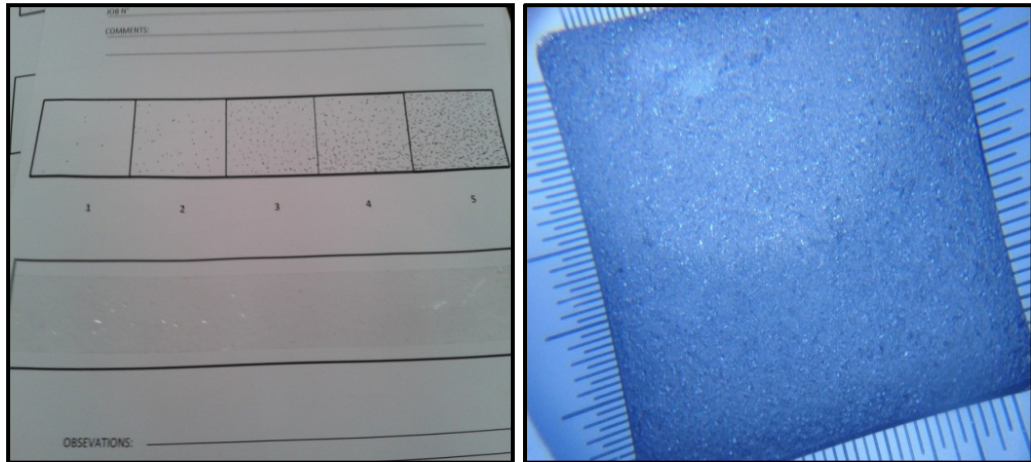
Fuente: Thales M. Watanabe. Industria de fundición Tupy LTDA. "El proceso de granallado".

Sandblasting.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. "Proceso DE PROTECH CRB CENTRALIZER". Julio 2013.

Método dust test para medir la limpieza del área y lupa para revisar el estado de la superficie.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013.

Medir el perfil de anclaje.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013.



4.5 PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

- Si existe peligro de fuego o explosión se deben tomar las precauciones adecuadas antes de que se haya iniciado el trabajo. Si la estructura previamente contenía materiales inflamables, se debe purgar de concentraciones peligrosas.

- Los operadores de la tobera, expuestos al polvo deben llevar un casco adecuado, conectado a una fuente de aire comprimido limpio.
- Los otros trabajadores que estén expuestos al polvo del chorro deben usar respiradores de aire tipo filtro. Se debe proveer una adecuada protección para el personal contra las partículas en el aire de la operación de limpieza con chorro.
- Las personas que están cerca de cualquier operación de limpieza con chorro deben usar anteojos de seguridad.
- La manguera del equipo de limpieza se debe aislar a tierra para evitar cargas estáticas.

5. COLOCACIÓN DE LOS MOLDES

5.1 OBJETIVO

Establecer el procedimiento recomendado para realizar una correcta instalación de los moldes sobre la tubería.

5.2 ALCANCE

Determinar los materiales y su correcto uso para la colocación precisa de los moldes.

5.3 PROCEDIMIENTO

5.3.1 Equipos y materiales

- Cinta 3M 3939.
- Cinta 3M 4462

5.3.2 Colocación de moldes

PASO	DESCRIPCIÓN
1	Si existe presencia de óxido en el área pulida se debe repetir el proceso de sandblasting.
2	Cada molde deberá ser inspeccionado para asegurar que el orificio de llenado de aire y los orificios de ventilación estén en los lugares adecuados.
3	La colocación incorrecta de los agujeros es causa de rechazo del molde.
4	Los moldes se colocan en el centro de la zona de pulido usando cinta 3M 4462, cinta de doble cara de color negro en los bordes del molde. Ver figura 12. Molde para CRB.
5	Se usa cinta 3M 3939 como sello final. Ver figura 12. Molde para CRB.
6	El orificio de relleno y orificios de ventilación serán cubiertos con cinta transparente para evitar la contaminación hasta que inicie el proceso de inyección.
7	Se tiene un periodo máximo de 4 horas para realizar la inyección de la resina.
8	Ubicar la aleta adicional para la prueba de PULL TEST.

5.4 PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

- Los operadores encargados de la colocación de los moldes deben llevar los elementos de protección adecuados, en especial guantes de seguridad que eviten contaminar la superficie tratada con el chorro abrasivo.

Molde para CRB.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013.

6. PREPARACIÓN DE LA BOMBA E INYECCIÓN

6.1 OBJETIVO

Establecer el procedimiento recomendado para el proceso de inyección del material CRB y la verificación del correcto funcionamiento de los equipos destinados para la operación.

6.2 ALCANCE

Preparar y adecuar los equipos y materiales para la inyección del material CRB en los moldes, estableciendo las condiciones del equipo y de los componentes para su correcto uso.

6.3 DEFINICIONES

- Bomba de inyección: Equipo usado para mezclar los componentes de la resina y ajustarlos a las condiciones necesarias de fluidez para su correcta inyección y moldeo.

6.4 PROCEDIMIENTO

6.4.1 Equipos y materiales

- Bomba de inyección.
- Material CRB (Resina y catalizador).

