



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura

Unidad Ticomán

Ingeniería Petrolera

**“Cementación de tuberías de revestimiento riserless
con aplicación de técnica inner string en proyectos
de aguas profundas”**

T E S I S

Para obtener el título de:

Ingeniero Petrolero

PRESENTA:

FRANCISCO ANTONIO CRUZ RODRÍGUEZ

Asesor Interno: Ing. Alberto Enrique Morfin Faure

Asesor Externo: Ing. Juan Carlos Cruz Rodríguez



Ciudad de México

Febrero 2017

OFICIO N° E.P. y T.021/2017

Ciudad de México, a 20 de enero de 2017.

C. FRANCISCO ANTONIO CRUZ RODRÍGUEZ
PASANTE DEL PROGRAMA ACADÉMICO
DE INGENIERÍA PETROLERA
P R E S E N T E

A continuación comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su tesis profesional, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha para elaborarla.

**“CEMENTACIÓN DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO RISERLESS CON APLICACIÓN DE TÉCNICA
INNER STRING EN PROYECTOS DE AGUAS PROFUNDAS”**

CONTENIDO

- RESUMEN
- ABSTRACT
- INTRODUCCIÓN
- I. GENERALIDADES DEL CEMENTO
- II. CEMENTACIÓN
- III. ACCESORIOS DE CEMENTACIÓN
- IV. POZOS EN AGUAS PROFUNDAS
- V. CASO PRÁCTICO
- RECOMENDACIONES
- GLOSARIO
- BIBLIOGRAFÍA

ATENTAMENTE

“La Técnica al Servicio de la Patria”



Ing. Saúl Milán Valdés
Subdirector Académico
Interino



UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

SMV*gach.

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán



Ciudad de México, a 24 de enero de 2017

ING. SAÚL MILÁN VALDÉS
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, hacemos constar que el Tema de Tesis Profesional, por la opción de **Tesis Individual "Cementación de Tuberías de Revestimiento Riserless con Aplicación de Técnica Inner String en Proyectos de Aguas Profundas"** presentado por el pasante del Programa Académico de **Ingeniería Petrolera, C. FRANCISCO ANTONIO CRUZ RODRÍGUEZ**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

TITULARES

ING. ALBERTO ENRIQUE MORFÍN FAURE

ING. JOSÉ ROBERTO ZENTENO JIMÉNEZ

ING. JOSÉ LUIS CHÁVEZ ALCARÁZ

ING. UWE VILLA GONZÁLEZ

ING. AZUCENA CHAVIRA GONZÁLEZ

OFICIO N° E.P. y T.017/2017

Ciudad de México, a 17 de enero de 2017.

ING. ALBERTO ENRIQUE MORFÍN FAURE
PRESENTE

En atención a la Solicitud del C. **FRANCISCO ANTONIO CRUZ RODRÍGUEZ**, pasante del Programa Académico de **Ingeniería Petrolera** con base en el Reglamento de Titulación Profesional del I.P.N., Capítulo II, Artículo 5, Fracción II y el Artículo 7 Inciso I, se le informa que ha sido seleccionado para asesorar la tesis del pasante mencionado, Por lo que solicito a usted se sirva proponer dentro de un plazo de 30 días calendario, el tema de tesis y contenido a desarrollar por el interesado.

Seguro de contar con su participación, la saludo cordialmente.

ATENTAMENTE
"La Técnica al Servicio de la Patria"



Ing. Saúl Milán Valdés
Subdirector Académico
Interino



c.c.p. Ing. Azucena Chavira González.- Jefa del Departamento de Formación Profesional Específica
Interesado
Archivo

SMV*gach.

OFICIO N° E.P. y T.018/2017

Ciudad de México, a 19 de enero de 2017.

ING. JUAN CARLOS CRUZ RODRÍGUEZ
INGENIERO DE DISEÑO DE AGUAS PROFUNDAS
PETRÓLEOS MEXICANOS
PRESENTE.

En atención a la Solicitud del C. **FRANCISCO ANTONIO CRUZ RODRÍGUEZ** pasante del Programa Académico de **Ingeniería Petrolera** y tomando en consideración sus altos méritos profesionales, me es grato invitarlo a dirigir el trabajo de tesis con fines de titulación profesional que por la opción de Tesis Individual, deberá desarrollar el interesado, por lo que solicito a usted, se sirva proponer a esta Subdirección el Tema.

En la confianza de que contaremos con su colaboración, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“La Técnica al Servicio de la Patria”


Ing. Saúl Milán Valdés
Subdirector Académico
Interino



UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

SMV*mdv.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.- GENERALIDADES DEL CEMENTO	3
1.1 Concepto de Cemento	3
1.2 Elaboración del Cemento.....	3
1.3 Clasificación de los Cementos	4
1.4 Cemento Clase G Y H	6
1.5 Aditivos	8
1.5.1 Concepto de aditivos líquidos en lechadas	8
1.6 Laboratorio de cemento	10
1.6.1 Concepto de laboratorio de cemento	10
1.7 Pruebas de laboratorio para una lechada	13
1.7.1 Determinación de agua libre	14
1.7.2 Pruebas de resistencia a la compresión.....	14
1.7.3 Densidad de la lechada.....	15
1.7.4 Determinación de filtrado	15
1.7.5 Tiempo bombeable	16
1.7.6 Reología.....	16
1.8 Preparación de la lechada de cemento	17
1.9 Etapas del proceso de fraguado	17
CAPÍTULO II.- CEMENTACIÓN.....	19
2.1 Concepto de cementación	19
2.2 Objetivos de la cementación	19
2.3 Tipos de cementación	20
2.3.1 Cementación primaria	20
2.4 Proceso de acondicionamiento de la cementación de un pozo	21
2.5 Ejecución de una cementación convencional.....	22

2.6 Cementación por etapas	24
2.7 Evaluación del trabajo de cementación	25
2.7.1 Registro CBL-VDL	25
2.7.2 Registro USI	26
2.8 Importancia de las geopresiones en la cementación de pozos.....	28
CAPÍTULO III.- ACCESORIOS DE CEMENTACIÓN	32
3.1 Concepto de equipos superficiales de cementación.....	32
3.1.1 Cabeza de cementación	32
3.1.2 Unidad de alta presión	33
3.2 Equipo de flotación y accesorios.....	34
CAPÍTULO IV.- POZOS EN AGUAS PROFUNDAS.....	39
4.1 Cementación de tubería riserless.....	41
4.1.1 Concepto de riserless	41
4.2 Objetivos de una cementación riserless.....	42
4.3 Equipos y técnicas de cementación empleados en aguas profundas.....	42
4.3.1 Plataforma semisumergible.....	42
4.3.2 ROV (Remote Operated Vehicle)	43
4.3.3 Tuberías de revestimiento para sección riserless y cabezales	44
4.3.4 Características del cabezal SMS 700.....	45
4.3.4 Características del cabezal SMS 800.....	46
4.3.5 Inner string.....	47
4.3.6 Técnica Pump and Dump.....	48
4.3.7 Centralización de la tubería de revestimiento.....	49
4.4 Retos de una cementación riserless en aguas profundas	50
4.4.1 Bajo gradiente.....	51
4.4.2 Riesgos de flujo somero.....	51
4.4.3 Hidratos de gas.....	52

4.5 Diseño de una cementación riserless.....	54
4.5.1 Estudio de riesgos someros.....	54
4.5.2 Características de la lechada de cemento.....	57
4.5.3 Realizar o verificar la simulación hidráulica durante la cementación	59
4.6 Evaluación de la cementación riserless	60
4.8 Análisis respecto a la presión y la temperatura	62
CAPITULO V.- CASO PRÁCTICO	64
5.2 Requerimientos de equipo y personal.....	66
5.3 Diseño de la lechada de cemento	66
5.4 Información del pozo.....	67
5.5 Estado Mecánico	69
5.6.1 Cálculos de la etapa Pump and Dump	70
5.7 Cálculo de volumetría	71
5.7.1 Capacidad de las tuberías de revestimiento.....	71
5.8 Cédula de bombeo.....	74
Recomendaciones	79
GLOSARIO.....	80
BIBLIOGRAFÍA.....	86

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación y descripción de los cementos.....	5
Tabla 2. Características de las tuberías de revestimiento usadas en secciones superficiales riserless.	45

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de fabricación del cemento Portland.	4
Figura 2 .Propiedades del cemento. Elaboración propia.	7

Figura 3. Laboratorio de cemento.	10
Figura 4. Balanza de medición.	11
Figura 5. Mezclador.	11
Figura 6. Consistómetro HPHT.	12
Figura 7. Filtro prensa.	12
Figura 8. Analizador de cemento (UCA).	13
Figura 9. Viscosímetro faan.	13
Figura 10. Esfuerzo compresivo en una lechada.	15
Figura 11. Consistencia de la lechada con su determinado tiempo bombeo.	16
Figura 12. Etapas del proceso de fraguado.	18
Figura 13. Cemento adherido a la formación.	19
Figura 14. Acondicionamiento del pozo previo a la cementación.	22
Figura 15. Lanzamiento de tapones y presión final.	23
Figura 16. Cementación con cople de cementación múltiple.	24
Figura 17. Operación del CCM.	24
Figura 18. Registro CBL-VDL.	26
Figura 19. Herramienta USI.	27
Figura 20. Registro donde se observa una buena cementación con los sistemas CVL-VDL y USI.	27
Figura 21. Registros donde se observan canales de lodo y cemento contaminado.	27
Figura 22. Tipos de geopresiones.	29
Figura 23. Prueba de goteo.	30
Figura 24. Procedimiento para una prueba de goteo.	31
Figura 25. Cabeza de cementar para alojar uno o dos tapones.	32
Figura 26. Cabeza de cementación para alojar dardos y sistema subsea en Aguas Profundas	33
Figura 27. Unidad de alta presión utilizada en plataformas marinas.	33
Figura 28. Unidad de alta presión en tierra.	34
Figura 29. Accesorios para una cementación de pozos.	34
Figura 30. Principales zapatas que se utilizan en el proceso de cementación.	35
Figura 31. Cople flotador, diferencial y de retención.	36
Figura 32. Centradores flexibles y sólidos.	37
Figura 33. Tapones de cemento.	37
Figura 34. Sistemas de tapones liberación subsuperficial (empleados en equipos flotantes)..	38
Figura 35. Representación gráfica de aguas profundas.	39
Figura 36. Sectores de pozos en aguas profundas en México.	40
Figura 37. Cementación con herramienta inner string.	41
Figura 38. Barco perforador especializado.	43
Figura 39. Plataforma Semisumergible.	43
Figura 40. ROV (remote operated vehicle).	44
Figura 41. Cabezal SMS 700 Vetco gray.	45
Figura 42. Cabezal SMS 800 Vetco gray.	46
Figura 43. Arreglo de tuberías de revestimiento con cabezales SMS 700 y SMS800.	46
Figura 44. Inner string.	47

Figura 45. Perfil de presión del método Pump and Dump.	48
Figura 46. Mixing on the fly.	49
Figura 47. Centralización (% standoff).	50
Figura 48. Ventana de operativa en aguas profundas.	51
Figura 49. Representación de flujos somero.	52
Figura 50. Condiciones a las que se forma un hidrato de gas.	53
Figura 51. Hidrato de metano.	54
Figura 52. Ejemplo de asentamiento de a TR con riesgo somero moderado identificado escenario 1.	55
Figura 53. Ejemplo de asentamiento con riesgo bajo, bajando la TR a mayor profundidad. ...	56
Figura 54. Ejemplo de asentamiento con riesgo alto, y propuestas de cambiar la localización del pozo o hacer un pozo direccional.	56
Figura 55. Reología de los fluidos usados en una cementación de pozos.	60
Figura 56. Comportamiento de la lechada en aguas profundas.	62
Figura 57. Análisis respecto a la presión y temperatura.	63
Figura 58. Perfil de geopresiones de pozo.	65
Figura 59. Perfil de temperatura del pozo "A".	65
Figura 60. Estado mecánico del pozo.	69
Figura 61. Posicionamiento de las lechadas al término de la operación.	78
Figura 62. Perfil de densidad equivalente de circulación (DEC), durante la operación.	78

AGRADECIMIENTOS

A Dios....

Le agradezco a dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mí alma mater....

Gracias por darme la oportunidad de pertenecer a la mejor universidad de México, de formarme como un profesional, de poder desarrollarme, aprender y apreciar las oportunidades que la vida me sigue dando. Con orgullo digo...Soy politécnico.

A mi Madre....

Madre esta tesis te la dedico a ti por que se del esfuerzo que has hecho para sacarnos adelante a mi hermano a mí, por el apoyo incondicional, por tu fortaleza de nunca dejarte caer a pesar de los problemas, te agradezco por tu paciencia, tu cariño y por haberme formado como una persona de bien... Te amo.

A mi Hermano....

Hermano eres y siempre has sido mi ejemplo a seguir, te agradezco por todo el apoyo que le has dado a nuestra madre y a mí, por ser una persona dura como hermano, a cada vez que cometía un error decírmelo, ya que eso me ayudo a ser mejor persona, gracias por tus ganas de ser el mejor en todo lo que haces... te amo.

A mi Novia....

Peque te agradezco por ayudarme a siempre estar en el camino del éxito, por tu paciencia, por estos años que me has aguantado, por qué siempre estás ahí cuando te necesito, pero sobre todo por tu cariño.

A mis Profesores....

Les agradezco la paciencia que me tuvieron a lo largo de la carrera, por enseñarme, aconsejarme, e instruirme en el camino para ser un buen profesional.

A los ingenieros especialistas de Cementaciones de pozos de Aguas Profundas....

Kendy Vanessa Mora Guerrero (SLB), Rodrigo Girón Rojas (SLB), Jorge Vázquez Valdez (HALL) gracias por el apoyo incondicional, por compartirme sus conocimientos y porque fueron un gran apoyo para lograr este trabajo de la mejor manera.

A mis Amigos....

Arturo, Preciado, Melo, Maribel, Gina, Michel, Juchi, Mogli, Neto, Lara, Mafer, Tania, Johana, Erika, Marce, Dani, Edgar, gracias por ser parte de mi vida, por su amistad, y por todos los buenos momentos que logramos compartir.

Gracias a todos

Francisco Antonio Cruz Rodriguez

***Huelum, Huelum! Gloria!
A la Cachi Cachi Porra
A la Cachi Cachi Porra
Pim Pom Porra
Pim Pom Porra
Politécnico, Politécnico,
GLORIA!***

RESUMEN

La industria petrolera atraviesa por un punto en el cual la exploración y producción de los hidrocarburos están siendo proyectadas hacia zonas marinas, con características de tirantes de agua a mayor profundidad (aguas profundas y ultra profundas). Es por esto que el área de perforación de pozos a continuado innovando y mejorando las tecnologías de perforación y a su vez las operaciones de cementación en zonas con presiones y temperaturas anormales por diferentes condiciones de pozo.

Actualmente las lechadas de cemento representan un gran éxito en pozos de aguas profundas y ultra profundas por las características que adquieren al agregar micro esferas o espumas, las cuales ofrecen principalmente mayor esfuerzo compresivo, que es uno de los requerimientos indispensables para una cementación eficiente y mejorar la vida útil del pozo bajo condiciones extremas.

Para realizar una cementación riserless se requiere tener las generalidades de la misma (geopresiones, carta de riesgos someros, lechadas a utilizar, diámetro del agujero, TR a cementar, densidad de lodo, etc.). En la bibliografía estas etapas están representadas por perfiles de presiones y temperaturas bajas; es por ello que el diseño de las lechadas de cemento a utilizar debe ser analizado previamente en el laboratorio bajo las condiciones de operación del pozo y apoyados con los pozos de correlación, de esta manera realizar una verificación para garantizar el éxito del trabajo.

De acuerdo a la importancia en la toma de decisiones en este tipo de proyectos, se muestran las ventajas y los beneficios de la cementación riserless; la cual se exhibe en este trabajo desde sus aspectos teóricos hasta concluir con un caso práctico de aguas profundas; dicho argumento manifiesta la necesidad de la implementación de la cementación riserless, ya que el éxito del proyecto depende de la correcta evaluación de los aspectos que lo benefician para obtener el mayor valor económico con el menor riesgo posible.

ABSTRACT

Oil industry is passing through a point where oil exploration and production is moving into marine areas, into deeper waters (deep and ultra-deep waters). This is why the drilling area continues innovating and improving drilling technologies as well as cementing operations in areas with abnormal pressures and temperatures due to different well conditions.

Currently cement slurries represent a great success in deep and ultra-deep water wells because of the characteristics they acquire by adding micro spheres or foams, which offer mainly greater compressive stress, which is one of the indispensable requirements for an efficient cementation and to improve the life of the well under extreme conditions.

To perform a riserless cementation it is necessary to have general information thereof (geopressures, shallow risk charts, slurry to use, hole diameter, casing to cement, mud density, etc.). In literature these stages are represented by pressure profiles and low temperatures; this is why cement slurries design to be used must be previously analyzed in the laboratory under well operative conditions and supported by correlation wells, in order to carry out a verification to guarantee the success of the work.

According to the importance of decision-making in this type of projects, the advantages and benefits of riserless cementation are shown; this is presented in this work from its theoretical aspects concluding finally with a deep waters practical case; this argument states the need for the implementation of riserless cementation, since the success of the project will depend on the correct evaluation of the aspects that benefit it, in order to obtain the highest economic value with the lowest risk possible.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad es indispensable contar con un grupo multidisciplinario para la elaboración del diseño de los pozos en las etapas de exploración y desarrollo en aguas profundas y ultra profundas. Las funciones del Ingeniero Petrolero son: ser un líder, estratégico, proponer soluciones y desarrollar la capacidad de adaptarse a los diferentes retos derivados de las distintas condiciones del pozo a diseñar.

Hoy en día, en zonas marinas se han encontrado yacimientos a profundidades grandes, que tienen la característica de tener tirantes de agua mayores a 500 m, las cuales limitan la capacidad de las plataformas y por ello se ocupan nuevas tecnologías como plataformas semisumergible de 6ta generación y barcos perforadores. Estos pozos son complejos debido a la presión y temperatura a las que están sometidos, para ello se requiere que durante las operaciones de perforación y cementación, los diseños de fluidos de perforación y lechadas de cemento sean las ideales para no fracturar las formaciones y evitar brotes con el objeto de tener el control del pozo.

El presente trabajo ha sido elaborado con la finalidad de presentar las técnicas que se requieren para realizar una eficiente cementación en zonas superficiales, así como mostrar los fundamentos teóricos de la cementación riserless en pozos de aguas profundas, su proceso y la importancia de saber realizarlo. De igual manera se describen los equipos que se necesitan para realizar correctamente una operación riserless, También se describen, los riesgos que existen en esta sección y las características de las lechadas a utilizar.

Finalmente, se presenta un caso práctico donde se plantea y ejemplifica una cementación riserless en la cual se muestran las soluciones, recomendaciones y conclusiones.

La cementación riserless en pozos de aguas profundas es muy importante debido a que la industria petrolera enfrenta nuevos retos a nivel mundial en esta área, estas operaciones deben de llevarse a cabo con extrema precaución para tener buenos resultados a bajo costo y sin daño al medio ambiente.

CAPÍTULO I.- GENERALIDADES DEL CEMENTO

1.1 Concepto de Cemento

El cemento es un conglomerado hidráulico, es decir, un material inorgánico compuesto de sílice, alúmina y hierro molido, que al mezclarlo con agua y aditivos, forma una mezcla líquida que fragua y endurece por medio de reacciones químicas y procesos de hidratación, y que una vez endurecido conserva su resistencia. Esta mezcla líquida es llamada lechada.

El primer tipo de cemento utilizado en un pozo petrolero fue el cemento Portland, el cuál fue desarrollado por Josep Aspdin en 1824, esencialmente era un producto de una mezcla de caliza y arcillas. Las condiciones a las cuales es expuesto en un pozo difieren significativamente de aquellas encontradas en operaciones convencionales tales como construcción.

1.2 Elaboración del Cemento

Para la fabricación del cemento Portland los materiales crudos se muelen vigorosamente y el horno se calienta con gas a temperaturas de 1430 a 1540°C, de esta manera se obtiene una mezcla homogénea en las proporciones que se requiere. Para esto existen dos procesos: seco y húmedo.

