UNIVERSIDAD DE ORIENTE

NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESTUDIO MECÁNICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO EXPLORATORIO COSTA AFUERA, EN EL CAMPO LA VELA, ESTADO FALCÓN

Realizado Por:

Br. Ricardo José Camacho Maita

Trabajo de Grado Presentado como Requisito Parcial para optar al Título de:

Ingeniero Mecánico

Puerto La Cruz, Marzo del 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESTUDIO MECÁNICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO EXPLORATORIO COSTA AFUERA, EN EL CAMPO LA VELA, ESTADO FALCÓN

Prof. Roberto Salas

Asesor Académico

Prof. Orlando M. Ayala

Co-Asesor Académico

Puerto La Cruz, Marzo de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESTUDIO MECÁNICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO EXPLORATORIO COSTA AFUERA, EN EL CAMPO LA VELA, ESTADO FALCÓN

El jurado hace constar que asignó a esta tesis la calificación de:

Prof. Roberto Salas	**Prof. Orlando M. Ayala**
Asesor Académico	**Co-Asesor Académico**
Prof. Johnny Martínez	**Prof. Rafael Barrueta**
Jurado Principal	**Jurado Principal**

Puerto La Cruz, Marzo de 2010

RESOLUCIÓN

DE ACUERDO AL ARTÍCULO 41 DEL REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO.

"LOS TRABAJOS DE GRADO SON EXCLUSIVAMENTE PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS PARA OTROS FINES, CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, EL CUAL LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO".

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una estimación de las presiones de formación y de fractura para la perforación de un pozo exploratorio en el Campo La Vela, a partir de los reportes diarios de perforación de los pozos adyacentes. Se determinó el estado mecánico del pozo, definido por el diseño de los revestidores, los cuales cumplieron con los requerimientos de las normas en cuanto a los factores mínimos de seguridad exigidos. También se analizó el efecto de las corrientes marinas y el oleaje sobre el conductor, en donde quedó evidenciado que el mismo no experimenta oscilaciones. Basado en la presión de formación y fractura se realizó un estudio de flujo estático, que permitió la definición de un fluido de perforación, cuya hidrostática inhibiera la entrada de fluidos entrampado en la matriz de roca al pozo y a su vez esta no fracturara la formación. El fluido de perforación seleccionado fue a base de agua por su baja toxicidad en los microorganismos marinos, cumpliendo con los estándares internacionales para la descarga de estos tipos de fluido en el mar.

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios todo poderoso.

A mis padres.

Mis hermanos.

Mis tías y tíos en especial a mi tía Mary.

Mis primos.

A todos mis amigos y amigas, compañeros y compañeras de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Estas primeras líneas se las dedico a dar gracias a Dios por dejarme alcanzar el final de una meta propuesta, que es solo el principio de muchas más, pidiéndole a Él que me permita degustar este sabor al éxito muchas veces más.

Este logrado fue manufacturado por una maquinaria integra, cuyos ejes y engranes fundamentales son, mis padres, mi tía, hermanos, primos, mi familia y los secundarios pero de un valiosísimo valor porque son los que permiten transmitir mayor potencia son los colegas y futuros colegas que compartimos el día a día en el Departamento de Mecánica, y también las amistades que vamos cultivando en el pasar de los años como estudiante y de la vida cotidiana. ¡Gracias!

A todos mis maestros y profesores que ayudaron a forjar mi educación, a la Casa más alta de la educación superior del oriente del país, la UDO, por abrirme las puertas a la ciencia y al conocimiento científico en aras de obtener una integridad profesional, que hoy día esta más cerca de ser consolidada, en una hoja de pergamino que simplemente a los ojos del mundo te acredita como Ingeniero, pero detrás de ella hay unas innumerables vivencias buenas y mala y un aprendizaje adquirido que realmente te hace ser ingeniero.

A CHEVRON Global Tecnology, por brindarme la oportunidad de hacer mi pasantía, en especial al departamento de perforación, a su Gerente Chris Carstens, a Chin Nguyen y a mi Tutor Industrial Cesar Fuenmayor. Absolutamente a todo el personal del departamento de geología Stan, Gabriela, Carlos, Luis, Pablo, Marlene, Javier, Esmirna, Geraldo. También Luisana Ramos (Dpto. Facility), Elizabeth Chacon (Dpto. Complite), y al pana Alberto Paulo (Dpto IT).

A Tania Pérez, son pocas las líneas pero reflejan el profundo agradecimiento por ser mi ancla entre dos idiomas ¡mil gracias! Extensiva a toda la gente de CVX

PLC. Por supuesto inmensamente agradecido a mis Tutores Académicos, a Roberto y Orlando, por ser la guía para el desarrollo de esta tesis.

ÍNDICE

RESOLUCIÓN iv
RESUMEN v
DEDICATORIA vi
AGRADECIMIENTOS vii
ÍNDICE ix
LISTA DE FIGURAS xiii
LISTA DE TABLAS xiv
INTRODUCCIÓN ..... **¡Error! Marcador no definido.**
CAPÍTULO I 15
INTRODUCCIÓN 15
1.1 GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO 16
1.1.1 UBICACIÓN 16
1.1.2 ESTRATIGRAFÍA 18
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 19
1.3 OBJETIVOS 21
1.3.1 OBJETIVO GENERAL 21
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21
CAPÍTULO II 23
MARCO TEÓRICO 23
2.1 ANTECEDENTES 23
2.2 PERFORACIÓN COSTA AFUERA 24
2.3 PRESIÓN HIDROSTÁTICA 25
2.3.1 Gradientes de presión 26
2.4 PRESIÓN DE FORMACIÓN 26
2.5 PRESIÓN DE FRACTURA 27
2.6 TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO 27
2.6.1 Funciones 28

2.6.2 Diseño de Revestidores 28
2.6.2.1 Cargas en los revestidores 29
2.6.2.1.1 Cargas por colapso 29
2.6.2.1.2 Cargas por estallidos 30
2.6.2.1.3 Cargas Axiales 30
2.6.2.2 Factores de seguridad 31
2.7 FLUIDO DE PERFORACIÓN 32
2.7.1 Principales Funciones del Fluido de Perforación 32
2.7.1.1 Sostén de las paredes del hoyo 33
2.7.1.2 Control de las presiones de las formaciones 33
2.7.1.3 Transporte de los recortes de perforación y los derrumbes del fondo del hoyo hacia la superficie 33
2.7.2 Propiedades de los fluidos de perforación 34
2.7.2.1 Densidad o peso del lodo 35
2.7.2.2 Viscosidad 35
2.7.2.3 Viscosidad plastica 35
2.7.2.4 Propiedades Reológicas 35
2.7.2.4.1 Punto cedente 36
2.7.2.4.2 Resistencia de geles 36
2.7.2.4.3 Perdida de Filtrado 37
2.7.2.4.4 Contenido de sólidos 37
2.8 CONDUCTOR MARINO “RISER” 37
2.8.1 Ecuación de Morison 38
2.8.1.1 Número de Keulegan – Carpenter 39
2.8.1.2 El coeficiente C_M 40
2.8.1.3 Fuerza transversal, vórtices y resonancia 40
CAPÍTULO III 44
METODOLOGÍA DEL TRABAJO 44

3.1 Estimación de la presión de poro (formación) y Presión de fractura 45
3.2 Determinación de la columna hidrostática a emplear..... 47
3.2.1 Especificar el tipo de lodo a emplear 48
3.3 Realizar el diseño de los revestidores del pozo 49
3.3.1 Determinación del número de revestidores a usar y su profundidad final.. 49
3.3.2 Selección del Diámetros de los revestidores..... 50
3.3.3 Selección del tipo de revestidor 52
3.3.4 Cálculos de las cargas por esfuerzos de estallido, colapso y tensión al cual van a estar sometidos los revestidores..... 53
3.3.4.1 Diseño de los revestidores por estallido 57
3.3.4.2 Diseño de los revestidores por colapso..... 60
3.3.4.3 Diseño de los revestidores por la tensión 65
3.4 Analizar el impacto de las corrientes marinas en el conductor de superficie (Riser) 67
3.4.1 Espesor del conductor marino..... 69
3.4.2 Cálculo de las fuerzas hidrodinámicas..... 70
3.4.3 Diagrama de cuerpo libre del conductor marino..... 73
3.4.3.1 Determinación de las reacciones en el conductor marino 74
3.4.4 Revisión del Espesor..... 75
3.4.4.1 Tensión Longitudinal..... 75
3.4.4.2 Presión Externa..... 76
3.4.4.2.1 Presión de Colapso. La capacidad a presión neta de colapso (Pc) se determinó mediante la expresión:..... 76
3.4.4.2.2 Propagación de Pandeo (Pp). La presión de propagación en líneas se calculó con la siguiente expresión: 77
3.4.4.3 Momento Flexionante..... 78
3.4.4.4 Pandeo Global..... 79
3.4.4.5 Formulación de Diseño para Estados Cargados Combinados 80

3.4.4.5.1. Tensión y Momento Flexionante. La capacidad del conductor marino para soportar esfuerzos combinados de tensión y momento flexionante, se verificó mediante la siguiente expresión:..... 80

3.4.4.5.2 Tensión, Momento Flexionante y Presión de Colapso. La capacidad del conductor marino para soportar esfuerzos combinados de tensión axial, momento flexionante y presión de colapso, se verificó mediante la siguiente expresión: 80

3.4.4.6 Expansión y Flexibilidad 81

3.4.4.7 Vorticidad por Corrientes Marinas 82

CAPÍTULO IV 85

ANÁLISIS DE RESULTADOS 85

4.1 Diagramas de Presiones hidrostática de los Pozos en el Campo La Vela 85

4.2 Estimación de la Presión de Yacimiento del Pozo Exploratorio Mapuey-1X... 86

4.3 Presión hidrostática del fluido de perforación 89

4.4 Análisis de los esfuerzo en los revestidores 90

4.4.1 Diseño del revestidor de superficie 13 3/8 pulg 94

4.5 Análisis del impacto de las corrientes marinas en el conductor de superficie .. 97

CAPITULO V 108

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 108

5.1 Conclusiones 108

5.2 Recomendaciones 110

BIBLIOGRAFÍA 111

APÉNDICE A ..... **¡Error! Marcador no definido.**

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO 113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Área del campo la vela ensenada de la vela. 17
Figura 2.1. Revestidores [7] 28
Figura 2.2. Transporte de ripios a la superficie 34
Figura 2.3 Evolución de la estela de un cilindro en un flujo de aceite según Re [24]. . 41
Figura 3.1. Mapa de localización de los pozos existente en el campo La Vela [25] 46
Figura 3.2. Determinación de la profundidad final de los revestidores 50
Figura 3.3. Típicas mechas y revestidores empleadas en la perforación. 51
Figura 3.4. Niveles de los topes de los tipo de cemento empleado. 65
Figura 3.5. Bosquejo del conductor marino y el taladro. 68
Figura 3.6. Coeficiente de arrastre contra el radio de la corriente. 72
Figura 3.7. Coeficiente de impulso contra el radio de corriente. 72
Figura 3.8. Diagrama de cuerpo libre del conductor marino 74
Figura 3.9. Determinación de las reacciones en el conductor marino 75
Figura 4.1. Presiones Hidrostática Empleada en los Pozos 85
Figura 4.2 Geopresiones y Presión Hidrostática en el Pozo 002X 87
Figura 4.3. Geopresión Pozo Exploratorio Cardón III 87
Figura 4.4. Geopresión de la zona a perforar 88
Figura 4.5. Presión de Yacimiento del Pozo Mapuey-1X 89
Figura 4.6 presión hidrostática del pozo Mapuey-1X 90
Figura 4.7. Profundidad Final de los Revestidores 91
Figura 4.8. Disposición de los revestidores dentro del pozo 91
Figura 4.9. Diseño por estallido del resvestidor de superficie de 13 3/8 94
Figura 4.10. Diseño por colapso del revestidor de superficie 13 3/8 96
Figura 4.11. Diseño por tensión del revestidor de superficie de 13 3/8 pulg. 97
Tabla 4.5. Fuerza actuante sobre la el conductor marino 99
Figura 4.12. Diagrama de fuerza y momento actuante en el conductor marino 100

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Topes de las Formaciones a Perforar 45
Tabla 3.2. Pr

2.7.2.1 Densidad o peso del lodo

La densidad es la masa por unidad de volumen. Generalmente se le da el nombre "peso del fluido" y viene expresado en libras por galón, libras por pie cúbico, kilogramos por litros. Una de las funciones, es la de mantener el gas, el petróleo y el agua, en el yacimiento durante la perforación. Además, ejerce primordial importancia sobre la presión hidrostática del lodo, lo cual permite tener un mejor control sobre las presiones de las formaciones atravesadas en la perforación [10].

2.7.2.2 Viscosidad

Es la resistencia que ofrece el fluido a fluir, es decir se refiere al equivalente en estado dinámico de su función interna. Esta va a depender de la concentración de los sólidos contenidos en el fluido así como también la forma y tamaño de los mismos. La viscosidad se define como la relación entre la tensión de corte y la velocidad de corte para un fluido determinado, estas son propiedades físicas abstractas que están relacionadas con la deformación de la materia [10].

2.7.2.3 Viscosidad plastica

La viscosidad plástica está generalmente relacionada con el tamaño, forma y número de las partículas de un fluido en movimiento. El control de la viscosidad plástica en lodos de bajo y alto peso es indispensable para mejorar el comportamiento reológico y sobre todo para lograr altas tasas de penetración. Este control se obtiene por dilución o por mecanismos de control de sólidos [10].

2.7.2.4 Propiedades Reológicas

Las propiedades de flujo de un lodo son en gran parte consecuencia de la viscosidad o más fundamentalmente de la reología. La reología de los fluidos de perforación permite determinar y controlar: capacidad de limpieza del hoyo, o sea capacidad de arrastre, propiedades de suspensión de sólidos, caídas de presión producidas en la sarta y en el espacio anular, presiones de surgencia y tratamientos de lodos [10].

Los conceptos de velocidad de corte, tensión de corte, flujo laminar y flujo turbulento son aplicable a todo flujo de fluido. Dentro del sistema de circulación de

un equipo de perforación, la velocidad (o tasa) de corte depende de la velocidad promedio del lodo en la sección que está atravesando en ese momento. Las velocidades de corte son muy altas en las boquillas de la mecha. Son más bajas en la sarta, y todavía más bajas en el anular. Un cambio en la velocidad de la bomba afectará las velocidades de corte en todo el sistema. Sin embargo, la tensión de corte encontrará una fuerza de resistencia mayor. Por consiguiente, las tensiones de corte de la sarta son mayores que la del anular [10].

2.7.2.4.1 Punto cedente

Se define como la resistencia a fluir causada por las fuerzas de atracción electroquímicas entre las partículas sólidas. Estas fuerzas son el resultado de las cargas negativas y positivas localizadas cerca de la superficie de las partículas. El punto cedente, bajo condiciones de flujo, depende de: la forma de los sólidos del lodo, la concentración de los sólidos en el volumen de lodo, la concentración y tipos de iones en la fase líquida del lodo.

Generalmente, un punto cedente alto es causado por los contaminantes solubles (como el calcio, carbonatos, etc.) y por los sólidos arcillosos de formación. Altos valores del punto cedente causan la floculación del lodo, que debe controlarse con dispersantes [10].

2.7.2.4.2 Resistencia de geles

Entre las propiedades del lodo, una de las más importantes es la gelatinización, que representa una medida de las propiedades tixotrópicas de un fluido y denota la fuerza de floculación bajo condiciones estáticas. La fuerza de gelatinización, como su nombre lo indica, es una medida del esfuerzo de ruptura o resistencia de la consistencia del gel formado, después de un período de reposo. Es una medida de la fuerza necesaria para empezar el movimiento desde condiciones estacionarias.

La tasa de gelatinización se refiere al tiempo requerido para formarse el gel. Si esta se forma lentamente después que el lodo está en reposo, se dice que la tasa de

gelatinización es baja y es alta en caso contrario. Un lodo que presenta esta propiedad se denomina tixotrópico [10].

2.7.2.4.3 Perdida de Filtrado

Los fluidos están formulados de manera tal que la presión hidrostática, generada por éstos en el pozo, sea mayor a la presión de la formación. Esto ocasiona que el fluido de perforación se filtre hacia las formaciones permeables, generándose, por la deposición de partículas sólidas presentes en el fluido, un revoque (película que se genera en la pared del pozo debida al fluido de perforación) [10].

2.7.2.4.4 Contenido de sólidos

Es una medida de la proporción de sólidos presentes en un fluido, en relación con el volumen total (sólido + líquido). Normalmente, se expresa en porcentaje, en mg/l ó en ppm. Los sólidos que no son solubles en agua o ácidos se consideran indeseables, ya que su intrusión en la formación productora reduce considerablemente la permeabilidad original y en algunos casos, pueden ocasionar daños irreversibles [10].

2.8 CONDUCTOR MARINO "RISER"

El Riser se puede describir como una serie de tubulares conectados en forma de brida para formar una tubería continua hacia el hoyo del pozo y la superficie. La función principal del Riser es proveer comunicación entre el pozo perforado y la unidad de perforación. La comunicación se logra cuando el revestidor de superficie y el cabezal del pozo haya sido conectado. La fijación del Riser a la plataforma se logra mediante tensores y líneas de guía que suministran una tensión constante a los tubos. Esta tensión mantiene suspendido el tubo del Riser y también compensa el movimiento de la plataforma producido por el oleaje. Se utilizan hasta 12 tensores cargados con aire a presión para compensar el movimiento. El conductor marino esta expuesto a las corrientes marina por tanto al diseñarlo debe hacerse un previo estudio oceanográfico [11].

2.8.1 Ecuación de Morison

La conocida ecuación de Morison considera de manera conjunta las componentes de arrastre e inercial que se han tratado hasta ahora por separado (ya que estas actúan sobre la estructura de manera conjunta) para estimar la fuerza total que se va a producir sobre un objeto colocado en un flujo en movimiento.

La ecuación de Morison divide la fuerza (y el momento) que produce la corriente sobre un cilindro en las dos componentes presentadas sumándolas linealmente: la fuerza de arrastre (drag) F_D y la fuerza de inercia (inertia) F_I [11]:

1. F_D es la contribución estacionaria del campo de presiones. Se debe a la diferencia de presiones respecto a la distribución hipotética que tendría lugar si no se desprendieran capas límite y no se formara una estela con vorticidad. Estrictamente hablando consta de una componente normal (pressure drag) y una tangencial por fricción (shear drag, viscous drag).