6.4.2 Preparación de la bomba e inyección

PASO	DESCRIPCIÓN
1	Ubicar el material CRB en baño maría para aumentar su fluidez a 35°C aproximadamente. El catalizador se debe ubicar en un compartimiento independiente a temperatura ambiente.
2	La pistola de inyección, el montaje del mezclador estático y la manguera flexible se adjuntan a la manguera de 15m, aislados, se mueve el material CRB de la bomba hacia la ubicación de inyección en los moldes.
3	Ya que los cilindros de la bomba son estándares, se debe corroborar las relaciones en volumen o en peso que certifiquen la correcta mezcla de los componentes. a. Volumen: 6.8:1 b. Peso: 12.2:1

	Rango de error aceptable $\pm 5\%$.
4	Verificar y registrar las condiciones ambientales, hora de inicio de trabajo y número de tuberías.
5	Si la temperatura de la tubería es menor a 10°C no se puede iniciar el proceso de inyección. La temperatura de la tubería debe ser 3°C mayor al punto de rocío y la temperatura ambiental debe ser como mínimo 15°C.
6	Los primeros 250 ml (mínimo) de CRB se bombean a través del sistema a un mix cup (Vaso de muestra o testigo). Durante la mezcla de los componentes se genera una reacción exotérmica que puede superar los 115°C.
7	La inyección se realiza mediante la inserción de la punta de la pistola en el orificio de llenado y se bombea material CRB hasta que el molde este lleno y comience a salir por los orificios de ventilación. Sellar los orificios con cinta 3M 3939.
8	Registrar el tiempo una vez que el proceso de inyección se haya completado.
9	Se deben lavar todos los componentes de la bomba con MEK o equivalente para evitar cualquier tipo de taponamiento o desgaste de los equipos.
10	Tiempo de fraguado o curado será de 24 horas.

6.5 PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

- Los operadores de la bomba de inyección deben llevar los elementos de protección personal adecuados y tener extremo cuidado durante el proceso de inyección debido a la reacción exotérmica generada por la mezcla de los componentes CRB.

Inyección de la resina en el molde.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013.

7. REMOCIÓN DE MOLDE

7.1 OBJETIVO

Establecer el procedimiento recomendado para la remoción del molde después del endurecimiento de la resina.

7.2 ALCANCE

Identificar la forma correcta de retirar los moldes y la evaluación de estos para su reutilización y deshecho.

7.3 PROCEDIMIENTO

7.3.1 Equipos y materiales

- Espátula.

7.3.2 Remoción de molde

PASO	DESCRIPCIÓN
1	El molde debe permanecer en la superficie por un período mínimo de 12 horas en una zona donde la temperatura ambiente no sea inferior a 15°C.
2	Retire la cinta 3M 3939 e inserte una espátula por debajo del borde del molde, levantándolo suavemente hasta que el plástico se separe del material CRB.
3	La cinta 3M 4462 no será removida de la tubería hasta que se complete la inspección final de la totalidad de las aletas.
4	Los moldes serán inspeccionados visualmente por un técnico HALLIBURTON para determinar si es reutilizable. Si el molde está deformado o partido será rechazado y desechado.
5	Los orificios de llenado y ventilación deben limpiarse si es necesario para su reutilización.
6	El tubo debe permanecer en el rack de trabajo hasta que la inspección final se haya completado.

8. PRUEBAS E INSPECCIÓN

8.1 OBJETIVO

Establecer el procedimiento y las pruebas recomendadas que garanticen la calidad y la correcta instalación de los centralizadores PROTECH CRB.

8.2 ALCANCE

Determinar las pruebas y los resultados que corroboren la correcta instalación de los centralizadores PROTECH-CRB.

8.3 PROCEDIMIENTO

8.3.1 Equipos y materiales

- Calibrador.
- Medidor de dureza SHORE D.
- Pulidora de disco.
- Prueba de PULL TEST.
- Pintura resistente a la intemperie.
- Cuerda o parachoques.

8.3.2 Pruebas e inspección

PASO	DESCRIPCIÓN
1	Se debe inspeccionar cada aleta con suficiente luz blanca o por medio de iluminación artificial para identificar imperfecciones y/o defectos. Un defecto es una imperfección, cuya anchura sea superior a 12,5 mm, independientemente de la profundidad o una imperfección de más de 3 mm, independientemente de la anchura.
2	No se deben reparar pequeños agujeros, ya que no afecta de manera representativa el funcionamiento y el rendimiento de la herramienta.
3	Cada aleta deberá ser verificada por la dureza SHORE D , la dureza mínima aceptable es de 80 SHORE escala D. El valor de dureza medido deberá ser registrado e incluido en el informe final de trabajo. Figura 14. Prueba de dureza y diámetro.
4	Si el valor de dureza es inferior al valor mínimo, se deben otorgar otras 48 horas de fraguado, si luego de este periodo de tiempo no se obtiene el valor aceptable de dureza, la aleta será rechazada.
5	Algún área elevada en las aletas sobrante de los agujeros de llenado y de