Proceso seco: Se preparan las materias primas y se pasan a un molino para homogenizar el tamaño de las partículas y su cantidad. Se pasa por un separador de aire y se les lleva a silos mezcladores para su almacenamiento antes de pasarse al horno rotatorio.

Proceso húmedo: A diferencia del anterior, este proceso efectúa una mezcla de las materias primas con agua para mantener en forma más homogénea la mezcla. También, se pasa por un molino para uniformar el tamaño de la partícula y posteriormente, se coloca en contenedores que mantienen en movimiento la mezcla antes de pasarla al horno rotatorio.

Estas temperaturas originan reacciones químicas entre los ingredientes de la mezcla cruda, resultando un material llamado Clinker. El Clinker se deja enfriar a temperatura ambiente con corrientes de aire, una vez frío, se almacena y se muele en molinos de bola, para darle el tamaño deseado de partículas.

El Clinker se alimenta al molino de cemento conjuntamente con una dosificación de sulfatos de calcio deshidratado, con lo que se obtiene el producto terminado de cemento Portland.

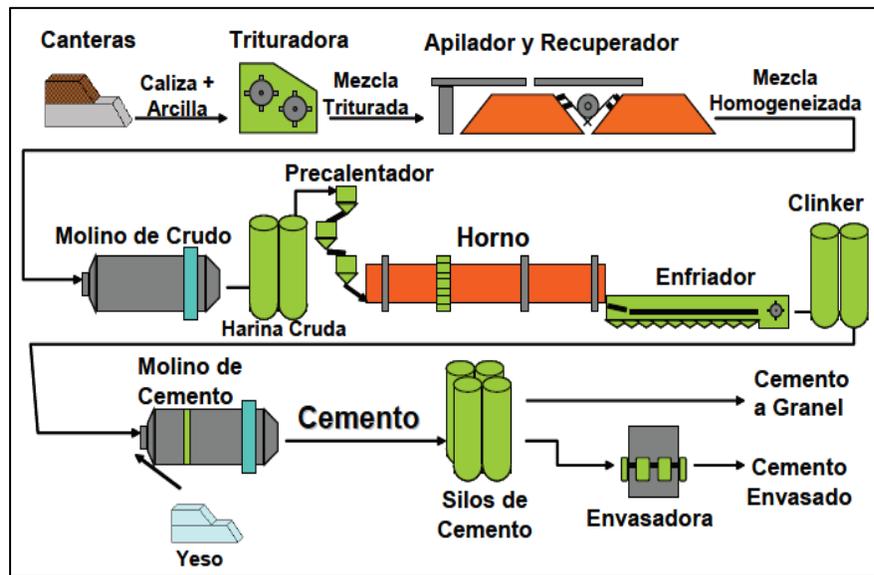


Figura 1. Proceso de fabricación del cemento Portland.

1.3 Clasificación de los Cementos

Los cementos tienen características físicas y químicas y en base a esto, es el uso que se le puede dar, dependiendo de la profundidad, presión y temperatura a soportar, los cementos más comunes en operaciones de cementación de pozos son el G y H. tabla 1.

Clase	Definición	Profundidad	Temperatura
A	Usado para pozos desde superficie cuando no se requiere propiedades especiales.	Desde superficie hasta 1800 mts.	77°C
B	Usado para pozos desde superficie cuando hay condiciones moderadas a altas resistencias a sulfatos.	Desde superficie hasta 1800 mts	77°C
C	Usada para pozos desde superficie cuando se requieren condiciones de alto esfuerzo.	Desde superficie hasta 1800 mts.	77°C
D	Usado para pozos con condiciones moderadas de presión y temperatura y esfuerzos moderados a altos.	1800 mts – 3000 mts.	110°C
E	Usado para pozos con condiciones de alta presión y temperatura	3000 mts. – 4300 mts.	143°C
F	Usado para pozos con condiciones extremas de presión y temperatura y esfuerzos moderados a altos,	1800 mts. – 5000 mts.	160°C

Tabla 1. Clasificación y descripción de los cementos.

1.4 Cemento Clase G Y H

El cemento tipo G Y H son los ideales para trabajos de cementación de pozos petroleros, son cementos que se emplean desde superficie hasta 10,000 mts.

El cemento G y H son diseñados bajo los requerimientos de las normas API 10 A cumpliendo con los requisitos especificados tales como tiempo de bombeabilidad, consistencia, agua libre y resistencia mecánica/compresiva. Pueden modificarse con aceleradores o retardadores para poder utilizarlos en un amplio rango de presión y temperatura, conservando su composición, propiedades mecánicas, desempeño, fluidez y evitando el fraguado prematuro de la lechada.

Un cemento clase G Y H de buena calidad, proporciona alta resistencia a la compresión, resistencia al ataque químico, buen sello hidráulico entre capas de subsuelo y bajo consumo de aditivos convirtiéndose en un producto con características técnicas aceptables y económicamente rentables.

Ventajas de cemento clase G Y H:

- Garantía de homogeneidad, emitido por la empresa fabricante y especificado mediante su certificado de Calidad (QA/QC)
- Las lechadas de esta clase de cemento por sus características desarrollan alta adherencia entre la formación y la tubería de revestimiento, lo que ofrece un mejor soporte para la tubería cuando se utilizan baches espaciadores efectivos.
- Por su moderado calor de hidratación, reduce en gran medida la posibilidad de fisuras de expansión térmica, evitando la migración de fluidos hacia la tubería de revestimiento y la protege contra la corrosión.

A continuación, se muestran las principales propiedades del cemento:

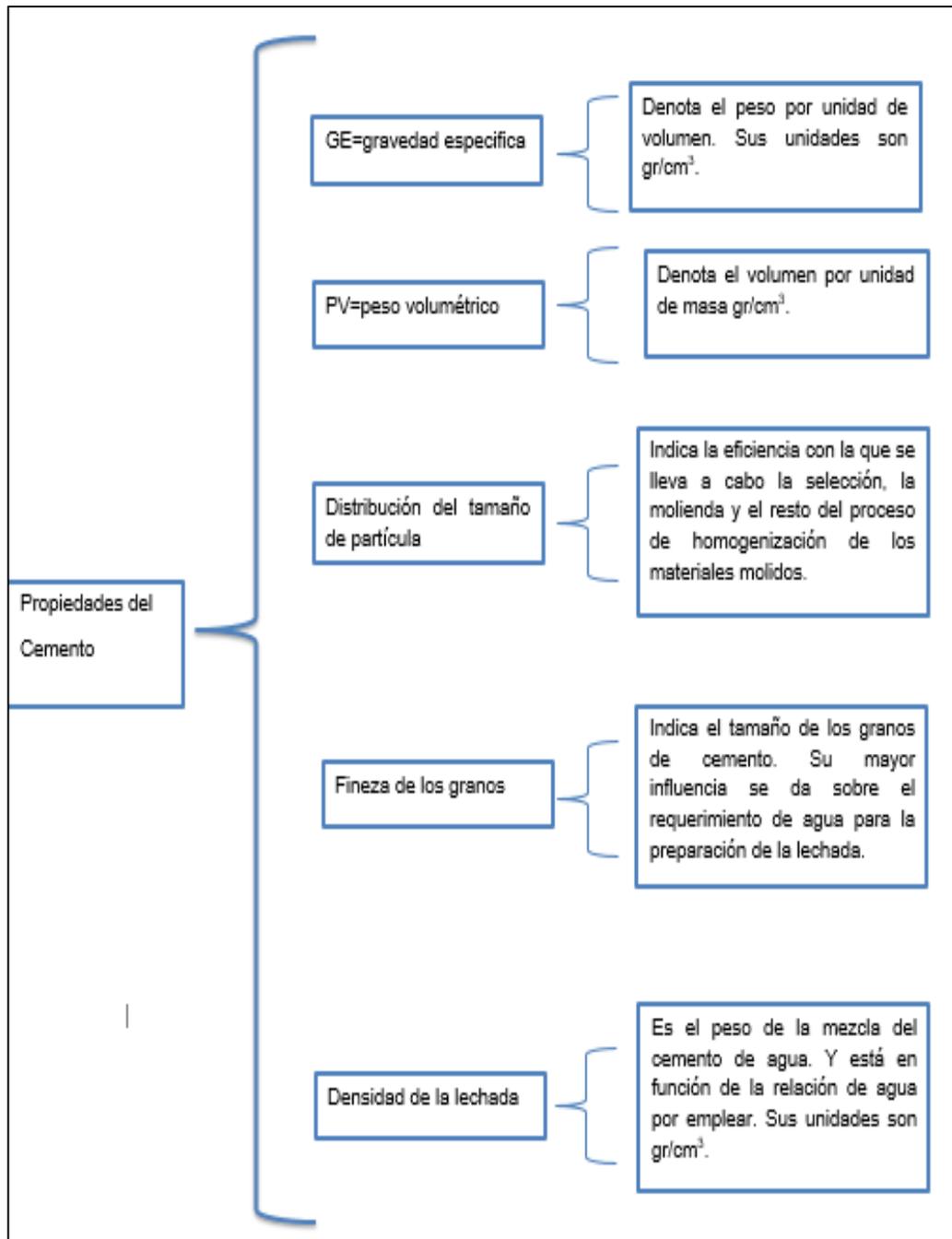


Figura 2 .Propiedades del cemento. Elaboración propia.

1.5 Aditivos

1.5.1 Concepto de aditivos líquidos en lechadas

Los aditivos agregados a la lechada son materiales orgánicos e inorgánicos que se añaden al agua y cemento durante la mezcla de una lechada.

También existen aditivos sólidos que se pueden agregar al cemento seco para optimizar sus propiedades finales. Sin embargo para operaciones costa afuera se utilizan primordialmente los aditivos líquidos.

La adición de estos productos líquidos en la lechada de cemento, modifican las características del proceso de hidratación, el endurecimiento e incluso la estructura interna del concreto.

Existen 7 clases de aditivos que se ocupan para modificar las propiedades de la lechada de cemento. A continuación, se muestran:

1. **Antiespumante:** Son productos químicos necesarios en cada cementación por su capacidad de prevenir/eliminar la espuma generada durante la mezcla de la lechada. Entre sus características principales destacan las siguientes:
 - Mantiene la densidad de la lechada que se bombea al pozo.
 - No influye en las reacciones químicas de los otros productos químicos adicionados a la mezcla.
2. **Aceleradores:** Son sustancias que reducen el tiempo normal de endurecimiento de la lechada de cemento y que aceleran el tiempo normal de desarrollo de la resistencia. Entre sus características principales destacan las siguientes:
 - Disminuyen el tiempo de bombeabilidad de la lechada para el posicionamiento de la lechada en anular a las bajas temperaturas del pozo.
 - Aceleran el proceso de fraguado (resistencia a la compresión)
 - Aumenta la hidratación.
3. **Retardadores:** Son productos químicos que prolongan el tiempo de bombeabilidad, brindan la posibilidad de trabajar el cemento en un amplio rango

de presión y temperatura. Entre sus características principales destacan las siguientes:

- Incrementa el tiempo de bombeabilidad requerido para el posicionamiento de la lechada en anular con altas temperaturas del pozo.
- Pospone el tiempo de fraguado (resistencia a la compresión)
- Inhibir la hidratación prematura.

4. **Extendedores:** Son aditivos químicos o material inerte utilizado para incrementar el rendimiento de una lechada de cemento, esto permite reducir ligeramente la densidad de la mezcla. El rendimiento de la lechada se expresa generalmente en pies cúbicos por saco de cemento; el incremento del rendimiento reduce el costo por volumen de la lechada de cemento, en tanto que la reducción de la densidad de la lechada reduce la presión hidrostática de la columna del cemento, lo que permite aislar con éxito las zonas débiles.

5. **Densificantes:** Son materiales químicos inertes, de alto peso específico y que manejen poca agua. Estos materiales se usa cuando se realizan operaciones de cementación en zonas presurizadas. Su característica principal es la siguiente:

- Aumentar la densidad de la lechada.

6. **Dispersantes:** Son productos químicos que reducen la viscosidad de las lechadas de cemento y son añadidos para mejorar las propiedades de flujo de las lechadas. Ayudan a obtener regímenes turbulentos con caudales bajos de bombeo y reducen la fricción entre granos y las paredes. Sus características primordiales son las siguientes:

- Reducen la viscosidad y el punto de cedencia de la lechada.
- Reducen la presión de fricción.
- Modifica el régimen de flujo.
- Mejoran la eficiencia de los controladores de filtrado.

7. **Aditivos especiales:** Son productos adicionados para mejorar las características finales de la lechada cuando los productos anteriormente mencionados no proporcionan las características requeridas para la sección a cementar.

➤ **Anti-sedimentante:**

- Aseguran un valor óptimo del punto de cedencia.
 - **Controlador de gas:**
- Controlan el influjo de gas durante la cementación y que puede presentarse en el pozo
 - **Controlador de filtrado:**
- Controlan el parámetro de pérdida de filtrado en las lechadas para mejorar los tiempos de transición.
 - **Controlador para pérdida de circulación:**
- Se usan para prevenir o mitigar la pérdida de circulación durante las operaciones de cementación.

1.6 Laboratorio de cemento

1.6.1 Concepto de laboratorio de cemento

Es el lugar donde se diseñan y evalúan las lechadas mediante diferentes pruebas que nos permiten verificar y evaluar los requerimientos de un pozo, en particular simulando las condiciones que tiene el mismo (presión y temperatura de fondo). Esta simulación se hace con el fin de tener resultados más cercanos a los reales y así tener la seguridad de utilizar una determinada lechada en el pozo.



Figura 3. Laboratorio de cemento.

Para realizar dichas pruebas se debe recopilar la información necesaria del pozo que se desea cementar. Los equipos que se utilizan para la evaluación y la preparación de una lechada son:

- **Balanza de medición:** Se utiliza a fin de medir las cantidades exactas del cemento y aditivos sólidos de acuerdo a su concentración.



Figura 4. Balanza de medición.

- **Mezclador:** Se utiliza para crear una mezcla homogénea entre el cemento, agua, y los aditivos a utilizar.



Figura 5. Mezclador.

- **Consistometro HPHT:** Este equipo se utiliza para determinar la consistencia de las lechadas de cemento. Su uso principal es determinar el tiempo bombeable requerido para efectuar la operación con seguridad.



Figura 6. Consistómetro HPHT.

- **Filtro prensa:** Este equipo es el medio más efectivo con objeto de determinar las propiedades de pérdida de filtrado y lechada de cemento.



Figura 7. Filtro prensa.

- **Analizador de cemento (UCA):** El analizador de cemento monitorea continuamente la tendencia de desarrollo de las composiciones de cemento. Con este equipo se puede saber el tiempo de fraguado inicial de la lechada de cemento y por ende la resistencia a la compresión.



Figura 8. Analizador de cemento (UCA).

- **Viscosímetro faan:** Es un instrumento que se usa para medir la viscosidad y la resistencia de gel de una lechada de cemento de parámetros llamados reologias.



Figura 9. Viscosímetro faan.

1.7 Pruebas de laboratorio para una lechada

Las normas API 10B explica las prácticas que se recomiendan en las pruebas de laboratorio que se llevan a cabo con las lechadas de cemento para pozos petroleros, tales son:

- Determinación de agua libre en la lechada.
- Pruebas de resistencia a la compresión.
- Determinación de la densidad.
- Determinación del filtrado.
- Determinación de tiempo de bombeabilidad.
- Determinación de reología.

1.7.1 Determinación de agua libre

El agua libre es una tendencia del agua a separarse de la lechada. El contenido de agua libre en una mezcla de lechada en el campo puede indicar que la mezcla no se encuentra completamente homogénea.

Si se pierde agua de la lechada de cemento antes de que esté en la posición que corresponde en el espacio anular, su tiempo de bombeabilidad decrece y las formaciones sensibles al agua pueden ser afectadas. La cantidad de agua perdida que puede ser tolerada depende de la operación de cementación que se está realizando, pero lo ideal en cada cementación es que se tenga 0% de agua libre.

Para determinar el agua libre, la muestra de la lechada se coloca en un consistometro, el cual se encarga de homogenizar la muestra, la mezcla de cemento debe ser sometida a fuerzas giratorias de 1200 rpm a 35 segundos. Después se saca la lechada y se deja reposar dos horas a 80°F en una probeta, al término de este tiempo se extrae el agua libre con un micro probeta y se cuantifica el agua libre.

1.7.2 Pruebas de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se incrementa con la densidad de la lechada. En la decisión del tiempo de espera de fraguado es importante considerar lo siguiente:

- Conocer que tan fuerte debe estar el cemento antes de que la perforación pueda continuar.
- Entender las características del desarrollo de la fuerza compresiva de los cementos de uso común.

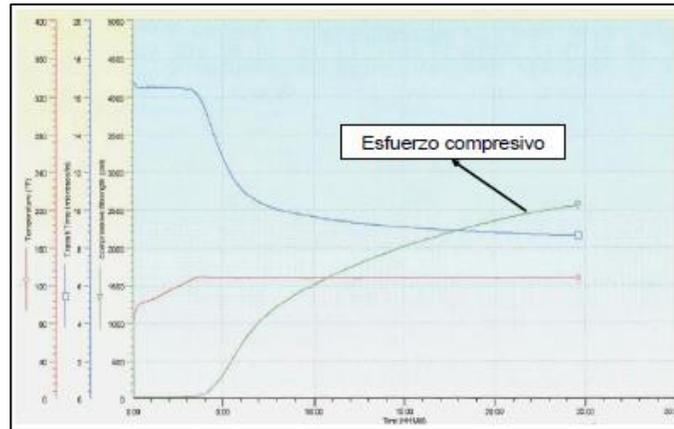


Figura 10. Esfuerzo compresivo en una lechada.

1.7.3 Densidad de la lechada

La densidad de una lechada es considerada una de las propiedades más importantes y comúnmente medida, la cual se relaciona directamente con la presión hidrostática de la lechada de cemento. Esta se debe encargar de impedir problemas de circulación y fracturamiento de las formaciones, la densidad de la lechada siempre debe ser suficiente para mantener el control del pozo.

En operaciones de campo, la densidad de esta mezcla de cemento es determinada por una balanza presurizada pero en la actualidad hay dispositivos integrados a la mezcladora para observar la densidad de la mezcla electrónicamente y se registra en la terminal de una computadora de control.

1.7.4 Determinación de filtrado

La determinación del filtrado se divide en dos: filtrado de baja presión y filtrado de alta presión, en la cual se aplican 100 y 1000 psi respectivamente y se mide la cantidad de líquido que se deposita en un cilindro graduado a 1,2 y 5 minutos de iniciada la prueba, y luego intervalos de 5 min cada uno. Si la muestra se deshidrata totalmente antes de media hora, se registra el tiempo que tardó en hacerlo. El filtrado se registra en mililitros cada 30 minutos.

1.7.5 Tiempo bombeable

El tiempo bombeo se determina analizando el tiempo en que la lechada permanece en estado líquido (y por consiguiente bombeable) bajo una serie de condiciones dadas en el laboratorio (presión y temperatura), correspondiente a un volumen de cemento que va a ser bombeado, cuando las condiciones de colocación de la lechada son críticas deben hacerse pruebas de sensibilidad con cambios de presión y temperatura, la medición se reporta y el límite de bombeo de la lechada se alcanza cuando se tienen 90 Bc.

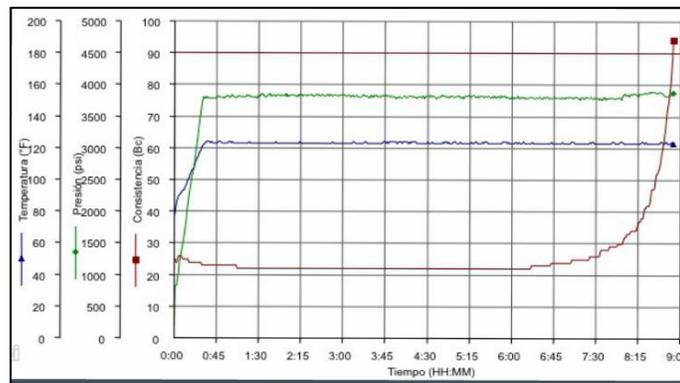


Figura 11. Consistencia de la lechada con su determinado tiempo bombeo.

