

	<b>GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>					  	
	<b>CARTA DE AUTORIZACIÓN</b>						
<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-06</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>1 de 2</b>

Neiva, 12 de junio de 2016.

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

JAIME ALBERTO HENRIQUEZ ARCINIEGAS, con C.C. No. 7.732.737 y, FRANCY JAQUELINE SERRANO CASTRO, con C.C. No. 1075224370 autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR LA MIGRACION DE GAS DURANTE LA CEMENTACION presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.



## GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

### CARTA DE AUTORIZACIÓN



<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-06</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>2 de 2</b>
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Jaime Alberto Henríquez Arciniegas

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Francy Jaqueline Serrano Castro

Firma:

	<b>GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS</b>					  	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>1 de 4</b>

**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR LA MIGRACION DE GAS DURANTE LA CEMENTACION**

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Henriquez Arciniegas	Jaime Alberto
Serrano Castro	Francy Jaqueline

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Orduz Pérez	Luis Humberto

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Sánchez Gutiérrez	Héctor Enrique
Vargas Castellanos	Constanza

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero de Petróleos

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Ingeniería de petróleos

**CIUDAD:** Neiva      **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2016      **NÚMERO DE PÁGINAS:** 74

**TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):**

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



## GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

### DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-07**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**2 de 4**

Diagramas\_\_ Fotografías\_\_ Grabaciones en discos\_\_ Ilustraciones en general\_\_ Grabados\_\_ Láminas\_\_ Litografías\_\_ Mapas\_\_ Música impresa\_\_ Planos\_x\_\_ Retratos\_\_ Sin ilustraciones\_\_ Tablas o Cuadros\_x\_

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento:

**MATERIAL ANEXO:**

**PREMIO O DISTINCIÓN** (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>		<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1.	Diseño_____	_____Design_____	6.	Gas_____	_____Gas_____
2.	Construcción_____	_____Construction_____	7.	_____	_____
3.	Equipo_____	_____Equipment_____	8.	_____	_____
4.	Simular_____	_____Simulate_____	9.	_____	_____
5.	Migración_____	_____Migration_____	10.	_____	_____

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

Este artículo presenta el diseño y construcción de un equipo para simular la migración de gas durante la cementación de una sección de un pozo vertical. En el diseño del equipo se consideraron parámetros como el espacio anular de un pozo, constituido por la formación y la tubería de revestimiento, el flujo de gas, la presión hidrostática de la columna de cemento y la implementación de ciertos accesorios necesarios para simular las condiciones en que se realiza una cementación con presencia de gas en el fondo del pozo. Una vez construido el equipo se realiza su instalación en el laboratorio y se realizaron tres pruebas básicas, las cuales corroboraron la finalidad del proyecto.



## GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

### DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-07**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**3 de 4**

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

This paper presents the design and construction of an equipment to simulate gas migration during the cementing of a vertical well section. In the equipment's design parameters as the annular space of a well, conformed for the formation and the casing, gas migration, the hydrostatic pressure of the cement column and the implementation of certain accessories needed to simulate conditions in which cementation is carried out with gas in downhole, were considered. Once built the equipment, installation is done in the laboratory and three basic tests were performed, which corroborated the purpose of the project.



## GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

### DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-07**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**4 de 4**

Empty box for the description of the thesis or degree work.

#### APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Luis Humberto Orduz Pérez

Firma:

Nombre Jurado: Héctor Enrique Sánchez Gutiérrez

Firma:

Nombre Jurado: Constanza Vargas Castellanos

Firma:

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR LA MIGRACION  
DE GAS DURANTE LA CEMENTACION**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
PROGRAMA PETROLEOS  
NEIVA-HUILA  
2016**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR LA MIGRACION  
DE GAS DURANTE LA CEMENTACION**

**JAIME ALBERTO HENRIQUEZ ARCINIEGAS COD 2005104574  
FRANCY JAQUELINE SERRANO CASTRO COD 2005203677**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA INGENIERIA DE PETROLEOS  
NEIVA - HUILA**

**2016**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR LA MIGRACION  
DE GAS DURANTE LA CEMENTACION**

**JAIME ALBERTO HENRIQUEZ ARCINIEGAS COD 2005104574  
FRANCY JAQUELINE SERRANO CASTRO COD 2005203677**

**Director del Proyecto  
ING. LUIS HUMBERTO ORDUZ PEREZ**

**Presentado a:  
COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

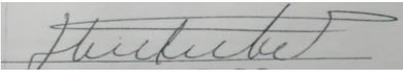
**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA INGENIERIA DE PETROLEOS  
NEIVA - HUILA  
2016**

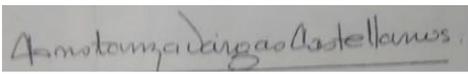
**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR LA MIGRACION  
DE GAS DURANTE LA CEMENTACION**

**ÁREA DE INVESTIGACIÓN: PERFORACIÓN**

**PRESENTADO AL COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO DEL PROGRAMA DE  
INGENIERIA DE PETRÓLEOS**

Director:   
**Ing. Luis Humberto Orduz**

Jurado:   
**Ing. Enrique Sánchez**

Jurado:   
**Ing. Constanza Vargas C.**

## DEDICATORIAS

### JAIME ALBERTO HENRIQUEZ ARCINIEGAS

*A mi padre celestial, por escribir mi nombre en el libro de la vida y guiarme en cada uno de mis pasos al pasar de los años, bendiciéndome enormemente.*

*A mis hijas Linda y Luciana, por ser la fuerza que me impulsa cada día a luchar por mis metas y sueños.*

*A mis abuelos, mis padres, hermanos y demás familiares, por acompañarme y apoyarme bajo toda circunstancia y momento.*

*A Francy, por su enorme apoyo incondicional.*

### FRANCY JAQUELINE SERRANO CASTRO

*A Dios por darme todos los días una oportunidad más y fuerzas para continuar.*

*A mi mami Clemencia Castro, por sus palabras de aliento, amor y oraciones en el momento adecuado.*

*A mi padre Humberto Serrano, hermanos, Leydi, Claudia, Andrea y Johann por su amor, apoyo incondicional, y paciente espera.*

*A Jaime, por su comprensión, Cariño, compañía y todo lo que hace todos los días por ayudarme a crecer.*

*A todos los profesores del Programa de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Surcolombiana, que cada uno, a su manera, me dirigieron hasta esta meta impartiendo su valioso conocimiento.*

*A mis ángeles desde el cielo, Edivia y Abigail, que están siempre a mi lado.*

*Y por último pero no menos importante, a mí, por todo el esfuerzo, sudor, sacrificio y lágrimas que hay detrás de este sueño por fin cumplido.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Ofrecemos nuestros agradecimientos a:

El ingeniero Luis Humberto Orduz P, director del proyecto y profesor de la Universidad Surcolombiana, por sus enseñanzas y el soporte académico ofrecido durante el desarrollo del proyecto.