PASO	DESCRIPCIÓN
	ventilación en el molde será retirado utilizando una pulidora o disco de esmeril. Figura 15: Exceso de material debido a los orificios de inyección y ventilación.
6	La altura de las aletas se verificarán en cada centralizador utilizando la altura calibrador HALLIBURTON. Las tolerancias de altura, deberán ser identificados antes de la descripción del trabajo e identificado en el informe final de trabajo. Figura 14. Prueba de dureza y diámetro.
7	PULL TEST: se debe realizar después de 24 horas de la inyección de la resina, se adhiere la herramienta con pegante a una aleta adicional construida específicamente para la prueba, que se retirara para la entrega de la tubería. Se debe registrar la fecha y hora de colocación de la herramienta y se deja secar el pegante durante 24 horas. El valor de la prueba de PULL TEST debe ser mayor a 1500 psi para garantizar el agarre del material en el sustrato o superficie. Figura 16: prueba de PULL TEST.
8	Después de la inspección final, se pintaran las áreas pulidas con pintura resistente a la intemperie. Todas las aletas luego se envolverán con anillos de cuerda o parachoques para la protección durante el transporte. La tubería se encuentra disponible para su traslado al área de almacenamiento adecuada. Figura 17: Protección y almacenamiento de la tubería.

Prueba de dureza y diámetro.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013.

Exceso de material debido a los orificios de ventilación y llenado.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de protech crb centralizer”. Julio 2013.

Prueba de PULL TEST.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013.

Protección y almacenamiento de la tubería.



Fuente: Halliburton – Casing Equipment. “Proceso de PROTECH CRB CENTRALIZER”. Julio 2013

9. PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN

9.1 OBJETIVO

Establecer el procedimiento recomendado para hacer una correcta reparación de posibles daños presentados en los centralizadores PROTECH CRB.

9.2 ALCANCE

Establecer los procedimientos para la reparación de defectos en la aleta y el modo de eliminarla de la tubería en caso de rechazo.

9.3 PROCEDIMIENTO

PASO	DESCRIPCIÓN
1	Un área que requiere reparación tendrá un mínimo de capa superior de CRB para ser eliminado. Esta será visible con un cambio en el color de la superficie de color gris oscuro a gris claro. Después de esto la superficie deberá ser limpiada con solvente.
2	El CRB para la reparación deberá ser tomada del tambor y se mezclará en tazas o vasos de forma manual. La mezcla será verificada con una escala para asegurar la proporción de los materiales.
3	Los agujeros se rellenan con el CRB y se cubren con cinta 3M 3939 hasta que se endurezca.
4	Si se debe remover la aleta, ésta se debe ubicar a las tres de acuerdo a las manecillas del reloj. Con un martillo y un cincel se deben golpear la aleta en posición vertical en un movimiento hacia abajo lejos de la tubería. Durante la extracción del molde el cincel no debe entrar en contacto con la tubería.

PASO	DESCRIPCIÓN
5	Cualquier resto de la aleta, se eliminará con una pulidora o rueda de esmeril.

10.REGISTROS Y REPORTE

10.1 OBJETIVO

Establecer el procedimiento recomendado para la redacción de los registros o reportes finales de los procedimientos realizados anteriormente.

10.2 ALCANCE

Establecer los formatos que den evidencia y certifiquen la correcta ejecución del procedimiento.

10.3 PROCEDIMIENTO

- El reporte debe incluir información importante a los instrumentos de medición utilizados y las fechas de calibración.
- Los criterios de aceptación relevantes pertinentes tales como la tolerancia de altura, dureza, temperatura, punto de rocío, limpieza de la superficie, perfil de anclaje, etc.
- El informe final debe ser completado en su totalidad y ser firmado por el representante de Halliburton según los modelos planteados en este método de trabajo.
- Una copia del informe final se entregará al cliente.
- Los registros se mantendrán por personal de Halliburton por un mínimo de seis meses.

11. ANEXOS

11.1 OBETIVO

Plantear flujo gramas y formatos de reportes de operación que sirvan como evidencia de la ejecución de la operación.

11.2 ALCANCE

Establecer los formatos básicos que serán entregados al cliente y serán archivados en HALLIBURTOS como evidencia del proceso de instalación de los centralizadores PROTECH-CRB.

11.3 ANEXOS

ANEXO 1: Flujo grama de inspección visual y dimensional de la tubería.

ANEXO 2: Flujo grama de preparación de la tubería para sandblasting.

ANEXO 3: Flujo grama de Sandblasting.

ANEXO 4: Flujo grama de colocación de moldes.

ANEXO 5: Flujo grama de preparación de la bomba e inyección.

ANEXO 6: Flujo grama de remoción de molde.

ANEXO 7: Flujo grama de pruebas e inspección.