1.7.6 Reología

La reología de la mezcla de cemento se enfoca básicamente al estudio del flujo y la deformación de la lechada a condiciones de fondo (presión y temperatura), con las reologías se determina la jerarquía de fricción de los fluidos y su capacidad para la remoción.

Al considerar que la lechada de cemento no es un fluido newtoniano, no es posible definir sus propiedades geológicas por medio del factor de viscosidad, ya que la relación esfuerzo/corte no es constante, y por lo tanto se determinan dos parámetros de flujo. El tamaño y la distribución de las partículas afectan de manera directa, ya que la velocidad de deshidratación depende de la finura del cemento.

Las lechadas de cemento se consideran como fluidos pseudoplásticos con punto de cedencia para los cuales la viscosidad disminuye con la velocidad de corte.

1.8 Preparación de la lechada de cemento

La efectividad de todo trabajo de cementación depende de llevar a cabo una buena preparación meticulosa y precisa en los equipos, material y personal, así como del diseño y las pruebas de trabajo. Los ensayos realizados en el laboratorio para el cemento tienen la función de evaluar el desempeño y las características químicas de sus lechadas mediante ciertas propiedades a condiciones de fondo del pozo.

El procedimiento para la preparación de una lechada es pesar la cantidad de agua y aditivos en una balanza electrónica. Se debe mezclar el cemento y aditivos en una mezcladora API. La mezcla se realiza de esta manera: por 15 segundos a 4000 rpm se mezclan los aditivos y después por 35 segundos a 1200 rpm toda la lechada. Lo siguiente es medir la densidad de la mezcla en una balanza presurizada.

Enseguida la lechada ya mezclada se pasa al consistometro atmosférico a fin de simular las condiciones de mezclado que soporta la lechada antes de bombearse al pozo, después se mide la reología de la mezcla en el viscosímetro “faan” donde se determina el punto de cedencia y la viscosidad plástica de la lechada.

Posteriormente se mide la cantidad de pérdida de filtrado de la lechada en el filtro prensa bajo las condiciones dinámicas de presión y temperatura, por último, se mide la resistencia a la compresión de la lechada de cemento en un analizador ultrasónico de cemento (UCA).

1.9 Etapas del proceso de fraguado

Los flujos someros de agua o gas afectan la lechada de cementación de diferente manera. Primero, debido a que estos flujos generalmente ocurren a profundidades relativamente someras respecto de la línea del lodo o superficie del lecho marino y en formaciones débiles o no consolidadas, el sistema de cementación debe ser especialmente ligero de modo tal que las presiones ejercidas sean inferiores a la presión de fractura. El diseño de la lechada debe proveer control de la pérdida de

fluido de 50 [ml/30min] API o menos para evitar modificar la reología o densidad de la lechada.

Para reducir la posibilidad de que se formen canales de fluidos en el cemento, el diseño de la lechada debe minimizar la cantidad de agua libre y el asentamiento de partículas en la lechada, fenómeno conocido como sedimentación. El período crítico de hidratación debe ser breve para prevenir que fluya gas o agua en el cemento. Finalmente, el cemento endurecido o fraguado debe tener baja permeabilidad para proveer un aislamiento por zonas en forma efectiva y duradera. Las lechadas de cemento atraviesan cuatro etapas principales al progresar desde un estado enteramente líquido hasta uno sólido.

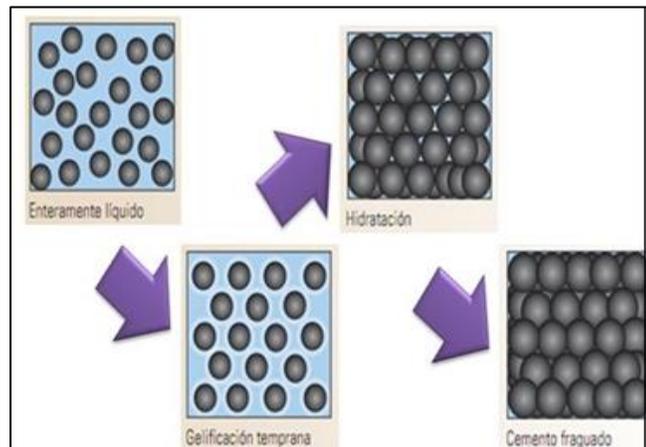


Figura 12. Etapas del proceso de fraguado.

CAPÍTULO II.- CEMENTACIÓN

2.1 Concepto de cementación

Esta operación se efectúa con el fin de colocar una lechada en el espacio anular expuesto entre tubería de revestimiento y formación perforada, se usa a fin de garantizar el soporte estructural del pozo, proporcionar aislamiento de la sección somera de posibles influjos de agua o gas y garantizar una prueba de goteo eficiente en la perforación de las siguientes etapas, entre otros. Por lo tanto, se clasifica como una de las operaciones críticas en el proceso de perforación de pozos.

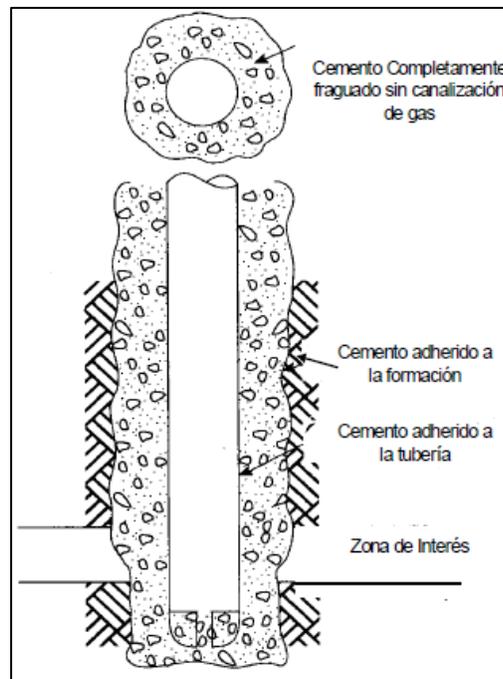


Figura 13. Cemento adherido a la formación.

2.2 Objetivos de la cementación

Para que una cementación sea correcta tiene que cumplir ciertos objetivos, los cuales se detallan a continuación:

- Soportar el peso de la propia tubería de revestimiento.
- Asegurar y proteger la tubería de revestimiento en el pozo.

- Aislar zonas de diferentes fluidos.
- Evitar o resolver problemas de pérdidas de circulación y pegadura de tuberías.
- Reparar pozos por problemas de canalización de fluidos.
- Reparar fugas en la tubería de revestimiento.
- Proteger al pozo de un colapso.
- Evitar derrumbes de la pared en formaciones no consolidadas.

2.3 Tipos de cementación

Para el proceso de cementar una tubería de revestimiento se tiene dos tipos de cementación.

- Cementación primaria
- Cementación secundaria (remediación o forzada)

2.3.1 Cementación primaria

La cementación primaria es una técnica que consiste en colocar cemento entre el espacio anular y desplazarlo entre la tubería y la formación asegurando un sello completo y permanente.

Después de colocar la lechada, el cemento se endurece proporcionando un sello hidráulico al pozo, previniendo la migración de los fluidos de la formación al anular; por lo tanto, la cementación primaria es una de las etapas más críticas durante la perforación y construcción de un pozo, este procedimiento debe ser diseñado y ejecutado cuidadosamente porque hay solo una oportunidad para completar el trabajo satisfactoriamente.

El reto principal es obtener un sello hidráulico efectivo en la zona de interés que tienen fluidos a presión. Se ha vuelto una práctica que para tener una buena cementación el cemento debe desarrollar un esfuerzo compresivo antes de efectuar la perforación de la siguiente etapa.

2.3.2 Cementación secundaria (Remediación o Forzada)

Es un proceso de remediación que se ejecuta cuando no existen buenos resultados en la cementación primaria, el proceso consiste en inyectar cemento mediante la aplicación de presión hidráulica a través de disparos o ranuras en la tubería de revestimiento en el espacio anular. Su principal función es mejorar el sello hidráulico de un intervalo específico por razones de aporte de agua, gas o para corregir una canalización en la cementación primaria.

En este documento se explica más adelante con mayor detalle la cementación primaria en aguas profundas.

2.4 Proceso de acondicionamiento de la cementación de un pozo

Una vez que la tubería de revestimiento está a la profundidad programada, previo a realizar el trabajo de cementación se debe romper circulación y circular limpiando el pozo al menos un tiempo de atraso, verificando con esto la circulación efectiva en el pozo y asegurando que previo al trabajo de cementación no existe ningún problema con respecto a la pérdida de circulación.

Las características de los fluidos de cementación por usar, se diseñan en base a la condición del pozo, la densidad de los baches debe ser mayor que la densidad de fluido de control y la densidad de la lechada mayor a la densidad de del bache por usar, lo anterior al considerar las reologías de los fluidos.

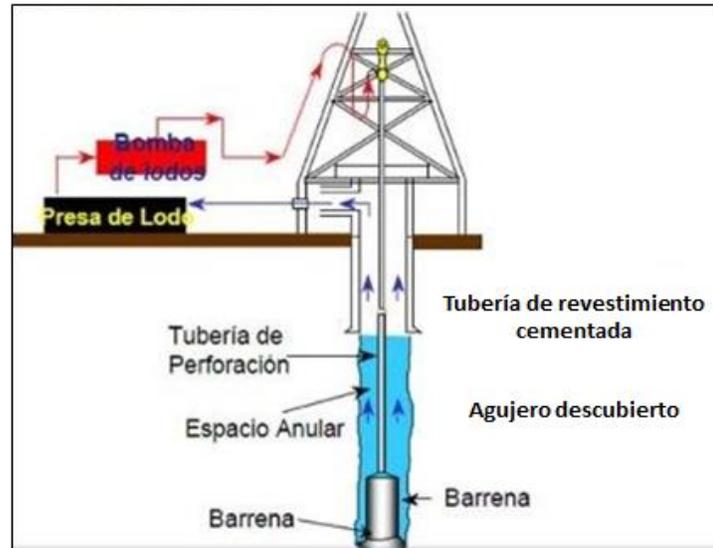


Figura 14. Acondicionamiento del pozo previo a la cementación.

2.5 Ejecución de una cementación convencional

Para llevar a cabo una cementación es preciso considerar en la práctica las siguientes etapas:

1. Es necesario efectuar una junta de seguridad con el personal encargado en la operación de cementación.
2. Inspeccionar la cabeza de cementar e instalar los tapones superior e inferior durante la circulación.
3. Examinar las líneas donde se bombea la lechada.
4. Bombear los baches de lavado y espaciado, para no ocasionar retrasos en la operación.
5. Soltar el tapón limpiador: Al soltar el tapón de diafragma se debe verificar el viaje del mismo por medio del indicador que se localiza en la cabeza de cementar; se inicia el bombeo del cemento, al inicio debe hacerse a bajo gasto para romper el gel de lodo y establecer circulación. Posteriormente, se bombea el gasto programado. Durante el mezclado se debe mantener la lechada homogénea, la cual se logra circulando y se controla por medio de la medición en una balanza de lodo presurizada.

6. Soltar el tapón de desplazamiento: Al liberar el tapón, el gasto de la lechada de desplazamiento debe estar de acuerdo con el diseño. Cuando el tapón está por llegar a su tope final, de acuerdo a cálculos previamente realizados, se debe disminuir el gasto a la mitad cuando el 70 por ciento del volumen de la lechada ha sido bombeada para evitar un incremento brusco de la presión en la TR.
7. Descargar presión y verificar el equipo de flotación. La presión final se descarga en la unidad de alta presión para cuantificar el volumen de fluido que regresa y al mismo tiempo verificar el funcionamiento del equipo de flotación. Si al descargar la presión se observa que no se suspende el flujo del lodo, se cierra la válvula de descarga para verificar la presión diferencial; se bombea nuevamente un volumen de lodo hasta observar un ligero incremento de presión y de nuevo se cierran las válvulas para esperar el tiempo de fraguado.
8. Espera de fraguado: El tiempo de espera de fraguado está en función de las pruebas de esfuerzo compresivo. Las pruebas de laboratorio demuestran que cuando el control de la calidad en la cementación es oportuno, el tiempo en que el cemento alcanza un esfuerzo compresivo de 500 psi y la temperatura estática de fondo del pozo es dentro de las primeras 8 a 12 horas.

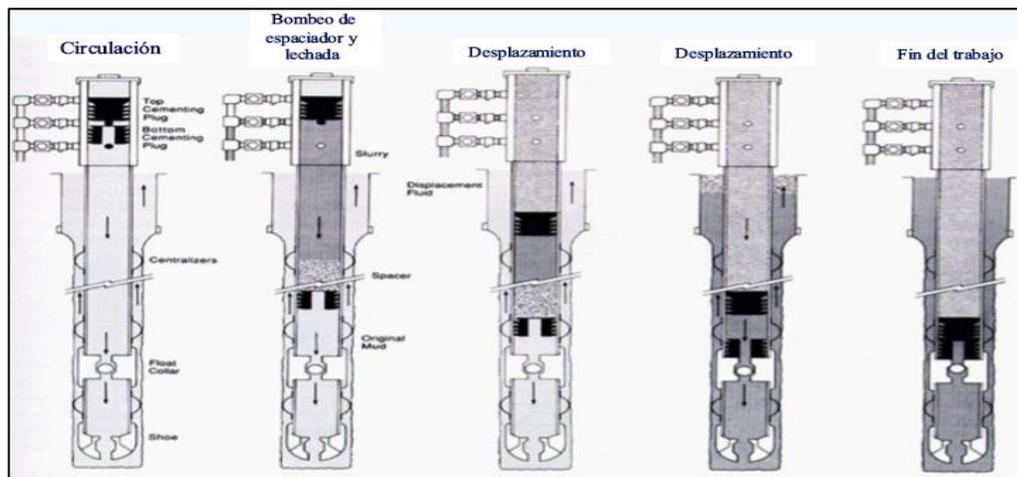


Figura 15. Lanzamiento de tapones y presión final.

2.6 Cementación por etapas

Estas operaciones se efectúan en pozos donde se requiere cubrir con cemento una longitud de TR demasiado larga, o se tiene zonas de interés con separaciones muy grandes o con problemas de pérdida de circulación debido al bajo gradiente de fractura. Para esta operación, se utiliza la herramienta copele de cementación múltiple, la secuencia operativa de la primera etapa es similar a una cementación convencional.



Figura 16. Cementación con copele de cementación múltiple.

La segunda etapa consiste en lanzar un tapón llamado torpedo, que se utiliza para romper los tornillos de corte en el copele de cementación múltiple (CCM) deslizando la primera camisa haciendo la apertura y estableciendo comunicación entre el interior de la TR y el espacio anular. Al establecer la circulación se procede a la operación de la segunda etapa como una cementación normal; al arribar el tapón de desplazamiento CCM, la segunda camisa del copele se desliza sellando los orificios de comunicación, llegando a la presión final, señal de que el sello es efectivo.

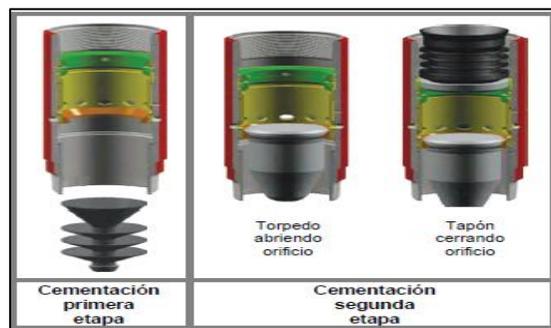


Figura 17. Operación del CCM.

2.7 Evaluación del trabajo de cementación

La evaluación del proceso de cementación es necesaria a fin de determinar diversos aspectos en el fondo del pozo, la cual proporciona el estado de la adherencia de la lechada entre formación y tubería de revestimiento. Un programa de evaluación del cemento no solo determina la calidad de la operación o la necesidad de reparar trabajos de cementación, si no también analizar la causa de fallas.

Cuando un trabajo de cementación falla puede ser por las siguientes condiciones :

- El cemento no llena el espacio anular a la altura requerida.
- El cemento no provee sellado en la zapata.
- El cemento no aísla formaciones indeseables.

La evaluación se realiza con diversas herramientas y depende de lo que se requiere evaluar, los cuales se explican a continuación.

2.7.1 Registro CBL-VDL

Es una herramienta sónica que evalúa la adherencia del cemento a tubería (CBL) y formación (VDL). El principio de medición se basa en generar ondas acústicas a travez de un transmisor y dos receptores colocados a 0.9 y 1.5 m del transmisor; a su vez envía un pulso omnidireccional a una frecuencia de 20 kHz, que induce una vibración longitudinal en la tubería de revestimiento. La amplitud de la primera señal positiva (E_1) recibida a 0.9 metros y la onda recibida a 1.5 metros, representan los valores promedio a lo largo de la circunferencia de la tubería de revestimiento; en su caso una tubería bien cementada y presenta una atenuación en la amplitud del primer semiciclo E_1 .

El tiempo de tránsito es el tiempo que tarda la onda en viajar del transmisor al receptor, el cual se usa para control de la calidad de centralización de la herramienta y establecer los parámetros de medición en las diferentes formaciones.

Los registros CBL-VDL proporcionan:

- Evaluación de la calidad del cemento en el revestimiento y formación.
- Evaluación en el valor vertical de la calidad en la adherencia del cemento.

A continuación se indica la presentación del registro CBL-VDL:

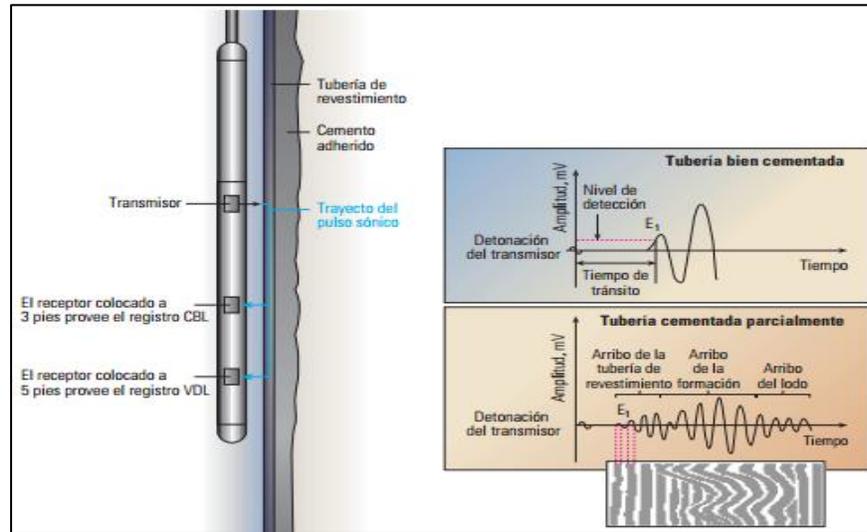


Figura 18. Registro CBL-VDL.

2.7.2 Registro USI

EL registro USI se basa en ondas acústicas que llevan suficiente energía a través de los medios que atraviesan a medida que se alejan de su origen. La herramienta emite una onda ultrasónica en la pared de la tubería de revestimiento a una frecuencia que puede ser de 200-700 kHz, la cual viaja a través del fluido del pozo y llega a la tubería de revestimiento proporcionando 360° de cobertura acimutal, usando un simple transductor rotacional colocado en la parte inferior de la sonda.

El mismo transductor recibe las señales reflejadas provenientes de la cara interna y externa de la tubería, las que decaen y dependen de la impedancia acústica y el material en el espacio anular.

El registro presenta lo siguiente:

- Mapa detallado de la distribución de los materiales sólidos, líquidos, gases, y cemento no adherido.

- Capaz de detectar canales en el cemento.
- La interpretación es más fácil y menos incierta que el registro sónico CBL-VDL.

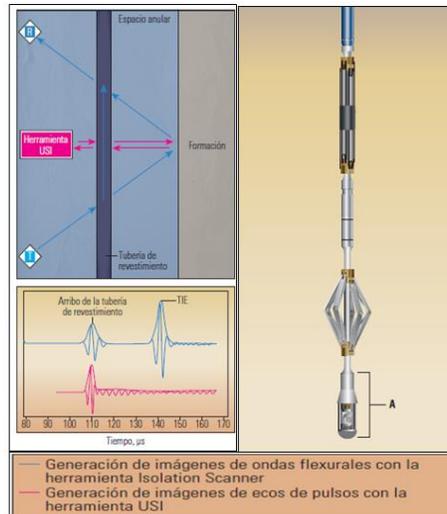


Figura 19. Herramienta USI.