El ingeniero Enrique Sánchez y la ingeniera Constanza Vargas, profesores de la Universidad Surcolombiana y evaluadores de este proyecto, por su apoyo, interés y observaciones en el desarrollo del proyecto.

Daniel Herrera Aya, instructor del SENA, por su apoyo durante el diseño y construcción del equipo.

Juan Sebastián Caneció, amigo y compañero, por su colaboración en las pruebas desarrolladas con el equipo.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	13
<b>1. JUSTIFICACIÓN</b>	14
<b>2. OBJETIVOS</b>	15
2.1.1 OBJETIVO GENERAL	15
2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
<b>3. MARCO TEÓRICO</b>	16
<b>3.1 CEMENTO PORTLAND</b>	16
3.1.1 Clasificación de los cementos	16
3.1.2 Aditivos	18
<b>3.2 CEMENTACION DE POZOS DE PETROLEO</b>	19
<b>3.3 CLASIFICACION</b>	19
3.3.1 Cementación primaria	19
3.3.1.1 Cementación en una etapa	20
3.3.1.2 Cementación en dos etapas	20
3.3.1.3 Cementación de tuberías de revestimiento	21
3.3.1.3.1 Cementación de tuberías de revestimiento superficiales	21
3.3.1.3.2 Cementación de tuberías de revestimiento intermedio	22
3.3.1.3.3 Cementación de tuberías de revestimiento de producción	22
3.3.2 Cementación secundaria o remedial	23
3.3.3 Tapones de cemento	24
3.3.3.1 Abandonamiento de pozo	25
3.3.3.2 Aislamiento zonal	25
3.3.3.3 Perforación direccional	26
3.3.3.4 Control de pérdida de circulación	27
3.3.3.5 Pruebas de formación	27
<b>3.4 EQUIPOS Y ACCESORIOS DE CEMENTACION</b>	28
3.4.1 Equipo guía y flotante	28
3.4.2 Tapones de limpieza	30
3.4.3 Centralizadores	31
3.4.4 Raspadores	31
3.4.5 Cabezal de cementación	32
<b>3.5 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LECHADAS DE CEMENTO</b>	32
3.5.1 Determinación del contenido de agua en la lechada	33
3.5.2 Determinación de la densidad	33
3.5.3 Pruebas de resistencia a la compresión	34

3.5.4	Determinación del tiempo de bombeabilidad	34
3.5.5	Determinación del filtrado	35
3.5.6	Pruebas de permeabilidad	36
3.5.7	Determinación de las propiedades reológicas	36
3.5.8	Otras pruebas	36
<b>3.6</b>	<b>MIGRACION DE GAS</b>	<b>37</b>
<b>4.</b>	<b>DISEÑO EQUIPO MIGRACION DE GAS</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>DISEÑO DEL ESPACIO ANULAR</b>	<b>41</b>
<b>4.2</b>	<b>DISEÑO DEL FONDO DEL POZO</b>	<b>42</b>
<b>4.3</b>	<b>DISEÑO DEL FLUJO DE GAS</b>	<b>43</b>
4.3.1	Diseño para aumentar la presión hidrostática	43
<b>4.4</b>	<b>DISEÑO DE ACCESORIOS EXTRAS</b>	<b>44</b>
4.4.1	Diseño tapa superior	44
4.4.2	Sistema de cierre del equipo	45
4.4.2.1	Cierres laterales	45
4.4.2.2	Cierres de tapa superior e inferior	45
<b>4.5</b>	<b>PLANOS DEL DISEÑO</b>	<b>46</b>
<b>5.</b>	<b>CONSTRUCCION</b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>ESPACIO ANULAR</b>	<b>53</b>
<b>5.2</b>	<b>FONDO DEL POZO</b>	<b>55</b>
<b>5.3</b>	<b>FLUJO DE GAS</b>	<b>55</b>
<b>5.4</b>	<b>ACCESORIOS EXTRAS</b>	<b>57</b>
<b>6.</b>	<b>MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</b>	<b>58</b>
<b>6.1</b>	<b>MANUAL DE OPERACIÓN</b>	<b>58</b>
6.1.1	Montaje del equipo	58
6.1.2	Desmontaje del equipo	61
<b>6.2</b>	<b>MANUAL DE MANTENIMIENTO</b>	<b>61</b>
6.2.1	Inspección	61
6.2.2	Lubricación	62
6.2.3	Ajustes	62
6.2.4	Limpieza	62
<b>7.</b>	<b>PRUEBA DEL EQUIPO</b>	<b>63</b>
<b>7.1</b>	<b>PRUEBA No 1 HERMETICIDAD</b>	<b>63</b>
<b>7.2</b>	<b>PRUEBA No 2 CEMENTACION BASICA</b>	<b>65</b>
<b>7.3</b>	<b>PRUEBA No 3. CEMENTACION CON PRESION DIFERENCIAL</b>	<b>68</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>72</b>
<b>9.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>73</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>74</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación API de los cementos	17

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cementación primaria	20
Figura 2. Diferentes tipos de tubería de revestimiento	23
Figura 3. Cementación secundaria o remedial	24
Figura 4. Tapón para abandono de pozo	25
Figura 5. Tapón para aislamiento zonal	26
Figura 6. Tapón para side track	26
Figura 7. Tapón para pérdida de circulación	27
Figura 8. Tapón para pruebas de formación	28
Figura 9. Zapata flotadora	29
Figura 10. Zapata guía	29
Figura 11. Collar flotador	30
Figura 12. Tapones de limpieza	30
Figura 13. Centralizador	31
Figura 14. Raspador	31
Figura 15. Cabezal de cementación	32
Figura 16. Principales parámetros que afectan la cementación	38
Figura 17. Espacio anular	41
Figura 18. Tapa inferior	42
Figura 19. Distribuidor de gas	43
Figura 20. Tapa superior	44
Figura 21. Cierres laterales	45
Figura 22. Cierre inferior	46
Figura 23. Cierre superior	46
Figura 24. Tubo externo	53
Figura 25. Tubo interno	54
Figura 26. Espacio anular	54
Figura 27. Tapa inferior	55
Figura 28. Distribuidor de gas	56
Figura 29. Tapa inferior y soporte del equipo	56
Figura 30. Tapa superior	57
Figura 31. Montaje tapa inferior	59
Figura 32. Montaje tubo externo	59
Figura 33. Montaje espacio anular	60
Figura 34. Montaje tapa superior	60

Figura 35. Registro presión prueba 1	64
Figura 36. Prueba de hermeticidad del equipo	64
Figura 37. Espacio anular cementado.	65
Figura 38. Migración de aire a través del cemento.	66
Figura 39. Espacio anular cementado prueba 2	66
Figura 40. Fondo del espacio anular prueba 2	67
Figura 41. Canal de migración del aire	67
Figura 42. Manómetro línea de aire principal y manómetro del equipo	68
Figura 43. Prueba migración de aire # 2	69
Figura 44. Espacio anular Prueba 3	69
Figura 45. Orificio migración de aire.	70
Figura 46. Orificio con ondas	70

## RESUMEN

En este proyecto se diseñó y construyó un equipo para simular la migración de gas durante la cementación de una sección de un pozo vertical con base a la teoría básica de las operaciones de cementación y la migración de gas, como respuesta a la carencia de un equipo de laboratorio en donde los estudiantes de ingeniería de petróleos que cursan la asignatura de cementación de pozos, puedan afianzar de manera práctica los conocimientos acerca del tema.