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot D \cdot Cd \cdot U^2 \qquad (2.3)$$

Fd = Fuerza de arrastre, N/m (lb/pie)

P = Densidad del Fluido, kg/m^3 (lb/pie^3)

Cd = Coeficiente de arrastre

U = Velocidad de corriente perpendicular a la superficie, m/s (pie/s)

2. F_I es la contribución oscilatoria del campo de presiones. Se trata de la fuerza de inercia por unidad de longitud de pilote originada por el fluido acelerándose alrededor del cilindro (incluso estando en ausencia de fricción).

$$F_I = \frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot D^2 \cdot C_M \cdot a \qquad (2.4)$$

F_I = Fuerza de inercia, N/m (lb/pie)

P = Densidad del Fluido, kg/m^3 (lb/pie^3)

C_M = Coeficiente de inercia

a = Aceleración de ola, m/seg^2 (pie/s^2)

El coeficiente C_D depende de:

- La geometría del objeto y de la influencia que pueda tener con otros objetos situados cerca del mismo.
- El número de Reynolds.
- La rugosidad relativa que presenta el objeto.
- La importancia relativa entre la amplitud del movimiento orbital de la partícula y el diámetro del cilindro (número de Keulegan - Carpenter).

2.8.1.1 Número de Keulegan – Carpenter

El número de Keulegan – Carpenter *KC* (1956) se define como [11]:

$$KC = \frac{u_W}{f \cdot D} \tag{2.5}$$

donde:

u_w = Velocidad de ola, m/s (pie/s)

f = Frecuencia de la ola, Hz

D = Diámetro del cilindro, m (pie)

Para pequeños valores de *KC*, la fuerza inercial es grande en comparación con la fuerza de arrastre. Análogamente, para magnitudes mayores de *KC*, la predominante es la fuerza de arrastre. La explicación es que un aumento de *KC* implica que a igualdad de velocidad orbital máxima, el recorrido que hace una partícula en cada semiperiodo es mayor, por lo que las aceleraciones que ésta sufre son más moderadas.

2.8.1.2 El coeficiente C_M

El valor del coeficiente de inercia C_M se asocia a las características y geometría del objeto pero depende también de las características del flujo. Aparece en el término oscilatorio de la fórmula de Morison.

El coeficiente C_M dependerá de:

- La geometría del objeto.
- La rugosidad relativa que presenta el objeto.
- El número de Keulegan – Carpenter
- La afectación de posibles objetos cercanos que puedan provocar un efecto de bloqueo o elevación de la superficie libre por efecto de la reflexión.

2.8.1.3 Fuerza transversal, vórtices y resonancia

Además de las fuerzas de arrastre e inercial que actúan en la dirección del flujo, existe para números de Re elevados una tercera componente neta transversal y alternante en sentido cuya acción es perpendicular a la dirección de avance del oleaje y que se debe al desprendimiento alternado y no simétrico de vórtices a ambos lados del cilindro.

Estos vórtices se forman por una desestabilización de la estela asociada a fenómenos de separación a ambos lados del cilindro de las capas límite del fluido que, interaccionando entre ellas, provocan el desprendimiento de los vórtices. Colocando un separador en la estela evitaríamos en parte la formación de vórtices ya que dificultaríamos la interacción de las capas límite.

Los vórtices giran alternativamente dextrógira y levógiramente generando fuerzas periódicas transversales que cambian de sentido cada vez que se produce uno nuevo.

En un flujo oscilatorio el punto de separación de la capa límite (que depende de Re y de $\frac{K_s}{D}$) varía su posición en la superficie del cilindro a medida que la velocidad varía en módulo y sentido.

En muchas aplicaciones costeras y offshore se ha pasado por alto este fenómeno, a veces muy importante, ya que si la frecuencia de vibración coincide con la natural del cuerpo mojado, se puede generar una respuesta resonante provocando grandes oscilaciones en la estructura que provocan fatigas prematuras del material y fallos no previstos.

En la Fig. 2.3 se muestran las fotografías de las líneas de flujo alrededor de cilindros circulares en aceite para el dominio de estela laminar.

En ellas se da una idea de los cambios en el flujo según el número de Reynolds considerado. Para pequeños Re, la estela es laminar, mientras que para Re mayores se forman vórtices con patrón muy regular (los llamados vórtices de von Kármán). Para números de Reynolds todavía mayores (no representados aquí), el patrón de formación de vórtices se vuelve irregular y turbulento.

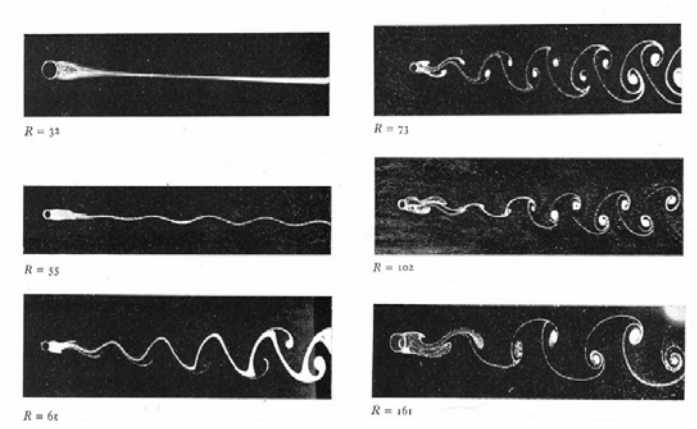

Figura 2.3 Evolución de la estela de un cilindro en un flujo de aceite según Re [24].

La fuerza transversal por unidad de longitud de pilote puede expresarse de una forma semejante a la fuerza de arrastre tal que:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot D \cdot Cl \cdot U^2 \tag{2.6}$$

F_L = Fuerza perpendicular al flujo,N/m (lb/pie)

ρ = Densidad del Fluido, kg/m^3 (lb/pie^3)

Cl = Coeficiente de impulso

U = Velocidad de corriente perpendicular a la superficie, m/s (pie/s)

Esta ecuación presenta, sin embargo, numerosos problemas debidos a la irregularidad de los vórtices y a la variación del coeficiente C_L a lo largo de un periodo.

Existen varias aproximaciones diferentes para el cálculo de la fuerza transversal en las referencias clásicas: Sarpkaya and Isaacson (1981) o Chakrabati (1994). También, el Shore Protection Manual ofrece una formulación para este cálculo.

La relación entre la frecuencia de desprendimiento de un par de vórtices f_e , una dimensión lineal característica de la sección transversal del cuerpo (por ejemplo el diámetro *D* en el caso de cilindro) y la velocidad del flujo *u* define el número de Strouhal S_t:

$$S_t = \frac{f_e \cdot D}{u} \tag{2.8}$$

D = Diámetro externo, m (pie)

Fv = Frecuencia de vorticidad, Hz

S_t = Número de Strouhal

U = Velocidad del flujo perpendicular al eje de la tubería, m/s (pie/s)

El número de Strouhal caracteriza la formación de vórtices. Para cilindros circulares aislados lisos y flujo continuo, $S_t \approx 0{,}2$ [11].

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DEL TRABAJO

En este capítulo del trabajo se identifican aquellos factores que intervienen directa o indirectamente en el proyecto; por medio de un estudio minucioso de los parámetros, que influyen en la construcción mecánica del pozo exploratorio del Campo La Vela, con el cual se permita el mejor diseño.

Una vez obtenidos los informes diarios de perforación de los pozos en el campo La Vela, se realizó el análisis de cada uno de ellos, resumiendo la información necesaria para el estudio mecánico de la construcción del pozo. Dicha información se vació en hojas de cálculo de Microsoft Excel; donde se obtuvieron todos los datos de la columna hidrostática del fluido de perforación, el estado mecánico de los revestidores, las profundidades de los topes de las formaciones encontradas. Sin embargo, sólo se obtuvo la presión hidrostática de los pozos 002X, 004X, 005X y 0012 debido a que son los únicos que contienen esa información.

A través del análisis de la sísmica realizada en el campo La Vela, por el Departamento de Geología y Geofísica de Chevron Global Tecnology, se delimitó la ubicación prospectiva (mediante los criterios característico de un yacimiento) del pozo a perforar (Mapuey-1X) y las profundidades de las formaciones que posiblemente se puedan encontrar. En Tabla 3.1 se muestra las formaciones a perforar y sus respectivas profundidades totales verticales (TVD, por sus siglas en ingles) cuyo nivel de referencia es el lecho marino.

Tabla 3.1. Topes de las Formaciones a Perforar

Tope de la formación	TVD (pies)	TVD(m)
Caujarao	2204’	667.37
Socorro	3617’	1102,46
Agua Clara	5200’	1584,96
Cauderalito Mb.	6114’	1863,55
Basamento	6469’	1971,75
Profundidad Final	7000’	2133,60

De acuerdo a la ubicación del pozo Mapuey-1X, se encontraron los pozos vecinos 001X, 002X, 017X y 022X, todos localizados en el campo La Vela, con características geológicas semejantes (ver Fig. 3.1), a diferencia del pozo 002X, que es el único cuyo reporte de perforación tiene la información necesaria para llevar a cabo este estudio. Es importante mencionar que del resto de los pozos vecinos no se tiene información.

3.1 Estimación de la presión de poro (formación) y Presión de fractura

La geopresión de la región a perforar es un factor importante para el estudio de la construcción mecánica del pozo Mapuey-1X. La estimación de este factor es muy difícil de realizar analíticamente, debido a que se deben considerar muchos factores, tales como, los procesos geológicos ocurridos, que generaron condiciones de presión y temperatura que comprimieron las diferentes formaciones. Usualmente para

perforaciones exploratorias, la estimación de este factor se hace mediante la correlación entre uno o más pozos cuyas características geológicas sean semejantes.

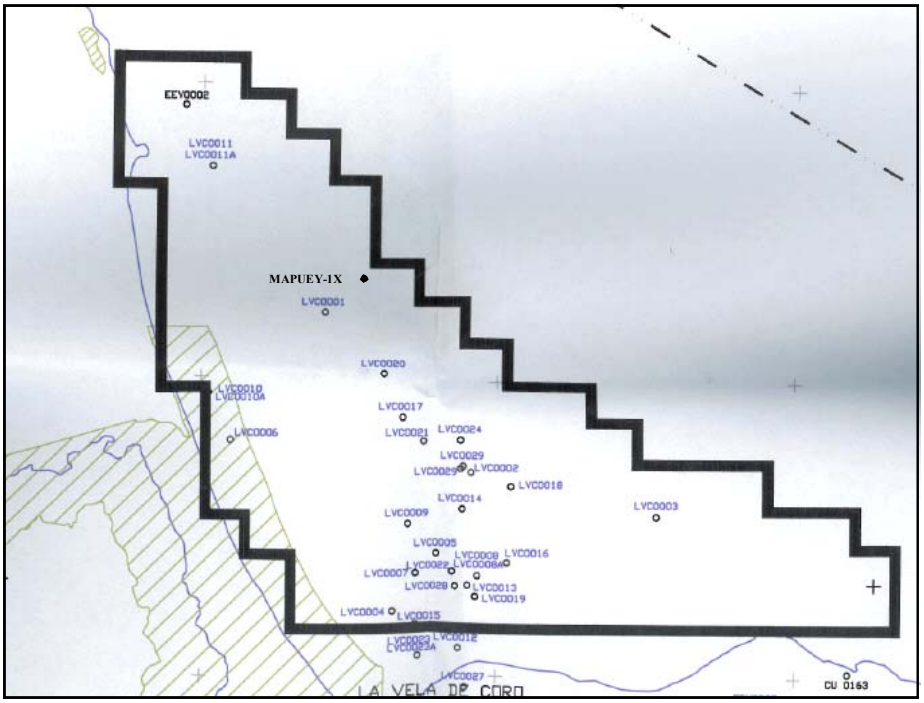

Figura 3.1. Mapa de localización de los pozos existente en el campo La Vela [25].

La estimación de la presión de yacimiento y presión de fractura para Mapuey-1X, se realizó a través de la correlación entre la geopresión del pozo 002X del campo La Vela y la geopresión de un pozo exploratorio en Cardón III; según el análisis geofísico realizado por el departamento de Geología y Geofísica de Chevron Global Tecnology, las condiciones geológicas a encontrarse en Mapuey-1X se estimaron similares a las encontradas tanto para el pozo 002X como para el pozo en Cardón III. Debido a esto, se estimó la geopresión en el Mapuey-1X dentro de los límites de las geopresiones de los pozos correlacionados.

Para estimar la presión de yacimiento del pozo Mapuey-1X, primero se determinó la presión de yacimiento del pozo de referencia (002X), mediante la presión hidrostática del fluido de perforación utilizado, en donde se le resto numéricamente el valor de 2757,90 kPa ó 400 psi (diferencial de presión promedio

entre la presión hidrostática del lodo y la presión de yacimiento, según los ingenieros de perforación), cuyo resultado es la presión de yacimiento del pozo 002X; esto se realizó debido a que no se tenían registros de geopresión del pozo 002X en la data aportada por Petróleos de Venezuela a Chevron Global Tecnology. Segundo, se determino la presión de fractura del pozo 002X mediante la densidad del lodo, sumándole a esta 600 kg/m^3 (5 lb/gal), obteniendo la densidad equivalente a la presión de fractura, luego se empleo la ecuación de la presión hidrostática para calcular la presión de fractura. El valor de 5 lb/gal fue sugerido por los ingenieros de perforación en virtud de obtener una ventana operacional típica durante una perforación.

La presión de yacimiento y fractura del pozo en Cardón III fueron obtenida del registro de geopresión de la unidad de Mudloging durante la perforación del mismo. Además se obtuvo un dato adicional, el cual fue la prueba de integridad realizada a 1341,12 m (4400 pie) en donde se elevó la presión hidrostática del lodo a 23978,28 kPa (3477,76 psi) observándose que no se fracturó la formación.

La presión de yacimiento y de fractura (geopresión) de los pozos 002X y Cardón III se graficaron con respecto a la profundidad, con dichas graficas se obtuvo la presión yacimiento de Mapuey-1X, a través de una línea de tendencia en ambas curvas.

3.2 Determinación de la columna hidrostática a emplear

La columna hidrostática del fluido de perforación es de vital importancia para llevar a cabo una construcción de un pozo, debido a que se debe contrarrestar la presión de yacimiento, inhibiendo así, la entrada de cualquier fluido entrampado en la matriz de formación al pozo que se está perforando.

La hidrostática del lodo genera estabilidad a la pared del pozo, ya que, no permite el derrumbe de la misma, lo cual evita problemas operacionales, tal como el atascamiento de la mecha y la obstrucción de la circulación del lodo bombeado.

La columna hidrostática del fluido de perforación no debe exceder la presión de fractura; si esta condición no se cumple, la misma presión hidrostática del lodo abriría canales en la formación por donde fluiría el lodo (perdiéndose el lodo) y por ende, el sistema de bombeo del lodo es afectado debido a la violación del principio fundamental de conservación de masa, es decir, que el caudal de fluido de perforación de entrada es diferente al caudal de salida del mismo.

Basado en que la presión hidrostática del lodo, debe ser mayor que la presión de yacimiento y menor que la presión de fractura, se determinó de forma gráfica el gradiente de presión hidrostática del lodo, con el empleo del grafico de geopresión del pozo Mapuey-1X donde se tiene la presión de yacimiento y fractura versus la profundidad, salvaguardando que la diferencia entre la densidad del fluido de perforación y la densidad equivalente a la presión de yacimiento sea mayor o igual que 0,50 lb/gal ó 60 kg/m^3, valor es sugerido por Byrom Ted [7].

3.2.1 Especificar el tipo de lodo a emplear

Cualquier líquido tiene la capacidad de generar la hidrostática necesaria para llevar a cabo la perforación. Como se mencionó en el capitulo anterior, hay una gran diversidad de tipos de lodo. En todo caso una buena definición del tipo de lodo a emplear es el utilizado en la perforación de pozos vecinos.

Durante una perforación, las características de este fluido deben estar sujetas a las condiciones del medio al que va estar sometido, entre dichas condiciones se encuentran la temperatura y las características de las formaciones, además no debe ser un agente contaminante, ya que este será desechado al mar.

Para la selección del lodo de perforación, se tomaron como referencia los tipos de lodos utilizados en la perforación de los pozos vecinos y sus propiedades, pero adaptados a las nuevas condiciones impuestas. La toxicidad del lodo juega un rol determinante en el uso del mismo en la perforación, por tanto se debe considerar en la definición del fluido de perforación.

3.3 Realizar el diseño de los revestidores del pozo

3.3.1 Determinación del número de revestidores a usar y su profundidad final

La profundidad final de los revestidores, se determinaron mediante un proceso sistemático, para el cual se necesitó un grafico de la densidad equivalente a la presión hidrostática del lodo y la densidad equivalente a la presión de fractura menos un margen de seguridad mayor de 60 kg/m^3 (0,5 lb/gal) versus la profundidad. Excepto para el último revestidor a emplearse en la construcción mecánica del pozo Mapuey1-X, ya que tiene una profundidad final predeterminda de 2119,6 m (7000 pie).

Este proceso se llevó a cabo realizando los siguientes pasos: 1) se trazó una recta paralela al eje de las ordenadas del gráfico, cuyo inicio era el punto final de la curva de densidad equivalente a la presión hidrostática del fluido de perforación, dicha recta se prolongó hasta que se consiguió un punto de corte con la curva de la densidad equivalente a la presión de fractura con el margen de seguridad, 2) se trazó una recta paralela al eje de las abscisa del gráfico, cuyo inicio fue el punto de corte que se encontró en el paso anterior hasta que cortó la curva de la densidad equivalente a la presión hidrostática del lodo, ese punto representa la profundidad final del revestidor que precede al último revestidor. Se repitieron los paso 1 y 2 hasta llegar a la superficie, encontrándose de esta forma los puntos finales de los revestidores a emplearse. (ver Fig. 3.2)

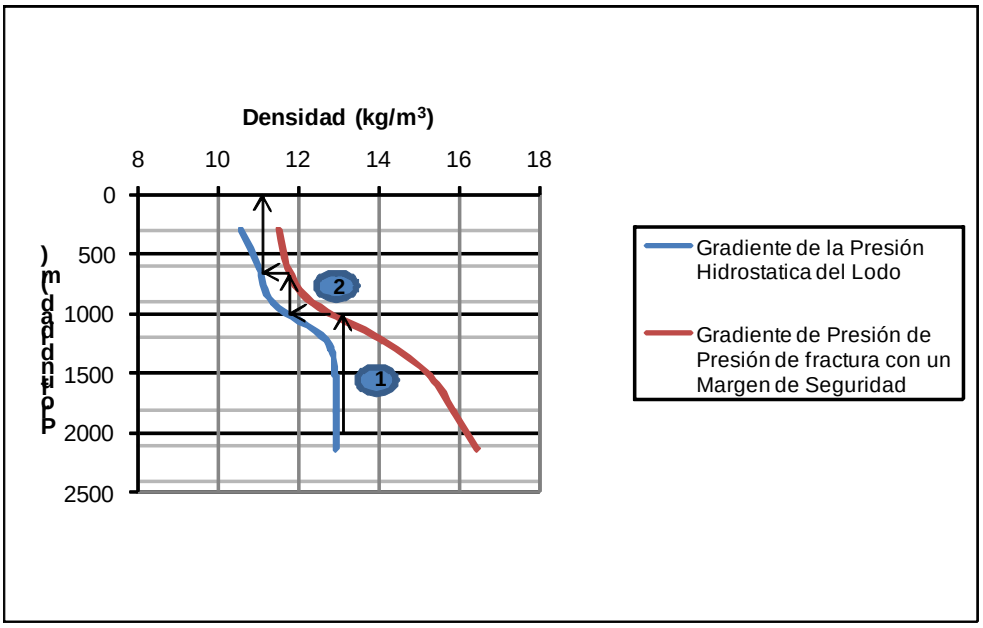

Figura 3.2. Determinación de la profundidad final de los revestidores

La metodología ante descrita, se basó en el procedimiento publicado por Byrom Ted [7], para la determinación de la profundidad final de los revestidores.