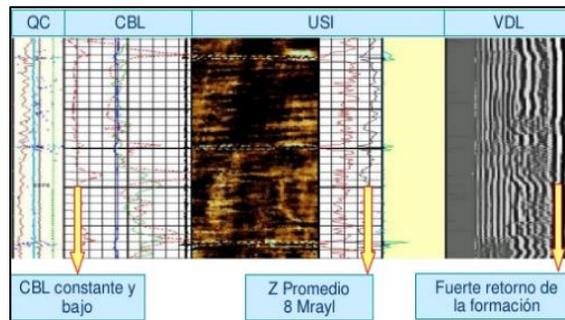


Figura 20. Registro donde se observa una buena cementación con los sistemas CBL-VDL y USI.

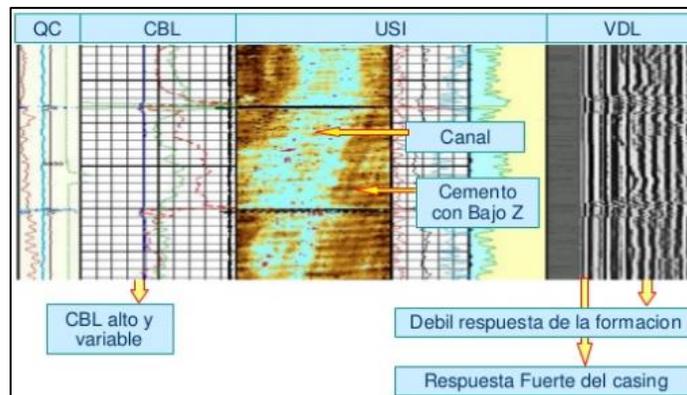


Figura 21. Registros donde se observan canales de lodo y cemento contaminado.

2.8 Importancia de las geopresiones en la cementación de pozos

Las sobrepresiones de una formación es el resultado de efectos diagenéticos de las rocas, estos efectos son los causantes de las presiones de poro y presión de fractura esta última una de las más importantes en la cementación de pozos, dado que si la lechada de cemento es mayor que la densidad de formación se puede fracturar, y por ende provocar pérdidas de circulación, algunos de los efectos que crean estas geopresiones son:

- Efecto de compactación.
- Propiedad de las arcillas.
- Efecto diagenéticos.
- Efecto de migración de fluidos.
- Movimiento tectónico.
- Expansión térmica del agua y los hidrocarburos.

Se menciona que cualquier mecanismo que sea capaz de atrapar fluidos de formación y que no los deje salir de la misma, a medida que la sobrecarga aumenta, tiene la capacidad potencial de formar Geopresiones. A continuación, se muestran los tipos de presiones:

Presión hidrostática: Es causada por el peso de una columna de fluido en reposo sobre una unidad de área.

Presión de sobrecarga (s): Es la presión de sobrecarga originada por el peso de los fluidos y rocas suprayacentes al punto de interés y se calcula a partir de la densidad combinada de la matriz rocosa y de los fluidos en los espacios porosos.

Presión de formación o de poro: Es la presión natural, originada por los procesos geológicos de depositación y compactación, a la que se encuentran sometidos los fluidos contenidos en los espacios porosos de la formación. Es la presión a la cual se le debe tener más atención y de las tres la más importante ya que de esta depende la

seguridad del personal, del entorno ecológico y de las instalaciones ya que está ligada directamente con el brote y el descontrol de pozos. La presión de poro se divide en:

Presión normal: se refiere a la presión que no varía de acuerdo a su tendencia normal de compactación, es decir, que es igual a la presión hidrostática ejercida por una columna de fluidos, teniendo un gradiente de 1.03 gr/cc.

Presión anormal: la presión anormal es una condición del subsuelo donde la presión de poro de una formación geológica excede o es menor que una presión normal.

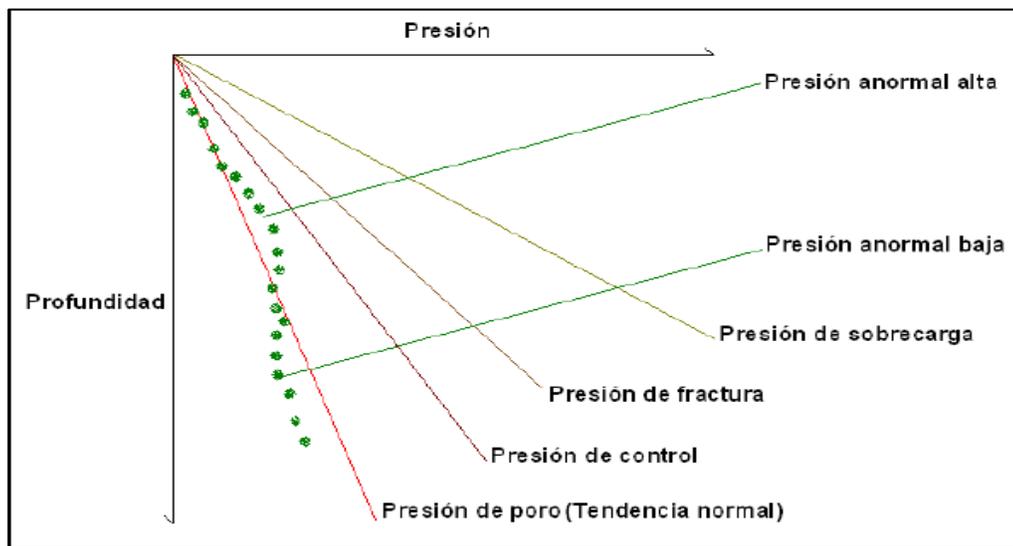


Figura 22. Tipos de geopresiones.

Presión de fractura: La presión de fractura es la cantidad de presión necesaria para deformar permanentemente la estructura rocosa de la formación.

En la perforación de pozos es importante resaltar que se debe evitar estar por encima de la presión de fractura, y en dado caso, se genera una pérdida de fluido y con ello la disminución de la columna hidrostática necesaria para controlar el pozo derivando así un brote o un descontrol del mismo. Para la determinación del gradiente real de fractura se tiene dos métodos, los cuales se detallan a continuación:

Prueba de goteo (LOT): Se bombea fluido a bajo gasto contra la pared de la formación, para crear una trayectoria de inyección de fluido en la roca; lo que indica, la presión de ruptura de la formación, la finalidad de este proceso es determinar el gradiente de fractura en la zapata de la tubería de revestimiento y probar el trabajo de cementación realizado, a fin de asegura que no existe comunicación con la superficie y determinar la máxima densidad posible en esa sección.

Prueba de Integridad de la Formación (FIT): Comienza presurizando la columna de fluido hasta un límite establecido que indica una presión hidrostática de densidad equivalente, hasta la cual el fluido no entra en la formación ni la rompe.

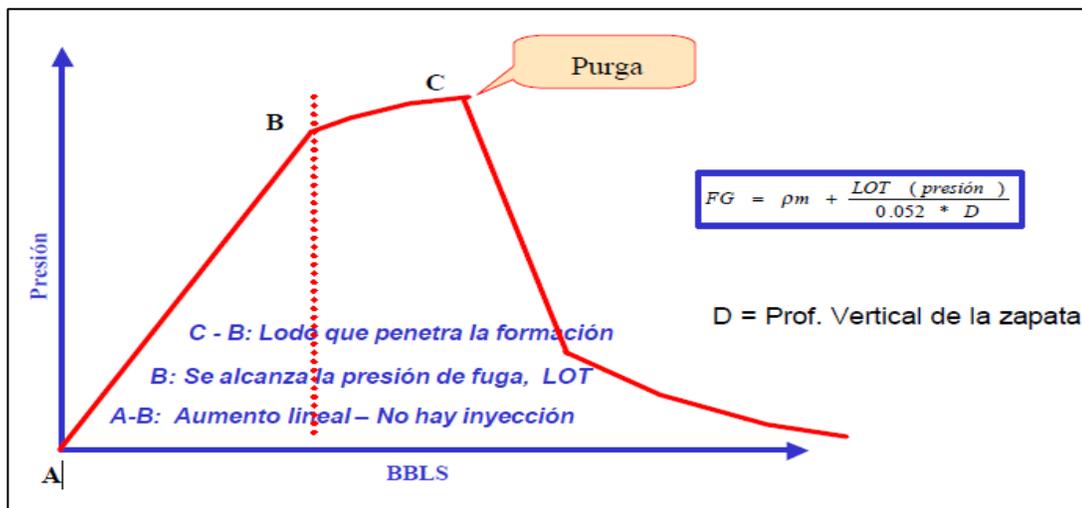


Figura 23. Prueba de goteo.

A continuación, se muestra el procedimiento para realizar una prueba de goteo:



Figura 24. Procedimiento para una prueba de goteo.

CAPÍTULO III.- ACCESORIOS DE CEMENTACIÓN

3.1 Concepto de equipos superficiales de cementación

Los equipos superficiales normalmente utilizados en las operaciones de una cementación debe cumplir con las especificaciones y requerimientos para los problemas que se tengan en los diferentes pozos, ya sea en tierra o en aguas profundas, estos equipos se encuentran en el exterior y su principal función es bombear y tener una línea de descarga para la unidad de alta presión.

Por lo tanto los equipos superficiales son:

- Cabeza de cementación.
- Unidad de cementación.

3.1.1 Cabeza de cementación

Este dispositivo se conecta directamente a la línea de descarga de la unidad de cemento en la parte superior de la tubería de revestimiento, es decir, a un niple de longitud y diámetro variable que va enroscado en la parte superior de la TR, cuenta con dispositivos laterales para conectar las líneas que conducen hacia la lechada proveniente de la unidad de alta presión y el lodo para el desplazamiento de la lechada de cemento.

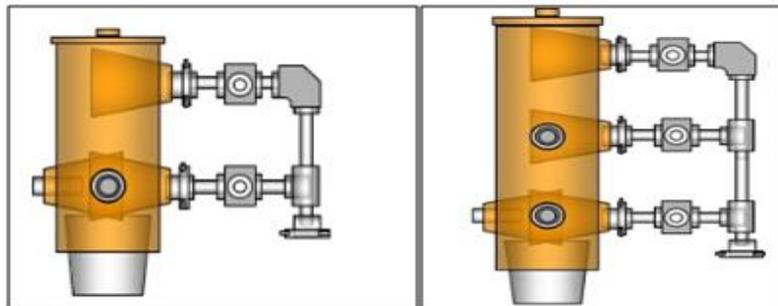


Figura 25. Cabeza de cementar para alojar uno o dos tapones.

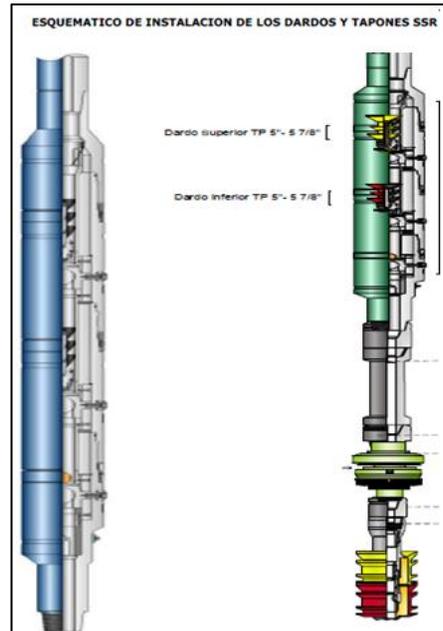


Figura 26. Cabeza de cementación para alojar dardos y sistema subsea en Aguas Profundas

3.1.2 Unidad de alta presión

La unidad de alta presión se encarga de mezclar el cemento con agua y aditivos que se requieran, proporcionando un continuo suministro de lechada con las propiedades que se desean, posteriormente se bombea al pozo.

Este equipo tiene dos bombas de alta potencia con un tablero de control y dos depósitos donde se mide el nivel de agua utilizado durante la cementación.



Figura 27. Unidad de alta presión utilizada en plataformas marinas.



Figura 28. Unidad de alta presión en tierra.

3.2 Equipo de flotación y accesorios

El diseño de una cementación implica la selección de los accesorios principales que forman parte de una tubería a cementar, los accesorios subsuperficiales que deben considerarse son los siguientes:

1. Zapata
2. Cople
3. Centradores
4. Tapones de desplazamiento

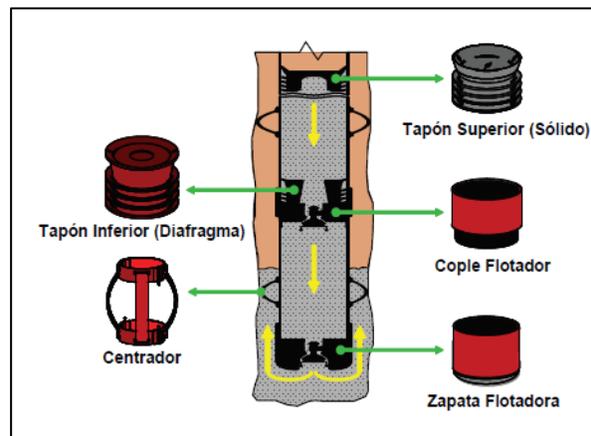


Figura 29. Accesorios para una cementación de pozos.

Zapata Guía: Este accesorio tiene la función de asegurar que la tubería de revestimiento, sea introducida de forma sencilla al pozo evitando que se atasque en zonas lavadas o pozos desviados, tiene una nariz redonda que guía a la tubería a través de resistencias.

Zapata flotadora: Estos equipos tienen integrada una válvula de contrapresión que evita la entrada de fluidos del pozo al interior de la tubería, pero permite el paso a través de ella. El equipo de flotación se utiliza para reducir esfuerzos en el mástil del equipo de perforación.

Zapatas diferenciales: Estos accesorios se diseñan a fin de ser llenados automáticamente y regular el nivel de fluido en el interior de la tubería. Este tipo de equipos se usa cuando las tuberías son largas con objeto de reducir el efecto de daño a la formación, ahorrar tiempo de introducción y reduce la posibilidad de pegaduras.

Zapata especiales: Este tipo de zapata tiene la función de guiar la tubería y tiene objetivos adicionales, tal como la zapata rimadora la cual está equipada con un área que le permite repasar (rimar) el agujero y la zapata perforadora necesaria para perforar un intervalo de 50 hasta 150 m con el objetivo de ganar gradiente en el asentamiento de la TR.

Se utilizan principalmente cuando por problemas operativos del pozo (pérdida de circulación, inlfujos e inestabilidad del pozo), no se logra llegar a la profundidad deseada o programada de una etapa.

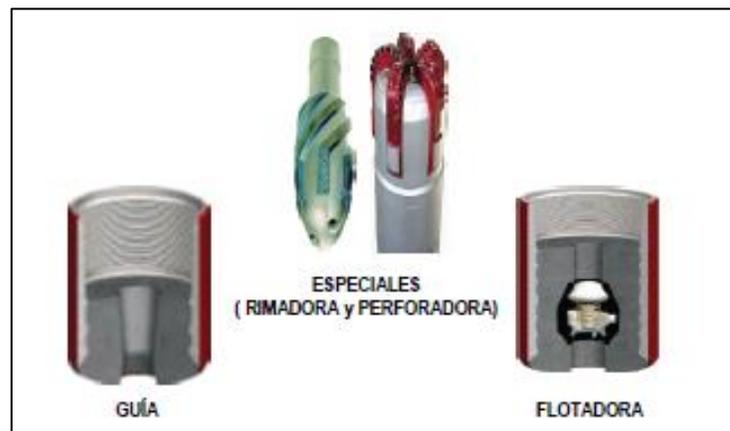


Figura 30. Principales zapatas que se utilizan en el proceso de cementación.

Cople: El cople es un accesorios, que se utiliza para proporcionar un asentamiento para los tapones de cemento, generalmente se instalan de 2 a 3 tramos arriba de la zapata para proporcionar un espacio suficiente en la tubería y que quede atrapado el cemento. El cople tiene las mismas características que la zapata, es flotadora o diferencial o retención. En algunas operaciones de cementación se propone usar zapata y cople flotador por la incertidumbre de que alguna válvula falle.

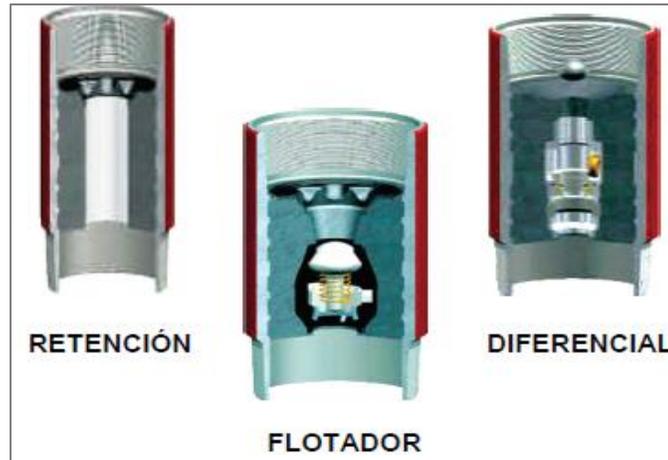


Figura 31. Cople flotador, diferencial y de retención.

Centradores: Una de las grandes necesidades en las operaciones de cementación es una correcta centralización de la tubería de revestimiento que se va a cementar, los centradores reducen el atascamiento por arrastre y pegadura por presión diferencial durante el proceso, mejora la excentricidad de la tubería optimizando la colocación de la lechada de cemento creando una pared de espesor más uniforme y hace que la cementación sea más segura y de mayor calidad.

Centrador flexible: Este tipo de centralizador es uno de los más comunes y se utiliza en pozos verticales y de bajo ángulo (menor a 45° de inclinación), la principal ventaja es que puede usarse en pozos con diámetros fuera de especificaciones y todavía crear una buena área de flujo.

Centrador sólido: La principal función de este centrador es soportar el peso de la tubería sin ocasionar deformaciones o cambios de posición. Así como proporcionar una distribución de la lechada alrededor de la tubería, principalmente en zonas de interés.



Figura 32. Centradores flexibles y sólidos.

Tapones: Los tapones de cemento son barreras semirrígidas o separadores mecánicos usados a fin de separar el cemento del fluido de perforación y/o baches, limpian la tubería e indican cuando el desplazamiento ha terminado. Existen dos tipos tapones; el superior (sólido) y el inferior (diafragma).

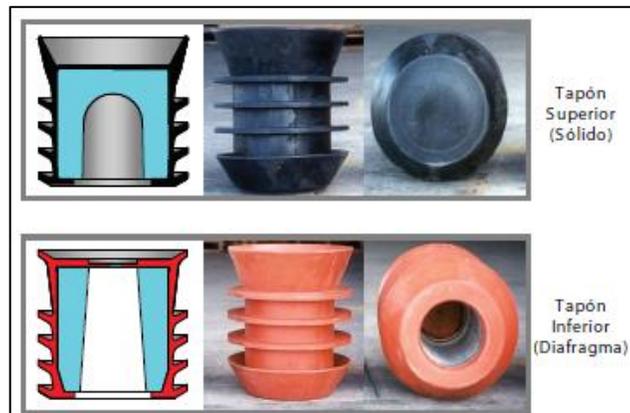


Figura 33. Tapones de cemento.

Aunque son similares en su apariencia los tapones superiores e inferiores difieren considerablemente en su diseño interno y operación, el tapón de diafragma entra en la tubería de revestimiento por delante de la lechada de cemento, sus escobillas de goma barren el lodo y sólidos de la pared de la tubería de revestimiento manteniendo siempre delante del tapón.

Se recomienda utilizar el tapón de fondo en la mayoría de las cementaciones primarias excepto cuando se utilizan materiales de pérdida de circulación junto con el cemento. Cuando el tapón de cemento llega al cople de flotación, la presión diferencial entre el interior de la tubería de revestimiento y el espacio anular rompe el diafragma que hay en la parte superior del tapón, permitiendo que la lechada circule fuera de la zapata y hacia arriba del espacio anular.