En el diseño del equipo se consideraron parámetros como el espacio anular de un pozo vertical constituido por la formación y la tubería de revestimiento, la migración de gas, la presión hidrostática del cemento y la implementación de ciertos accesorios necesarios para simular las condiciones en que se realiza una cementación con presencia de gas en el fondo del pozo. Se realizó el diseño del equipo en el software AutoCAD, para generar planos técnicos que se emplearon en la construcción por parte de un taller especializado en trabajos de metalmecánica.

Una vez construido el equipo, se realiza su instalación en el laboratorio de lodos y cementos de la facultad de ingeniería, en donde se realizan modificaciones para dotar el equipo con un suministro de aire a presión y comprobar su funcionamiento. Se realizan tres pruebas básicas, las cuales corroboraron la finalidad del proyecto.

## INTRODUCCIÓN

La perforación de un pozo implica la práctica de diferentes procedimientos, entre los cuales se encuentra la cementación de las diversas secciones perforadas, la cual es indispensable para llegar a la culminación de un pozo, sostener la formación y evitar la migración de hidrocarburos a otras formaciones que puedan estar interconectadas a corrientes de agua subterránea y generar así su contaminación.

En los últimos años la industria petrolera ha sufrido fatales accidentes que han dejado pérdida de vidas humanas, equipos y contaminación al medio ambiente. Por lo tanto, es importante contar con unos buenos parámetros de diseño para la lechada de cemento cuando se tiene migración de gas en el pozo y así prevenir accidentes y contaminación del medio ambiente. Todos estos aspectos se obtienen de manera teórica y se afianzan de manera práctica, el estudiante de ingeniería de petróleos tarda en asimilar dichos aspectos por falta de interacción con el medio que lo relaciona.

Por esta razón se construirá un equipo para simular la migración de gas en los trabajos de cementación de un pozo vertical permitiendo visualizar de manera directa, práctica y eficaz el comportamiento de la lechada de cemento en presencia de migración de gas en el pozo. Esta interacción permite comprender y adquirir conocimientos del esquema de cementación de un pozo mucho más rápido con la práctica como se viene realizando en la universidad, aparte se realizará el documento guía que sustente el diseño y los parámetros tomados en cuenta para el desarrollo de éste.

## 1. JUSTIFICACIÓN

La percepción de la migración de gas durante la cementación de un pozo es muy limitada a falta de visualización. La importancia de esta metodología para el diseño y desarrollo de las operaciones de cementación de un pozo en condiciones reales conlleva a crear una visualización más amplia y detallada que permite de forma directa interactuar con un equipo para simular estas operaciones.

Tener una percepción directa del diseño planteado permite comprender y practicar diferentes parámetros como el uso de lavadores para remover la torta (cake) de las paredes del pozo, la presencia de gas, los cálculos volumétricos de lechada y las propiedades específicas del cemento para diferentes condiciones. No alcanzar con satisfacción los parámetros anteriores conlleva a la cementación no óptima del pozo lo cual representa la ejecución de cementaciones remediales que aumentan el costo de la perforación, así como altos riesgos de seguridad que puedan ocasionarse en superficie.

No siempre el diseño teórico de las lechadas de cemento es igual al llevado a la práctica debido a que durante la operación se pueden presentar problemas como los anteriormente mencionados, que cambian algunos componentes del diseño.

Debido a que el curso de cementación de pozos del programa de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Surcolombiana no cuenta con un equipo para simular la migración de gas durante la cementación de un pozo vertical, se realizará una compilación de los diferentes parámetros para hacer tangible y palpable dicho modelo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y construir un equipo para simular la migración de gas durante la cementación de una sección de un pozo vertical.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Poner en marcha el equipo construido.
- Correr tres pruebas básicas con el equipo. La primera prueba consiste en probar la hermeticidad del equipo. La segunda prueba consiste en cementar el espacio anular inyectando aire desde el fondo para que migre a través del cemento sin aplicar ninguna presión por encima de este. La tercera prueba es similar a la segunda con la diferencia de que se aplica una presión por encima del cemento.
- Elaborar una guía del funcionamiento y mantenimiento del equipo.
- Entregar el equipo al laboratorio de lodos y cementos de la facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 CEMENTO PORTLAND

Es una mezcla compleja de caliza (u otros materiales con alto contenido de carbonato de calcio), sílice, hierro y arcilla, molidos y calcinados, que fragua y se endurece al reaccionar con el agua. Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al enfriarse.

El cemento Portland es, además, el ejemplo típico de un cemento hidráulico; fragua y desarrolla resistencias a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. De todos los cementos, el Portland es el más importante en cuanto a términos de calidad, desarrollo de resistencia a la compresión, tensión y a los sulfatos; por lo cual es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos petroleros.

Cabe mencionar que algunos cementos Portland se fabrican de manera especial debido a que las condiciones de los pozos difieren significativamente entre sí al variar su profundidad, temperatura, ubicación geográfica; etc. El fraguado y endurecimiento se presenta si el cemento se coloca en agua. El cemento fraguado tiene baja permeabilidad y es insoluble en agua, de tal forma que expuesto a ésta no se destruyen sus propiedades. Tales atributos son esenciales para que un cemento obtenga y mantenga el aislamiento entre las zonas del subsuelo. Los principales componentes del cemento son:

**Silicato tricálcico** ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) Es el componente más abundante y factor principal para producir la consistencia temprana (de 1 a 28 días).

**Silicato di cálcico** ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) Proporciona la resistencia gradual después de los 28 días.

**Aluminato tricálcico** ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) Proporciona resistencia al ataque de los sulfatos.

**Aluminato férrico tetra cálcico** ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) Es un compuesto de bajo calor de hidratación en el cemento y no influye en el fraguado inicial.

##### 3.1.1 Clasificación de los cementos

El American Petroleum Institute (API) ha identificado nueve tipos de cementos de acuerdo a su composición química y propiedades físicas, y estos son:

- API Clase A y B
- API Clase C
- API Clase D,E y F
- API Clase G y H
- API Clase J

Clase	Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Observaciones
<b>A (tipo I)</b>	Hasta 1830	77	Donde no se requieren propiedades especiales.
<b>B (tipo II)</b>	Hasta 1830	77	Donde se requiere moderada resistencia a los sulfatos.
<b>C (tipo III)</b>	Hasta 1830	77	Donde se requiere alta resistencia a la compresión y moderada o alta resistencia a los sulfatos.
<b>D</b>	De 1830 a 3050	110	Aplicado en presión moderada, moderada y alta resistencia a los sulfatos.
<b>E</b>	De 1830 a 4270	143	Aplicado en presiones altas, moderada y alta resistencia a los sulfatos.
<b>F</b>	De 3050 a 4880	160	Aplicado en presiones altas, moderada y alta resistencia a los sulfatos.
<b>G y H</b>			Comúnmente conocidos como cementos petroleros, son básicos para emplearse desde la superficie hasta 2240 m tal como se fabrican. Pueden modificarse con aceleradores y retardadores para usarlos en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura.
<b>J</b>	De 3660 a 4880	177	En etapa de experimentación y diseñado para emplearse sin necesidad de harina sílica, que evita la regresión de la resistencia a la compresión.