3.3.2 Selección del Diámetros de los revestidores

La geometría de los revestidores fueron determinados a partir de los estados mecánicos del pozo 002X del campo La Vela y del pozo en Cardón III. El estado mecánico de un pozo es el diagrama de los diámetros de los revestidores que se emplearon para la construcción del mismo y la profundidad de asentamiento (profundidad final del revestidor). Este diagrama siempre es de forma telescópica, es decir, de mayor a menor diámetro visto desde la superficie.

El diámetro de los revestidores depende estrictamente del diámetro del pozo, por ende se utilizó la Fig. 3.3 donde se muestra el diámetro de los revestidores y el diámetro de la mecha a usarse.

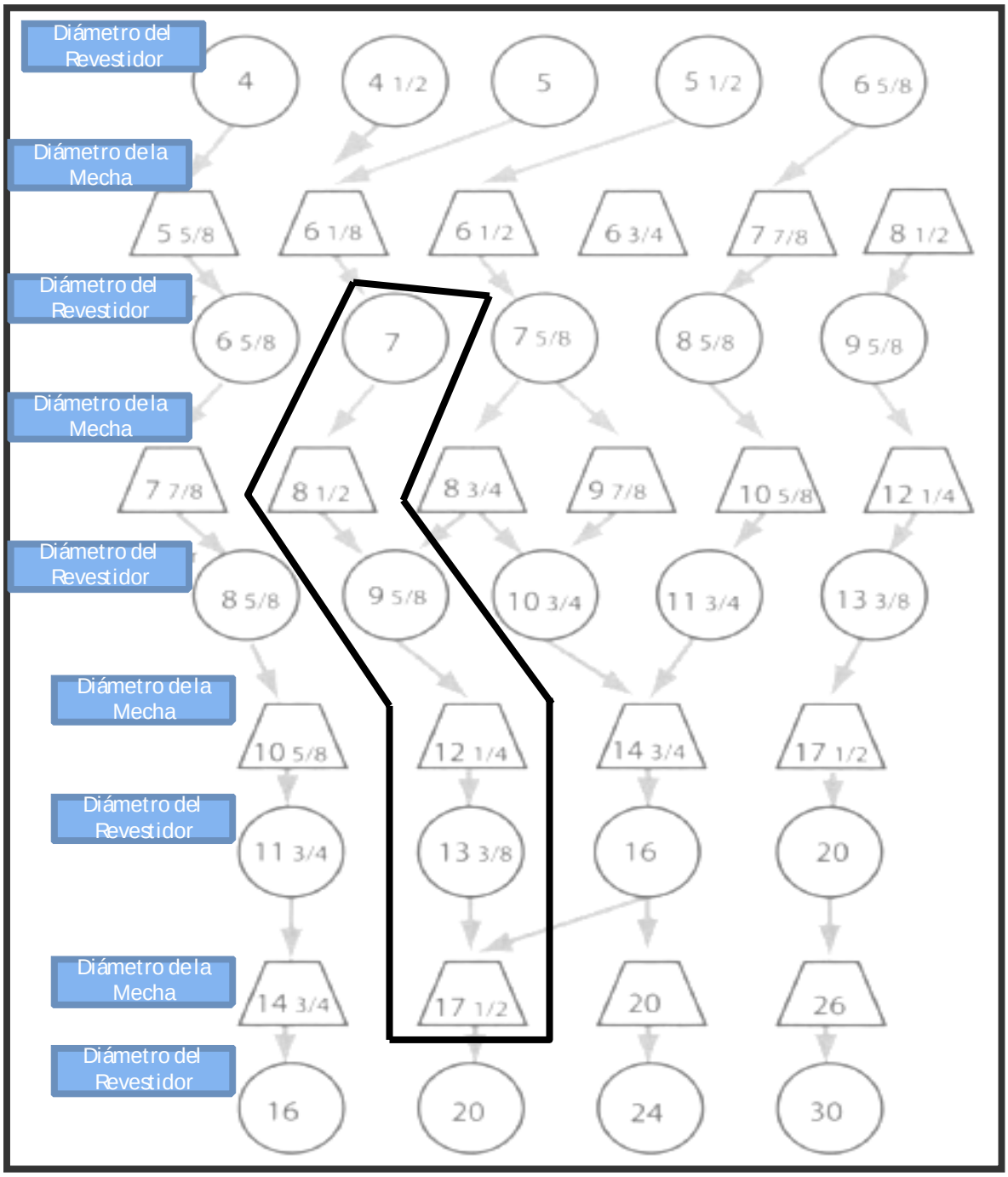

Figura 3.3. Típicas mechas y revestidores empleadas en la perforación [7].

3.3.3 Selección del tipo de revestidor

El principio fundamental de la selección del tipo de revestidor, es la disponibilidad de ellos en stock de Chevron Global Tecnology, porque básicamente determinar un tipo de revestidor y sus propiedades para la perforación de Mapuey-1X implicaría manufacturar miles de metros de revestidores, elevando así el costo total de la operación. Generando pérdidas de tiempo en cuanto al traslado de los revestidores a Venezuela. Por tanto se decidió utilizar los siguientes revestidores (ver Tabla 3.2) ya que están disponibles en los almacenes.

Tabla 3.2. Propiedades de los Revestidores del Pozo Mapuey-1X.

Diámetro del Hoyo, m (pulg)	**Diámetro del Revestidor, m (pulg)**	**Grado**	**Resistencia al Colapso kPa (psi)**	**Resistencia al Estallido kPa (psi)**	**Resistencia a la Tensión kPa (psi)**
0,4445 (17 ½)	0,3397 (13 3/8)	Q-125	19856,88 (2880)	51021,15 (7400)	12355392 (1792000)
0,3115 (12 ¼)	0,2445 (9 5/8)	N-80	32819,01 (4760)	47366,93 (6870)	7487698,50 (1086000)
0,2159 (8 ½)	0,1778 (7)	P-110	58812,22 (8530)	77359,10 (11220)	5495115,75 (797000)

3.3.4 Cálculos de las cargas por esfuerzos de estallido, colapso y tensión al cual van a estar sometidos los revestidores

Las cargas que actúan sobre los revestidores son determinadas con el empleo del Microsoft Excel 2003 y la hoja de cálculo que CHEVRON dispone para concretar dicho objetivo. Esta hoja de cálculo está diseñada para utilizarse con el Sistema de Unidades Ingles, la misma estaba dividida en cuatro partes. La primera parte esta subdividida en tres columnas: en la primera columna se introducen los datos de la densidad equivalente de la presión de fractura, yacimiento e hidrostática del fluido de perforación, la profundidad vertical total del tramo de perforación (profundidad final del revestidor); estos datos se leyeron del gráfico densidad equivalente de presión del pozo Mapuey-1X (ver Apéndice). Además el gradiente de gas, cuyo valor tomado fue 0,1(lb/pie^3); dicho valor se tomó por ser una perforación con profundidad menor a 4572 m (15000 pie), para perforaciones con profundidad mayores esta se toma 0,2 (lb/pie^3).

En la segunda columna llamada presión de la formación, se realizaron los cálculos de la máxima presión de operación, en la cual se consideró la presión de fractura como la máxima presión a encontrase durante la perforación, la presión de yacimiento y la presión hidrostática del lodo. Todas las presiones se calcularon a las profundidades finales de los respectivos revestidores, ya que en esos puntos existen las mayores presiones que experimentaran los mismos; empleado la ecuación de la presión hidrostática para el cálculo ya que se tiene la como datos la densidad equivalente de geopresión del pozo Mapuey 1-X.

$$MAX_{BHP} = C \cdot Fgrad \cdot H \tag{3.1}$$

$$PPs = C \cdot Pgrad \cdot H \tag{3.2}$$

$$PHs = 0{,}052 \cdot MW \cdot H \tag{3.3}$$

Donde:

MAX_{BHP} = Máxima presión de operación, kPa (lb/pulg^2)

Fgrad = Densidad equivalente de la presión de fractura, kg/m^3 (lb/gal)

PPs = Presión de poro en la zapata, kPa (lb/pulg^2)

Pgrad = Densidad equivalente de presión de yacimiento, kg/m^3 (lb/gal)

PHs = Presión hidrostatica en la zapata, kPa (lb/pulg^2)

MW = Densidad del lodo, kg/m^3 (lb/gal)

H = Profundidad de asentamiento del revestidor, m (pie)

C = *0,052* Constate de conversión (psi/[(lb/ gal)(pie)])

9,802E-3 Constante de conversión [(kPa/(kg/m^3)(m)]

Además se calculó el diferencial de presión entre la presión de yacimiento y la presión hidrostática del lodo, Pa (Psi).

$$SBs = PHs - PPs \tag{3.4}$$

En la tercera columna se introducen los datos de los tipos de revestidores seleccionados, es decir, la resistencia al colapso, la resistencia a tensión, la resistencia al estallido, el peso del revestidor por unidad de longitud y el diámetro del revestidor (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Propiedades del los revestidores seleccionado para la construcción del Pozo Mapuey-1X

Diámetro del Revestidor, m (pulg)	**Grado**	**Peso, kg/m (lb/pie)**	**Resistencia al Colapso kPa (psi)**	**Resistencia al Estallido kPa (psi)**	**Resistencia a la Tensión kPa (psi)**
0,3397 (13 3/8)	Q-125	100,15 (72)	19856,88 (2880)	51021,15 (7400)	12355392 (1792000)
0,2445 (9 5/8)	N-80	69,94 (47)	32819,01 (4760)	47366,93 (6870)	7487698,50 (1086000)
0,1778 (7)	P-110	43,16 (29)	58812,22 (8530)	77359,10 (11220)	5495115,75 (797000)

En la segunda parte de la hoja de cálculo, se realizó el diseño de los revestidores por estallido. Las cargas que deben resistir los revestidores se calcularon de acuerdo a las situaciones críticas que pueden ocurrir en la perforación del pozo Mapuey-1X: 1) Cuando el revestidor está lleno en un 75 % de gas, producto de la ineficacia de la presión hidrostática del fluido de perforación durante la perforación del siguiente tramo (arremetida del pozo), 2) Cuando se realiza la prueba de presión interna al revestidor. Ambas consideraciones crean las máximas presiones internas en los revestidores, que podrían generar la falla del revestidor por estallido.

Luego se elaboró el diseño por colapso del revestidor, en la tercera parte de la hoja de cálculo, primero cuando el revestidor está expuesto a la presión de formación, esto podría ocurrir con una pérdida de circulación del lodo durante la perforación del siguiente hoyo, convirtiéndose así en una situación crítica, ya que el revestidor debe estar diseñado para resistir la presión externa que genera la formación. Segundo durante el proceso de cementación del pozo, el revestidor está expuesto a un diferencial de presión externa (resultado de la diferencia entre la presión hidrostática del cemento y la presión de yacimiento). Sin embargo, para el cálculo de esta carga se tomó la densidad equivalente de presión del agua 1032 kg/m^3 (8,6 lb/gal), en vez de la densidad equivalente a la presión de formación, con el fin de obtener un diferencial de presión externa mayor que el real (generado entre la presión hidrostática del cemento y la presión de yacimiento). Se consideró la presión hidrostática del cemento ya que esta es mayor que la presión hidrostática del fluido de perforación.

En la cuarta parte de la hoja, se analizaron las mayores fuerzas de tensión en las conexiones que estarían sometidos los revestidores durante su instalación y cuando se prueban los mismos.

Los revestidores deben cumplir con los factores de seguridad establecidos por las normas adoptadas por Chevron Global Tecnology mostrado en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Factores de seguridad según la carga en los revestidores

Factor de diseño	**Valor**
Colapso	1.1
Estallido	1.2
Tensión	1.6

En todas las secciones del diseño de los revestidores de la hoja de cálculo, se obtuvieron los factores de seguridad, los cuales deben cumplir los factores antes mencionados.

Así mismo en la cuarta parte de la hoja de cálculo, se realizaron tres gráficos: diseño por estallido, diseño por colapso y diseño por tensión; donde se graficaron las respectivas cargas calculas según los criterios seleccionados y la respectivas resistencias de los revestidores en función de la profundidad.

3.3.4.1 Diseño de los revestidores por estallido

Los revestidores se diseñaron según las siguientes hipótesis:

3.3.4.1.1 Caso I: Arremetida de gas cuando se perfora la siguiente sección, 75% de gas en tope del lodo de perforación.

A. Presión de estallido en la superficie del revestidor; profundidad 0 pie en la superficie.

$$PBs = MAX_{BHP} - GPG \cdot H \tag{3.5}$$

donde:

PBs = Presión de estallido en la zapata, kPa (lb/pulg^2)

MAX_{BHP} = Máxima presión de operación, kPa (lb/pulg^2)

GPG = Gradiente de gas 0,1 lb/pie^3 ó N/m^3

H = Profundidad de asentamiento del revestidor, m (pie)

Factor de seguridad

$$Fsb = \frac{RCB}{PBs} \tag{3.6}$$

RCB = Resistencia al estallido del revestidor, kPa (lb/pulg^2)

B. Presión de estallido en el nivel del fluido.

$$PBfl = MAX_{BHP} - (H - Hd) \cdot 0{,}052 \cdot MW - (MW - Pgrad) \cdot 0{,}052 \cdot Hd \quad (3.7)$$

$$PBfl = MAX_{BHP} - (H - Hd) \cdot 9{,}802 \cdot 10^{-3} \cdot MW - (MW - Pgrad) \cdot 0{,}052 \cdot Hd \quad (3.8)$$

$$Hd = H \cdot 0.75$$

donde:

$PBfl$ = Presión de estallido nivel del fluido de perforación, kPa (lb/pulg^2)

MAX_{BHP} = Máxima presión de operación, kPa (lb/pulg^2)

Hd = Profundidad de diseño, m (pie)

H = Profundidad de asentamiento del revestidor, m (pie)

MW = Densidad del lodo, kg/m^3 (lb/gal)

$Pgrad$ = Densidad equivalente de presión de formación, kg/m^3 (lb/gal)

Factor de seguridad al estallido (Fsb)

$$Fsb = \frac{RCB}{PBfl} \quad (3.9)$$

C. Presión de estallido en la zapata (PB_s)

$$PB_s = MAX_{BHP} - Pgrad \cdot H \quad (3.10)$$

Factor de seguridad al estallido (Fsb)

$$Fsb = \frac{RCB}{PB_s} \quad (3.11)$$

3.3.4.1.2 Caso II. Prueba de presión interna del revestidor

La presión interna de prueba de los revestidores se tomó de acuerdo a las especificaciones de prueba de cada uno de ellos (ver Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Presiones de prueba en los revestidores

Revestidor (pulg)	13 3/8	9 5/8	7
Presión de prueba kpa (psi)	10342,125 (1500)	20684,25 (3000)	34473,75 (5000)

Se calcularon las cargas de presión de estallido en los extremos de los revestidores. En el extremo superior, se experimenta la misma presión de prueba, pero en el extremo inferior, la presión de prueba es incrementada por el diferencial de presión entre presión hidrostática del lodo y la presión de yacimiento.

A. Presión de estallido en la superficie

$$PBs = presiondeprueba$$

Factor de seguridad

$$Fsb = \frac{RCB}{PBs} \tag{3.12}$$

B. Presión de estallido en la zapata

$$PB_s = Ppt + 0{,}052 \cdot H \cdot (MW - Pgrad) \tag{3.13}$$

$$PB_s = Ppt + 9{,}802 \cdot 10^{-3} \cdot H \cdot (MW - Pgrad)$$

Factor de seguridad

$$Fsb = \frac{RCB}{PB_s} \tag{3.14}$$

3.3.4.2 Diseño de los revestidores por colapso

Se realizaron bajo los escenarios más crítico de colapso que pueden estar sometidos los revestidores:

3.3.4.2.1 Escenario I. Pérdida de circulación como resultado de la perforación del siguiente tramo

A. En la superficie, la carga de colapso es igual a cero.

B. En el tope del nivel de fluido. Carga por colapso

Esta carga representa la presión que experimenta el revestidor si se deja perder cierto nivel de fluido de perforación debido a una pérdida de circulación, es decir, esto representa la longitud del revestidor quedando expuesta a la formación. La carga se calcula a la profundidad del nivel hasta donde llega el fluido de perforación.

Estos niveles de pérdida del fluido de perforación son tomados según el criterio del diseñador. Para el diseño de los revestidores se tomaron los niveles de fluido de perforación perdidos, cuyo nivel de referencia es el lecho marino (ver Tabla 3.6), esto implica que ocurrida una pérdida de circulación durante la perforación solo se pueden dejar perder lodo hasta los niveles que se reportaron en la Tabla 3.6. Sin embargo en toda operación de perforación existen tanques de lodos extra para suplir la cantidad de lodo perdido dado el caso, convirtiéndose los niveles de los tanques de lodo en un indicador de pérdida de circulación y para detener dicha perdida es necesario contar en el taladro con material anti-perdida (material que permite sellar los canales abierto por la presión hidrostática del lodo; como por ejemplo arroz, papelillo, concha de coco, mica).

Tabla 3.6. Niveles de pérdida de fluido de perforación

Revestidor (pulg)	13 3/8	9 5/8	7
Nivel de fluido perdido m (pie)	609,6 (2000)	609,6 (2000)	1676,4 (5500)

$$PCfl = Pgrad \cdot 0{,}052 \cdot N \qquad (3.15)$$

$$PCfl = Pgrad \cdot 9{,}802 \cdot 10^{-3} \cdot N$$

donde

PCfl = Presión de colapso al nivel del fluido, kPa (lb/pulg^2)

N = Nivel del fluido de perforación perdido, m (pie)

Pgrad = Densidad equivalente de la presión de formación, kg/m^3 (lb/gal)

C) En la zapata (profundidad final del revestidor)

$$PC_S = Pgrad \cdot 0{,}052 \cdot H - (H - N) \cdot 0{,}052 \cdot MW \qquad (3.16)$$

$$PC_S = Pgrad \cdot 0{,}052 \cdot H - (H - N) \cdot 9{,}802 \cdot 10^{-3} \cdot MW$$

donde:

PC_s = Presión de colapso en la zapata, kPa (lb/pulg^2)

H = Profundidad de asentamiento del revestidor, m (pie)

Pgrad = Densidad equivalente de la presión de formación, kg/m^3 (lb/gal)

MW = Densidad del lodo, kg/m^3 (lb/gal)

N = Nivel del fluido de perforación perdido, m (pie)

3.3.4.2.2 Escenario II. Operación de cementación

La operación de cementación de un pozo consiste en bombear un cemento formulado para resistir las condiciones de presión y temperatura preparado para fraguar en un determinado tiempo. Siempre se bombean dos tipos de cemento uno de menor densidad que el otro; típicamente de 1500 kg/m^3 y 1896 kg/m^3 (12,5 y 15,8 lb/gal), lo cual hace que el revestidor esté sometido a presiones hidrostática diferentes, por tanto se calcularon las cargas que estos generaría a los niveles, al cual se dejará cada tipo de cemento.