El tapón superior o sólido se bombea antes del fluido de desplazamiento, luego de bombear la lechada, evita que el fluido forme canalizaciones a través de la misma, al llegar a la parte superior del tapón de fondo (bombeado anteriormente), se forma un sello, la presión aumenta lo que indica que la operación ha terminado (presión final). En una operación con equipo flotante (barcos perforadores, plataformas semisumergible) los tapones que se emplean son de liberación subsuperficial, el que se muestra en la siguiente figura:

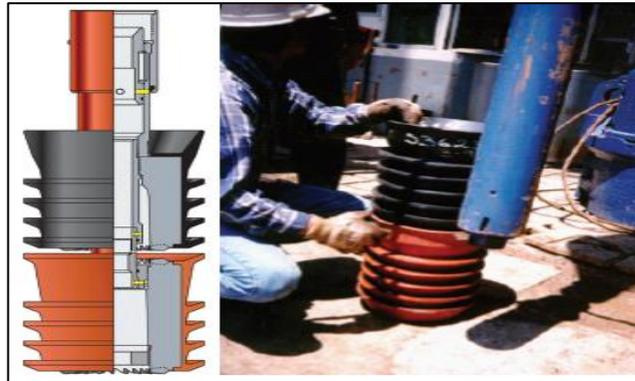


Figura 34. Sistemas de tapones liberación subsuperficial (empleados en equipos flotantes)

CAPÍTULO IV.- POZOS EN AGUAS PROFUNDAS

Se tienen antecedentes de que la primera perforación de pozos en aguas profundas fue cerca del año 1950, en esta operación realizada costa afuera se dio el nombre por primera vez a un pozo de aguas profundas. En México, la empresa Petróleos Mexicanos, denomina aguas profundas a los pozos que se perforan en un tirante de agua comprendido del lecho marino a la superficie cuya longitud es de 500 a 1500 metros, las longitudes mayores a 1500 mts. Reciben el nombre de aguas ultra profundas.

Debido al incremento en la demanda de hidrocarburos y a la rápida declinación de los pozos terrestres, los pozos ubicados en aguas profundas tienen una gran importancia para el futuro de la industria petrolera en México. La construcción de pozos con estas características presenta nuevos retos que obligan a la industria a implementar nuevas tecnologías y a perfeccionar las técnicas ya establecidas.

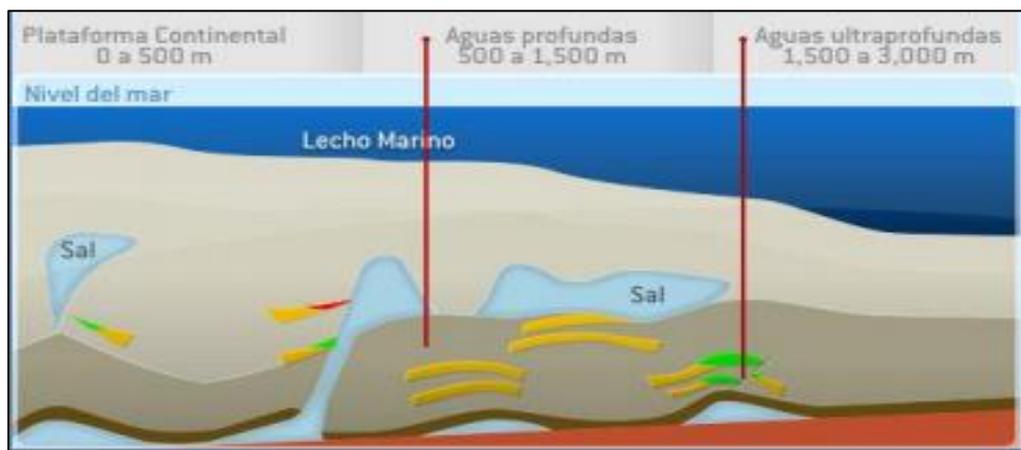


Figura 35. Representación gráfica de aguas profundas.

Las aguas territoriales en el Golfo de México se conforman por una extensión de 575,000 km², dividido en 5 sectores:

1. Perdido.
2. Lamprea profundo.
3. Lankahuasa profundo.
4. Coatzacoalcos profundo.
5. Campeche profundo.

Al norte limitan con aguas territoriales de los estados unidos de Norteamérica y al oriente con aguas territoriales de Cuba. Los yacimientos potenciales en aguas profundas se localizan en el subsuelo entre 500 y 3000 metros de tirantes de agua.



Figura 36. Sectores de pozos en aguas profundas en México.

4.1 Cementación de tubería riserless

4.1.1 Concepto de riserless

Una sección riserless es una técnica que se lleva a cabo en pozos de aguas profundas cuando una plataforma fija o auto elevable está limitada a cierta profundidad y no puede anclarse al lecho marino. En este caso, se utilizan plataformas semisumergible que cuentan con un posicionamiento dinámico, que ayuda a que la plataforma se mantenga estable y se pueda hacer la operación de perforación y terminación de pozos.

Riserless es una técnica en la cual se cementa una tubería de revestimiento superficial mayor a 125 metros de tirante de agua, en la que el proceso deberá ser posterior al jetteo de la TR de 36" o 30". Enseguida, se sube la sarta y se cambia para perforar hasta la etapa programada con la técnica pump and dump, para así obtener la densidad equivalente requerida según el programa de perforación elaborado por los ingenieros de diseño. Posteriormente, se eleva la sarta de perforación y se cambia para bajar la TR 28", 22" o 20" dependiendo del cabezal que se esté ocupando; se baja con la tubería de perforación y se cementa bajo la técnica de inner string.

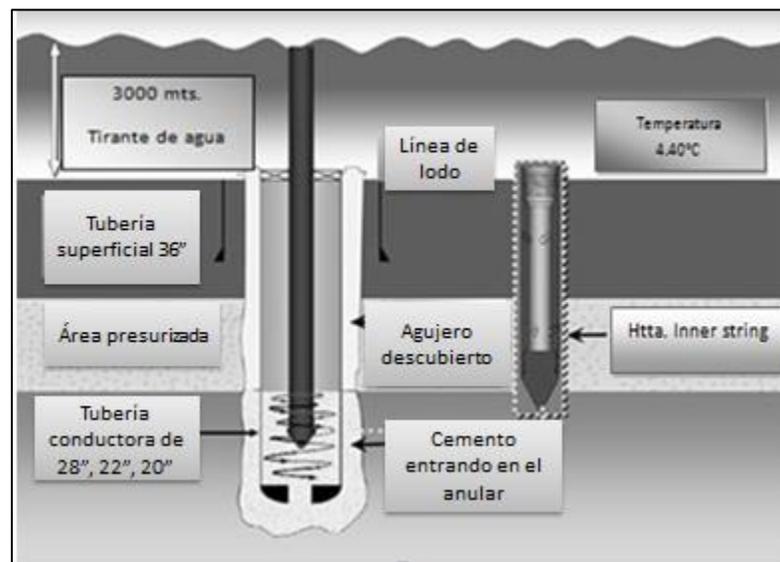


Figura 37. Cementación con herramienta inner string.

4.2 Objetivos de una cementación riserless

Los avances tecnológicos ayudan a evitar los problemas que se presentan en las operaciones de cementación de pozos en aguas profundas. A continuación, se enlistan los objetivos más importantes de la cementación riserless:

1. Proveer soporte estructural.
2. Resistencia al pandeo y desgaste de la TR.
3. Proporcionar base para la colocación de tuberías de revestimiento.
4. Obtener un sello hidráulico eficiente.
5. Evitar la migración de fluidos detrás de la tubería de revestimiento.
6. Sello hidráulico en zonas de migración somera.

Algunos de los requerimientos fundamentales para que los objetivos mencionados con anterioridad se cumplan dependen de las excelentes propiedades mecánicas combinadas con cemento de baja densidad (en formaciones débiles); así como mejorar las condiciones de hidratación del cemento a bajas temperaturas y adecuar el control de migración del gas.

4.3 Equipos y técnicas de cementación empleados en aguas profundas

Los equipos que se utilizan en la cementación de aguas profundas son los siguientes.

4.3.1 Plataforma semisumergible

Son consideradas como el equipo de perforación en aguas profundas más versátil. Ya que combina las ventajas de un equipo sumergible con la capacidad de perforar en tirantes de agua de más de 3000 metros, en la cubierta principal se localiza el equipo de perforación y área de almacenamiento de tuberías y riser, también cuenta con un moon pool que es el área donde se almacenan los preventores submarinos. La estabilidad de la plataforma se obtiene por posicionamiento dinámico, lo que le permite navegar y realizar los trabajos de perforación y cementación del pozo.



Figura 38. Barco perforador especializado.



Figura 39. Plataforma Semisumergible.

4.3.2 ROV (Remote Operated Vehicle)

Es un robot submarino no tripulado y conectado a una unidad de control en la superficie por medio de cable umbilical. La energía y las órdenes se envían mediante un mando de control a través del cable al ROV. El ROV puede llevar una gran variedad de brazos manipuladores, herramientas y sensores para realizar trabajos en las profundidades, o simplemente una cámara de video con el fin de captar las imágenes del fondo del mar.

Esta herramienta es de gran importancia en una cementación riserless en aguas profundas porque es la única forma de visualizar el momento en que la lechada de cemento sale al lecho marina y el retorno constante de fluidos durante toda la operación de cementación riserless.



Figura 40. ROV (remote operated vehicle).

4.3.3 Tuberías de revestimiento para sección riserless y cabezales

En una sección riserless la tubería de revestimiento por usar se elige y depende del cabezal programado, basado en la información de diseño proporcionada por el VCD (visualización, conceptualización, diseño).

En aguas profundas y ultra profundas del Golfo de México, los sistemas que actualmente están siendo utilizados para trabajar en tirantes de agua de hasta 3000 metros son los cabezales Vetco gray denominados SMS 700 y SMS 800, estas herramientas tienen las características de cumplir con los requerimientos de geometría de pozo y resistencia a la presión interna.

Si se programó el cabezal SMS 700 solo se tiene la opción de ocupar una TR de 20", por otro lado si el cabezal a utilizar es el SMS 800 se tiene dos opciones, TR 28" y TR 22", las cuales en la sección riserless son los arreglos más comunes. En la tabla que se indica a continuación se tienen las características de las tuberías de revestimiento para zonas superficiales de pozos en aguas profundas y ultra profundas.

Diámetro externo. OD[in]	Diámetro interno. ID [in]	Grado de tubería	Presión de cedencia interna [psi]	Presión de colapso [psi]
TR 36"	32"	X-65	6320	5560
TR 36"	33"	X-56	4080	2690
TR 28"	26.5"	X-56	2630	950
TR 22"	20"	X-80	6360	3870
TR 20"	18.73"	K-55	1500	3060

Tabla 2. Características de las tuberías de revestimiento usadas en secciones superficiales riserless.

4.3.4 Características del cabezal SMS 700

El cabezal SMS 700 cuenta con una resistencia a doblamiento de 4 millones de libras, con una capacidad de carga de 7 millones de libras, el diámetro exterior del cabezal es de 27" y es capaz de resistir 15000 psi.

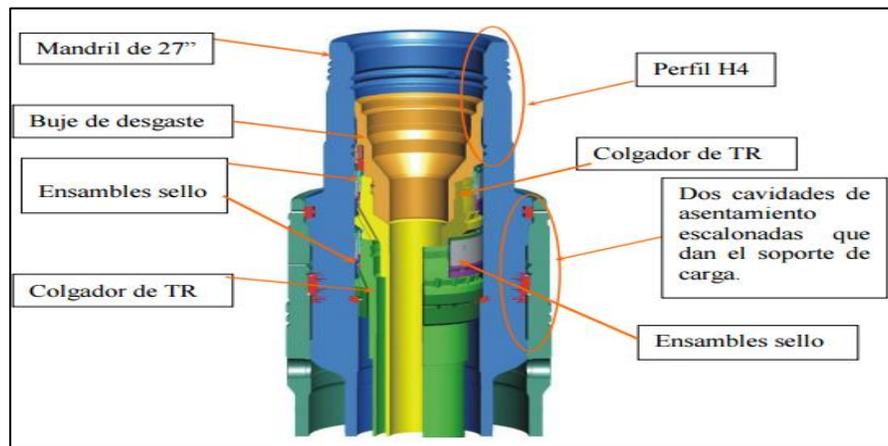


Figura 41. Cabezal SMS 700 Vetco gray.

4.3.4 Características del cabezal SMS 800

El cabezal SMS cuenta con una resistencia al doblamiento de 7 millones de libras, con una capacidad de carga certificada de 8 millones de libras, diámetro exterior de 30" y es capaz de resistir 15000 psi.

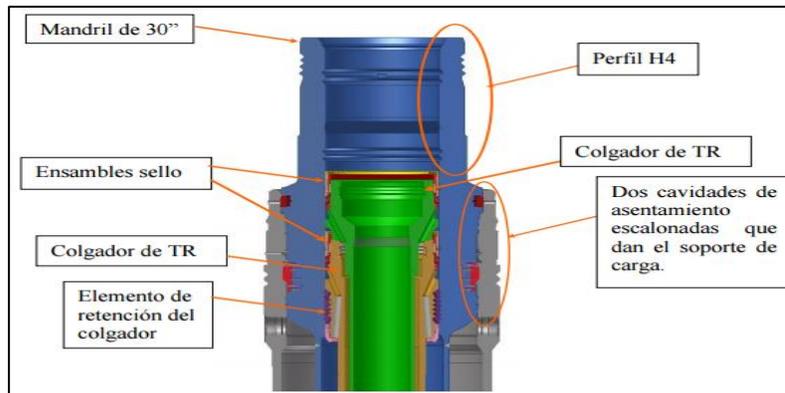


Figura 42. Cabezal SMS 800 Vetco gray.

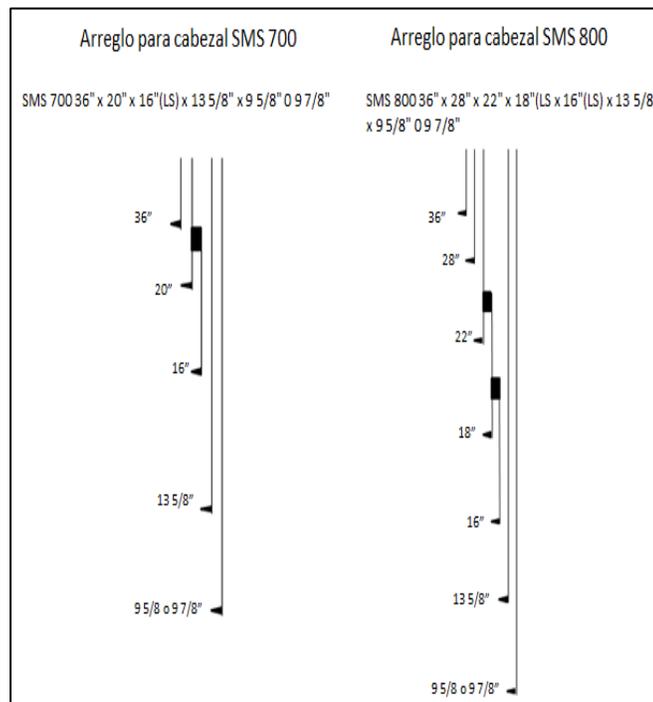


Figura 43. Arreglo de tuberías de revestimiento con cabezales SMS 700 y SMS800.

4.3.5 Inner string

Es una sarta convencional, armada con tubería de perforación que se introduce dentro de las tuberías de revestimiento de gran diámetro a fin de cementar pozos de aguas profundas y ultra profundas. Este procedimiento consta de bajar la tubería de revestimiento junto con la tubería de perforación por el interior de la misma hasta la profundidad programada, el cual reduce el tiempo de cementación y el volumen de cemento en la etapa.

La técnica utiliza zapatas flotadoras o zapata guía, con adaptadores de sellado, la tubería de perforación debe de estar equipada con una válvula de contrapresión o con un deflector de cierre, para que el equipo inner string pueda desengancharse y retirarse de la de la tubería de revestimiento tan pronto como la cementación de la etapa haya finalizado. Sus principales ventajas son:

- Ahorro potencial de costos comparando con una cementación convencional.
- Bajo tiempo operativo por el bajo volumen de desplazamiento. Ahorro de tiempo de plataforma.
- Al bombear a través del inner string el resultado de la contaminación del cemento por canalización se reduce.
- Reduce la cantidad de cemento que tiene que ser perforado fuera del diámetro y a lo largo de la tubería de revestimiento.

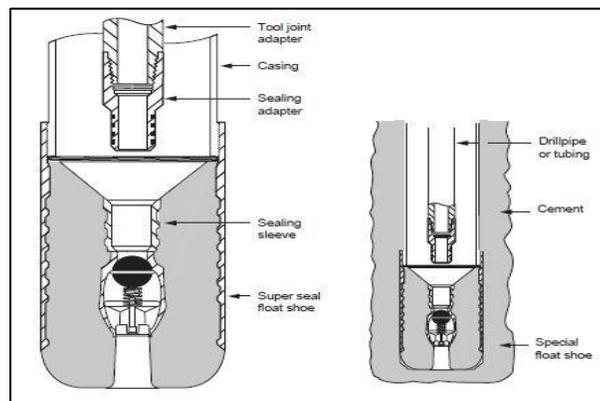


Figura 44. Inner string.

4.3.6 Técnica Pump and Dump

El método de perforación sin riser o conocido como pump and dump, se utiliza principalmente para perforar las primeras etapas de un pozo en aguas profundas. Este método no emplea un BOP ni un sistema de retorno de flujo a superficie, simplemente se efectúa la perforación con el uso de un fluido, el cual puede ser de agua mar y un lodo base agua de alta densidad, el cual es preparado y bombeado con el equipo mixing on the fly.

La técnica pump and dump es importante previo en una cementación de pozos en aguas profundas, debido a que se debe tener en cuenta la densidad del lodo pesado con la que fue terminada la etapa, lo anterior considerando el tipo de lechada que se tiene abordo.

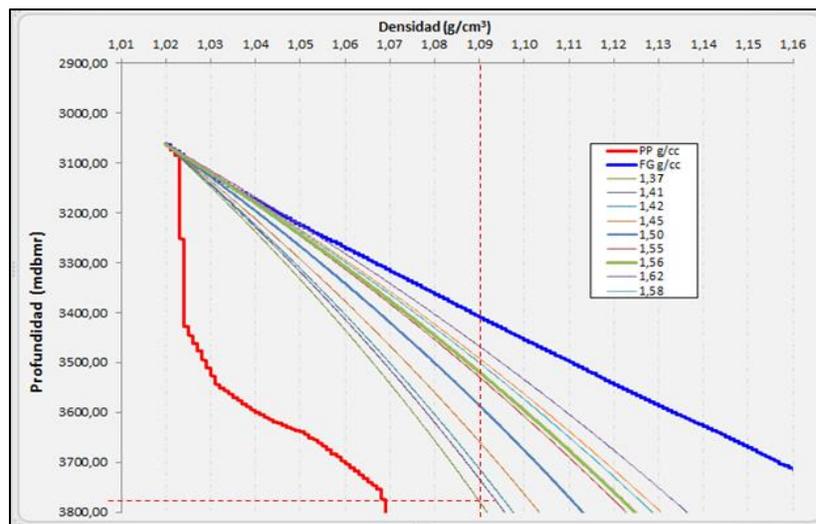


Figura 45. Perfil de presión del método Pump and Dump.

Mixing on the fly: Es un equipo de mezclado que se usa cuando se perfora en zonas superficiales (riserless) en aguas profundas. Este equipo de perforación requiere de grandes volúmenes de agua de mar, lo cual no suele ser un problema por la localización del pozo, el equipo mixing on the fly es de fácil instalación y su principal función es que puede mezclar un fluido de alta densidad con agua de mar a gastos de hasta 2000 gpm. Para proporcionar una mezcla consistente y densidad equivalente de lodo requerida para controlar el pozo.



Figura 46. Mixing on the fly.

4.3.7 Centralización de la tubería de revestimiento

La centralización en una tubería mejora la eficiencia de desplazamiento y por lo tanto, la calidad de la cementación. La condición de centralización se determina mediante el standoff, el cual se relaciona a la excentricidad de la TR dentro del poz. La colocación de centradores considera un buen standoff en las zonas susceptibles a pegaduras por presión diferencial (zonas permeables) y severidad del pozo (patas de perro) o irregularidades.