Tabla 1. Clasificación API de los cementos  
Fuente: Halliburton, Well Cementing. 2010

### 3.1.2 Aditivos

Los pozos de petróleo actualmente se perforan en un amplio rango de profundidades y condiciones de temperatura. Las lechadas de cemento son diseñadas regularmente para condiciones por debajo del punto de congelamiento, temperaturas de hasta 500 F y presiones de hasta 30.000 psi. Todo esto ha sido posible gracias al desarrollo de aditivos que modifican los distintos tipos de cementos portland, para cumplir con los requerimientos de cada pozo. Para modificar las propiedades de las lechadas de cemento existen ocho tipos de aditivos:

1. Aceleradores: Estos aditivos disminuyen el tiempo de bombeo de la lechada, aceleran el proceso de fraguado, compensan el efecto retardador de otros aditivos (Controladores de filtrado, dispersantes, etc.), modifican la estructura del gel C-S-H (Hidrato de Silicato de Calcio) y aumentan la hidratación.
2. Retardadores: Estos aditivos incrementan el tiempo de fraguado e inhiben la hidratación.
3. Extendedores: Estos aditivos incrementan el rendimiento del cemento y reducen la densidad.
4. Densificantes: Estos aditivos aumentan la densidad de la lechada de cemento.
5. Dispersantes: Estos aditivos reducen la viscosidad y el punto de cedencia de la lechada, reducen la presión de fricción, modifican el régimen de flujo, mejoran la eficiencia de los controladores de filtrado y reducen el contenido de agua.
6. Controladores de pérdida de filtrado: Estos aditivos controlan la pérdida de la fase acuosa hacia la formación.
7. Controladores de pérdida de circulación: Estos aditivos controlan la pérdida de lechada de cemento hacia la formación.
8. Aditivos especiales: Se encuentran dos tipos de aditivos especiales, los antiespumantes los cuales previenen o eliminan la espuma, previenen la cavitación, mantienen la densidad de la lechada bombeada al pozo y los anti sedimentación, los cuales previenen la sedimentación de los sólidos.

## **3.2 CEMENTACION DE POZOS DE PETROLEO**

La cementación de pozos de petróleo es el proceso de mezclar y desplazar una lechada de cemento a través de la tubería de perforación o el revestimiento para situarla entre las paredes de la formación y la parte externa de la tubería de revestimiento con el objetivo de:

- Proteger el pozo de derrumbes en formaciones no consolidadas.
- Asegurar la tubería de revestimiento a las paredes del pozo.
- Aislar las formaciones que contienen diferentes fluidos.
- Aislar acuíferos que puedan ser contaminados con el lodo de perforación.
- Proteger el revestimiento de la corrosión.
- Crear un sello hidráulico entre la formación y la tubería de revestimiento.
- Minimizar el peligro de patada de pozo debido a formaciones presurizadas.
- Sellar zonas de pérdidas de circulación de lodo.

## **3.3 CLASIFICACION**

Las operaciones de cementación en pozos de petróleo y gas se clasifican en:

- Cementación primaria.
- Cementación secundaria o remedial.
- Tapones de cemento.

### **3.3.1 Cementación primaria**

La cementación primaria es una técnica para colocar las lechadas de cemento en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y las paredes del pozo. El cemento luego endurece y forma un sello hidráulico, previniendo la migración de fluidos de las formaciones dentro del espacio anular. La cementación primaria es entonces una de las etapas más críticas durante a perforación y el completamiento de un pozo. Este procedimiento debe ser planeado y ejecutado de manera cuidadosa, porque solo existe una posibilidad para completar la operación de manera exitosa.

Además de proporcionar aislamiento de las zonas, el cemento ya fraguado debe soportar la tubería de revestimiento y protegerla de la corrosión que generan los fluidos de formación. Si la tubería de revestimiento no se cementa puede corroerse rápidamente al contacto con salmueras de formación calientes, sulfuro

de hidrogeno y dióxido de carbono. Puede incluso estar sujeta a corrosión por las altas velocidades de los fluidos producidos, particularmente cuando partículas sólidas como arena de formación es transportada.

En principio, las técnicas de cementación primaria son las mismas independientemente del propósito y el tamaño de la tubería de revestimiento. La lechada de cemento es bombeada desde superficie a través de la tubería, sale por la parte inferior de esta y desplaza al lodo de perforación mientras se mueve por el espacio anular.

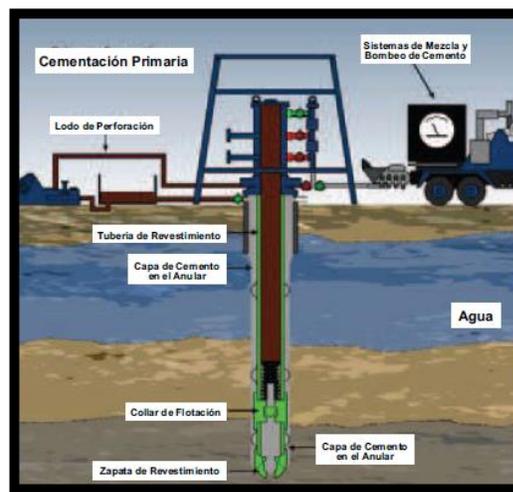


Figura 1. Cementación primaria

Fuente:<http://portalperforacion.blogspot.com.co/2014/09/procedimientos-basicos-en-una.html>

### 3.3.1.1 Cementación en una etapa

Básicamente es la más sencilla de todas, la lechada de cemento es ubicada en su totalidad en el espacio anular desde el fondo hasta la profundidad deseada, para esto se requerirá de presiones de bombeo altas lo que implica que las formaciones más profundas deben tener presiones de formación y fractura altas y no permitir que se produzcan pérdidas de circulación por las mismas. Usualmente esta técnica es usada en pozos poco profundos o para cementar el revestimiento superficial, y el equipo de fondo será el básico para la cementación, zapato guía, collar flotador, centralizadores, raspadores, tapones de fondo y tope.