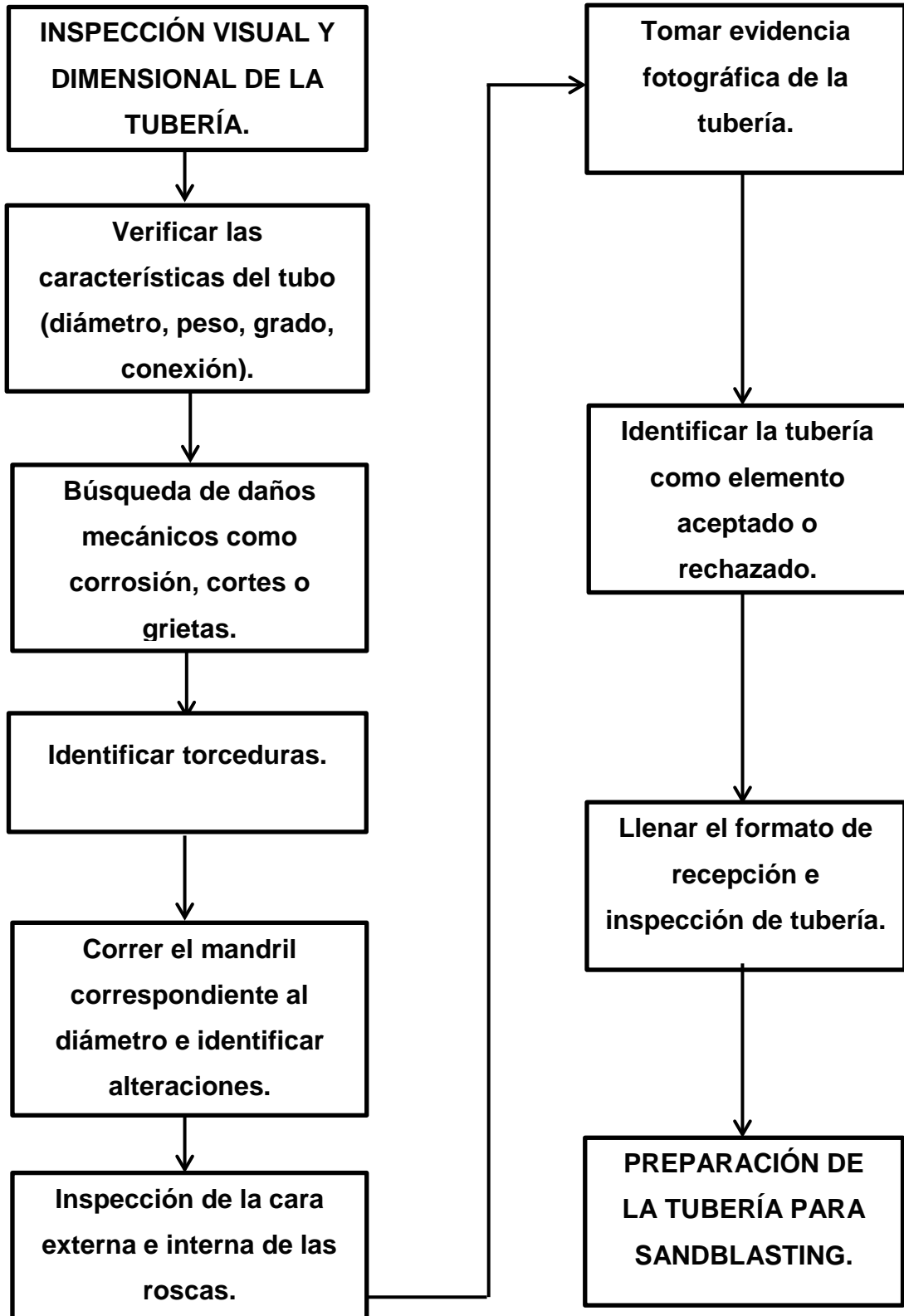
ANEXO 8: Formato de recepción de tubería.

ANEXO 9: Formato de preparación de la tubería para sandblasting.

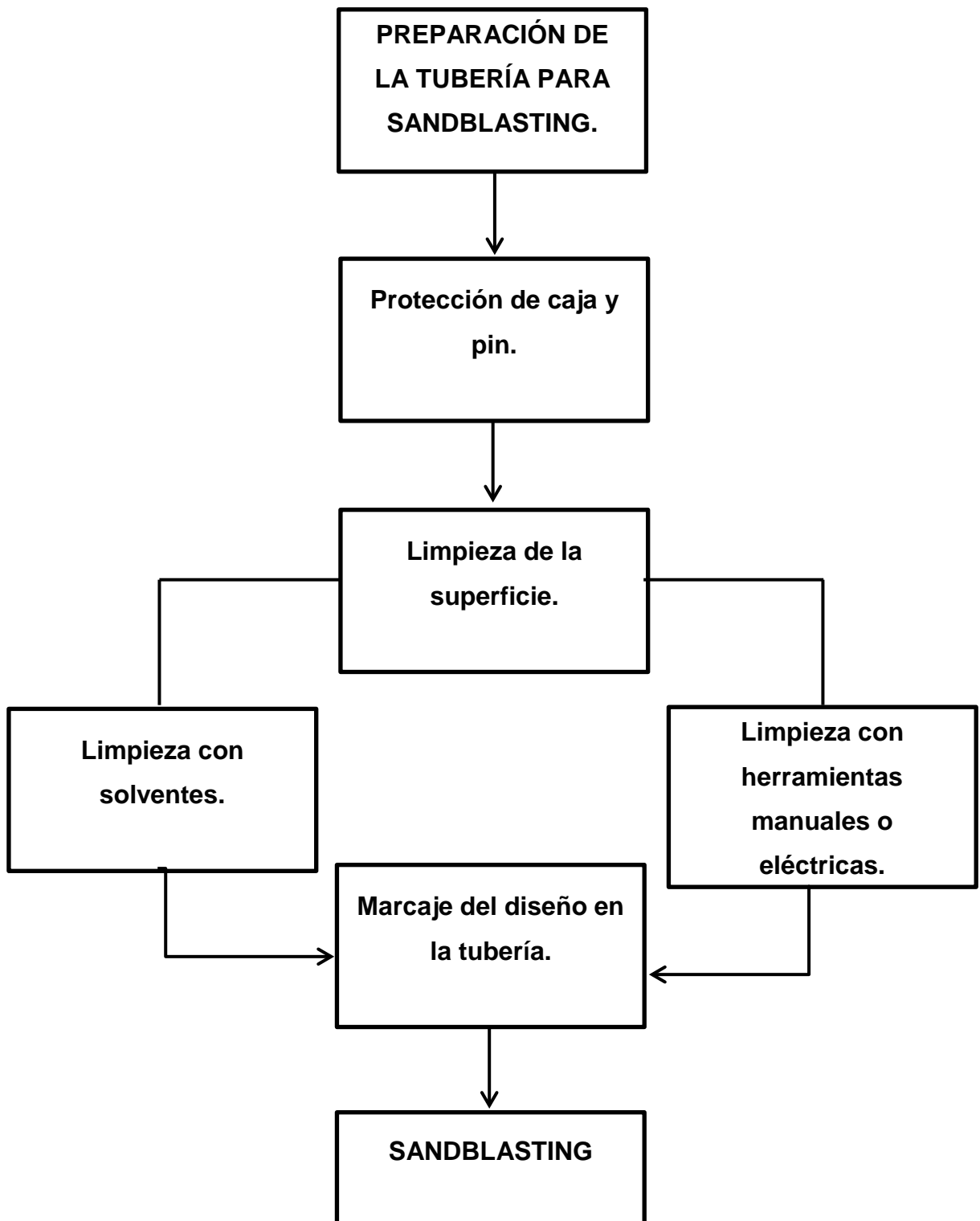
ANEXO 10: Formato de sandblasting.