La experiencia en la práctica demuestra que un standoff con valor entre el 75-100% es adecuado. A fin de determinar la cantidad óptima de centradores se recomienda el uso de un simulador. Sin embargo, la recomendación para el uso de centradores en caso de no tener un simulador son:

- Usar centradores rígidos entre tubería y cabezal.
- En tubería superficial, colocar uno arriba de la zapata y uno por junta en el fondo, y después cada 2 a 4 juntas dependiendo de la profundidad.
- En tuberías intermedias, colocar centradores igual que en las superficiales. En caso de que existan patas de perro, condiciones de inestabilidad o formaciones irregulares, solo colocarlo entre tuberías.
- Para tuberías de producción, se recomienda emplear centradores integrales arriba y debajo de los intervalos de interés.
- Los centradores de flejes deben usarse en agujeros estables y entre tuberías.

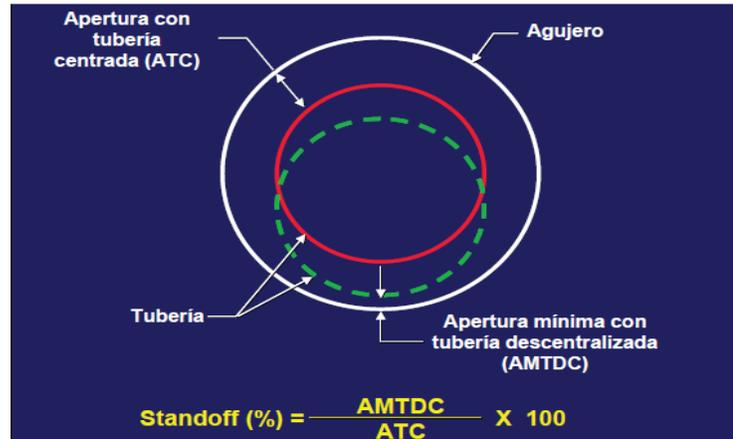


Figura 47. Centralización (% standoff).

4.4 Retos de una cementación riserless en aguas profundas

Los principales retos en una cementación riserless de aguas profundas son los flujos someros de agua o gas que ocurren en zonas de rápida sedimentación, formaciones sobre presurizadas y formaciones débiles. Estos riesgos se detectan mediante datos sísmicos y mediciones en tiempo real durante la perforación.

Aunque la gran base de datos que se tiene de los pozos de correlación de aguas profundas en las regiones del Golfo de México, ha conducido a predicciones más confiables. La cementación en aguas profundas es uno de los retos técnicos y logísticos más importantes del proceso de construcción de pozos. Es una operación clave para diseñar y construir pozos más eficientes.

Los retos técnicos más importantes en una cementación riserless de pozos en aguas profundas son:

- Ventanas operativas estrechas.
- Riesgos de flujo somero de agua y gas.
- Hidratos de gas.
- Bajas temperaturas.

4.4.1 Bajo gradiente

La ventana operativa de pozos en aguas profundas se reducen en comparación con las de pozos terrestres, esto se debe a la sobrecarga del tirante de agua y formaciones no consolidadas. En realidad el tirante de agua puede ser mayor que la profundidad del yacimiento con respecto al fondo marino, por esta razón el gradiente aparente disminuye desde el punto de vista operativo.

Una reducción del gradiente de fractura tiende a incrementar los problemas de pérdida de circulación, reventones, pegaduras de tubería, inestabilidad del pozo y costos excesivos. Para evitar este problema se utiliza lodo y combinación de sistemas de lechadas (alta y baja densidad) para que se pueda cumplir satisfactoriamente en la zona de interés.



Figura 48. Ventana de operativa en aguas profundas.

4.4.2 Riesgos de flujo somero

Los riesgos de flujo somero (agua y/o gas) son un gran riesgo. El problema consiste en la presencia de arena no consolidada y altamente permeable entre 100 y 1650 metros debajo del lecho marino. Después de la cementación, el proceso de fraguado del cemento presenta un reto a condiciones de profundidad, donde la temperatura de lechada de cemento varía desde la superficie donde se mezcla hasta su objetivo final.

Una falla en el control del flujo puede tener graves consecuencias, los costos económicos van desde 100,000 dólares, en el caso de una cementación forzada, hasta la pérdida total del pozo y de millones de dólares de inversión.

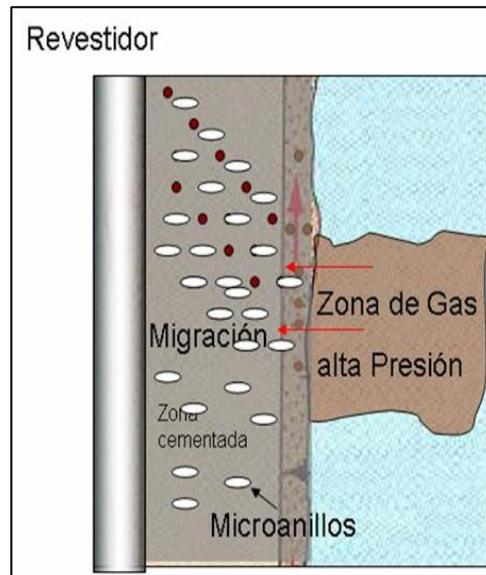


Figura 49. Representación de flujos somero.

4.4.3 Hidratos de gas

Los hidratos de gas son compuestos químicos sólidos cristalinos que ocurren de manera natural y está formado por agua en forma de hielo y una molécula huésped de gas, generalmente metano. Todos los gases, a excepción del helio, neón e hidrógeno generan hidratos, estos compuestos se forman a baja temperatura y alta presión.

Se identificó que en aguas profundas, existen los parámetros necesarios para la formación de hidratos de gas con temperaturas de 0 a 16 °C correspondiente a profundidades que van de 1200 a 1500 metros.

Cuando se perfora, y por ende circula el fluido de perforación, este ocasiona un aumento de temperatura en los sedimentos debido a la fricción y la velocidad con que se circula, al provocar que los hidratos alojados en la formación se desestabilicen y liberen gas; este modifica las propiedades del fluido de perforación alterando sus características para el que fue diseñado, al ocasionarse que no se cumplan con los requerimientos que demanda y verse en la necesidad de estar monitoreando las

propiedades del fluido e ir dosificando las cantidades de químicos necesarios para controlar sus propiedades del mismo; así entonces, se verá alterada la construcción del pozo al generar cavernas por la disociación de hidratos y con el riesgo de un posible derrumbe.

En algunos casos, durante la cementación de la tubería de revestimiento, se puede complicar si se tiene identificado la zona a cementar se tiene la presencia de hidratos, por lo tanto se debe considerar que el fraguado del cemento actúa como desestabilizador de hidratos; debido a que éste libera calor y actúa como disociador de los hidratos de los cuales se liberara gas. Este gas transita a través del cemento no fraguado al tener como resultado gas atrapado y re-presionado en la columna de cemento reflejando una discontinuidad en la solidez de la cementación ocasionando fracturas y baja estabilidad del cemento.

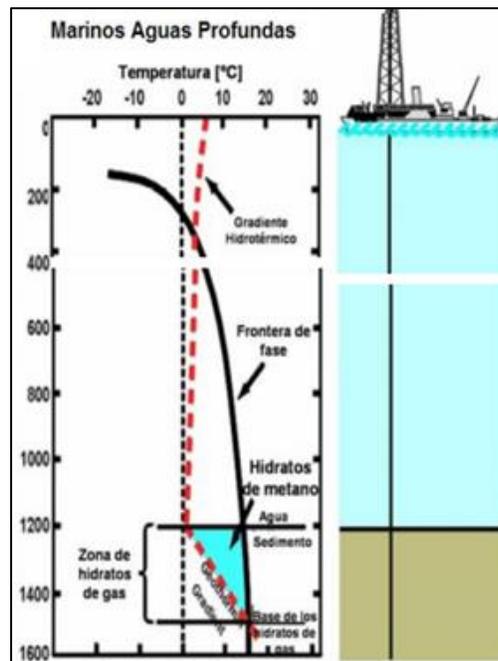


Figura 50. Condiciones a las que se forma un hidrato de gas.



Figura 51. Hidrato de metano.

4.5 Diseño de una cementación riserless

Para garantizar un diseño adecuado de la cementación de una tubería riserless, posterior a la operación se debe garantizar soporte estructural y aislamiento de influjos de agua o gas de la sección somera. Para esto es necesario contar con la sig. Información:

- Estudio de riesgos someros.
- Perfil de geopresiones.
- Características de la lechada a utilizar.
- Verificar la simulación hidráulica de la cementación.
- Cálculos previos de la operación de la cementación.

4.5.1 Estudio de riesgos someros

En la seccione riserless se tiene que tener cierta consideración, para la planeación del asentamiento de la tubería de revestimiento con el estudio de riesgos someros, ya que se encuentra en zonas superficiales, y en las cuales se puede tener un problema de influjo de aceite, agua, gas.

Estos problemas generan que la tubería de revestimiento se asiente por arriba o por debajo de ellos, lo que afecta el volumen de la lechada a utilizar y no llegar a la profundidad programada.

Los riegos someros se clasifican en altos, medios y bajos, los cuales se muestran a continuación:

1. En caso de que el estudio de riesgos someros indique que existe la posibilidad de un riesgo somero moderado, la tubería debe asentarse a una profundidad menor de la ubicación a este riesgo somero.

Este asentamiento debe considerar el cálculo de tolerancia a brote en la perforación de la siguiente etapa.

Al terminar la etapa superficial, la siguiente etapa se debe perforar con preventores submarinos (BOP's) instalados y probados.

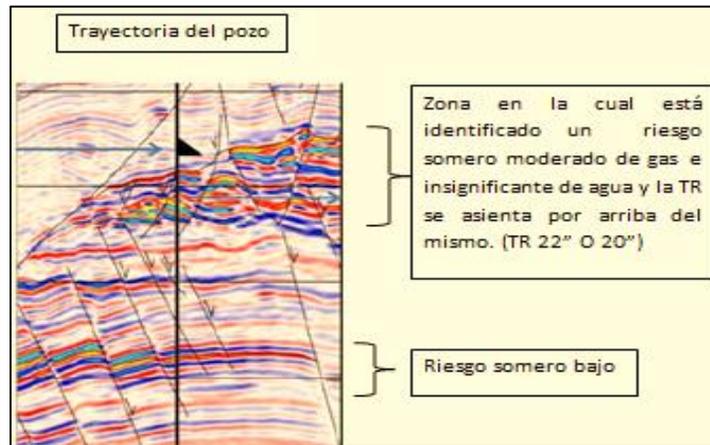


Figura 52. Ejemplo de asentamiento de a TR con riesgo somero moderado identificado escenario 1.

2. Cuando existe un riesgo somero bajo o insignificante y en el cual la presión estimada de formación pueda ser controlada con la técnica pum and dump, la tubería puede cubrir este riesgo somero con la finalidad de incrementar la profundidad de asentamiento de la TR. Con esto se debe tener en cuenta que el gradiente de fractura se incrementa y se asegura alcanzar los objetivos.



Figura 53. Ejemplo de asentamiento con riesgo bajo, bajando la TR a mayor profundidad.

3. En caso de que se tenga un riesgo somero alto, se debe asentar la TR superficial por encima de este riesgo y en caso de que no sea posible, se debe mover la localización y realizar un pozo vertical, de no poder alcanzar los objetivos programados se moverá nuevamente la localización y se realiza un pozo direccional en el objetivo principal del pozo,

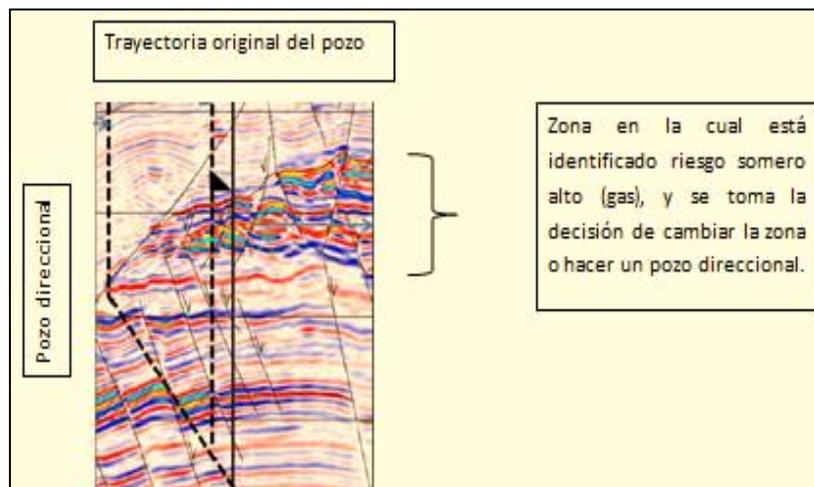


Figura 54. Ejemplo de asentamiento con riesgo alto, y propuestas de cambiar la localización del pozo o hacer un pozo direccional.

4.5.2 Características de la lechada de cemento

Para la cementación de tuberías de revestimiento superficial sin riser se recomienda usar dos tipos de lechadas:

1. Lechada de llenado.
2. Lechada de amarre.

Lechada de llenado: En este tipo de pozos donde la ventana de operación se reduce se recomienda utilizar lechadas ligeras, las cuales pueden ser:

- Espumadas.
- Cemento ligero con micro esferas.

Las lechadas extendidas comúnmente usadas en tierra quedan descartadas por su baja resistencia compresiva por no aguantar el peso de los preventores submarinos. La selección del tipo de lechada de llenado depende de las características específicas de cada pozo así como de materiales y equipo disponible para la ejecución de trabajo de la cementación y se debe considerar las siguientes ventajas y desventajas de cada una de las técnicas.

Lechadas espumadas: Es una mezcla compuesta de cemento, agente espumante y gas inerte comúnmente nitrógeno. Son lechadas de cemento de baja densidad que se aplica en pozos con bajo gradiente de fractura y yacimientos depresionados. Estas lechadas tienen alta eficiencia de desplazamiento del lodo en el espacio anular con baja densidad variable, alta consistencia que ofrece una buena adherencia y aislamiento hidráulico con esto se evita el daño que causa la carga hidrostática. En seguida, se enlistan sus ventajas más importantes:

- Ajuste de la densidad en base a la necesidad del pozo.
- Regular esfuerzo compresivo en relación a la densidad.
- Incrementa la eficiencia de remoción de lodo.
- Bajo calor de hidratación.
- Baja pérdida de filtrado.

- Baja permeabilidad después de haber fraguado.
- La energía de la espuma permite su mejor colocación en el espacio anular.
- Requiere un menor volumen de cemento en plataforma.

A continuación se muestran las desventajas más importantes:

- Variación de la densidad y reologías debido a la compresibilidad del gas.
- Equipo y personal adicional en plataforma (unidad inyectora de nitrógeno, tanques de almacenamiento de nitrógeno, unidad inyectora de espumante).
- Trabajo con precaución debido a que se manejan equipos energizados con un gas inerte (nitrógeno).

Lechada de cemento ligero con micro esferas: Son lechadas de baja densidad no nitrogenadas a partir de la mezcla del cemento con micro esferas huecas de vidrio o porcelana.

La cementación con microesferas de cerámica ayuda a prevenir daños a la formación, corrosión de la tubería de revestimiento e impedir la acumulación de presión detrás de la tubería de revestimiento causada por el flujo de fluidos que se produce cuando se abren canales de migración en la columna de cemento.

Es una lechada que tiene buena adherencia entre cemento y tubería de revestimiento, asegurando la estabilidad del pozo. Entre sus ventajas más importantes destacan las siguientes:

- Superior esfuerzo compresivo en relación a la densidad y comparado con las espumadas.
- Tiempos cortos para el desarrollo de esfuerzos compresivos.
- Bajo calor de hidratación.
- Nula permeabilidad después de haber fraguado.

A continuación se muestran las desventajas más importantes:

- Requiere mayor volumen de cemento en plataforma.

- Limitada variación de la densidad en pozo.
- Alto costo.

Lechada de amarre: Es un sistema de lechada cuya base principal es Cemento H o G, una lechada de amarre se debe utilizar con la principal característica de tener un alto esfuerzo compresivo para asegurar la integridad de la zapata de la tubería a cementar. Se recomienda utilizar densidades de amarre de 1.95 a 2.00 gr/cc.

4.5.3 Realizar o verificar la simulación hidráulica durante la cementación

Se requiere realizar y verificar simulaciones para optimizar el diseño de la cementación, por lo cual las simulaciones que se recomiendan son las siguientes:

- Densidad equivalente de circulación: Buscar que la máxima DEC durante la cementación este dentro de la ventana operativa de Geopresiones.
- Presión de bombeo: Calcular la presión de bombeo máxima y mínima que se observa durante la ejecución de la cementación.
- Centralización: Verificar que el número de centradores se coloquen de acuerdo al diseño y se tenga una centralización adecuada de la tubería (cálculo realizado considerando agujero un agujero de gran magnitud).
- Gasto de trabajo: Buscar una velocidad optima en el espacio anular para lograr la mejor remoción de lodo, así como evaluar gastos de entrada y salida de fluidos y optimizar el gasto de trabajo para minimizar el efecto de caída libre y por último determinar tiempo de operación.
- Perfil de temperatura circulante: Determina el perfil de temperatura dinámica de los fluidos para realizar pruebas de laboratorio.
- Jerarquía reológica de los fluidos: Para asegurar que la presión por fricción del fluido que desplaza sea mayor que la del fluido desplazado, el fluido que desplaza debe tener reologías mayores. Se considera que el punto de cadencia del fluido que desplaza debe ser siempre mayor que el fluido desplazado y verificar que el perfil reológico de los fluidos se mantenga aun cuando se tenga variación de gastos de trabajo y diámetros en el espacio anular.

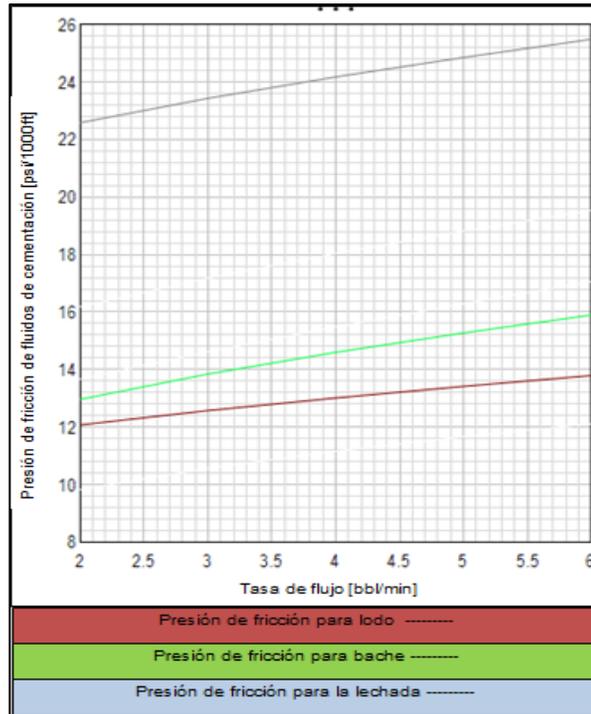


Figura 55. Reología de los fluidos usados en una cementación de pozos.

4.6 Evaluación de la cementación riserless

Durante la operación de cementación riserless, se debe de verificar en todo momento la continua salida de fluido al lecho marino(lodo, baches, cemento)., esta operación debe observarse en el fondo con el ROV (Remote Operated Vehicle) en todo momento (si por alguna razón no hay ROV se cancela la operación de cementación) es por ello que las lechadas de cemento se calculan con un exceso del 50, 100 o 150% sobre el volumen original, de esta manera se sabe que la tubería esta cementada en su totalidad.

Previo a la operación de cementación se debe circular un tiempo de atraso para verificar el tiempo que tarda el lodo de perforación en viajar por el pozo, de esta manera se hace una estimación del tiempo que se tarda en bombear las lechadas de cemento de diferentes densidades a cierto gasto y que la lechada salga al lecho marino.