### 3.3.1.2 Cementación en dos etapas

Consiste en ubicar la lechada de cemento primero en la parte inferior del espacio anular y el revestimiento, luego la parte superior de la lechada a través de un

dispositivo desviador. Este tipo de técnica se utiliza cuando las formaciones del fondo del pozo no soportan las presiones hidrostáticas ejercidas por la columna de cemento en zonas de interés que están muy separadas entre sí y es necesario cementarlas, en zonas superiores a ser cementadas con cementos no contaminados, en pozos profundos y calientes que requieren lechadas diferentes de acuerdo a las características propias de un nivel determinado.

### 3.3.1.3 Cementación de tuberías de revestimiento

Para poder perforar, completar un pozo y producir los fluidos de interés, se necesita una serie de tuberías de revestimiento. El diseño del revestimiento de un pozo depende de ciertos factores como la profundidad, el diámetro del pozo, la columna de lodo, las condiciones de la formación, su presión y los objetivos de la perforación. La tubería de revestimiento debe ser diseñada además para resistir los esfuerzos mecánicos y químicos del pozo.

#### 3.3.1.3.1 Cementación de tuberías de revestimiento superficiales

La principal función de la cementación en las tuberías superficiales, es aislar formaciones no consolidadas y evitar la contaminación de mantos acuíferos que se encuentren a profundidades someras, mantener el agujero íntegro y evitar una probable migración de aceite, agua o gas, de alguna arena productora superficial, además de permitir la continuación de la segunda etapa de perforación. Cabe mencionar que la tubería conductora está incluida en las tuberías de revestimiento superficiales, su función principal es permitir circulación y evitar derrumbes de arenas poco consolidadas, además de ser el primer medio de circulación de lodo a la superficie. Esta tubería de revestimiento tiene la opción de cementarse según sean las condiciones del terreno.<sup>1</sup>

Regularmente el revestimiento superficial es la primera tubería donde se conectan las BOPs. De esta manera, el revestimiento seleccionado debe tener la capacidad de soportar las BOPS y resistir las presiones de los fluidos que se encuentren en el subsuelo. El revestimiento superficial debe soportar los próximos revestimientos que se asentaran en el pozo, los tubulares de producción y proveer un anclaje sólido para el cabezal cuando el pozo sea puesto en producción. Los tamaños de los revestimientos superficiales y las profundidades de asentamiento varían considerablemente. El rango de diámetros va de 7 a 20 pulgadas y las profundidades pueden alcanzar los 5000 pies.

---

<sup>1</sup> Cementación de pozos petroleros en aguas profundas

### 3.3.1.3.2 Cementación de tuberías de revestimiento intermedio

Las tuberías de revestimiento intermedias se utilizan para separar el pozo en secciones explotables, aislar zonas de pérdida de circulación, secciones salinas, zonas de sobrepresión, secciones con lutitas y otras condiciones en el fondo o la superficie del pozo que puedan dificultar o hacer que sea peligroso continuar la perforación.

El tamaño y la longitud de las tuberías de revestimiento intermedias varían mucho de un operador a otro y de un campo a otro, e incluso dentro de un mismo campo. Los tamaños más utilizados son: 13-3/8 pulgadas, 10-3/4 pulgadas y 9-5/8 pulgadas. La longitud puede oscilar entre 1.000 pies y 15.000 pies (305 m a 4.570 m). Generalmente es la sección más larga de tuberías de revestimiento en el pozo y van corridas hasta la superficie, por lo que los preventores deben instalarse en estos revestimientos para continuar perforando las siguientes etapas. Las tuberías de revestimiento intermedias pueden cementarse hasta la superficie o hasta la zapata de la tubería de revestimiento anterior, en función de las necesidades del cliente, la presión de fractura de la formación, etc.

Si el tramo que hay que cementar es muy largo y hay formaciones con una presión de fractura baja, la tubería de revestimiento puede cementarse en dos etapas.<sup>2</sup>

### 3.3.1.3.3 Cementación de tuberías de revestimiento de producción

El asentamiento de esta tubería es uno de los principales objetivos cuando se perfora un pozo. Este revestimiento sirve para aislar el yacimiento de fluidos indeseables en la zona productora. Además de actuar Como elemento de sustentación del pozo, esta tubería cumple otras funciones como, actuar como cubierta de protección de los equipos de bombeo artificial, equipos de completamiento en múltiples zonas, recubrir tuberías de revestimiento intermedias o desgastadas.

La longitud y tamaño de la tubería de revestimiento de producción varía mucho, pero las más usuales son: 4-1/2 pulgadas, 5 pulgadas, 7 pulgadas y 9-5/8 pulgadas. Las tuberías de revestimiento de producción pueden introducirse como una sarta completa desde el fondo del pozo (profundidad total) hasta la superficie o desde el fondo del pozo (profundidad total) hasta 100 o 200 pies dentro de la tubería de revestimiento anterior. Este último tipo de tubería recibe el nombre de liner. Los liner son tuberías de cementación que no llegan hasta la superficie sino que son colgadas del interior de la tubería anterior. La superposición depende del objetivo del liner y puede oscilar entre 50 y 500 pies. El uso de liner (como tuberías de revestimiento de producción) permite utilizar menos tubería de revestimiento y, por tanto, reducir el costo del pozo. Las tolerancias anulares suelen ser pequeñas; debido a esto, en los trabajos de cementación puede ser necesario utilizar fluidos y técnicas de colocación especiales para reducir el riesgo de

sufrir pérdidas. Las lechadas utilizadas en la cementación de los liner están diseñadas para presentar unas propiedades de fluidez y de fraguado que garanticen una buena sustentación y aislamiento. Si el volumen lo permite, la lechada se mezclará por baches.<sup>2</sup>

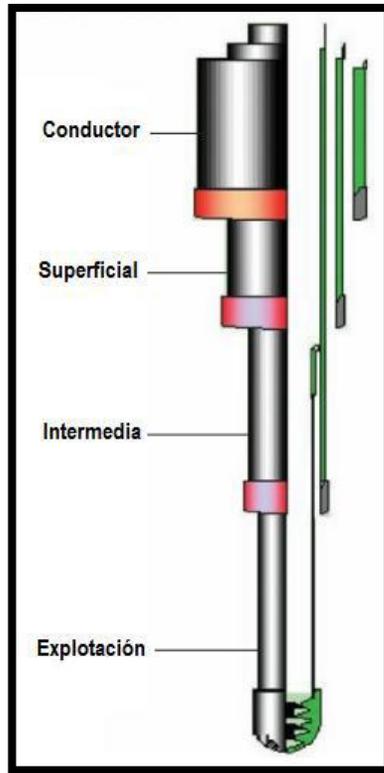


Figura 2. Diferentes tipos de tubería de revestimiento  
Fuente: Cementación en aguas profundas pág. 40

### 3.3.2 Cementación secundaria o remedial

La cementación primaria tiene como objetivo cementar el espacio anular en su totalidad o zonas productivas y problemáticas. En muchos casos se presentan problemas en la cementación que ocasionan que esta no sea totalmente exitosa y es allí donde se aplica la cementación secundaria o remedial.