Para el revestidor de superficie (revestidor cuyo diámetro es 13 3/8 pulg) sólo se cementa con una densidad 1896 kg/m^3 (15,8 lb/gal).

A. En la superficie la carga de colapso es igual a cero, por estar en superficie.

B. Carga por encima del tope del cemento de densidad 1500 kg/m^3 (12,5 lb/gal) (ver Tabla 3.7), se obtuvo de acuerdo al diferencial de presión entre la presión de yacimiento y la presión hidrostática del lodo, considerando que el revestidor queda expuesto a la formación, condición que no es cierta ya que estos revestidores quedan solapado por el revestidor que lo antecede (ver la Fig. 3.4).

Tabla 3.7. Tope del Cemento con densidad 1500 kg/m^3 (12,5 lb/gal)

Revestidor (pulg)	9 5/8	7
Profundidad (Hl) tope del cemento, m (pie)	457,2 (1500)	579,12 (1900)

$$PCl = 0{,}052 \cdot Hl \cdot (MW - 8{,}6) \tag{3.17}$$

$$PCl = 9{,}802 \cdot 10^{-3} \cdot Hl \cdot (MW - 1032)$$

donde:

PC_l = Presión de colapso por la carga, kPa (lb/pulg^2)

Hl = Profundidad del tope de la carga, m (pie)

MW = Peso del lodo, kg/m^3 (lb/gal)

C. En el tope de la lechada de cemento 1896 kg/m^3 (15,8 lb/gal).

Los niveles de los topes de cemento con densidad de 1896 kg/m^3 (15,8 lb/gal) (ver Tabla 3.8), se encogieron basado en que este cemento se localizara frente a la zapata del revestidor 9 5/8 pulg y frente a toda la formación donde se ubicó el revestidor de 7 pulg, debido a que esta formación se pronosticó como prospectiva (por el Departamento de Geología y Geofísica de Chevron Global Tecnology), por ende, se empleara el cemento de mayor densidad permitiendo sellar efectivamente dicha formación (ver Fig. 3.4).

Tabla 3.8. Tope de la lechada de cemento con densidad 1896 kg/m^3 (15,8 lb/gal)

Revestidor(pulg)	9 5/8	7
Profundidad (Ht)del tope de cemento, m (pie)	1066,8 (3500)	762 (2500)

En la sección entre el tope del cemento de densidad 1500 kg/m^3 (12,5 lb/gal) y el tope de cemento de densidad 1896 kg/m^3 (15,8 lb/gal), actuaba una presión externa generada por el diferencial de presión entre la presión hidrostática cemento (densidad

1500 kg/m^3 ó 12,5 lb/gal) y la presión de yacimiento (se tomó como presión de yacimiento, la presión hidrostática que ejercería el agua, en virtud de realizar el cálculo un diferencial de presión mayor que el verdadero) cuyo máximo valor esta justo al nivel del segundo cemento (ver Fig. 3.4).

Presión de colapso:

$$PCt = 0{,}052 \cdot (Ht - Hl) \cdot (12{,}5 - 8{,}6) + PCl \tag{3.18}$$

$$PCt = 9{,}802 \cdot 10^{-3} \cdot (Ht - Hl) \cdot (1500 - 1032) + PCl$$

donde:

PC_t = Presión de colapso por la carga durante la cimentación, kPa (lb/pulg^2)

Ht = Profundidad del tope de la lechada de cemento, m (pie)

PCl = Presión de colapso por la carga, kPa (lb/pulg^2)

D. Carga de colapso en la zapata (extremo final del revestidor)

La carga que experimentara la zapata del revestidor se consideró como el diferencial de presión entre la presión hidrostática del cemento de densidad 1896 kg/m^3 (15,8 lb/gal) y la presión de yacimiento (se estimó de igual forma que el caso anterior) a la profundidad final del mismo (ver Fig. 3.4)

$$PC_s = 0{,}052 \cdot (H - Ht) \cdot (15{,}8 - 8{,}6) + PCt \tag{3.19}$$

$$PC_s = 9{,}802 \cdot 10^{-3} \cdot (H - Ht) \cdot (1500 - 1896) + PCt$$

donde:

PC_s = Presión de colapso en la zapata, kPa (lb/pulg^2)

H = Profundidad del tope de la lechada de cemento, m (pie)

PCt = Presión de colapso por la carga durante la cimentación, kPa (lb/pulg^2)

La Fig. 3.4 se muestra el estado mecánico del y un bosquejo de la cementación del pozo donde se visualizan de forma clara los niveles de los cementos empleados para el cálculo de las cargas.

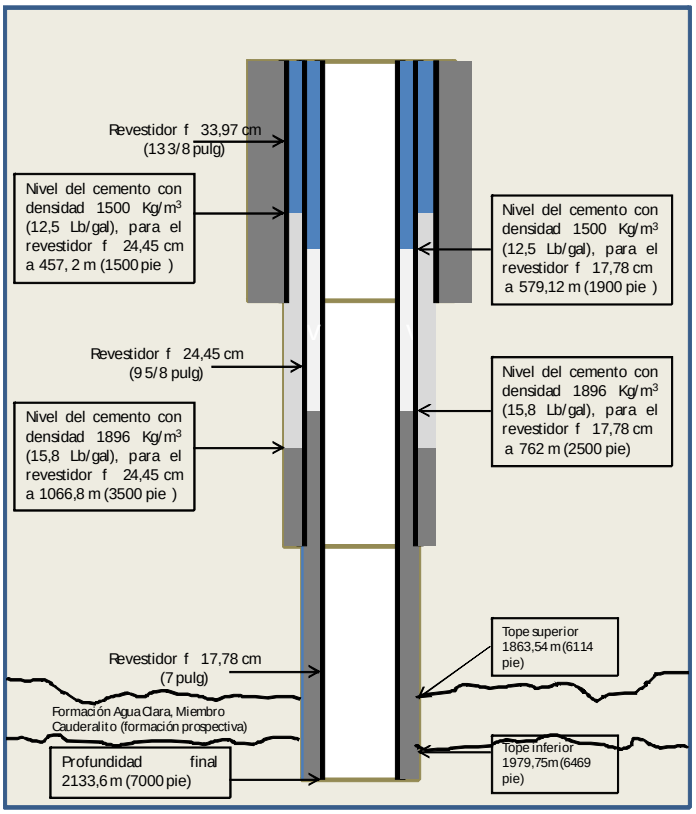

Figura 3.4. Niveles de los topes de los tipo de cemento empleado.

3.3.4.3 Diseño de los revestidores por la tensión

3.3.4.3.1 Caso I. Durante la corrida del revestidor hacia dentro y fuera del pozo

En la instalación de los revestidores en el pozo, ellos experimentaran la máxima tracción, por lo tanto, se calcularon las siguientes cargas:

A. En superficie, profundidad igual a cero

$$BW = (H - h) \cdot CW \cdot \left(\frac{64{,}5 - MW}{64{,}5} \right) \tag{3.20}$$

$$BW = (H - h) \cdot CW \cdot \left(\frac{7740 - MW}{7740} \right)$$

BW = Peso flotante del revestidor, N (lb)

H = Profundidad de asentamiento del revestidor, m (pie)

CW = Peso del revestidor en el aire, N/m (lb/pie)

MW = Peso del lodo, kg/m^3 (lb/gal)

OP = Sobre tracción = 250000 lb

Un buen diseño por tensión de un revestidor tiene que considerar el atascamiento y/o la incrustación del revestidor en la pared del pozo, esta situación se solventó adicionándole una fuerza de 11112,055 kN (250000 lb), según las especificación de Chevron Global Tecnology.

Carga por tensión en Lb (TF)

$$TF = BW + OP \tag{3.21}$$

B. En la zapata del revestidor

Peso flotante del lodo BW = 0

OP = 11112,055 kN (250000 lb)

Carga por tensión

$$TF = BW + OP \tag{3.22}$$

Factor de seguridad

$$Fsb = \frac{RT}{FT} \tag{3.23}$$

F_{sb} = Factor de seguridad a la tensión

RT = Resistencia a la tensión de la tubería, N (Lb)

FT = Fuerza de tensión, N (lb)

3.3.4.3.2Caso II. Durante la prueba de presión

Tensión por la carga de prueba (Ttp)

$$Ttp = Pt \cdot D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \tag{4.24}$$

Ttp = Tensión generada por la presión de prueba, N (Lb)

Pt = Presión de la prueba, kPa (lb/pulg^2)

D = Diámetro del revestidor, m (pie)

3.4 Analizar el impacto de las corrientes marinas en el conductor de superficie (Riser)

El conductor marino es una facilidad que se localiza entre el lecho marino hasta la superficie del taladro, cuyo diámetro exterior es 0,762 m (30 pulg) por proporcionar una mejor operatividad ya que se tiene mayor área para correr las herramientas de perforación (ver Fig. 3.5).

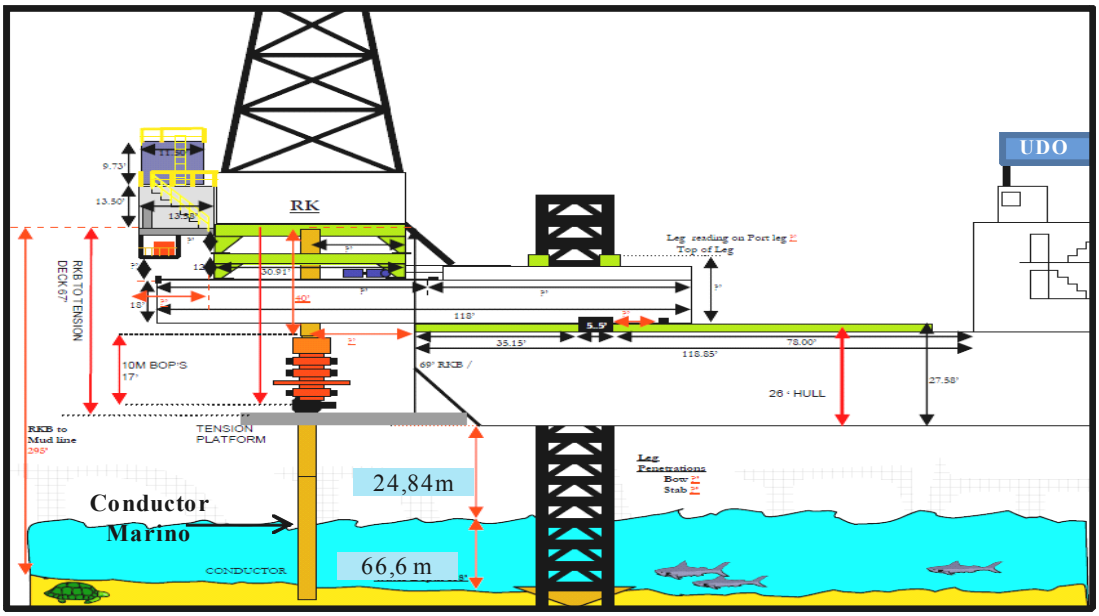

Figura 3.5. Bosquejo del conductor marino y el taladro.

Se emplea típicamente un conductor marino cuyo material es de grado API X-52 cuya propiedades mecánicas se muestran la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Propiedades mecánicas del conductor marino

Modulo de Young (E), MPa (psi)	199947,961 MPa (29000000)
Coeficiente de Poisson (υ)	0,3
Esfuerzo de fluencia minimo, MPa (psi)	360 (52200)
Esfuerzo de tensión último minimo, MPa (psi)	460 (66700)

3.4.1 Espesor del conductor marino

El conductor marino está sujeto a presiones internas que pueden ocasionar fallas de la tubería (reventamiento), por lo que el ducto debe tener un espesor que limite este tipo de falla y que esté de acuerdo con un factor de seguridad que garantice la integridad del ducto.

Para este diseño se tomó una presión interna de 12410,55 kPa (1800 psi), correspondiente a la sustracción numérica de la presión de fractura del tramo final (a 2133,6 m ó 7000 pie) y la presión ejercida por el fluido de perforación en el mismo tramo. Esta es la máxima presión al que puede estar sometido el conductor marino considerando la presión de formación igual a la presión de fractura.

Cálculo del espesor del conductor marino mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{Pd \cdot D}{2 \cdot SMYS \cdot F \cdot E \cdot T} \tag{3.25}$$

donde:

T = Espesor de la tubería, m (pulg)

Pd = Presión de diseño, Pa (psi)

D .= Diámetro exterior, m (pulg)

$SMYS$ = Esfuerzo de Fluencia Mínimo Especificado de la tubería (Specified Minimum Yield Strength), Pa (psi)

F = Factor de seguridad

E = Factor de seguridad a la soldadura

T = Factor de seguridad por temperatura

Según la norma API RP1111

$$t = \frac{Pd \cdot Do}{0{,}72 \cdot (SMYS + SMTS) \cdot Fd \cdot Fe \cdot Ft + Pd} \tag{3.26}$$

donde:

T = Espesor de la tubería, m (pulg)

Pd = Presión de diseño, Pa (psi)

Do = Diámetro exterior, m (pulg)

$SMYS$= Esfuerzo de Fluencia Mínimo Especificado de la tubería (Specified Minimum Yield Strength), en Pa (psi)

$SMTS$= Esfuerzo de Tensión Ultimo Mínimo Especificado del tubo (Specified Minimum Ultimate Tensile Strength), en Pa (psi)

Fd = Factor de seguridad por diseño

Fe = Factor de seguridad a la soldadura

Ft= Factor de seguridad por temperatura

Obtenido el espesor del conductor marino teórico de diseño, es elegido a partir de este el espesor comercial próximo superior.

3.4.2 Cálculo de las fuerzas hidrodinámicas

Para el cálculo de las fuerzas, se necesitaron los datos oceanográficos de la región donde se realizará la perforación. Se tomaron los datos reportados por la estación oceanográfica La Guaira, para el periodo 1990-1995. La estación oceanográfica La Guaira fue seleccionada en virtud de no existir otra estación más cercana en la costa oriental del estado Falcón y porque las estaciones que se ubican en la costa occidental falconiana y el Golfo de Venezuela registran un comportamiento totalmente distinto al que se observa en el sector costero donde se ubica el área de estudio (ver Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Condiciones Oceanográficas

Velocidad del oleaje (m/s)	1,497
Frecuencia del oleaje (Hz)	0,183
Altura máxima de ola (m)	1,3
Velocidad de la Corriente (m/s)	1,1
Aceleración de ola (m/s^2)	1,72

Fuerzas generadas por la acción de las corrientes:

En la línea del flujo

$$Fd = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot D \cdot Cd \cdot U^2 \tag{3.27}$$

$$Fl = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot D \cdot Cl \cdot U^2 \tag{3.28}$$

donde:

Fd = Fuerza en la línea de flujo, N/m (lb/pie)

Fl = Fuerza perpendicular la flujo, N/m (lb/pie)

ρ = Densidad del Fluido, kg/m^3 (lb/gal)

Cd = Coeficiente de arrastre

Cl = Coeficiente de impulso

U = Velocidad de corriente perpendicular a la superficie, m/s (pie/s)

Los coeficientes de las fuerzas hidrodinámicas fueron determinados a través de las siguientes figuras:

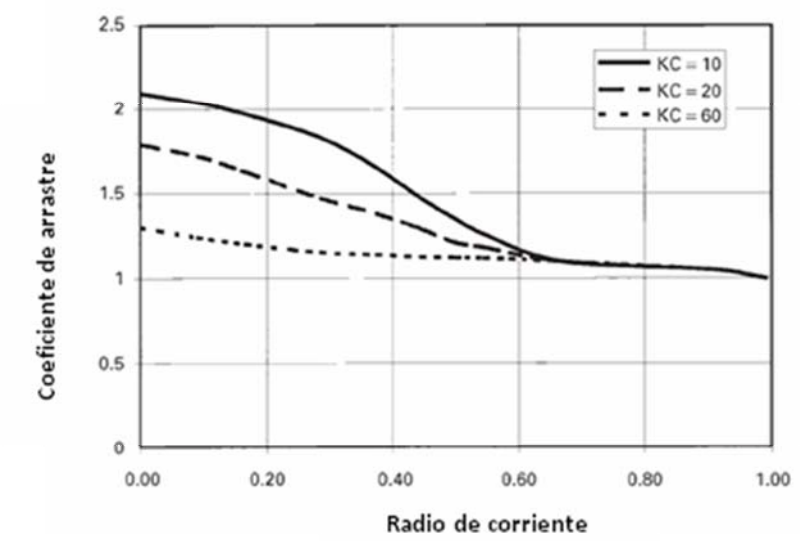

Figura 3.6. Coeficiente de arrastre contra el radio de la corriente, combinado con el oleaje [11].

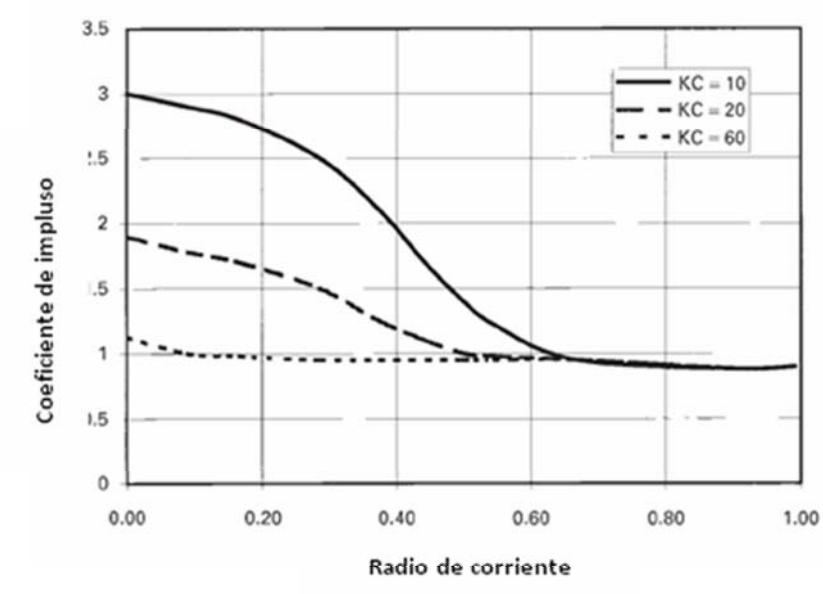

Figura 3.7. Coeficiente de impulso contra el radio de corriente, combinado con el oleaje y el flujo de corriente [11].

donde:

$$\alpha = \frac{Uc}{Uc + Uw} \tag{4.29}$$

$$KC = \frac{Uw}{f \cdot D} \tag{4.30}$$

α = Radio de Corriente

KC = Número Keulegan-Carpenter

Uc = Velocidad de la corriente perpendicular a la superficie, m/s (pie/s)

Uw = Velocidad del oleaje, m/s (pie/s)

f = frecuencia del oleaje, Hz

D = Diámetro exterior, m (pie)

Las Figs. 3.6 y 3.7 se usaron para determinar los coeficientes de las fuerzas hidrodinámicas, en donde el valor del radio de la corriente es proyectado verticalmente hasta cortar la grafica que representa el valor de KC (número de Keulegan-Carpenter). Luego se lee la ordenada de ese punto de corte, el coeficiente de arrastre o impluso.