En el caso que la lechada de cemento no llegue en el tiempo que se programó al lecho marino, primero la gente abordo debe tomar medidas y posiblemente sean las condiciones de operación que se tiene en la cementación. Los parámetros que se debe revisar son: gasto de bombeo de los fluidos y densidad de la lechada. Una vez que se revisan estos dos parámetros, se debe reducir el gasto, si se logra restablecer circulación se continua con ese gasto, en dado caso que no se restablezca la circulación se debe evaluar las gráficas de la compañía cementadora y se revisa la presión de bombeo con la que se alcanzó el término de la operación, y con esa información estimar la longitud aproximada de donde puede estar el cemento, si la longitud calculada resulta que la pérdida se registró 50 a 60 metros por debajo del lecho marino, se hace un anillo de cemento, es decir se mete cemento a boca de pozo, colocando mangueras con el ROV y se bombea cemento para asegurar que la tubería este completamente llena.

4.7 Comportamiento de la lechada durante la cementación en aguas profundas

Durante el bombeo de la lechada de superficie al objetivo, el cemento va sufriendo cambios en sus características debido a la temperatura en el tirante de agua y al momento de llegar al lecho marino. El cemento se bombea en estado líquido y con el tiempo pasa a un estado de endurecimiento, la cual se mide en término de la resistencia de compresión, el cemento es como un gel, acompañado de una perdida de volumen y de presión hidrostática contra la formación. El proceso de endurecimiento del cemento se complica más adelante debido a que la lechada de cemento debe resistir los cambios de temperatura.

El proceso de mezclado eleva la temperatura del cemento a aproximadamente 35 [°C] (95°F), luego se bombea de 125 a 3000 [m] de tirante de agua, donde en el fondo marino está a pocos grados del congelamiento 4 [°C].

Después de viajar por el fondo marino y a través de la TR y espacio anular. La temperatura de formación caliente de forma natural la lechada, en ambientes de bajas temperaturas la consecuencia no se deseada es el tiempo de espera prolongado. Ver figura 54.



Figura 56. Comportamiento de la lechada en aguas profundas.

4.8 Análisis respecto a la presión y la temperatura

Este análisis indica el comportamiento del cemento a través de sus cuatro fases, al iniciar con la mezcla completamente líquida, hasta obtener el fraguado posterior al periodo crítico de hidratación y la gelificación temprana. A continuación se especifican cada una de ellas:

- La temperatura aumenta rápidamente después de la gelificación temprana durante la fase de hidratación.
- En el momento que la resistencia estática del gel de la lechada de cemento alcanza un punto conocido como esfuerzo cortante crítico en la pared del pozo, el gas o el agua de la formación puede entrar a la lechada por que la presión transmitida por la lechada es igual a la presión de poro de la formación.
- El esfuerzo cortante crítico es también el punto de inicio para el periodo crítico de la hidratación. El final de este punto ocurre cuando la matriz de cemento es lo suficientemente impermeable para prevenir la migración de gas o fluido.

Durante el periodo crítico de la hidratación la lechada es altamente vulnerable a la migración de gas o fluido por lo tanto es importante que la lechada tenga un punto de periodo crítico de hidratación corto para que no exista problemas de influjo de gas a fluidos. (figura 55).

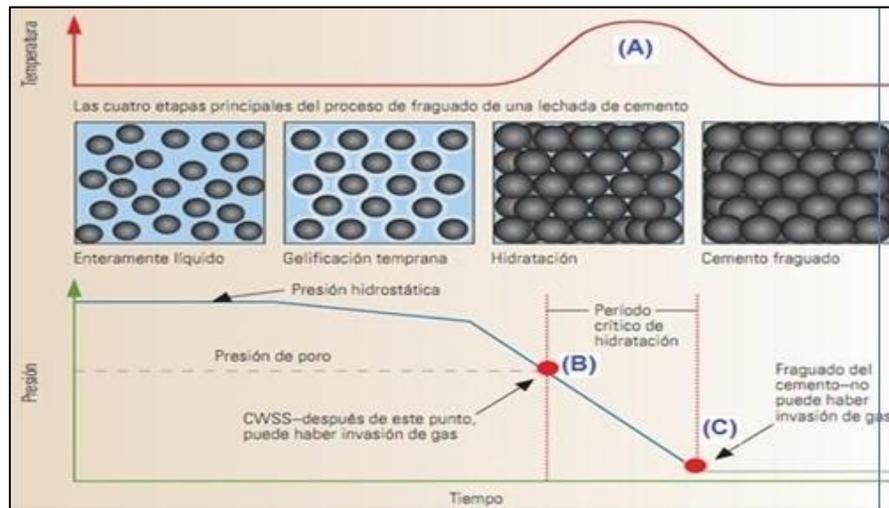


Figura 57. Análisis respecto a la presión y temperatura.

CAPITULO V.- CASO PRÁCTICO

En este capítulo se presenta un caso práctico, en base a la información obtenida en la bibliografía, para la ejecución de una cementación riserless.

La localización del pozo “A” se destaca por tener un tirante de agua de 3000 metros y será intervenida por la plataforma B1, la cual se llama de 6ta generación misma que en su ficha técnica menciona tener la capacidad para operar en tirantes de agua de hasta 3200 metros y perforar a profundidades de hasta 11300 metros. Para la operación de perforación se toma en cuenta 30 metros de mesa rotaria a nivel del mar. A continuación, se presentan las características y los asentamientos que se evalúan:

Etapa 2	Tubería superficial(riserless)	Grado	Peso [lb/ft]	Profundidad de asentamiento[m]
Sección 1	TR 22”	X-80	224.28	3790

El objetivo de estas tuberías de revestimiento estructural y superficial es cubrir sedimentos superficiales, aislar zonas de riesgos someros bajo e instalar cabezal de 18 ¾”, BOP” Subsea y riser marino para etapas posteriores a mayor profundidad.

A continuación se indica el perfil de geopresiones del pozo, en el cual se tienen las presiones de poro y de fractura que esperadas para la operación de perforación y cementación riserless del pozo “A.”

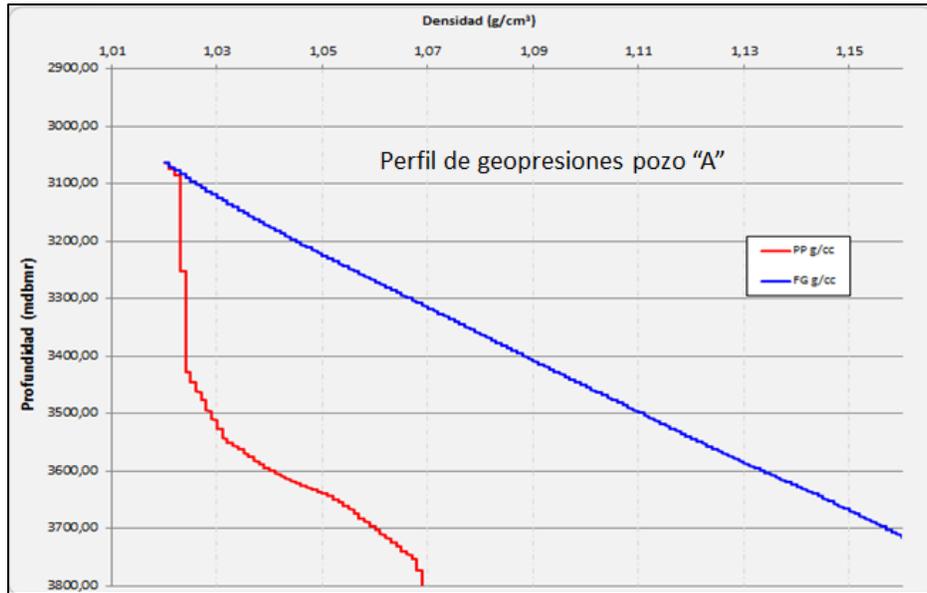


Figura 58. Perfil de geopresiones de pozo.

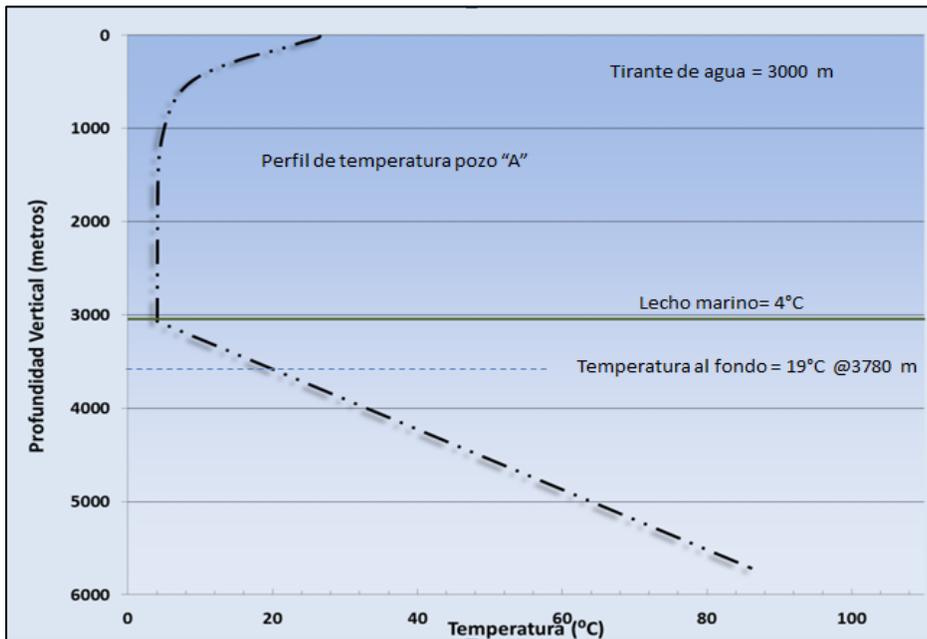


Figura 59. Perfil de temperatura del pozo "A".

5.2 Requerimientos de equipo y personal

El equipo necesario para una llevar a cabo una cementación riserless es el siguiente:

- Unidad de alta presión con capacidad para bombear fluidos a un gasto de 0 a 8 bpm y mezclar la lechada de cemento con densidad de 1.40 a 2 gr/cc a un gasto mínimo de 3 bpm con una presión máxima de 5000 psi.
- Presa para la preparación y almacenamiento de 300 bbl de bache espaciador con densidad de 1.40 gr/cc.
- 4 silos de plataforma con capacidad de 94.57 m³ cada uno.
- Sistema de alimentación de cemento a UAP con capacidad mínima de 2 ton/min.
- 1 equipo de almacenamiento y dosificación de aditivos líquidos.
- 1 cabeza de cementar tipo Subsea con capacidad mayor a 1000000 lb.
- 1 zapata de auto llenado-flotadora doble válvula de 22", 224.28 lb/ft, X-80

El personal necesario para la operación es:

- 1 supervisor de cementaciones.
- 1 ingeniero de cementaciones, 2 operadores de UAP.
- 1 operador de cabeza de cementación.
- 3 ayudantes de cementación.

5.3 Diseño de la lechada de cemento

Con la información adquirida de geopresiones proporcionada por el equipo de geomecanica, se comienza el diseño en la operación de perforación y cementación riserless del pozo, en la cual se prevé tener una presión de poro 1.07 gr/cc y una presión de fractura de 1.15 gr/cc.

Previo a la introducción de la TR 22" se perfora la etapa con barrena de 28" y se bombea lodo de 1.37 gr/cc, con el fin de generar una equivalente en el fondo de 1.09 gr/cc con la cual se mantenga estable el pozo.

Derivado de las condiciones esperadas en esta etapa, se consideró bombear como pre flujo 300 bls de bache / trazador, con densidad de 1.40 gr/cc, el cual ayuda a mejorar el barrido del fluido de perforación promoviendo una buena adherencia sobre el agujero a cementar y poder identificar y verificar tiempo del retorno al lecho marino.

Para el sistema de llenado se consideró bombear 1075 bls en el espacio anular considerando en los cálculos de volumetría un 150% de exceso sobre el diámetro en agujero descubierto de 28" y 172.10 bls en la tubería de revestimiento de 36" y tomando en cuenta 650 metros lineales con una lechada de 1.55 gr/cc con cima en el lecho marino y 200 metros de lechada de amarre con densidad de 2.00 gr/cc.

El trabajo de cementación se realiza con la técnica inner string, el cual permite una colocación más rápida y sencilla de las lechadas de cemento, dado los grandes volúmenes de agujero, la circulación debe ser en un tiempo de atraso previo a la cementación.

5.4 Información del pozo

Pozo	A
Plataforma	B1
Operación	Cementación riserless tubería de 22" con inner string

Datos del Pozo	
Diámetro del agujero	28"
Exceso en agujero descubierto	150%
Temperatura en el lecho marino	4°C
Temperatura estática de fondo	19°C
Fondo perforado	3780 m

Datos de TR a cementar	
Diámetro del agujero	22"
Diámetro interno	20"
Peso de la tubería	224.28 lb/ft
Grado	X-80
Presión interna	3870 psi al 100%
Presión	6360 psi al 100%

Datos de la TR anterior	
Diámetro externo	36"
Diámetro interno	32"
Peso	726.42 lb/ft
Grado	X-65
Profundidad de la TR	TR 36"@ 3130

Datos de cemento	
Cima teórica de cemento de llenado	Lecho marino @ 3030 m
Cima teórica de cemento de amarre	3580 m

Datos del fluido de perforación	
Tipo	Bentonítico
Base	Agua
Densidad	1.37 gr/cc
VP	32cp

5.5 Estado Mecánico

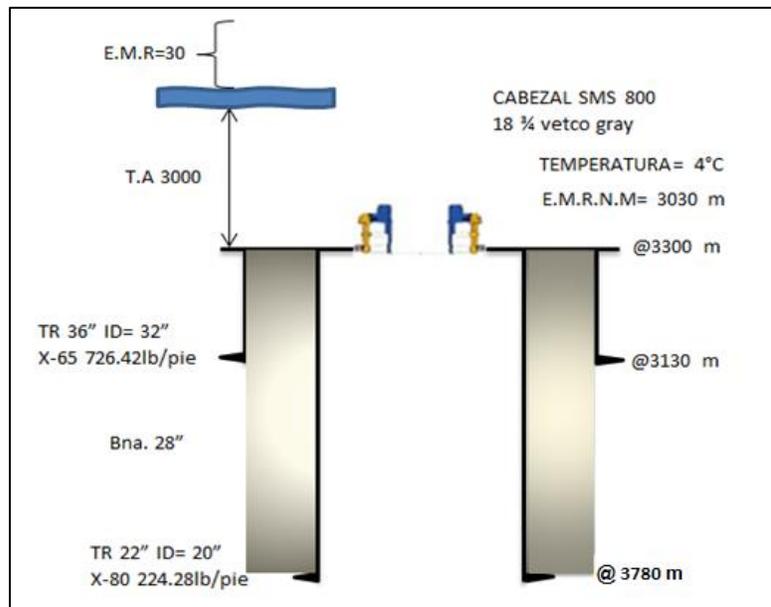


Figura 60. Estado mecánico del pozo.

5.6 Cálculos

5.6.1 Cálculos de la etapa Pump and Dump

$$PH = [(\rho) (p) (1.4223)]$$

Dónde:

ρ =densidad [gr/cc]

p=profundidad [metros]

Con la información de geopresiones dada por el equipo de geomecanica ($P_p=1.07$) Se requiere generar 1.09 gr/cc en el fondo, para el control del pozo, (la técnica pump and dump se calcula en 4 pasos, los cuales se detallan y explican para una mejor comprensión):

Como primer paso se necesita calcular la presión que se tiene en el fondo con la densidad 1.10 gr/cc

1. $PH_1 = (1.09 \text{ gr/cc}) (3780 \text{ m}) (1.4223)$

$$PH_1 = 5860.16 \text{ psi} \longrightarrow \text{Presión que se tiene en el fondo con una } \rho \\ 1.09 \text{ gr/cc}$$

Como segundo paso se requiere saber la presión que se genera al tener un tirante de agua de 3000 m (la densidad que se ocupara para este cálculo es de 1.03 gr/cc que es agua de mar).

2. $PH_2 = (1.03 \text{ gr/cc}) (3000 \text{ m}) (1.4223)$

$$PH_2 = 4394.907 \text{ psi} \longrightarrow \text{Presión en el tirante de agua}$$

Como tercer paso se requiere saber la diferencial de presión que se tiene entre la presión de fondo y la presión generada por el tirante de agua.

3. $Ph_1 - \rho \text{ Tirante de agua} = (5860.16 - 4394.90) \text{ psi}$

$$Ph_1 - \rho \text{ Tirante de agua} = 1465.26 \text{ psi}$$

En el cuarto paso se despeja la densidad de la ecuación original para conocer la equivalente que se tiene en el fondo, para esto se toma, $\Delta P=1480.76$ psi y la profundidad que se evalúa es solo la longitud de la TR a cementar sin considerar el tirante de agua.

$$4. \rho = \frac{PH}{P \cdot 1.4223} = \frac{1465.26 \text{ psi}}{(750 \text{ m})(1.4223)} = 1.37 \text{ gr/cc}$$

Nota: Para tener una equivalente de 1.09 gr/cc, se necesita bombear lodo de 1.37 gr/cc.

5.7 Cálculo de volumetría

5.7.1 Capacidad de las tuberías de revestimiento

Para el cálculo de la capacidad volumétrica de la tubería utilizamos la siguiente ecuación.

- **Capacidad**= $[(0.5067) (d^2)]$

Dónde:

d= diámetro interno de la TR a evaluar

- **Capacidad**= $[(0.5067) (D^2-d^2)]$

Dónde:

D=diámetro interno de la TR anterior o diámetro del agujero

d=diámetro externo de la TR de la etapa

TR [in]	ID[in]	CAPACIDAD [Its/m]
36"	32	518.86
22"	20"	202.68

Se hace una propuesta de cementación para la TR de 22" (750 m). Tomando en cuenta la jerarquía reológica de los fluidos.

Sistema	Densidad [gr/cc]	Metros Lineales de cada fluido [m]
Bache con trazador	1.40	
Lechada de llenado/TR 36	1.55	550
Lechada de amarre/anular de 28"	2.00	200
Desplazamiento (agua mar)	1.03	3650

A continuación se calcula los volumen que se requieren para la operación en base a los metros lineales que se tiene, de acuerdo a la profundidad de la TR, se consideraran un exceso de 150% para la lechada de llenado y un exceso de 100% en la lechada de amarre.

- **Factores de conversión**

$$\text{Lts} \div 1000 = \text{m}^3$$

$$\text{m}^3 \times 6.29 = \text{bls}$$

El volumen interno de la TP se calcula para saber el fluido de perforación que se necesita para desplazar las lechadas de cemento y que queden en el lugar correcto.

Vol Inner string y TP OD= 5.875" ID=5"

Longitud= 3750 m. Capacidad de TR= 12.66 [lts/m]

$$V = (0.5067) (5''^2) (3780)$$

$$V = 47883.15 \text{ lts.} \longrightarrow 47.88 \text{ m}^3 \longrightarrow 301.18 \text{ lbs.}$$

El volumen de la lechada de llenado se calcula con un exceso del 50%, 100% y 150%, lo anterior se debe a que esta en contacto con la formación y para observar la mejor opción de bombeo de acuerdo a la densidad que tiene.

- **Lechada de llenado en el espacio anular de 28"**

Longitud= 450 mts. , Capacidad de TR= 152.01 [lts/m]

$V = (450 \text{ m}) (152.01 \text{ lts/m})$

Original= 68404.5 lts $\rightarrow 68.40 \text{ m}^3 \rightarrow 430.264 \text{ bls.}$

V 50% = 102,606.75 lts $\rightarrow 102.60 \text{ m}^3 \rightarrow 645.39 \text{ bls.}$

V 100% = 136,809 lts $\rightarrow 136.80 \text{ m}^3 \rightarrow 860.52 \text{ bls.}$

V 150% = 17,101.25 lts $\rightarrow 171.01 \text{ m}^3 \rightarrow 1075.66 \text{ bls.}$

Los 100 m de la lechada de llenado dentro de la TR anterior de 36" no se calculan con exceso, se queda el volumen original para la operación.