ANEXO 11: Formato de inyección y pruebas de inspección.

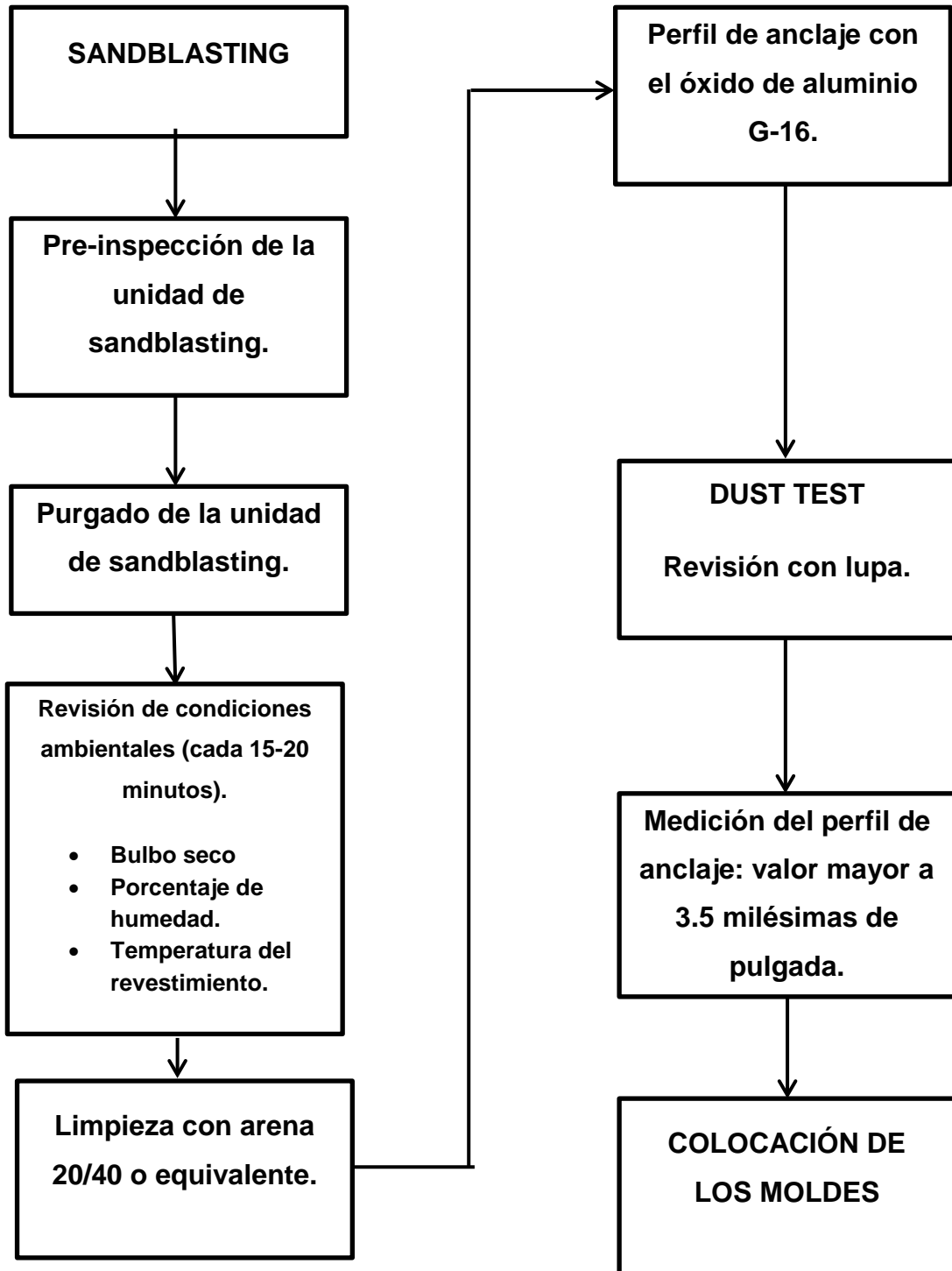
ANEXO 1: Flujo grama de inspección visual y dimensional de la tubería.