3.4.3 Diagrama de cuerpo libre del conductor marino

El conductor marino es considerado como una viga estáticamente indeterminada de primer orden (ver Fig. 3.8), debido a que su extremo en B es fijo y su extremo superior tiene una restricción en X (el taladro se mantiene fijo). La fuerza distribuida F, representa la fuerza hidrodinámica producto de la acción de las corrientes marinas cuyo comportamiento real es parabólico, para este estudio se consideró como una carga distribuida uniforme, con el cual se sobre diseña al conductor marino.

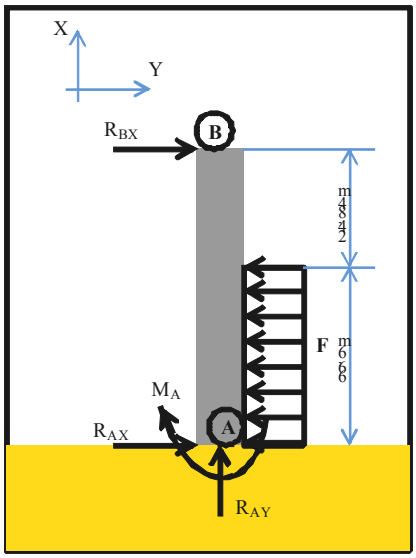

Figura 3.8. Diagrama de cuerpo libre del conductor marino

3.4.3.1 Determinación de las reacciones en el conductor marino

Las reacciones en los apoyos del conductor marino fueron determinadas mediante el uso de los teoremas de momento de área para vigas estáticamente indeterminadas.

Se consideró redundante al par que se ejerce en el extremo "A" y se reemplazó el extremo fijo por un apoyo puntual, sin embargo al par del momento en "A" se consideró como una carga desconocida (ver Fig. 3.9a), la cual se determinó a partir de la condición de que la tangente del extremo B a A debe ser horizontal. Se deducía que esta tangente debe pasar a través del apoyo en B, y entonces que las desviación en tangencial ($t_{B/A}$) de B con respecto a A debe ser igual a cero. Se calculó la desviación tangencia por separado, es decir, la desviación tangencial $(t_{B/A})_F$ generada por la carga distribuida (ver Fig. 3.9b) y la desviación tangencial $(t_{B/A})_M$ producida por el par desconocido M_A (ver Fig. 3.9c). La suma algebraica de estas desviaciones tangenciales se consideró igual a cero, de donde se obtuvo el valor el momento en A y a través de las ecuaciones de estática se determinaron los valores de las reacciones. Se construyeron los diagramas de fuerza cortante, momento cortante y momento flector, se cálculo las respectivas desviaciones tangenciales aplicando el teorema de momento de área con respecto a un eje que pasa por B (la desviación

tangencial es igual al área de bajo de la curva del momento flexionante por la distancia del centro de gravedad de dicha área hasta el eje en B).

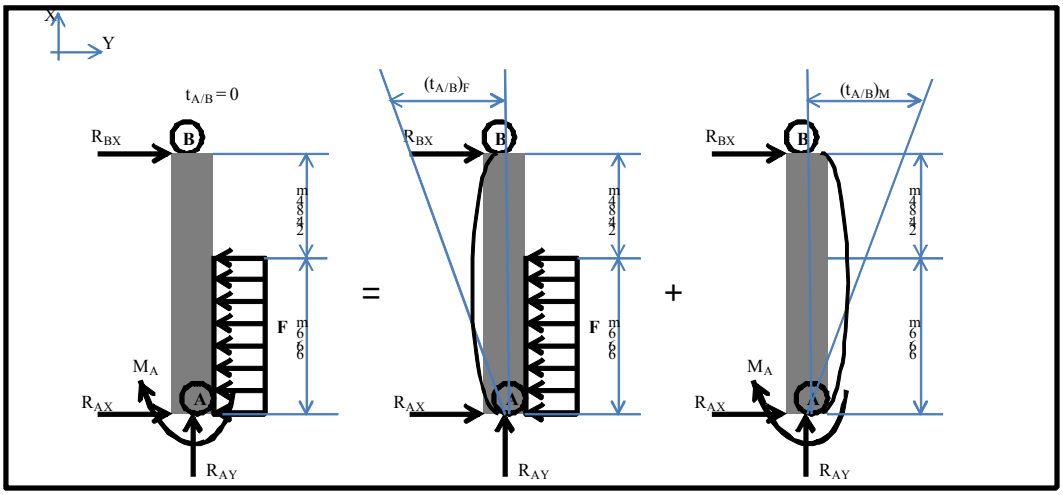

Figura 3.9. Determinación de las reacciones en el conductor marino por el método de área

Una vez que se obtuvieron las reacciones se realizó el diagrama de fuerza cortante y momento cortante del conductor marino con el cual se determinó el momento flexionante máximo.

La fuerza axial máxima aplicada en el conductor se determinó a través de la suma algebraica del peso del mismo y el peso de todos los revestidores, la cual será la situación más crítica del conductor marino.

3.4.4 Revisión del Espesor

3.4.4.1 Tensión Longitudinal

Para fines de considerar este efecto, se tomó en cuenta los esfuerzos longitudinales que se presentaran en la fase de instalación u operación. La capacidad del ducto a tensión longitudinal se calculó por la siguiente expresión:

$$Tu = 1.1 \cdot SMYS \cdot A \tag{3.31}$$

donde:

Tu= Tensión longitudinal última, N (lb)

SMYS= Esfuerzo de fluencia mínimo especificado de la tubería (Specified Minimum Yield Strength), Pa (psi)

A= Area Transversal del conductor marino, m^2 ($pulg^2$)

3.4.4.2 Presión Externa

El conductor marino está sujeto a condiciones de presión externa. El diferencial de presión con respecto a la presión interna actuando en la tubería, puede causar el colapso del ducto. Debe realizarse una revisión de los efectos de presión de colapso y propagación de pandeo para garantizar una adecuada resistencia del conductor marino, se tomó en cuenta las variaciones de las propiedades geométricas, ovalamiento, esfuerzos y presiones externas (P_{ext}).

3.4.4.2.1 Presión de Colapso. La capacidad a presión neta de colapso (Pc) se determinó mediante la expresión:

$$(Po - Pi) \leq fo \cdot Pc \tag{3.32}$$

$$Pc = \frac{Py \cdot Pe}{\left(Py^2 + Pe^2\right)^{1/2}} \tag{3.33}$$

$$Py = 2 \cdot SMYS \cdot \left(\frac{t}{D}\right) \tag{3.34}$$

$$Pe = \frac{2 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^3}{\left(1 - \upsilon^2\right)} \tag{3.35}$$

$$P_{ext} = 0{,}052 \cdot H \cdot \rho \tag{3.36}$$

donde:

P_{ext} = Presión externa, kPa (psi)

P_{int} = Presión interna, kPa (psi)

fo = Factor de ovalamiento ≤ 0,005 de a uerdo con las normas Offshore Standard DNV-OS-F-201. Dinamic Riser 2001.

Pc = Presión de colapso, kPa (psi)

Py = Presión de fluencia por colapso, kPa (psi)

Pe = Presión elástica por colapso, kPa (psi)

SMYS = Esfuerzo de Fluencia Mínimo Especificado de la tubería (Specified Minimum Yield Strength), kPa (psi)

T = Espesor del conductor marino, m (pulg)

D = Diámetro externo del conductor, m (pulg)

E = Modulo de Yougs, kPa (psi)

Y = Coeficiente de Possion 0,3 para el acero

H = Profundidad del agua, m (pie)

P = Densidad del mar, 1032 kg/m^3 (8,6 lb/gal)

La presión interna se consideró cero, aunque es sabido que existe presión interna; esta consideración hace que se tenga la condición mas critica de colapso

3.4.4.2.2 Propagación de Pandeo (Pp). La presión de propagación en líneas se calculó con la siguiente expresión:

$$Pp = 24 \cdot SMYS \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{2,4} \qquad (3.37)$$

$$\left(P_{ext} - P_{\text{int}}\right) \leq Fp \cdot Pp \tag{3.38}$$

donde:

P_{ext} = Presión externa, kPa (psi)

P_{int} ..... = Presión interna, kPa (psi)

Fp .... = Factor de seguridad 0,8 de acuerdo a la norma API RP1111

Pp = Presión de propagación, kPa (psi)

$SMYS$ = Esfuerzo de Fluencia Mínimo Especificado de la tubería (Specified Minimum Yield Strength), kPa (psi)

T = Espesor del conductor marino, m (pulg)

D = Diámetro exterior, m (pulg)

3.4.4.3 Momento Flexionante

La capacidad a flexión transversal del conductor marino se determinó por las siguientes expresiones:

$$M_U = 1{,}1\left[SMYS \cdot D^2 \cdot t \cdot \left(1 - 0{,}001 \cdot \frac{D_{ext}}{t}\right)\right] \tag{3.39}$$

donde:

M_U = Momento último por flexión transversal para el diseño, N-m (lb-pulg)

$SMYS$ = Esfuerzo de Fluencia Mínimo Especificado de la tubería (Specified Minimum Yield Strength), kPa (psi)

D_{ext} = Diámetro exterior del conductor marino, m (pulg)

t = Espesor del conductor marino, m (pulg)

3.4.4.4 Pandeo Global

Se realizó una revisión por pandeo global, para el caso del conductor marino por estar sometido a fuerza de compresión pura, durante la instalación del mismo. La capacidad por pandeo global se calculó mediante la siguiente expresión:

$$Cg = 1{,}1 \cdot \left[SMYS \cdot \left(1{,}2 - 0{,}25 \cdot \lambda^2 \right) \right] A \tag{3.40}$$

$$\lambda = \frac{K \cdot L}{\pi \cdot r} \cdot \left(\frac{SMYS}{E} \right)^{0,5} \tag{3.41}$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{3.42}$$

Cg = Carga de compresión por pandeo global, N (lb).

$SMYS$ = Esfuerzo de Fluencia Mínimo Especificado de la tubería (Specified Minimum Yield Strength), kPa (psi)

λ = Relación de esbeltez

K = Factor de longitud efectiva que depende de las condiciones de apoyo en los extremos del tramo. Para extremos empotrados K = 0.5 y para extremos articulados K = 1.0.

L = Longitud del conductor marino, m (pulg)

R = Longitud del tramo, mm (pulg.).

E = Modulo de Yougs, kPa (psi)

I = Momento de inercia, m^4 ($pulg^4$)

A = Área transversal, m^2 ($pulg^2$)

La capacidad permisible de la tubería se calculó con la expresión:

$$Cgp = 0{,}54 \cdot Cg$$

Cgp = Capacidad permisible por pandeo global para diseño, N (lb).

La máxima fuerza de compresión que puede causar el pandeo del conducto, es la que este experimenta durante la instalación del mismo, dicha fuerza se calculó a partir de la presión de fractura a 60,96 m (200 pie) (profundidad hasta donde va a ser clavado el conductor) multiplicada por el área transversal del mismo.

3.4.4.5 Formulación de Diseño para Estados Cargados Combinados

3.4.4.5.1. Tensión y Momento Flexionante. La capacidad del conductor marino para soportar esfuerzos combinados de tensión y momento flexionante, se verificó mediante la siguiente expresión:

$$\left[\left(\frac{M}{M_U}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_U}\right)^2\right]^{0,5} \leq F_{TM} \qquad (3.43)$$

donde

F_{TM} = Factor de diseño para combinación de Tensión y Momento Flexionante = 0.54; de acuerdo con la norma NRF 013 PEMEX-2005

M_U = Momento último por flexión transversal, N-m (lb-pulg). (Ec. 3.39).

T_U = Tensión longitudinal última, N (lb). (Ec. 3.41)

M = Momento flexionante aplicado, N-m (lb-pulg).

T = Fuerza axial aplicada, N (lb).

3.4.4.5.2 Tensión, Momento Flexionante y Presión de Colapso. La capacidad del conductor marino para soportar esfuerzos combinados de tensión axial, momento flexionante y presión de colapso, se verificó mediante la siguiente expresión:

$$\left[\left(\frac{M}{M_U}\right)^2+\left(\frac{T}{T_U}\right)^2+\left(\frac{P_{ext}}{P_C}\right)\right]^{0,5} \leq F_{TMPC} \qquad (3.44)$$

donde

F_{TMPc} = Factor de diseño para combinación de tensión, momento flexionante y presión de colapso = 0.80; de acuerdo a la noma NRF 013 PEMEX-2005

M_U = Momento último por flexión transversal, N-m (lb-pulg). (Ec. 3.39).

T_U = Tensión longitudinal última, N (lb). (Ec. 3.31)

P_C = Presión de colapso, kpa (psi)

M = Momento flexionante aplicado, N-m (lb-pulg).

T = Fuerza axial aplicada, N (lb).

Pext = Presión externa actuante, kPa (psi)

3.4.4.6 Expansión y Flexibilidad

Se realizó una revisión de los esfuerzos por expansión y flexibilidad en zonas críticas como son: ducto ascendente, curva de expansión, cruces, interconexiones y otros. El esfuerzo equivalente se calculó usando la siguiente expresión con base al esfuerzo combinado de Von Mises donde:

$$\sigma_{eq}=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\left(\sigma_{pr}-\sigma_{p\theta}\right)^2+\left(\sigma_{p\theta}-\sigma_{pz}\right)^2+\left(\sigma_{pz}+\sigma_{pr}\right)^2} \leq 0{,}9SMYS \qquad (3.45)$$

$$\sigma_{pr}=\frac{\left(P_{ext}\cdot D_o-P_{\text{int}}\cdot D_i\right)}{D_o+D_i} \qquad (3.46)$$

$$\sigma_{p\theta}=\frac{D_o}{2\cdot t}\left(P_{\text{int}}-P_{ext}\right)-P_{\text{int}} \qquad (3.47)$$

$$\sigma_{pz} = \frac{T}{A} + \frac{M}{2 \cdot I} \cdot (D_o - t) \tag{3.48}$$

σ_{eq} = Esfuerzo equivalente máximo, kPa (psi)

P_{ext} = Presión externa, kPa (psi)

P_{int} = Presión interna, kPa (psi)

σ_{pr} = Esfuerzo radial, kPa (psi)

$\sigma_{p\theta}$ = Esfuerzo circunferencial, kPa (psi)

σ_{pz} = Esfuerzo longitudinal, kPa (psi)

D_o = Diámetro exterior del conductor marino, m (pulg)

D_i = Diámetro interno del conductor marino, m (pulg)

T = Espesor del conductor marino, m (pulg)

I = Momento de Inerciam, m^4 ($pulg^4$)

A = Área trasversal, m^2 ($pulg^2$)

T = Fuerza axial aplicada, N (lb)

M = Momento flexionante, N-m (lb-pulg)

3.4.4.7 Vorticidad por Corrientes Marinas

La vorticidad debida al flujo transversal del agua de mar actuando en un tramo libre induce oscilaciones tanto normales como perpendiculares al vector de flujo, pudiéndose presentar oscilaciones de gran amplitud (resonancia) si la frecuencia de la vorticidad se encuentra cercana a la frecuencia natural de vibración del claro libre.

La frecuencia excitadora de la tubería fue determinada mediante la siguiente expresión:

$$Fs = \frac{S \cdot Uc}{D} \tag{3.49}$$

Donde

Fs = Frecuencia excitadora, Hz

S = Número de Strouhal

Uc = Velocidad de la corriente perpendicular a la superficie, m/s (pie/s)

D = Diámetro exterior, m (pie)

El número de Strouhal fue considerado 0,2 considerando que el conductor marino es un tubular liso.

Con el análisis de vorticidad se calculó la frecuencia de excitación la cual no debe estar el rango de 0,8 y 1,2 de la frecuencia natural de la tubería (Fn) según las norma NRF 013 PEMEX-2005 en el inciso 8.1.1.18. Fn se calculó por la siguiente expresión:

$$Fn = \left(\frac{C}{L^2}\right) \cdot \left(\frac{E \cdot I}{me}\right)^{1/2} \tag{3.50}$$

donde:

Fn = Frecuencia natural de la tubería, Hz

C = Constante que depende de las condiciones de apoyo= 3,57 para tramos con extremos restringidos

L_{claro} = Longitud del tramo, cm (pulg)

E = Modulo de elasticidad del acero, kg/cm^2 (lb/pulg^2)

I = Momento de inercia del acero, cm^4 ($pulg^4$)

Me = Masa efectiva por unidad de longitud, kg/cm (slug/pie)

La masa efectiva es la suma algebraica de la masa por unidad de longitud de la tubería y la masa por unidad de longitud de la tubería del agua de mar

$$Me = \frac{1}{g}(Mp + Ma) \tag{3.51}$$

donde:

Mp = Masa por unidad de longitud de la tubería, kg/m (lb/pie)

Ma = Unidad de masas del agua de mar, kg/m (lb/pie)

G = Aceleración de gravedad, m/s^2 (pie/s^2)

La unidad de masa del agua de mar y del flujo contenido dentro del conductor marino se calculó con la siguiente expresión:

$$Ma = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \rho}{4} \tag{3.52}$$

donde:

Ma = Unidad de masas del agua de mar, kg/m (lb/pie)

D = Diámetro externo, m (pulg)

ρ = Densidad del fluido, kg/m^3 (lb/gal). Para el agua de mar se utiliza una densidad de 1.025 kg/m^3

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Diagramas de Presiones hidrostática de los Pozos en el Campo La Vela

Las presiones hidrostáticas generadas por los fluidos de perforación se basaron en los reportes operacionales diarios llevados durante la perforación de cada uno de los pozos, que para los efectos de este trabajo son los pozos 002X, 004X, 005X y 012X; debido a que el resto de los pozos existente en el Campo La Vela, no poseen la información necesaria para obtener dicha curva (ver Fig. 4.1). Los reportes diarios de perforación fueron importantes para la estimación de geopresión de sus alrededores.