- **Lechada de llenado en TR**

Longitud= 100 mts. Capacidad de TR= 273.61 [lts/m]

$V = (100 \text{ mts}) (273.61 \text{ lts/m})$

$V = 27,361 \text{ lts} \rightarrow 27.361 \text{ m}^3 \rightarrow 172.10 \text{ bls.}$

El volumen de la lechada de llenado se calcula con un exceso del 50%, 100% y 150%, lo anterior se debe a que estará en contacto con la formación y para observar la mejor opción de bombeo de acuerdo a la densidad que tiene.

- **Lechada de amarre en formación**

Longitud= 200 mts Capacidad de TR= 152.01 [lts/mts]

$V = (200 \text{ mts}) (152.01 \text{ lts/m})$

$V = 30,402 \text{ lts} \rightarrow 30.40 \text{ m}^3 \rightarrow 191.22 \text{ lts}$

$V 50\% = 45,603 \text{ lts} \rightarrow 45.60 \text{ m}^3 \rightarrow 286.84 \text{ bls}$

$V 100\% = 60,804 \text{ lts} \rightarrow 60.80 \text{ m}^3 \rightarrow 382.45 \text{ bls}$

$V 150\% = 76,005 \text{ lts} \rightarrow 76.00 \text{ m}^3 \rightarrow 478.07 \text{ bls}$

- **Bache**

$V = 300 \text{ lbs} \rightarrow 47.69 \text{ m}^3 \rightarrow 47690 \text{ lts}$

5.8 Cédula de bombeo

Bache / trazador

Volumen original 300 bls	
Gasto	Tiempo
Q= 8 bls/min	38 min
Q= 6 bls/min	50 min
Q= 4 bls/min	1 hr 15 min
Q= 3 bls/min	1 hr 40 min

Lechada de llenado en formación [550 mts lineales]

Volumen/Exceso 150% 1075.66 bls.	
Gasto	Tiempo
Q= 8 bls/min	2 hrs. 14 min
Q= 6 bls/min	3 hrs.
Q= 4 bls/min	4 hrs. 28 min
Q= 3 bls/min	6 hrs

Lechada de llenado TR

Volumen original 172.10 bls.	
Gasto	Tiempo
Q= 8 bls/min	22 min
Q= 6 bls/min	29 min
Q= 4 bls/min	43 min
Q= 3 bls/min	57 min

Lechada de amarre en el anular (200 mts lineales)

Exceso Volumen 100% 382.45 bls.	
Gasto	Tiempo
Q= 8 bls/min	48 min
Q= 6 bls/min	1 hr. 3 min
Q= 4 bls/min	1 hr. 35 min
Q= 3 bls/min	2 hrs. 7 min

Exceso Volumen 150% 478.07 bls.	
Gasto	Tiempo
Q= 8 bls/min	1 hr
Q= 6 bls/min	1 hr. 19 min
Q= 4 bls/min	2 hrs.
Q= 3 bls/min	2 hrs. 39 min

Desplazamiento con lodo

Volumen original 301.18 bls.	
Gasto	Tiempo
Q= 8 bls/min	37 min
Q= 6 bls/min	50 min
Q= 4 bls/min	1 hr 15 min
Q= 3 bls/min	1 hr 40 min

Nota: Los gastos que se proponen pueden cambiar durante el proceso de cementación, esto depende del perfil real de geopresiones real que se tenga en el pozo. En dado caso que la operación esté en riesgo primero se baja el gasto, si ya se encuentra en el mínimo por las características de la lechada, hay que observar la opción de bajar la densidad de la misma, esto anterior si y solo sí es posible (pero no los dos al mismo tiempo), con la finalidad de no causar daño a la formación.

Secuencia operativa

A continuación se describen los pasos a seguir para la operación riserless:

1. Armar cabeza de cementar tipo Subsea.
2. Armar TR 22”.
3. Armar e introducir inner string dejando punta a 100 metros por arriba de la zapata.
4. Introducir TR 22” con inner string, por lingadas a nivel del cabezal de baja. (lecho marino a 3030 m.)
5. Continuar con la corrida de la TR de 22” hasta la profundidad de asentamiento (3790 m).
6. Instalar y probar cabeza de cementar tipo Subsea y líneas.
7. Se recomienda de ser posible circular el tiempo de atraso con el objetivo de mejorar las condiciones reologicas del lodo previas a la cementación.

8. Bombear 300 bls (47.7 m³) de bache espaciador con densidad 1.40 gr/cc con trazador a un gasto entre 5 a 8 bpm.
9. Mezclar y bombear 1247 bls (200 m³) de lechada de llenado con un 150% exceso de densidad 1.55 gr/cc a un gasto entre 5 a 8 bpm.
10. Mezclar y bombear 648.57 bls (103 m³) de lechada de amarre con densidad 2.00 gr/cc a un gasto entre 3 a 4 bpm.
11. Liberar bola de esponja colocada en la cabeza de cementar tipo Subsea, desplazando con un total 301 bls de agua de mar al gasto inicial de 2 a 6 bpm.

Nota: Se recomienda dejar la punta del inner string a 100 m de la zapata flotadora con la finalidad de evitar un atrapamiento.

12. Terminado el desplazamiento, verificar funcionamiento del equipo de flotación, es decir que no se observen retornos constantes en superficie.

Nota: Si se observa retorno mantener represionado el sistema por unos minutos y verificar de nueva cuenta el no retorno de fluidos.

13. Cerrar las válvulas del cabezal para asegurar el pozo y esperar un tiempo de fraguado.
14. Con ROV monitorear el lecho marino durante la operación de cementación, verificando circulación constante a boca de pozo. Posterior a la operación continuar monitoreando durante el tiempo de fraguado verificando que no exista ningún flujo.

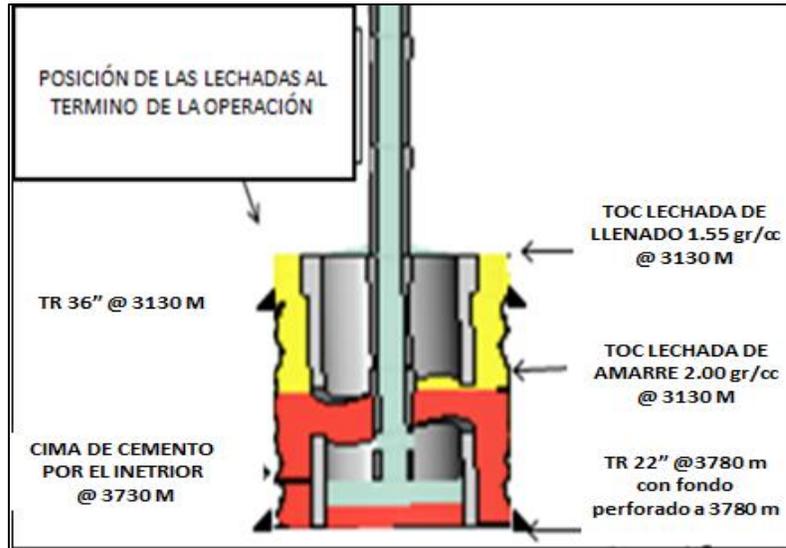


Figura 61. Posicionamiento de las lechadas al término de la operación.

Durante el trabajo de cementación se observa que la máxima densidad equivalente de circulación generada en el momento del desplazamiento de encuentra dentro de la ventana operación.

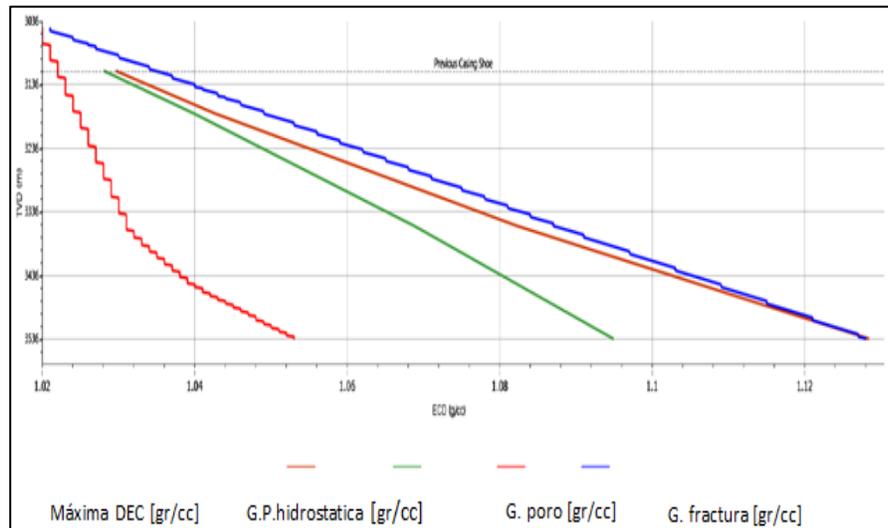


Figura 62. Perfil de densidad equivalente de circulación (DEC), durante la operación.

Recomendaciones

- Llenar el pozo perforado con lodo de densidad adecuada a fin de asegurar el control del pozo. Previo a la cementación el lodo debe tener la densidad adecuada para este fin y debe ser observado con ROV para identificar y confirmar el control del pozo.
- Minimizar la distancia de la zapata al fondo perforado con el fin de minimizar la posibilidad de contaminación del cemento en dicha zona y consecuentemente de cemento inconsistente.
- Acondicionamiento adecuado del fluido de perforación.
- La centralización de la tubería puede ser el factor de mayor influencia en la remoción del lodo, el standoff mínimo recomendado es de 70%. Sin embargo siempre que sea posible se debe buscar un standoff de 100%.
- Determinar la temperatura circulante de fondo más adecuada. Una sobre valoración representa cemento sin consistencia en la zapata y en su defecto al considerar una temperatura menor a la real se tiene el riesgo de inducir un fraguado prematuro del cemento. .
- Para la verificación de la salida del bache de limpieza, se recomienda utilizar un trazador.
- Se recomienda dejar 100 m de la zapata a la base del inner string, así como la utilización de la bola espuma limpiadora del interior del Landing string e inner string.

GLOSARIO

Aguas profundas: Se refiere al tirante de agua que está en el rango de 500 a 1500 metros.

Aguas ultra profundas: Se refiere al tirante de agua mayor a los 1500 metros.

Agujero descubierto: Es la formación perforada sin tuberías de revestimiento.

Agujero de producción: Tubería por la cual fluyen los fluidos del yacimiento a la superficie y que permite la extracción eficiente de hidrocarburos según sea la naturaleza del pozo.

Barrera permanente: Tapón de cemento consistente y verificado, que mantiene el sello constante, sin experimentar cambio alguno a través del tiempo.

Barrera temporal: Dispositivo diseñado para mantener un sello por un periodo de tiempo finito de acuerdo al propósito de la suspensión.

BOP'S (Blow Outs Preventors): Sistema de preventores; el cuerpo de un preventor está constituido por una forja completa, fabricada con acero de alta resistencia para operar en ambientes hostiles. Consta de elementos de arietes, elastómeros, vástagos, bonetes, bridas, cilindros y cámaras de deslizamiento para cierre y apertura.

Cabezal submarino: Accesorio que permite el alojamiento de los colgadores de las tuberías de revestimiento, así como el enlace con el conjunto de preventores y árbol submarino.

Cementación primaria: Es el proceso de colocar un material cementante dentro del espacio anular entre tubería de revestimiento y formación expuesta.

Cementación forzada: Consiste en la secuencia de operaciones que se ejecutan para lograr la inyección de una lechada de cemento a la formación a través de intervalos abiertos en el pozo con el propósito de abandonarlos o corregir adherencia detrás del revestimiento, así como remediar alguna anomalía.

Efectos diagenéticos: Son cambios físicos y químicos que ocurren en los sedimentos después del depósito ocasionado por la circulación de los fluidos

Disparos: Perforación que se realiza a las tuberías de revestimiento y cemento para establecer comunicación entre el pozo y la formación.

Esfuerzo de corte: Los fluidos dilatantes son suspensiones en las que se produce un aumento de viscosidad con la velocidad de deformación. Es decir un aumento del esfuerzo de corte con dicha velocidad.

Espacio anular: Es el espacio libre o cementado que se encuentra entre la formación y la tubería de revestimiento.

Empacador: Dispositivo empleado para sellar, estableciendo un aislamiento entre dos zonas.

Empacador o tapón mecánico recuperable: Elemento mecánico compuesto por un sistema de cuñas, elemento de empaque, sistema de recuperación, conjunto conector y soltador que sirve para aislar el estado mecánico del pozo.

Fluido newtoniano: Un fluido no newtoniano es aquel fluido cuya viscosidad varía con la temperatura y el esfuerzo de corte que se le aplica. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido.

Fraguado: Es el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del hormigón producido por la desecación y recristalización de los materiales que lo componen.

Gasto de bombeo: Caudal de fluido de control o agua de mar, generado por las bombas del equipo.

Inerte: El término inerte se utiliza para describir algo que no es químicamente reactivo.

Inhibir: Se refiere a retener o lentificar la hidratación de un fluido.

Lechada de cemento: Mezcla líquida compuesta de agua, cemento y aditivos.

Lecho marino: Punto donde concluye tirante de agua (fondo del mar) en donde se inicia la presencia de formación o roca.

Línea “Boost”: Línea auxiliar que es utilizada para el bombeo y circulación de fluidos provenientes del pozo, esta línea es probada hidráulicamente con 5000 psi durante su armado e introducción con el “riser” de perforación, su requerimiento es cumplir con las normas de presión interna y colapso de acuerdo a los rangos de presión de trabajo del conjunto de preventores y a las especificaciones API RP 53, 6, 6ª, 7 Y TC.

Línea de matar: Línea de alta presión que se usa para el control de un brote o manifestación del pozo, esta línea es probada hidráulicamente con 10000 psi durante su armado e introducción con el “riser” de perforación, en ocasiones además se usa cuando no se tenga tubería de trabajo dentro del pozo o que la misma se encuentre obturada o tapada, su requerimiento es cumplir con las normas de presión interna y colapso de acuerdo a los rangos de presión de trabajo del conjunto de preventores y a las especificaciones API RP 53, 6, 6ª, 7 Y 7C.

Línea de estrangular: Línea que se usa para desalojar el flujo de fluidos provenientes del pozo a través de ella y en caso de cerrar el pozo, contener la presión del espacio anular, esta línea se prueba hidráulicamente con 10000 psi durante su armado e introducción con el “riser” de perforación, su requerimiento es cumplir con las normas de presión interna y colapso de acuerdo a los rangos de presión de trabajo del conjunto de preventores y a las especificaciones API RP 53, 6, 6ª, 7 Y 7C.

Norma API 10 A: Especificaciones para cementos y materiales para cementación de pozos. El documento con la norma de la industria especifica los requisitos de los cementos para pozos y los métodos de ensayo.

Norma API 10 B: Práctica recomendada para ensayo de cementos en pozo. El documento con lo norma de la industria que proporciona orden para los métodos de ensayos de cementos y formulaciones del mismo las cuales se usan en pozos petroleros. Estos procedimientos recomendados son comúnmente modificados para resolver las condiciones específicas de un pozo en particular.

Pata de perro: Es el cambio en la curva del pozo por un cambio de inclinación entre estaciones en pozos direccionales.

Presión: Fuerza por unidad de área actuando sobre la superficie de una tubería.

Presión anormal: Se caracteriza por apartarse de la tendencia normal, de este modo se pueden entender presiones anormalmente bajas y altas, siendo estas últimas las que se presentan por lo regular.

Presión de poro: Es la presión a la cual están sometidos los fluidos (agua, gas, aceite) en el medio poroso de una roca.

Presión de fractura: Es la fuerza por unidad de área necesaria para vencer la presión de formación o la resistencia de la roca.

Presión hidrostática: Presión ejercida por una columna del fluido sobre una unidad de área.

Presurizadas: Mantener constante la presión en un espacio cerrado. Aunque la presión exterior sea muy diferente.

Preventores submarinos (BOP'S Sub Sea): Conjunto de preventores instalados en el fondo marino y operados a control remoto desde la plataforma o unidad flotante.

Prueba de alijo (negativa): Prueba de aligeramiento de una columna hidrostática (presión negativa) utilizada para detectar fugas de una barrera, un elemento u otro objeto que este diseñado para confinar fluidos presurizados (líquido o gas).

Punto de cedencia: Es el punto de la curva esfuerzo/deformación donde el comportamiento real de un fluido se desvía, (comportamiento elástico) en este punto comienza el flujo plástico o deformación permanente.

Régimen turbulento: Se llama flujo turbulento al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, es decir que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias del fluido forman pequeños remolinos periódicos.

Reología de fluidos: Propiedades físicas de los fluidos como es la densidad, viscosidad y punto de cedencia utilizado en la perforación y terminación de pozos.

Retenedor de cemento: Herramienta mecánica que se ancla en el interior de la tubería de revestimiento, con objeto de realizar cementaciones forzadas y aislar intervalos.

Riser de perforación (RISER): Es la tubería que conecta los preventores instalados en el pozo (fondo marino) con la plataforma.

Riserless: Cementación de tuberías de revestimiento de gran diámetro (28", 22", 20") sin riser.

Shoe track: Espacio entre el Cople de retención o diferencial y la zapata de tubería de revestimiento.

TOC: Cima de cemento (top of cement).

TTOC: Cima teórica de cemento (theoretical top of cement).

Tiempo de atraso: Periodo requerido para circular la capacidad del pozo y levantar los recortes de fondo a superficie.

Tubería de revestimiento: Es una tubería de gran diámetro que se baja en un agujero descubierto y se cementa en el lugar. Estas tuberías deben resistir fuerzas de colapso y estallido.

Tubería conductora: Es una tubería que va desde 150 a 500 m en aguas profundas, esta tubería tiene la función de evitar derrumbes alrededor del equipo de perforación.

Tubería superficial: Es una tubería que va desde 50 a 1200 m, la tubería superficial tiene la función de proteger los acuíferos superficiales de contaminación, prevenir derrumbes y pérdidas de circulación y esta tubería tiene que ser cementada hasta la superficie.

UAP: Unidad de alta presión.

Ventana de operación: Es el área definida por las áreas de presión de poro y gradiente de fractura.

Viscosidad: La viscosidad de un fluido es una medida de la resistencia a las deformaciones graduales producidas por esfuerzos cortantes o esfuerzos de tracción.

BIBLIOGRAFÍA

- A., P. P. (2009). *Diseño de una tubería de revestimiento y cementación de un pozo en el oriente ecuatoriano*.
- B.Nelson, E. (1983). *Well Cementing*.
- Bermudez, R. (2007). *Cementación de pozos petroleros*. Manual Schlumberger.
- Carlos, C. V. (2000). *Mecánica de suelos y cementaciones*. Limusa.
- Halliburton. (2012). *Diseño optimizado de lechadas de cemento para tuberías de producción mediante el uso de un simulador de temperatura*.
- Huerta Rosales Miguel Ángel, L. R. (2010). *Cementación de pozos horizontales*. Mexico.
- Institute, A. P. (2013). *API Recommended Practice 10-B*.
- Joseline Core Hernández Pérez, E. E. (2011). *Adición de compuestos químicos para la Cementación de pozos petroleros en la etapa de Producción, región Poza Rica - Altamira*. Poza Rica.
- Mitchell, R. F. (2006). *Petroleum Engineering Handbook*. University of Texas: Editor and Chief.
- Nelson, R. (2007). *Del cemento al puente*. Minneapolis: Lerner.
- Pemex. (2002). *Cemento clase "H" empleado en pozos petroleros*. Mexico: Manual.
- Pemex. (2016). *Documento guía para el asentamiento y cementación de tubería superficial sin riser en pozos de aguas profundas y ultra profundas*. Manual.
- Pemex. (2012). *Manual para el Procedimiento para la supervisión de cementación de tuberías de revestimiento durante la construcción de pozos en aguas profundas y ultra profundas*.

Schlumberger. (2000). *Manual de Soluciones para operaciones en Aguas Profundas*. Russel.

Smith, D. K. (1976). *Cementing*.

SPE. *Determination of temperatures for cementing in wells drilled in deep water*

SPE. *Acoustic method for determining the static gel strength of slurries*.

Halliburton. *Deepwater cementing best practices for the riserless section*.

Halliburton. Dwight K. Smith. *API Oil well Cementing Practices*.

Halliburton. *Problem in cementing horizontal wells*.

Schlumberger. *Determination of temperatures for cementing in wells drilled in deep water*.

SPE. *Annular gas flow after cementing a look at practical solutions*.