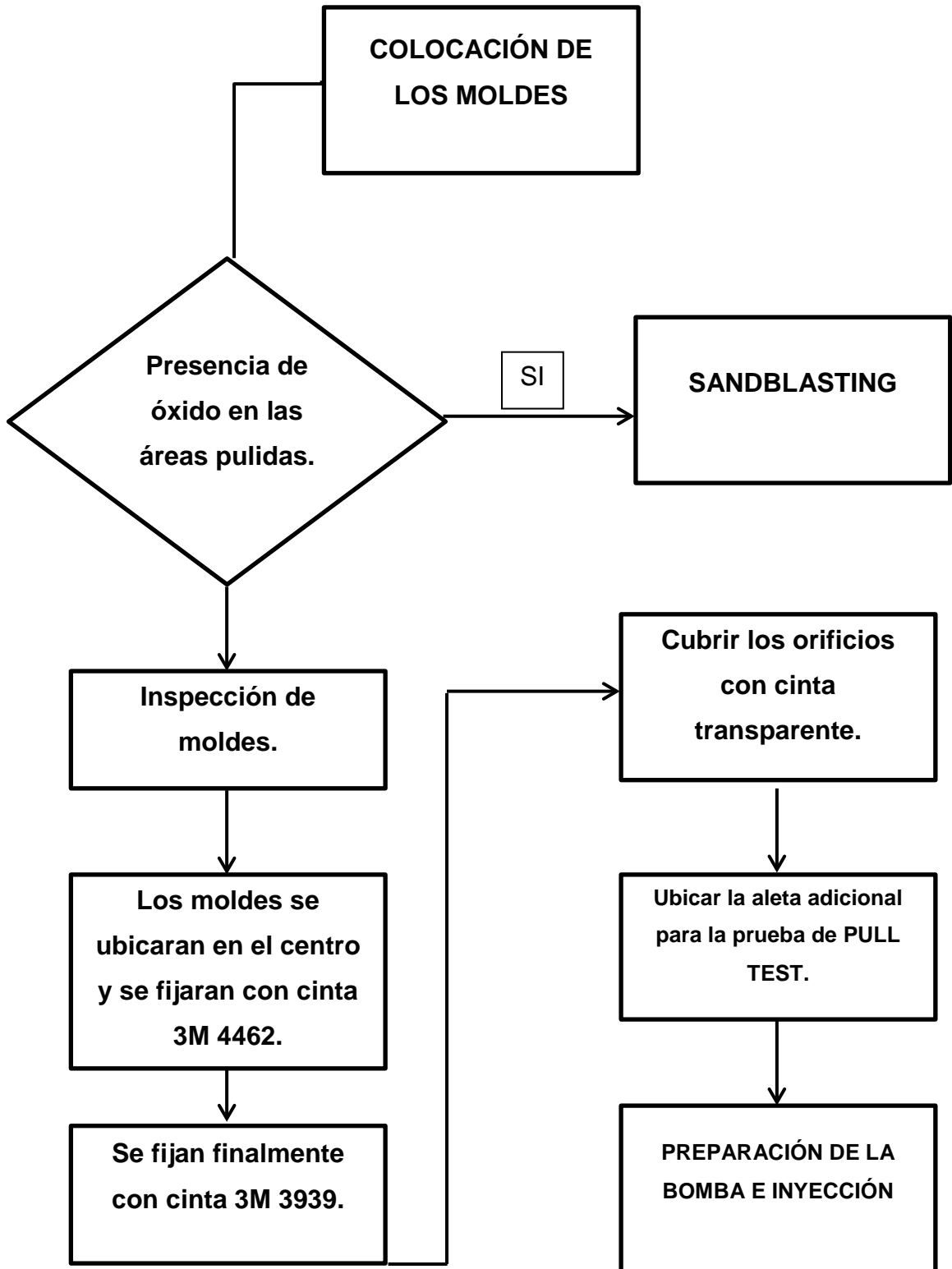
ANEXO 2: Flujo grama de preparación de la tubería para sandblasting.