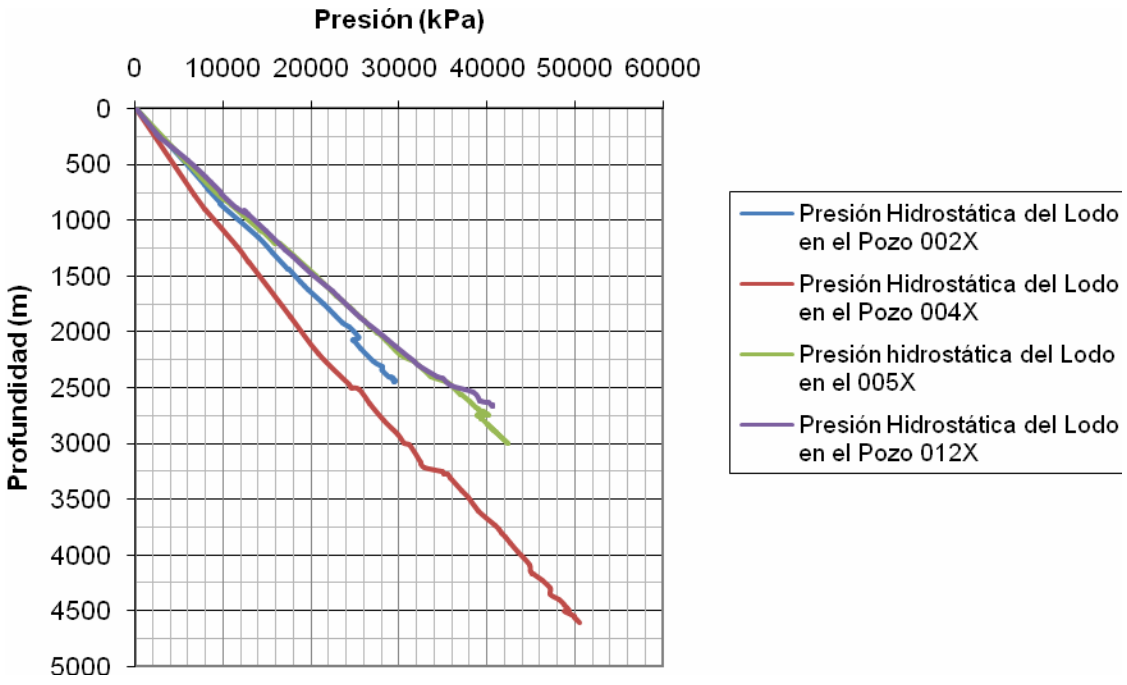

Figura 4.1. Presiones Hidrostática Empleada en los Pozos

Todas las presiones hidrostática empleadas para los respectivos pozos fueron efectivas, debido a que no se reportaron (en los reportes diarios de perforación) problemas operacionales debido a esta, tal como el flujo de fluido entrampado en la matriz formación hacia el pozo (presión hidrostática del lodo menor que la presión de

yacimiento) o el flujo del fluido de perforación por canales abiertos por la acción de la presión hidrostática (presión hidrostática del lodo mayor que la presión de fractura).

Cabe destacar que todos estos pozos fueron exploratorios y que no se conocía la verdadera presión de formación sino hasta el momento de la perforación de ellos. Por lo tanto, es típico tomar como referencia la presión de yacimiento y de fractura del pozo vecino más cercano o pozos con características geológicas similares, debido a que estas dependen de los procesos geológicos ocurridos en la región de exploración.

4.2 Estimación de la Presión de Yacimiento del Pozo Exploratorio Mapuey-1X

La localización del pozo exploratorio Mapuey-1X delimita los pozos de referencia a considerarse; para este caso se tomó como pozo de referencia el 002X, entre otros pozos cercanos a la ubicación de Mapuey-1X (001X, 017X y 022X), por ser el único en tener la información necesaria para llevar a cabo el estudio de la construcción mecánica del pozo exploratorio Mapuey-1X.

En el reporte operacional diario del pozo 002X no existeron los registros de geopresión por tanto se estimó la presión de yacimiento y presión de fractura a partir de la presión hidrostática del lodo (ver Fig. 4.2).

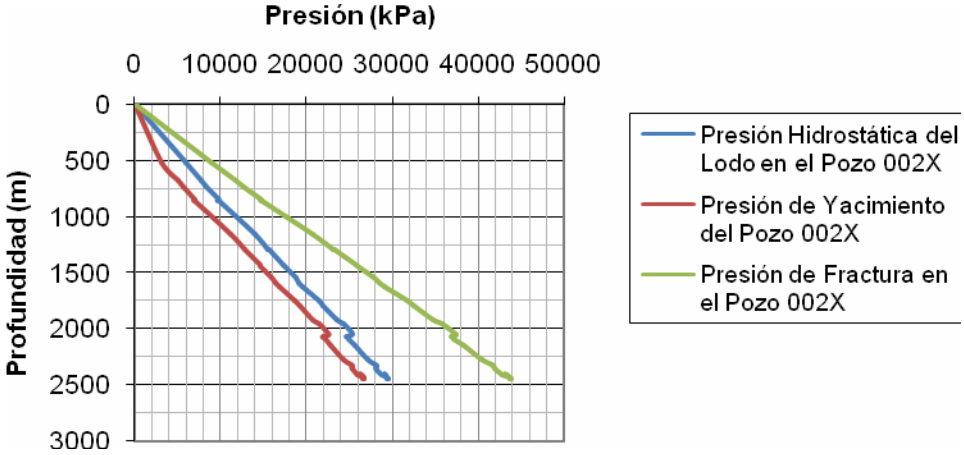

Figura 4.2. Geopresiones y Presión Hidrostática en el Pozo 002X

En la Fig. 4.3 se muestra la presione de formación y fractura encontradas en el pozo exploratorio perforado en el bloque Cardón III, reportada por la unidad Mudloging del taladro. A pesar de que estos datos pertenecen al área occidental de la Peninzula de Paraguaná, se tomaron como referencia en este estudio de acuerdo con análisis geofísico realizado por el departamento de Geología y Geofísica de Chevron Global Tecnology, donde se encontró que dicha zona tienía características geológica similares al del campo La Vela, permitiendo así minimizar la incertidumbre de los datos estimados mediante el reporte operacional del pozo 002X en el campo La Vela.

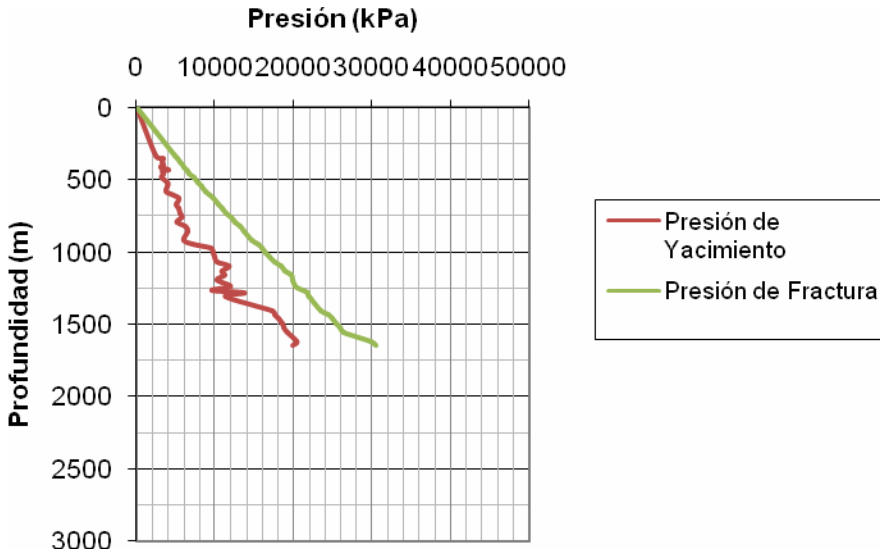

Figura 4.3. Geopresión Pozo Exploratorio Cardón III

La presión de yacimiento y de fractura aumenta con respecto a la profundidad, pero no de forma proporcional debido a los procesos geológicos ocurridos.

La geopresión en los pozos exploratorios 002X y Cardón III, constituyen los límites de la geopresión a encontrase durante la perforación de Mapuey-1X de acuerdo al análisis del departamento de Geología y Geofísica, es decir, que se estimó una presión de yacimiento para Mapuey-1X, entre la presión de yacimiento del pozo

002X y Cardón III, de igual forma se estimó una presión de fractura para Mapuey-1X entre la presión de fractura del pozo 002X y Cardón III (ver Fig. 4.4).

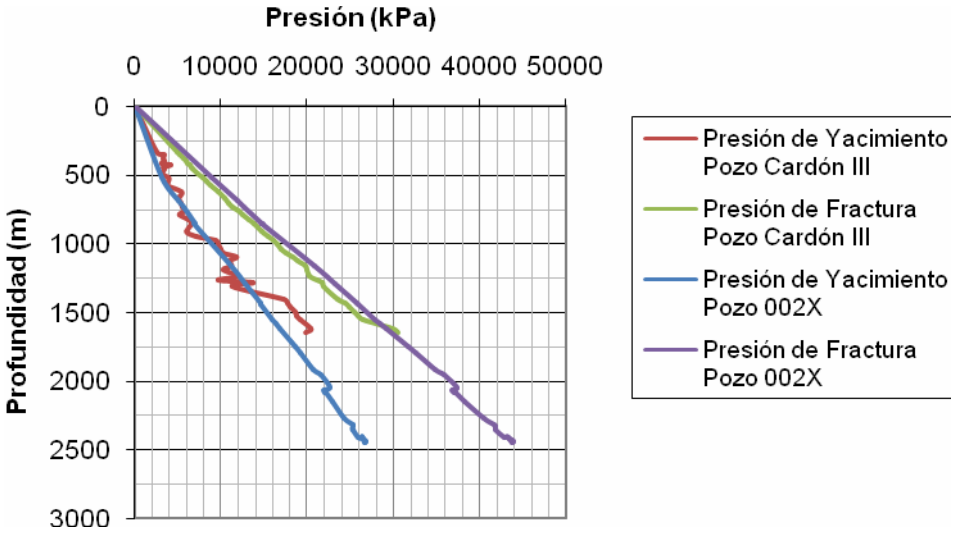

Figura 4.4. Geopresión de la zona a perforar

Como se mostró en la Fig. 4.4 las presiones de yacimiento de los pozos de 002X y Cardón III, se consideran iguales para la perforación de Mapuey-1X hasta los 1375 m. A partir de los 1375 m se estima una presión de yacimiento para Mapuey-1X entre los límites de las presiones de formación de los pozos 002X Y Cardón III, dado que para el pozo Cardón III se reportan presiones de yacimiento hasta 5345 pie. Se graficó una línea de tendencia entre la presión de yacimiento del pozo 002X y Cardón III; dicha línea representa la presión de formación estimada para la perforación de Mapuey-1X (ver Fig. 4.5).

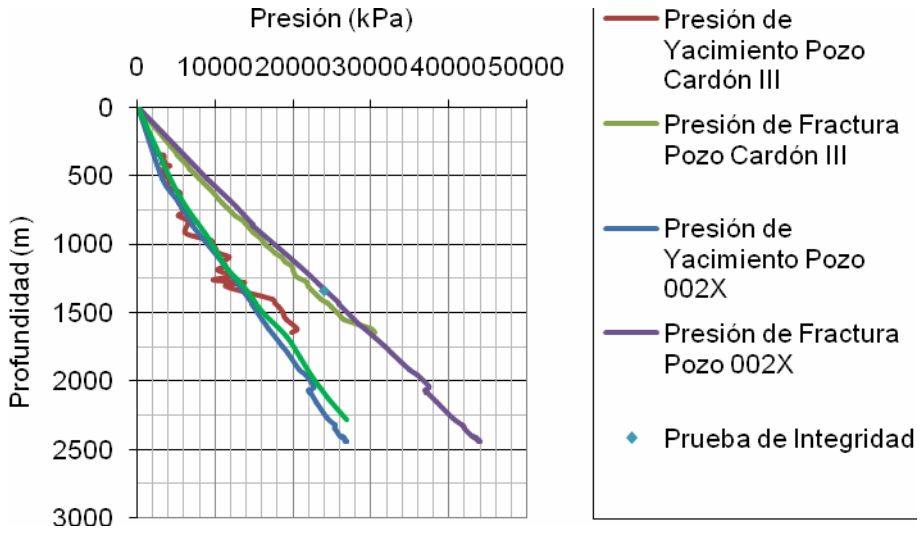

Figura 4.5. Presión de Yacimiento del Pozo Mapuey-1X

La presión de fractura se estimó igual que la presión de fractura del pozo 002X, debido a la prueba de integridad realizada, en donde se aumentó la presión hasta 23978,28 kPa (3477,7 psi) durante la perforación del pozo en Cardón III y no se consiguió la fractura de la formación.

4.3 Presión hidrostática del fluido de perforación

En la Fig. 4.6 se muestra la presión hidrostática del fluido de perforación para la perforación de pozo Mapuey-1X, obtenido de forma grafica a partir de la Fig 4.5, como se observa en dicha figura. La presión hidrostática del lodo perfectamente contrarresta eficazmente a la presión de yacimiento que se estima para el pozo Mapuey-1X, inhibiendo las posibles arremetidas del pozo, como también no sobre pasa los límites de la presión de fractura que se estima para Mapuey-1X.

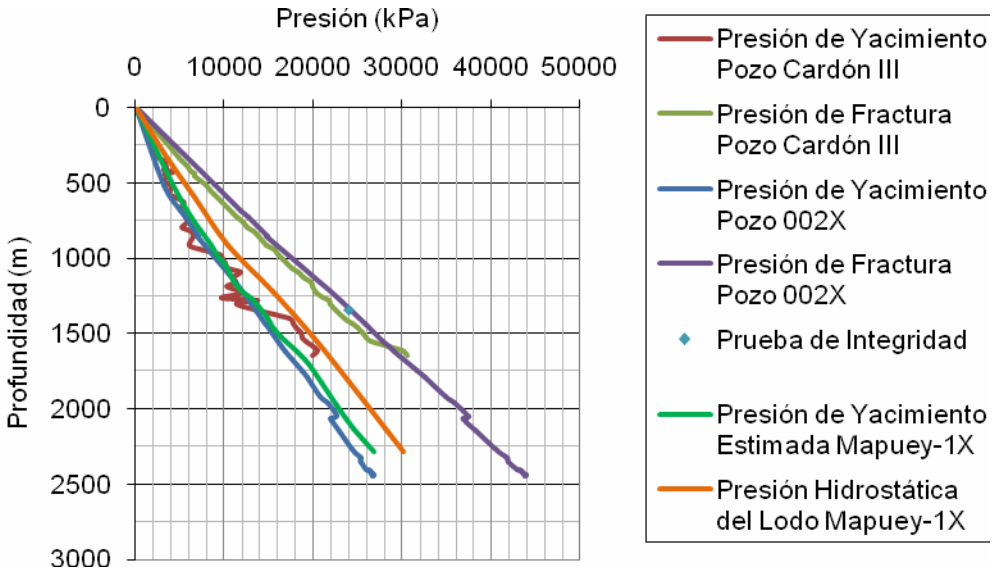

Figura 4.6 presión hidrostática del pozo Mapuey-1X

Durante la perforación del pozo Mapuey-1X se conseguirán las verdaderas presiones de yacimiento y fractura, por ende, es de vital importancia el empleo de válvulas impide reventones; dichas válvulas permiten cerrar el pozo cuando hay una arremetida, lo cual inhibe la entrada continua del fluido que se encuentra entrampado en la matriz de formación. Además se debe aumentar la densidad del lodo para continuar con la operación.

En el caso que la presión de fractura sea violada por la hidrostática del lodo, se debe bajar la densidad del fluido de perforación. Sin embargo para detener la perdida de circulación del lodo se recomienda bombear el lodo con material anti-perdida (mica, arroz, papelillo entre otros) para cerrar la cavidad abierta en la formación.

4.4 Análisis de los esfuerzo en los revestidores

El estado mecánico del pozo Mapuey-1X, se determinó a partir de la presión hidrostática del lodo y la presión de fractura con un margen de seguridad, para lo cual se empleó la metodología descrita en el capítulo anterior (ver Fig. 4.7).

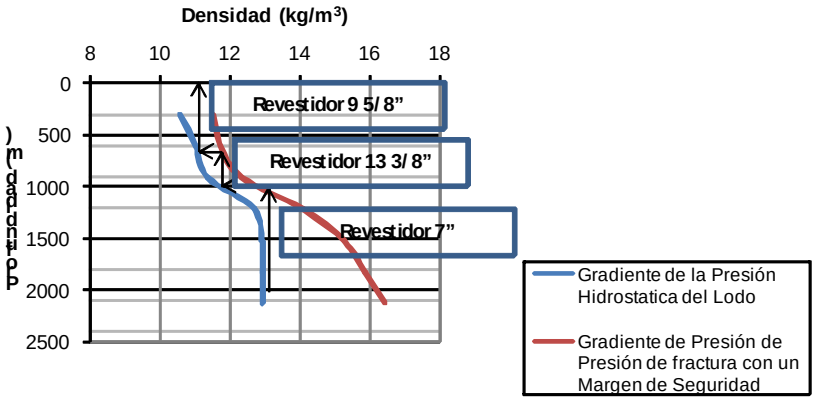

Figura 4.7. Profundidad Final de los Revestidores

En la Fig. 4.8 se muestra un bosquejo de la disposición del los revestidores dentro del pozo, en él se muestra la profundidad final de los revestidores y el diámetro del pozo necesario para instalar los revestidores.

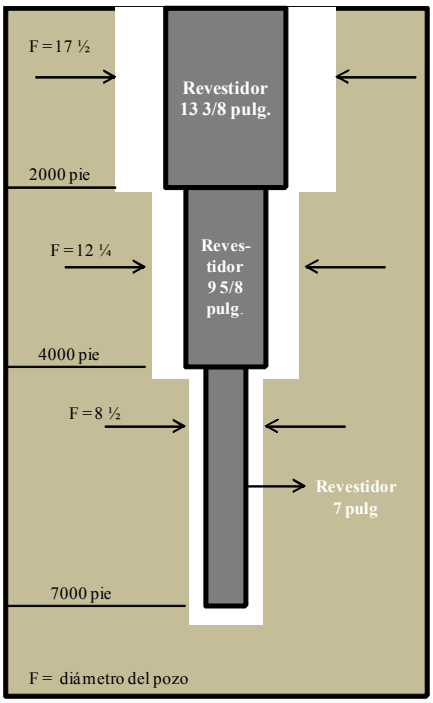

Figura 4.8. Disposición de los revestidores dentro del pozo

Se seleccionaron diámetros de revestidores decrecientes según los intervalos de perforación, ya que a medida que se alcanzan mayores profundidades se consiguen formaciones más duras y/o compactas, por otro lado la barrena tiene que perforar a una tasa óptima de perforación y con la mejor eficiencia y rendimiento por lo que es conveniente realizar una perforación con una barrena de menor diámetro, que con la fuerza de empuje necesaria, se conseguiría una menor resistencia de la formación a perforarse. A pesar de que hay menor área de contacto, esto contribuye a una mejor deformación elástica y plástica produciendo un efectivo cizallamiento de la formación.