La cementación secundaria o remedial es definida como el proceso de inyectar una lechada de cemento a través de unas perforaciones en la tubería de revestimiento hacia el espacio anular. Su objetivo es obtener un sello entre el revestimiento y la formación. Esta cementación tiene varias aplicaciones en las fases de perforación y completamiento. Las más comunes son:

<sup>2</sup> JET 14 - Introducción a la Cementación

- Reparar un trabajo de cementación primaria que fallo.
- Eliminar la intrusión de agua dentro de las zonas de producción.
- Reducir el GOR (gas/oil ratio) aislando las zonas de gas de los intervalos productores de crudo.
- Reparar fugas en los revestimientos.
- Abandonar zonas no productivas o depletadas.
- Taponar zonas de pérdidas de circulación.
- Proteger las zonas productoras de la migración de fluidos.

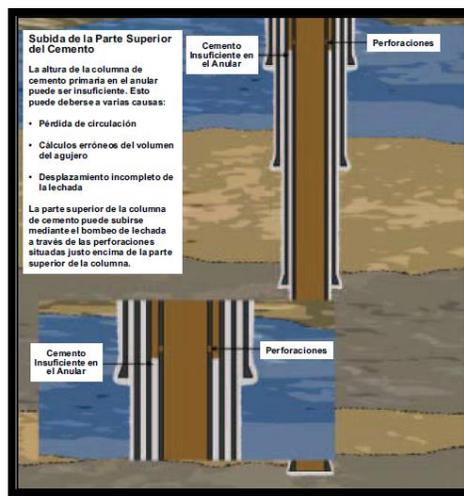


Figura 3. Cementación secundaria o remedial

Fuente: <http://portal-perforacion.blogspot.com.co/2014/10/conceptos-de-cementacion-secundaria.html>

### 3.3.3 Tapones de cemento

Tarde o temprano en la vida de un pozo se necesita colocar un tapón de cemento. Un tapón es un pequeño volumen de lechada de cementación que se coloca en un lugar donde se requiere llevar a cabo una de las siguientes operaciones:

- Abandonamiento del pozo
- Aislamiento zonal
- Perforación direccional
- Control de pérdida de circulación
- Pruebas de formación

### 3.3.3.1 Abandonamiento de pozo

Para sellar diferentes intervalos seleccionados de un pozo seco o depletado, se requiere de un tapón de cemento a diferentes profundidades para prevenir la comunicación entre zonas y cualquier migración de fluidos que pueda contaminar acuíferos.

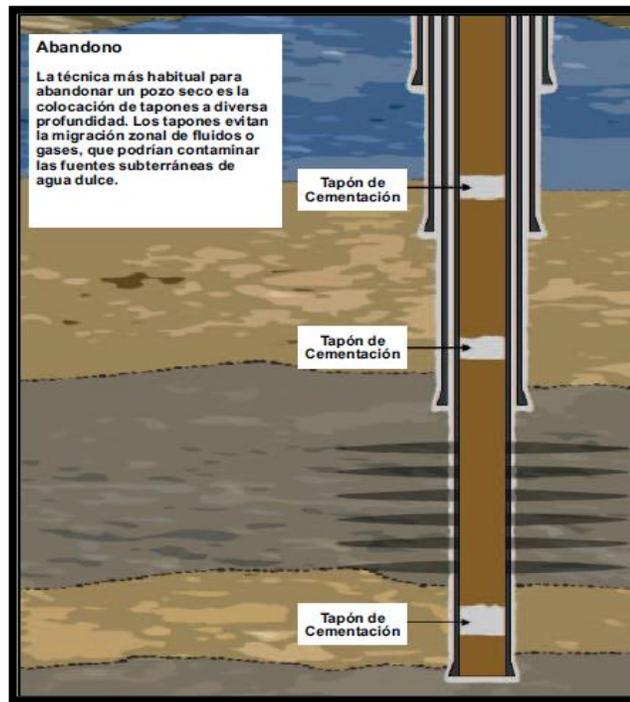


Figura 4. Tapón para abandonamiento de pozo

Fuente:<http://portal-perforacion.blogspot.com.co/2014/10/conceptos-de-cementacion-secundaria.html>

### 3.3.3.2 Aislamiento zonal

Una de las razones más comunes para taponar es el aislamiento zonal. El propósito puede ser sellar zonas con agua, proteger una zona de baja presión a hueco abierto o completar una zona a una profundidad somera. En un pozo que tiene una o más zonas productoras, a veces es de beneficio abandonar una zona depletada o una zona que no es rentable, colocando un tapón de cemento permanente para asilar esta zona.

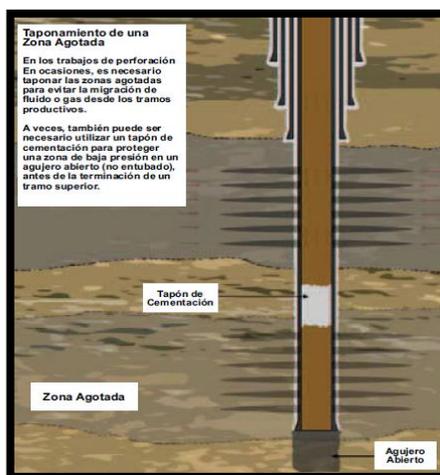


Figura 5. Tapón para Aislamiento zonal

Fuente:<http://portal-perforacion.blogspot.com.co/2014/10/conceptos-de-cementacion-secundaria.html>

### 3.3.3.3 Perforación direccional

Un side track es la desviación de la dirección de perforación en algún punto debido a diferentes causas como un pescado no recuperado o simplemente porque se va a iniciar la perforación direccional. En estos casos es necesario un tapón de cemento en el fondo para que la broca tenga donde asentarse y pueda ser desviada en la dirección deseada.

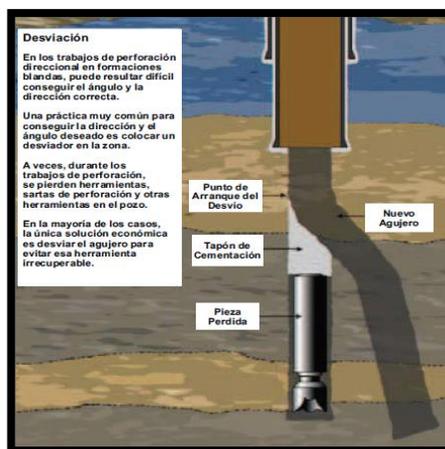


Figura 6. Tapón para Side track

Fuente:<http://portal-perforacion.blogspot.com.co/2014/10/conceptos-de-cementacion-secundaria.html>

### 3.3.3.4 Control de pérdida de circulación

Este problema es uno de los más comunes y costosos que se presentan durante las operaciones de perforación, se entiende como la pérdida del lodo de perforación hacia la formación. La pérdida puede ser parcial o total, es decir, se puede perder una pequeña fracción de fluido generalmente manifestada por una disminución gradual del nivel del fluido de perforación en los tanques o se puede perder el fluido de perforación que se encuentra en el hoyo, al desplazarse en su totalidad hacia la formación. Este problema algunas veces se puede solucionar colocando un tapón de cemento en la formación deteniendo así la pérdida de fluido.