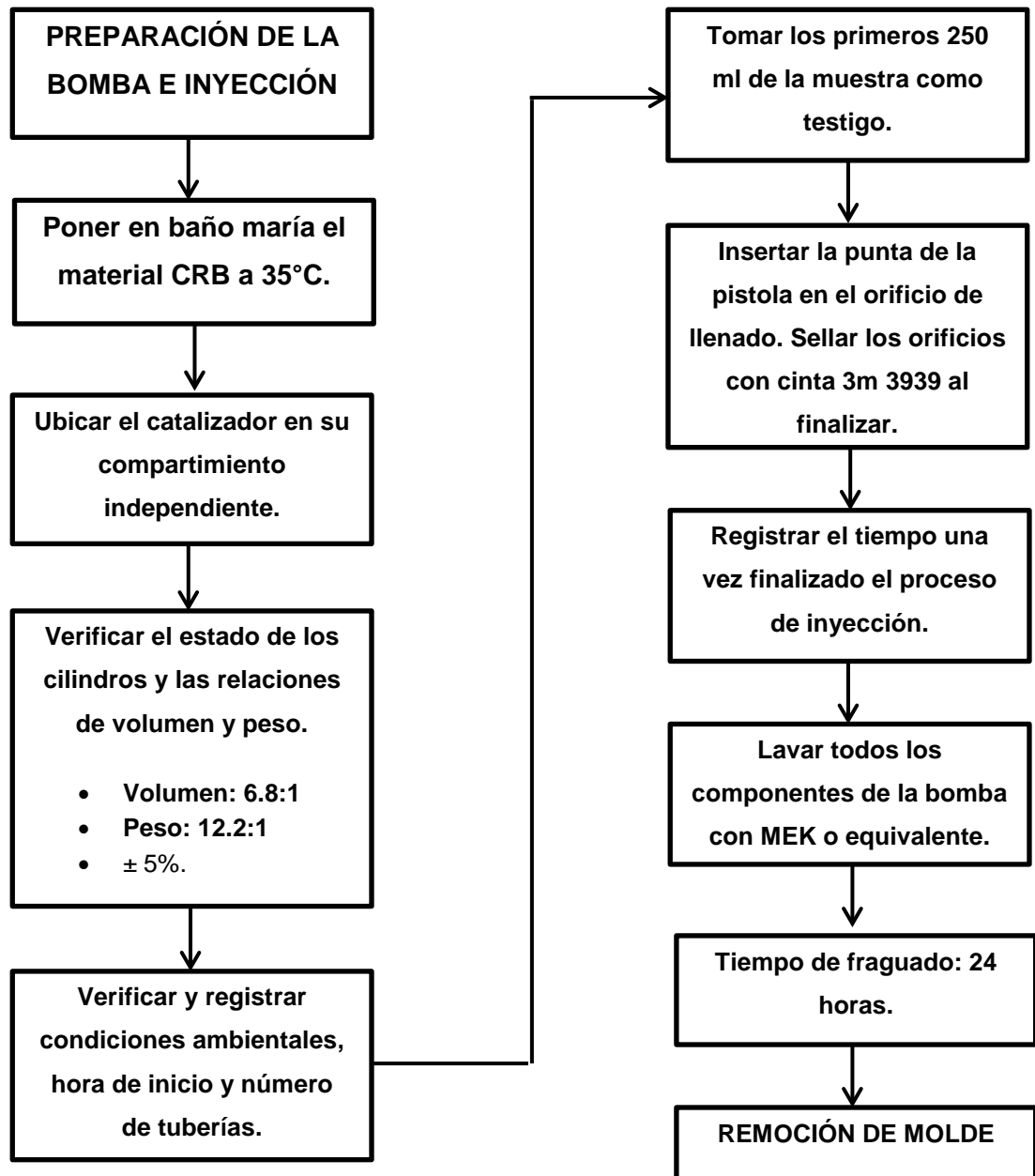
ANEXO 3: Flujo grama de Sandblasting.



ANEXO 4: Flujo grama de colocación de moldes.



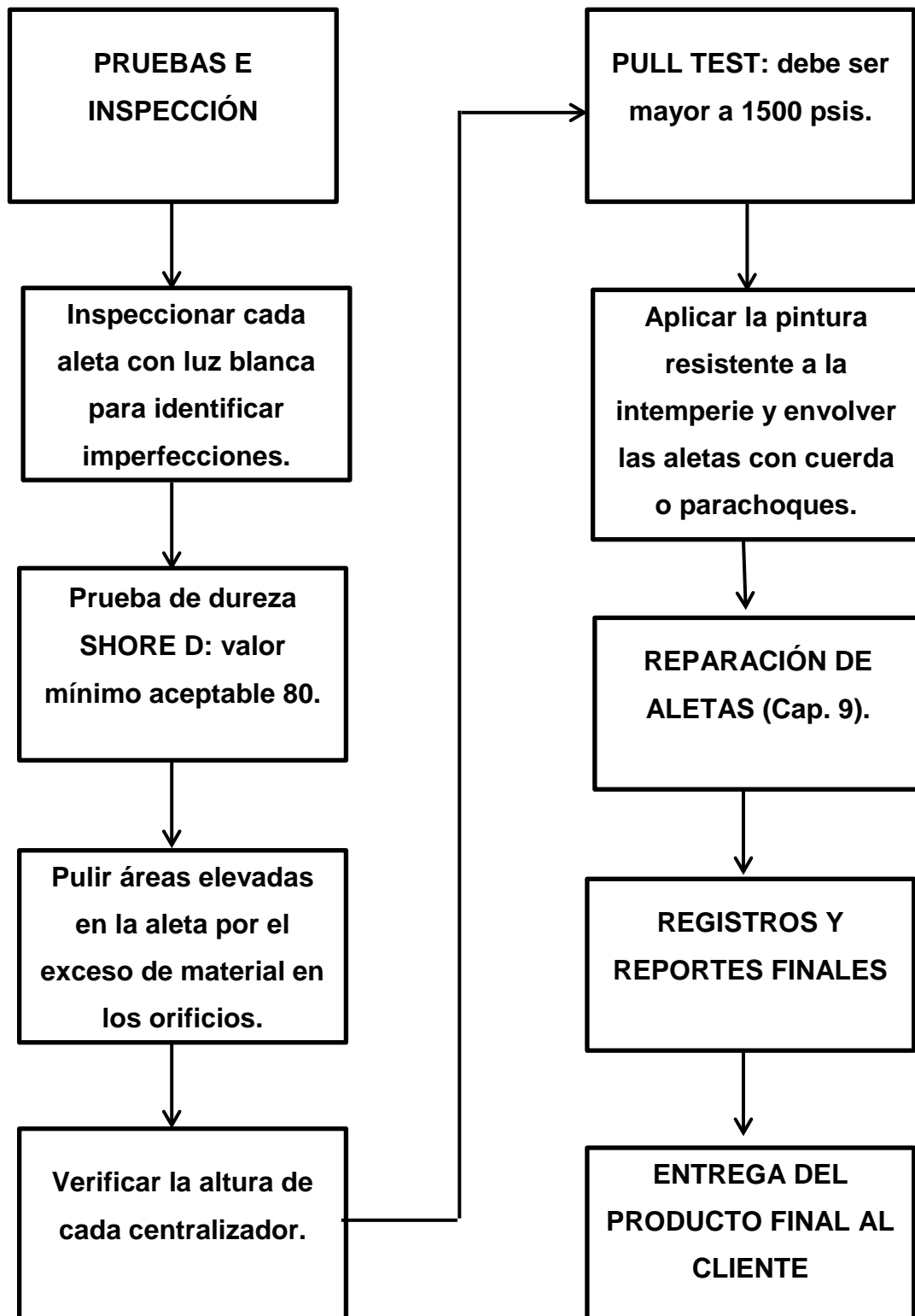
ANEXO 5: Flujo grama de preparación de la bomba e inyección.