Por otra parte con dicha disposición, se minimiza el volumen de ripio que deben ser transportados a la superficie. También permite un mejor manejo en operaciones de control de pozo.

En la Tabla 4.1 se muestra el diámetro del hoyo y del revestidor, además del grado y la resistencia al colapso, estallido y a la tensión de los revestidores. El criterio de la elección tanto del grado como la resistencia fueron los impuestos primordialmente según disponibilidad en el stock y en la región.

Tabla 4.1. Propiedades de los Revestidores del Pozo Mapuey-1X

Diámetro del Hoyo, m (pulg)	**Diámetro del Revestidor, m (pulg)**	**Grado**	**Resistencia al Colapso, kPa (psi)**	**Resistencia al Estallido, kPa (psi)**	**Resistencia a la Tensión, N (psi)**
0,4445 (17 ½)	0,3397 (13 3/8)	Q-125	19856,88 (2880)	51021,15 (7400)	12355392 (1792000)
0,3115 (12 ¼)	0,2445 (9 5/8)	N-80	32819,01 (4760)	47366,93 (6870)	7487698,50 (1086000)
0,2159 (8 ½)	0,1778 (7)	P-110	58812,22 (8530)	77359,10 (11220)	5495115,75 (797000)

En la Tabla 4.2 se encuentran los intervalos de perforación con sus respectivas condiciones en la formación en la zapata de cada revestidor, es decir, la densidad

equivalente a la presión de yacimiento y fractura a la profundidad final de los revestidores; debido a que la hoja de cálculo está diseñada para que los datos iníciales de la formación sean introducidos en función de la densidad. Todos estos datos fueron leídos de la Fig. A-1 densidad equivalente de la geopresión de Mapuey-1X (ver Apéndice A), en dicha figura se muestra las densidades equivalentes de las presiones de formación de los pozos Mapuey-1X, 002X y Cardón III, como también la densidad equivalente de las presiones de fractura de los pozos 002X y Cardón III y la densidad equivalente de la presión hidrostática del fluido de perforación.

Tabla 4.2 Parámetros en la Formación

Diámetro Revestidor, m (pulg)	0,3397 (13 3/8)	0,2445 (9 5/8)	0,1778 (7)
Intervalo de perforación, m (pie)	0-609,6 (0-2000)	609,6-1219,2 (2000-4000)	1219,2-2133,6 (4000-7000)
Presión de fractura, kg/m^3 (lb/gal)	1560 (13)	1824 (15,2)	1896 (15,8)
Presión de Poro, kg/m^3 (lb/gal)	960 (8)	1008 (8,4)	1176 (9,8)
Profundidad de asentamiento, m (pie)	609,6 (2000)	1219,2 (4000)	2133,6 (7000)
Densidad del lodo, kg/m^3 (lb/gal)	1128 (9,4)	1200 (10)	1320 (11)
Gradiente de Gas, kPa/m (psi/pie)	0,6894 (0.1)	0,6894 (0.1)	0,6894 (0.1)

4.4.1 Diseño del revestidor de superficie 13 3/8 pulg

El diseño por estallido del revestidor de superficie de 13 3/8 grado Q125 Tenaris Blue se realiza con las presiones internas máximas a las que puede estar sometido dicho revestidor, las cuales son: 1) carga impuesta cuando se produce una arremetida del pozo (presión de yacimiento es mayor que la presión hidrostática del lodo) cuando el revestidor está lleno en un 75% de gas (curva de color azul de la Fig. 4.9) y 2) carga por la prueba de presión de 1500Psi (curva de color rojo de la Fig. 4.9).

El revestidor de superficie resistes a las cargas máximas de presión interna, como se ve reflejado en la diferencia notable entre las curvas de dichas cargas y la resistencia del revestidor (curva de color verde de la Fig. 4.9), cumpliendo así con factores de seguridad por estallido (ver hoja de cálculo, Apéndice A), siendo estos mayores a los normalizados por la API.

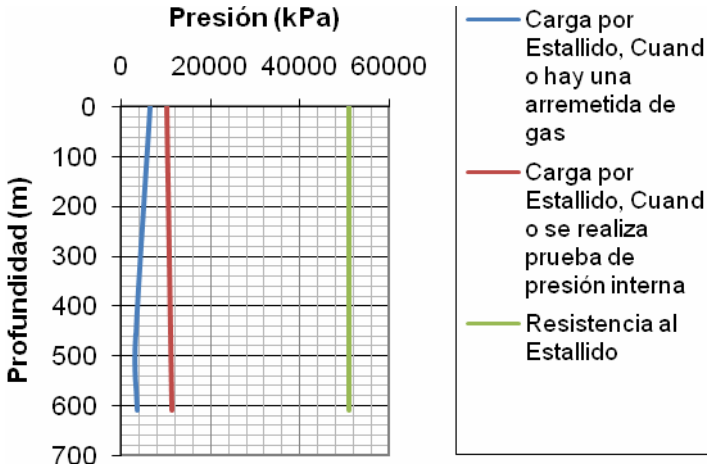

Figura 4.9. Diseño por estallido del resvestidor de superficie de 13 3/8

En la Fig. 4.10 se muestran las presiones externas máximas que pueden causar la falla por colapso del revestidor. Para el diseño por colapso se consideraron como cargas externas máximas cuando ocurre la pérdida de circulación (presión hidrostática del fluido de perforación es mayor que la presión de fractura, lo que afecta el flujo volumétrico del lodo, porque este se pierde a través de los canales que

se abren en la formación por la misma acción de la presión hidrostática del lodo, es decir, que el caudal de lodo que es bombeado hacia el pozo es diferente al de salida del mismo) durante la perforación del siguiente tramo quedando el revestidor expuesto a las presiones que ejerce la formación sobre él.

Otra situación crítica en la que puede ocurrir el colapso del revestidor es cuando se está llevando a cabo la operación de cementación ya que el cemento genera una mayor presión hidrostática que el mismo fluido de perforación.

Las cargas por colapso no representan ningún riesgo de falla por colapso al revestido ya que la resistencia al colapso del mismo es mayor que las cargas impuesta según los criterios de diseño, es decir, que los factores de seguridad por colapso se cumplen de acuerdo a las normas API.

El comportamiento de la curva que representa la pérdida de circulación excibe un comportamiento adecuado, ya que en la zapata del revestidor (última sección del revestidor) experimenta la mayor presión externa debido a que a mayor profundidad se encontrará una mayor presión de formación.

A pesar de que la lechada de cemento (volumetría de cemento bombeado al pozo, cumpliendo la función principal de sellar la formación y así mismo darle mayor resistencia al revestidor; dicha resistencia no es considerada durante el diseño de los mismos) posee una densidad más alta que la densidad del fluido de perforación, ejerce una presión externa menor que la presión de formación como se muestra en la Fig. 4.10. Esto es debido a que la presión hidrostática de cemento se contrarresta con la presión formación, además que a medida que trascurre el tiempo la lechada de cemento va perdiendo las propiedades de cualquier fluido, sin embargo para efecto del diseño solo se considera que dicha lechada se encuentra en estado liquido el cual es la situación más crítica. Todas las cargas fueron calculadas mediante la hoja de cálculo que Chevron Global Tecnology dispone para el diseño de los revestidores (ver Apéndice A).

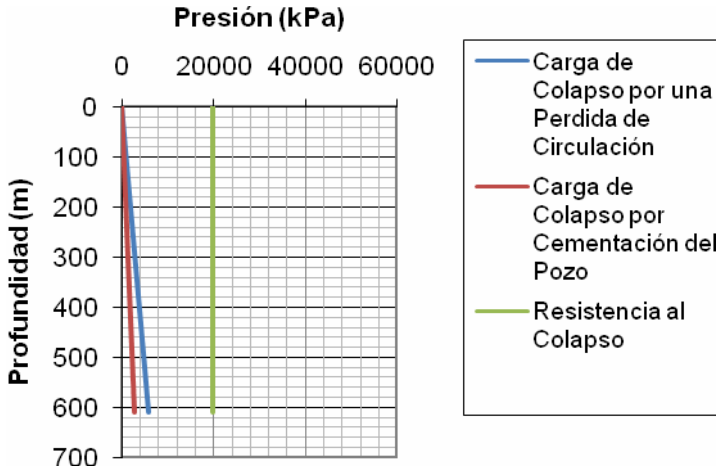

Figura 4.10. Diseño por colapso del revestidor de superficie 13 3/8

El diseño por tensión del revestidor de superficie 13 3/8 pulg cumple con las exigencias de las normas API, teniendo unos factores de seguridad mayor a los normalizados, esto se evidencia en la Fig. 4.11, ya que las cargas por tensión son mucho menores que la resistencia a la tensión del revestidor

Dicho diseño por tensión del revestidor se fundamenta principalmente en el peso del revestidor y la tensión que experimenta el revestidor en cada viaje (entrada y salida del revestidor del pozo) y la prueba de 1500 psi.

La mayor tracción se experimenta en longitudes cercanas a la superficie tal como se nota en las diferentes curvas de cargas de la Fig. 4.11. Las cargas fueron calcula con el empleo de la hoja de cálculo para el diseño de revestidores (ver Apéndice A).

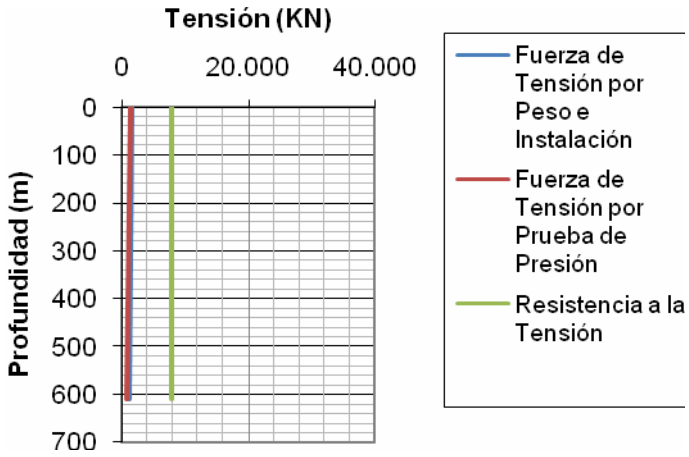

Figura 4.11. Diseño por tensión del revestidor de superficie de 13 3/8 pulg.

Todo los revestidores tanto el intermedio como el de producción se calcularon bajo la misma metodología empleada para el revestidor de superficie, cumpliendo a su vez con los factores de seguridad de estallido, colapso y tensión (ver Apéndice A).

4.5 Análisis del impacto de las corrientes marinas en el conductor de superficie

Antes de realizar el análisis de las corrientes marinas, se efectuó el cálculo del espesor del conductor marino o riser, teniendo este un diámetro exterior de 0,762 m (30 pulg), ya que este proporciona un mejor manejo durante la perforación. El riser se debe diseñar con una presión interna de 12410,55 kPa (1800 psi), correspondiente a la sustracción numérica del valor de la presión de fractura del tramo final (7000 pie) y la presión ejercida por el lodo en el mismo tramo. Esta es la máxima presión a la que puede estar sometido el conductor marino, ya que se considera como presión de formación a la presión de fractura.

El cálculo se realizó siguiendo las directrices de la normas ASME 31.8 y API RP1111 (ver Apéndice A), en la Tabla 4.3, se muestran los resultados obtenidos. Se escogió el espesor comercial próximo superior a los espesores teóricos.

Tabla 4.3. Espesor del conductor marino

Espesor por ASME 31.8, m (pulg)	0,0164 (0,646)
Espesor por API RP111, m (pulg)	0,0208 (0,818)
Espesor Comercial, m (pulg)	0,0254 (1)

Fuerzas hidrodinámica

Para el cálculo de los coeficientes, es necesario tener la velocidad de la ola que es de 1,497 m/s, una frecuencia de 0,183 Hz, una altura máxima de ola de 1,3 m y con una aceleración de 1,72 m/s^2. Las corrientes tienen una velocidad de 1,1 m/s. Dichos datos fueron reportados por la estación oceanográfica de La Guaira, debido a que esta estación es la más cercana a la costa oriental de la península de Paraguná.

Los números adimensionales útiles para el cálculo de fuerza hidrodinámica por las ecuaciones de Marison se encuentran en la Tabla 4.4, (ver Apéndice A)

Tabla 4.4. Parámetros adimensionales para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas.

Numero de Keulegan-Carpenter (KC)	10
Radio de Corriente (α)	0,44
C_D	1,4
C_L	1,5
C_M	3,29

Fuerzas generada por la acción de las corrientes (ver Tabla 4.5), obtenida por las ecuaciones de Morison, estimando una densidad del mar de 1032 kg/m^3 y con los coeficientes de cada asociado a cada fuerza:

Tabla 4.5. Fuerza actuante sobre la el conductor marino

Fuerza de Arrastre (F_D)	666,067 N/m
Fuerza de Inercia (F_M)	2663,20 N/m
Fuerza Transversal (F_L)	713,643 N/m
Fuerza Hidrodinámica Neta (F_H)	3329,267 N/m

Una vez que se determinó las fuerzas hidrodinámica, se realizó el diagrama de cuerpo libre del conductor marino, en donde se obtuvo que dicho conductor estaba estáticamente indeterminado, por lo tanto, se aplicó los teoremas de momento de área para vigas estáticamente indeterminada. Se determinaron las reacciones en el conductor marino, tomando como carga redundante el M_A (ver Apéndice A).

En el diagrama de cuerpo libre se consideró la fuerza hidrodinámica como una fuerza distribuida uniforme, con el cual se sobre diseñaría el conductor marino; realmente esta fuerza tiene un comportamiento parabólico debido a que las corrientes marinas son proporcionales a la profundidad del mar. En la Tabla 4.6 se muestra el valor de las reacciones ver cálculo en el Apéndice A.

Tabla 4.6. Reacciones en el conductor marino

R_{AX}	174459,111 N
R_{BX}	47270,0711N
M_A	3061206,46 N-m

En la Fig. 4.12 se muestra el diagrama de fuerza cortante y momento, del cual se obtuvo el máximo momento al que está sometido el conductor que es igual a 3061206,46 N-m (los cálculos se presenta en el Apéndice A).

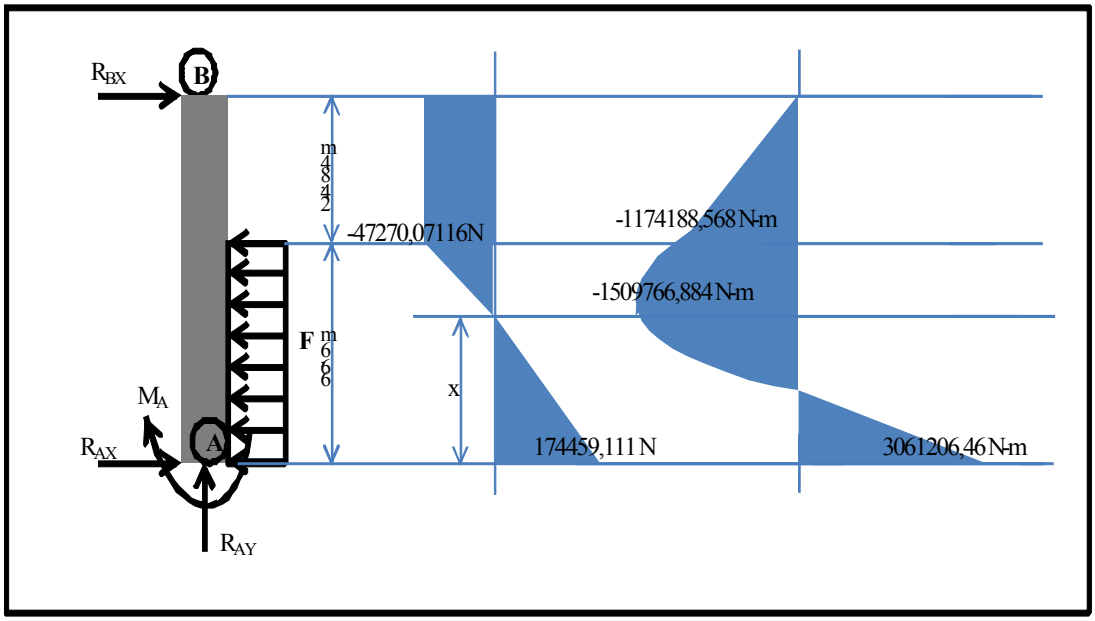

Figura 4.12. Diagrama de fuerza y momento al cual va estar sometido el conductor marino

El espesor comercial del conductor marino de 0,0254 m (1 pulg) tiene la capacidad de resistir las cargas impuestas, según las revisiones que se le hicieron; los resultados de dichas revisiones se muestran en la Tabla 4.7. En la revisión por presión de colapso y propagación de pandeo se considera la presión interna igual a cero a pesar de que existe; esto representa una situación con mayor criticidad.

Tabla 5.7. Revisión del espesor

Revisión por presión de colapso (Pc)	$(Po - Pi) \leq fo \times Pc$	925 kPa < 13470,403 kPa
Propagación de Pandeo (Pp).	$(P_{ext} - P_{\text{int}}) \leq Fp \times Pp$	195 kPa < 1970,210 kPa
Tensión y momento flexionante	$\left[\left(\frac{M}{M_U}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_U}\right)^2\right]^{0,5} \leq F_{TM}$	0,53 < 0,54
Tensión, presión de colapso y momento flexionante	$\left[\left(\frac{M}{M_U}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_U}\right)^2 + \left(\frac{P_{ext}}{P_C}\right)\right]^{0,5} \leq F_{TMPC}$	0,53 < 0,54
Expansión y flexibilidad	$\sigma_{eq} \leq 0,9SMYS$	269966,15 < 324000 kPa

La fuerza con que es clavado el conductor marino en el lecho marino no pueda superar la capacidad de pandeo global de mismo, que es igual a -5550884,5879 N. En el Apéndice A se muestra el cálculo de este valor de acuerdo a las normas Pemex para el diseño de tuberías submarinas.

Análisis de vorticidad

El principio fundamental de este análisis es verificar que el conductor no experimente oscilaciones de gran amplitud, que puedan hacer fallar el conductor marino por fatiga. En la Tabla 4.8 se muestran los valores de la frecuencia natural del conductor y la frecuencia vibratoria por vórtices, donde esta última es menor que la primera, por

tanto el conductor no entra en resonancia. Es importante destacar que no solo dichas frecuencia tiene que ser numéricamente diferente, sino que también cumplan que la frecuencia exitadora no se encuentre entre el 0,8Fn y 1,2Fn de acuerdo a las formas Pemex para el diseño de tuberías submarinas. El conductor marino de diámetro externo de 0,762 m (30 pulg) y de espesor 0,0254 m (1 pulg) cumple con la exigencia de la norma.