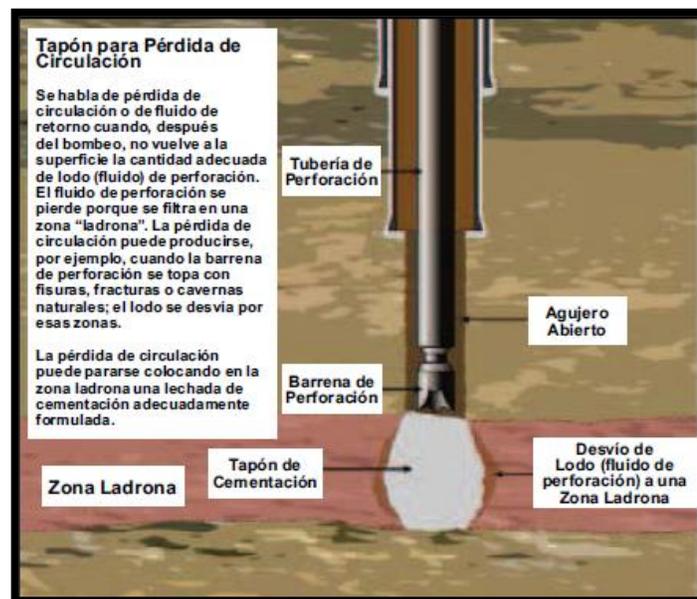


Figura 7. Tapón para pérdida de circulación

Fuente: <http://portal-perforacion.blogspot.com.co/2014/10/conceptos-de-cementacion-secundaria.html>

### 3.3.3.5 Pruebas de formación

Los tapones de cemento son frecuentemente colocados en hueco abierto debajo de una zona que se desea probar y que está a una distancia considerable del fondo, donde no es posible o práctico utilizar otro mecanismo de taponamiento.

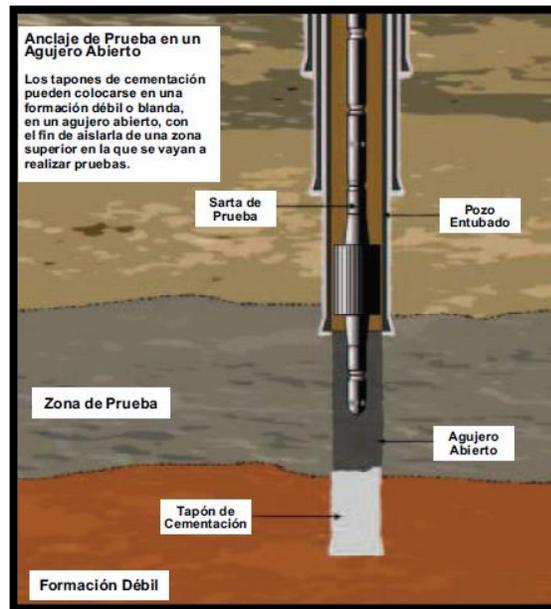


Figura 8. Tapón para pruebas de formación

Fuente:<http://portal-perforacion.blogspot.com.co/2014/10/conceptos-de-cementacion-secundaria.html>

### 3.4 EQUIPOS Y ACCESORIOS DE CEMENTACION

El equipo de flotación, tapones de limpieza, centralizadores y raspadores son dispositivos mecánicos comúnmente utilizados para bajar las tuberías de revestimiento y colocar el cemento en el espacio anular.

#### 3.4.1 Equipo guía y flotante

El equipo flotante es comúnmente utilizado en las secciones bajas de la tubería de revestimiento para reducir el esfuerzo de la torre de perforación, permitiendo que la tubería flote. El peso de las tuberías de revestimiento en pozos de profundidades moderadas y profundas, puede generar altas tensiones en la torre de perforación. Cuando la tubería de revestimiento es inmersa en el fluido del pozo, esta flota por una fuerza igual al peso del fluido que la tubería desplaza. Si la tubería se deja inundar de fluido mientras se baja al pozo, la flotabilidad será igual al peso del fluido desplazado por sus paredes. Si por el contrario, la tubería no se deja inundar de fluido, una mayor cantidad de fluido será desplazada aumentando la flotabilidad de la sarta y reduciendo el peso que soporta la torre de perforación. Para esto se emplea un dispositivo llamado zapata flotadora.

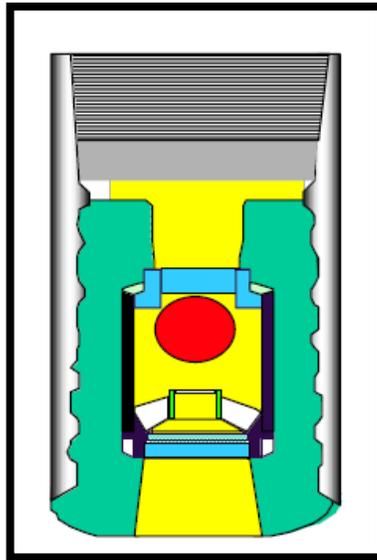


Figura 9. Zapata Flotadora  
Fuente: Halliburton, Well Cementing. 2010.

La zapata guía se instala en la punta del primer tubo de revestimiento y su función es guiar la tubería para pasar diferentes irregularidades en el pozo.

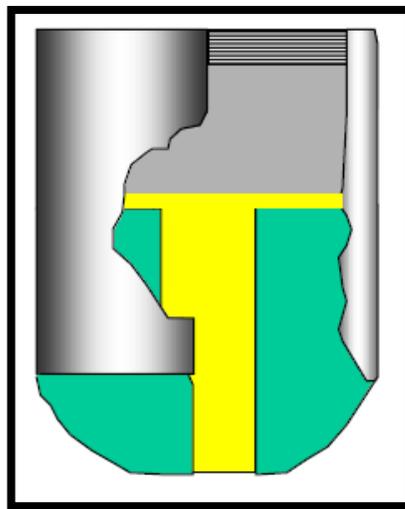


Figura 10. Zapata guía  
Fuente: Halliburton. Well Cementing. 2010.

Los collares flotadores son normalmente instalados, tres juntas arriba de la zapata guía y prestan la misma función que la zapata flotadora. Además posee una superficie que detiene a los tapones de limpieza.

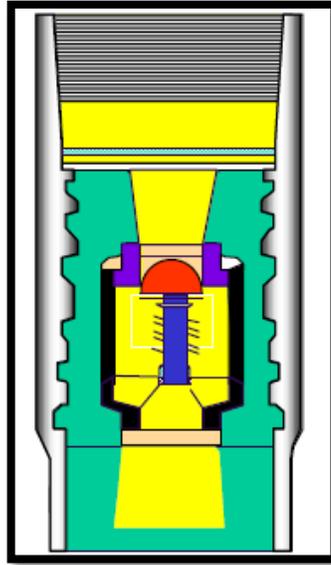


Figura 11. Collar flotador  
Fuente: Halliburton. Well Cementing. 2010.