ANEXO 6: Flujo grama de remoción de molde.



ANEXO 7: Flujo grama de pruebas e inspección.

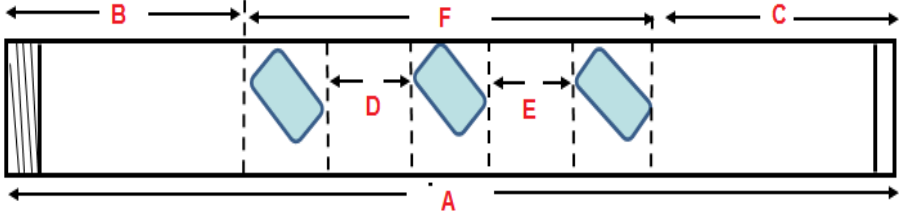


ANEXO 9: Formato de preparación de la tubería para sandblasting.

	ACTIVIDAD		FORMATO DE PREPARACIÓN DE TUBERÍA PARA SANDBLASTING				 <small>CONSTRUYENDO FUTURO</small>	
	2	de	4					

Fecha/hora		Supervisor	PROTECH CRB
Cliente		Ing. De diseño	HALLIBURTON
Pozo		Telefono	
Contacto		Orden de venta	

Preparación de tubería para sandblasting									
N° tubería	Protección		Limpieza de la superficie	Medidas					
	Caja	Pin		A	B	C	D	E	F





Nota: el número de medidas puede variar según las especificaciones del diseño de los centralizadores PROTECH-CRB.

Observaciones

Representante Cliente Firma _____ Nombre _____ Teléfono _____	Representante HALLIBURTON Firma _____ Nombre _____ Teléfono _____
--	--

ANEXO 10: Formato de sandblasting.

	ACTIVIDAD 3 de 4	FORMATO DE SANDBLASTING	
---	----------------------------	--------------------------------	---

Fecha/hora	Supervisor PROTECH CRB
Cliente	Ing. De diseño HALLIBURTON
Pozo	Telefono
Contacto	Orden de venta

Hora	T Bulbo humedo °C	T Bulbo seco °C	% R.H	D.P °C	T metal °C

Unidad de sandblasting					
Operador		Supervisor			
Fecha/hora		No. Unidad			
Compresor		Separador de humedad		Controles	
Respirador				Manguera/boquilla	

Perfil de anclaje		

Observaciones

Representante Cliente	Representante HALLIBURTON
Firma _____ Nombre _____ Teléfono _____	Firma _____ Nombre _____ Teléfono _____

ANEXO 11: Formato de inyección y pruebas de inspección.

HALLIBURTON

Cementing

ACTIVIDAD

4 de 4

FORMATO DE INYECCIÓN Y PRUEBAS DE INSPECCIÓN

Fecha/hora	
Cliente	
Pozo	
Contacto	

Supervisor	PROTECH CRB
Ing. De diseño	HALLIBURTON
Telefono	
Orden de venta	

Hora inicio		Relación de volumen o peso	
Hora final		T de la tubería °C	D. P °C

Resultados inspección visual y dimensional de la tubería						
N° tubería	SHORE D	Altura aleta	OD aleta	OD final tubo	PULL TEST	Pintura Envoltura

Reparación o remoción de aletas			
N° tubería	N° aleta	Tipo de reparación	Remoción

Observaciones

Representante Cliente

Firma _____

Nombre _____

Teléfono _____

Representante HALLIBURTON

Firma _____

Nombre _____

Teléfono _____