Tabla 4.8. Frecuencias vibratoria y frecuencia natural del conductor

Frecuencia Natural del Conductor	1,237Hz
Frecuencia Excitadora por los Vórtices	0,2887 Hz

Definición del Tipo de Lodo a Emplear

Según las estimaciones de la presión de formación y de la presión de fractura, la operación de perforación se subdivide en tres intervalos de perforación de acuerdo a los puntos de asentamiento de los revestidores.

Los pozos perforados en el campo La Vela se emplearon lodos a base agua pero lignosulfanato. En esta nueva operación exploratoria en dicho campo, se utilizará un lodo de perforación base agua con inhibición de polímeros. (ver Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Tipo de lodo a emplear

Intervalos	Tipo de Lodo	Propiedades	
0 – 2000 pie	Seep Sea Water	Peso Lodo (lb/gal)	8,9 – 9,4
		Viscosidad Plastic (cP)	5 – 10
		Yp(Lb/100 pie^2)	20 – 30
		PH	8.5 – 9,5
		Filtrado (/32 pulg)	1
		Contenido Solido %	Max 5%
2000 – 4000 pie	Inhibited poliymer mud (WBM)	Peso lodo (lb/gal)	10 – 10,5
		Pv (cP)	12- 15
		Yp (lb/100 pie^2)	12 - 16
		PH	8,5 – 9,0
		Filtrado (/32 pulg)	1
		Contenido Solido %	6%-7,5%
4000 – 7000 pie	Inhibited poliymer mud (WBM)	Peso lodo (lb/gal)	11 – 11,5
		PV < (cP)	25
		PH	9,3 – 9,5
		Filtrado (/32 pulg)	1
		Contenido Solido %	10%-11%

Toxicidad del Fluido de Perforación

La implementación de un fluido base agua en la perforación de este pozo, responde a que estos tienen una baja toxicidad en las especies marinas, dicha condición es dada por que los componentes químicos individuales de este, no alcanzan concentraciones

letales altas para los organismos marinos, mientras que el cromo o ferrocromo lignosulfato son considerados moderadamente tóxicos.

Los metales asociados a las impurezas de la barita y bentonita del fluido de perforación base agua, probablemente no constituyen una fuente de toxicidad en el lodo por sus baja concentración.

La biodegradación del fluido de perforación solo se estima cuando se trata de un lodo de base aceite, cuyas características desde el punto de vista de la perforación son mejores que la del lodo a base de agua (bien sea agua dulce o salada) debido a que estos evitan problemas en las perforación tales como: osmosis, hidratación de las lutitas entre otros, pero sus componentes son agentes contaminantes y producen un gran impacto ambiental, es preciso conocer cuánto tiempo la naturales tarda en degradar dichos componentes para poderlos emplear.

Para los efectos de este trabajo no se tiene en consideración la biodegradación del lodo, ya que el fluido de perforación escogido en a base agua de mar, totalmente compatible al medio donde será deshecho y solo es analizado el grado de toxicidad del mismo en los organismos marinos.

En la práctica de perforación pozo y sobretodo cuando es de tipo exploratorio, es muy común utilizar semejantes tipo de lodo al empleado en el (o los) pozo(s) de referencia. En este caso en particular, la situación es distinta debido a que el pozo de referencia usan un lignosulfanato como fluido de perforación y como se mencionó anteriormente ellos son considerados moderadamente toxicos, razón por la cual no es empleado en esta operación, en virtud de llevar a cabo una perforación costa afuera con el menor impacto posible en el ambiente.

Los fluidos de perforación recomendados para la operación exploratoria en el campo La Vela fueron sometidos a pruebas en las cuales, fue calificado como un lodo de perforación no toxico, por su concentración media letal (LC50%) de acuerdo con las especificaciones de la Normas EPA y GESAMP. Se deben hacer pruebas de la

toxicidad del lodo después de la perforación para verificar que su composición sea la misma.

Riesgos operacionales

La perforación de un pozo es una operación de alto riesgo, porque durante la perforación se del mismo se develan las presiones de yacimiento y de fractura reales, por tal razón se deben considerar los riegos que se pueden presentar. En la Tabla 4.10 se plantean los riesgos que pueden ocurrir durante la construcción del pozo y que se debe hacer en cada caso.

Tabla 4.10. Factores de riesgo

Riesgo	Plan de mitigación a tomar	Plan de contingencia
Riesgo de posicionamiento de la plataforma	Realizar un "seabed scan", y una inspección geotécnica del suelo y analice el potencial de problemas de posicionamiento, para predecir la penetración de los soportes de la plataforma.	Planes detallados de posicionamiento del taladro y de precargas son creados en conjunto con las partes involucradas. El contratista recargará independientemente las patas para contrarrestar la leve posibilidad de un golpe transversal basado en el análisis geotécnico.
Altas corrientes causando problemas con suministro de barcos.	Investigue los métodos para obtener una óptima comprensión de corrientes en la ubicación propuesta.	Tenga un equipo de boya disponible para la instalación de un sistema de ayuda segura para los barcos en un lado del taladro
Clavado del conductor de 30"	Utilice 9-1/2" DC's para adicionar peso para ayudar a mantener derecho la cuerda del taladro debajo de la mesa rotatoria.	Investigue el uso de un taladro en el procedimiento de instalar una estructura de 30".
Potencial de Gas Superficial	Realice estudio superficial de peligro para cuantificar riesgos, reinterpretando la nueva información digital de inspección de reflejo 3D (sísmica). La sísmica no muestra riesgo de gas superficial alrededor de la trayectoria del pozo. Sin	Plan Detallado de perforación donde incluya perforar un hoyo piloto de 8-1/2" para verificar la existencia de gas superficial para determinar el volumen y peso del lodo a ser bombeado. Planear previamente el acontecimiento de surgencia de gas superficial con equipos de

	embargo, en conjunto con Drilling contractor, se desarrolla procedimientos de funcionamiento (Gas Superficial que Taladra plan) específico para peligros superficiales en caso de encontrase. Perfore utilizando instrumento de APWD.	taladro para bombeo de lodo de matanza y plan de emergencia para evacuar la tripulación en caso de que el evento sea incontrolable. Planee la logística y las operaciones de perforación en áreas con incertidumbre de gas superficial durante las horas del día.
Pega de revestidores y sarta de perforación.	Use la mejor práctica operacional cuando este corriendo un revestidores. Un sistema de control de lodo que tenga bajo contenido de sólido. Diseñe BHA's que permita un buen perfil del pozo para prevenir desviaciones excesivas.	Use la mejor practica en cuanto la perforación y corrida de revestidores. Use herramientas de perforación tales como collares, estabilizadores que mantengan lo la sarta de perforación concéntrica al diámetro del hoyo. Tener herramientas de pescado lista para a ser usado. Tener un sistema de emergencia con ganchos para revestidores listo para hacer empleado.
Perdida de circulación por regresión de la presión de formación	Trabajar con geología para hacer una mejor investigación e identificación del punto de asentamiento de revestidores de dicha sección.	Tener a la mano material anti-perdida de circulación.
Revestidores no alcanzaran a la profundidad final	Perfore el pozo con BHA para prevenir severidad de pata perro. Asegurar condiciones óptimas de hoyo para una corrida de tubo fácil. Planear la limpieza del pozo necesarias para asegurar la mejor condición de hoyo aceptable para correr los revestidores.	Minimice los tropiezos de los revestidor con las paredes del pozo. Si se presenta este problema, se debe sacar el revestidor y escariar el hoyo. El diseño tolerancia de los revestidores deben alcanzar los cambios de la profundidad final de perforación.
Matar el gas debido a desconocida presión, especialmente en la sección de hoyo de 8-1/2"	Establecer un programa de lodo con un peso alto y un programa de bombeo para administrar la densidad de circulación equivalente. En la perforación se debe integrar las mejores prácticas que permitan detectar una arremetida tal como conexiones de gas, indicadores PVT, etc. El personal de perforación debe estar entrenado para procedimiento de control de pozo. Los puntos de asentamiento de los revestidores deben ser flexibles	Asegurarse que la válvula impide reventón BOP estén en buenas condiciones. Realice programas de control de pozo y haga reuniones con la tripulación para que estén familiarizados con el procedimiento. Tener un plan de emergencia en caso de incontrolable "blow out" para evacuar la tripulación. Realice una investigación adicional con geología para la sección de hoyo 8-1/2".

	a cambios.	
Encontrando basamento	Si se encuentra basamento ante de la planificada profundidad final, la decisión de seguir perforando dependerá de los riesgo HES pero no se perforara más de 50’ de basamento.	Revisar la desviación del pozo, los problemas cuando se perfora el basamento, la estabilidad al perforar, planes y prácticas de repuesta concerniente a estos potenciales.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. La presión de formación aumenta con la profundidad, pero no de forma proporcional debido a los procesos geológicos que tuvieron lugar en un momento dado.
2. La perforación del pozo exploratorio se realizará en tres intervalo de 0 a 2000 pie, 2000 a 4000 pie y de 4000 hasta profundidad final de 7000 pie, según los mejores puntos de asentamientos de los revestidores.
3. El estado mecánico del pozo es de un revestidor de superficie de 13 3/8 pulg. un revestidor intermedio de 9 5/8 pulg. y un revestidor de producción de 7 pulg. de esta forma se minimizan el costo en la perforación, se tiene un mejor control del pozo si es necesario y un menor volumen de ripio que manejar.
4. Todos los revestidores (de superficie, intermedio y de producción) cumplen con los factores de seguridad al colapso, estallido y tensión de acuerdo a las directrices de las normas. Resisten a los diferenciales de presión que puedan generar colapso como estallido en los revestidores.
5. Se definió un columna hidrostática en concordancia con los intervalos de formación, para el primer intervalo de(0 a 609,6 m ó 0 a 2000 pie) se tiene un peso de lodo de 1044 kg/m3 a 1092 kg/m3 (8,7 a 9,1 lb/gal), en el segundo intervalo (609,6 a 1219,2 ó 2000 a 4000 pie) un peso de lodo de 1200 kg/m3 a 1260 kg/m3 (10 a 10,5 lb/gal) y el ultimo intervalo (1219,2 a 2133,6 m ó 4000 a 7000 pie) un peso de 1320 kg/m3 a 1380 kg/m3 (11 a 11,5 lb/gal), pudiendo ser modificado según los criterios del perforador, cuando se lleve a cabo la operación.
6. Se empleara un lodo base agua porque tiene menor grado de toxicidad que los lodos base aceite y los emulsionados. Este lodo tiene como densificante la barita

y viscosificante bentonita cuyas impurezas asociada a estas no atentan con las vidas de los microorganismos marinos. Los ensayos de biodegradación solo se hacen a los lodos base aceite.

7. La frecuencia vibratoria es menor que la frecuencia natural del conductor, lo cual evita la falla prematura del conductor por fatiga, aunque el conductor es una facilidad temporal, cuyo uso expira al finalizar el lapso de perforación.
8. El conductor de superficie experimenta una fuerza de arrastre de 666,067 N y una fuerza inercial de 2663,20 N, calculadas por la ecuación de Morison, para estimar la fuerza total de 3329,267 que se produce sobre el conductor marino expuesto a las corrientes. La fuerza transversal de 713,643 N.
9. El espesor comercial elegido para el conductor marino es de 1 pulg, el cual cumple perfectamente con las condiciones de operación. Este espesor cumple con las condiciones normalizadas de resistencia a la presión colapso, propagación de pandeo y momento flexionante.

5.2 Recomendaciones

1. Hacer un estudio de toxicidad del lodo después de la operación de perforación para comprobar que no sean alteradas las concentraciones de los componentes del mismo, mientras que estuvo en contacto con la formación, para conocer que no tenga un mayor grado de toxicidad.
2. Se sugiere para la neutralización de una hipotética arremetida que: en primer lugar se cierre el pozo con el uso de la válvula impide reventones (BOP, blowout preventor por sus siglas en ingles) e inmediatamente se tomen los valores de presión en el revestidor y en la cabeza del pozo, con las cuales se calcula la nueva hidrostática del fluido de perforación.
3. Se recomienda que para cada intervalo de perforación, sea cambiada la válvula impide reventones en aras de grantirzar la seguridad de la operación, ya que se pueden experimentar mayores presiones. Estas deben ser probadas antes que continúe la perforación.
4. Se recomienda tener disponible en el taladro material anti-perdida para inhibir una posible pérdida de circulación.

BIBLIOGRAFÍA

1. GONZALEZ C, ITURRALDE, J y XAVIER R. **"GEOLOGIA DE VENEZUELA Y DE SUS CUENCAS PETROLIFERAS"**,TOMO I, EDICIONES FONINVES, CARACAS 1980.
2. ESPINEL, L., MATHEUS J. y CRISTENSEN H. **"Nuevas Tecnologias De Perforación Ayuda A Mejorar El Acceso En Zonas De Gas Superficial De Alto Riesgo"**, Venezuela, 2008.
3. LUGO, N., **"Desarrollo de un Modelo de Planificación en la Construcción de Pozos Exploratorios en Áreas Costa Afuera, caso Plataforma Deltana"**, Universidad de Oriente, 2005.
4. PACE, T., SANTOS, D., MACEDO, D., CARRIJO, J. y CERQUEIRA, L. **" Subsea production System for Gas Feild Offshore Brazil"**, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
5. CEPET Centro de Formación y Adiestramiento de Petróleos de Venezuela y sus Filiales **"La Industria Venezolana de los Hidrocarburos: Vol 2"** Caracas, Venezuela, 1989.
6. ESPINOSA, G. **"El análisis de geopresiones, fundamental en la planeación y el diseño de la perforación de pozos"**, Instituto Politécnico Nacional de México, México, 2007.
7. BYROM, G., **"Casing and Liners for Drilling and Completion - Design and Application"** Gulf Publishing Company, 2007.
8. VELAZQUEZ, D., LÓPEZ, V., **"Estudio de Geopresiones y Estabilidad de Pozos en el Área Marina de la División Norte"**, Proyecto F.42461, Instituto Mexicano del Petróleo, México, 2005.
9. PDVSA, **"Procedimiento de Diseño para Tubulares de Revestimiento y Producción"**, Caracas, Venezuela 1998.
10. BOX, P., **"Manual of drilling fluids tecnology"**, NL Baroid/NL Industries, Inc, Texas, 1979.

11. BRAESTRUP, M., ANDERSEN, J., MADS, B., CURST, J. y NEILSEN, J. **"Design and Installation of Marine Pipeline"**, Editorial Elseveir. USA, 2005.
12. GUO, B., SHANHONG, S., CHACKO, J. y GHALAMBOR, A. **"Offshore Pipeline"**, Editorial Elsevier, USA, 2005.
13. Brusco, G. y LEWIS, P., **"Perforacion De Pozos Verticales"**, Eni SA, Italia, 2005.
14. FONTENOT, K., LESSO, B., STRICKLER, R. y WARREN T., **"Perforacion De Pozos Dirreccionales Con Tuberia De Revestimiento"**, ConocoPhillips, Puerto La Cruz, 2005.
15. WILLIAMS, M., **"Un Nuevo Giro En La Perforación Rotativa Dirreccional"**, Sugar Land, Texas, 2005.
16. MUÑOS, D., **"Tecnicas De Prediccion Y Monitoreo De Geopresiones Durante La Perforacion"**, Texas, 2003.
17. GRACE, R., **"Blowout and Well Control Handbook"**, Editorial Elsevier, 2003.
18. BRAUN, S., EWINS, D. y RAO, S. **"Encyclopedia of Vibration"**, Editorial Elsevier, Volumen 1-3, Texas, 2003.
19. ACOSTA Y., **"Estado Del Arte En Predicción De Presiones Anormales Mediante Sismica De Superficie"**, Trabajo Especial de Grado, Universidad de Los Andes, Mérida, 2001.
20. X- CIED, **"Diseño de Revestidores Básico"**, Caracas, 1998.
21. BOWERS, G., **"Pore Presuare Estimation from Velocity Data Accunting for Overpressure Mechanisms Resides Undercompaction**", paper SPE 1995.
22. RAHMAN, S. y CHILINGARIAN, G., "**Casing Design Theory and Practice"**, Editorial Elsevier, 1995.
23. www. PDVESA.com
24. www. MIT. Ocean Engineering.com
25. Análisis de la sísmica del campo La Vela por Chevron Global Tecnology

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	"Estudio mecánico de la construcción de un pozo exploratorio costa afuera, en el campo La Vela, estado Falcón"
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Camacho M., Ricardo J..	CVLAC: 17.359.663 EMAIL: r.j_camacho@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Diseño

Revestidores

Presión hidrostática

Conductor marino

Pozo exploratorio

Construcción

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Mecánica

RESUMEN (ABSTRACT):

En el presente trabajo se realizó una estimación de las presiones de formación y de fractura para la perforación de un pozo exploratorio en el Campo La Vela, a partir de los reportes diarios de perforación de los pozos adyacentes. Se determinó el estado mecánico del pozo, definido por el diseño de los revestidores, los cuales cumplieron con los requerimientos de las normas en cuanto a los factores mínimos de seguridad exigidos. También se analizó el efecto de las corrientes marinas y el oleaje sobre el conductor, en donde quedó evidenciado que el mismo no experimenta oscilaciones. Basado en la presión de formación y fractura se realizó un estudio de flujo estático, que permitió la definición de un fluido de perforación, cuya hidrostática inhibiera la entrada de fluidos entrampado en la matriz de roca al pozo y a su vez esta no fracturara la formación. El fluido de perforación seleccionado fue a base de agua por su baja toxicidad en los microorganismos marinos, cumpliendo con los estándares internacionales para la descarga de estos tipos de fluido en el mar.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Salas A., Roberto R.	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	3.413.775			
	E_MAIL	rsalas@udo.edu.ve			
Fuenmayor O., Cesar E.	ROL	CA	AS	TUX	JU
	CVLAC:	13.992.187			
	E_MAIL	cesarfuenmayor@chevron.com			
Martínez R., Johnny J.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	8.340.871			
	E_MAIL	johnnymartinr@hotmail.com			
Barrueta, Rafael A.	ROL	CA	AS	TU	JUX
	CVLAC:	6.961.032			
	E_MAIL	rafaelbarrueta@cantv.net			

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

201’	03	22
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Estudio mecánico de la construcción de un pozo exploratorio. Doc	application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: Dpto. Drilling (Chevron) (OPCIONAL)

TEMPORAL: ____12 meses_____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Mecánico _____

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado_____

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Mecánica _____

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente/Núcleo de Anzoátegui _____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado de la Universidad de Oriente.

"Los trabajos son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien le participará al Consejo Universitario"

Camacho M., Ricardo J.

AUTOR

Prof. Salas A.,Roberto R.	Prof. Martínez R., Johnny J	Prof. Barrueta, Rafael A.
ASESOR	**JURADO**	**JURADO**

Prof. Diógenes Suarez

POR LA COMISIÓN DE GRADO