### 3.4.2 Tapones de limpieza

Los tapones de limpieza son dispositivos empleados para separar los fluidos bombeados a través de la tubería de revestimiento, limpiar las paredes interiores y como indicación en superficie del desplazamiento del cemento hacia el espacio anular.



Figura 12. Tapones de limpieza  
Fuente: Halliburton, Well Cementing. 2010.

### 3.4.3 Centralizadores

La uniformidad del cemento alrededor de la tubería determina el sello efectivo entre la formación y la tubería de revestimiento. Los pozos no son totalmente derechos, de manera que la tubería generalmente estará en contacto con las paredes del pozo en diferentes lugares. Los centralizadores previenen que la tubería se arrastre cuando se introduce en el pozo, centran la tubería en el hoyo, minimizan las pegas diferenciales y ayudan a igualar la presión hidrostática en anular.



Figura 13. Centralizador  
Fuente: Halliburton, Well Cementing. 2010.

### 3.4.4 Raspadores

Los raspadores o limpiadores de pared son dispositivos que se enganchan en la tubería de revestimiento para remover la retorta de lodo en las paredes del pozo.



Figura 14. Raspador  
Fuente: Halliburton, Well Cementing. 2010.

### 3.4.5 Cabezal de cementación

Es un dispositivo fijado a la unión superior de la sarta de revestimiento para sostener uno o dos tapones de limpieza antes de que sean bombeados en la tubería de revestimiento durante la operación de cementación. En la mayoría de las operaciones, se lanza un tapón de fondo antes del espaciador o la lechada de cemento. El tapón superior es liberado desde la cabeza de cementación después del fluido espaciador. Un colector múltiple incorporado en el arreglo de la cabeza de cementación permite la conexión de una línea de circulación de fluido.

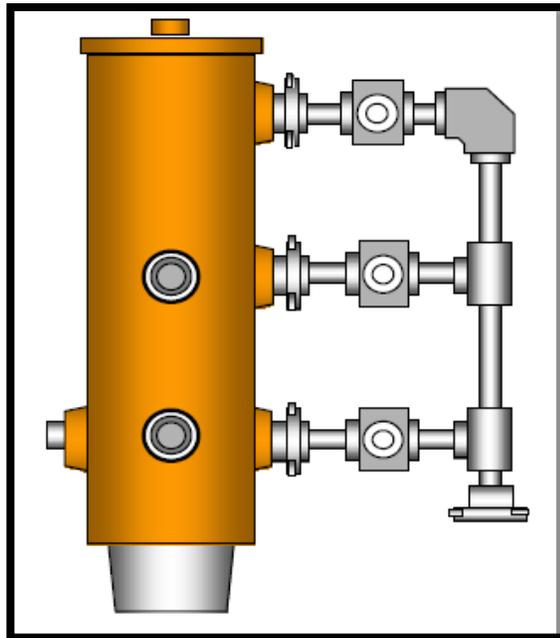


Figura 15. Cabezal de cementación  
Fuente: Halliburton. Well Cementing. 2010.

### 3.5 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LECHADAS DE CEMENTO

La norma API RP 10 B se refiere a las prácticas recomendadas para las pruebas de laboratorio que se llevan a cabo con las lechadas de cemento, así como sus aditivos; estas pruebas se describen a continuación:

- Determinación del contenido de agua en la lechada
- Determinación de la densidad
- Pruebas de resistencia a la compresión
- Determinación del tiempo de bombeabilidad

- Determinación del filtrado
- Pruebas de permeabilidad
- Determinación de las propiedades reológicas

### 3.5.1 Determinación del contenido de agua en la lechada.

#### • Agua libre

Una vez que se ha preparado la lechada en el mezclador, se le agita en un consistómetro a presión atmosférica; se vuelve a pasar por el mezclador, y luego se le deja en un cilindro de vidrio graduado de 250 ml, perfectamente tapado para evitar la evaporación. Al cabo de dos horas de reposo, se habrá acumulado agua en la parte del recipiente, ese volumen de agua expresado en mililitros, es el contenido de agua libre de la lechada.

#### • Agua normal

El contenido de agua normal de una lechada de cemento, es lo que cede una lechada que tiene 11 unidades de consistencia, luego de haber sido agitada durante 20 minutos, a 80° F de temperatura en un consistómetro a presión atmosférica. Las unidades Bearden de consistencia son adimensionales, pero a veces se refiere a ellas como Poises por costumbre. Para determinar el contenido normal de agua de una lechada, a veces hay que hacer muchas pruebas con diferentes porcentajes de agua.

#### • Agua mínima.

El mínimo contenido de agua de una lechada es aquel que hace lograr a la misma, una consistencia de 30 unidades luego de haber sido agitada durante 20 minutos en un consistómetro a presión atmosférica y 80° F de temperatura. Por lo general, las pruebas de contenido de agua se hacen con cementos puros, ya que el agregado de aditivos puede hacer variar la consistencia de la lechada, sin cambiar el porcentaje de agua.

### 3.5.2 Determinación de la densidad.

Se utiliza una balanza para lodos que puede ser presurizada o no. En el laboratorio se pondrá especial cuidado en eliminar todo el aire contenido en la muestra de cemento.

### 3.5.3 Pruebas de resistencia a la compresión.

Se vierte la lechada en estudio en una serie de moldes, cubos de 1 pulgada por lado y se les coloca en un baño de agua corriente a la temperatura requerida por la prueba, estos pueden ser:

- a) Un recipiente a presión atmosférica para muestras a temperatura hasta de 180F
- b) Un recipiente presurizable para muestras a temperaturas hasta de 380 F y presiones hasta de 3000 psi.

Por supuesto que éste es más caro, pero por otro lado es muy superior, ya que permite simular las condiciones del pozo durante el ensayo. Los tiempos recomendados para sacar las muestras son: 8, 12, 18, 24, 36, 48, y 72 horas. Por lo general, las pruebas a las 8, 24 y 72 horas son suficientes; aunque a veces se necesita más información para los tiempos de espera de fraguado, (WOC), u otros datos.

Una vez que se retiran los cubos del baño se les coloca, inmediatamente en una prensa hidráulica que incrementa la carga entre 1 000 y 4 000 Psi por minuto. Cuando se rompe el cubo, se lee la máxima presión obtenida en la escala y esa será el valor de la resistencia a la compresión. Se deberá repetir la operación con varias muestras y luego se sacará el promedio.

### 3.5.4 Determinación del tiempo de bombeabilidad.

Tal vez sea ésta la prueba de laboratorio más usada en el campo ya que determina durante cuánto tiempo la lechada permanece en estado líquido, (y por consiguiente bombeable) bajo una serie de condiciones dadas de presión y temperatura.

El aparato que se usa para determinar el tiempo de bombeabilidad es el consistómetro, que puede ser atmosférico o presurizable. Este último, tal vez sea el aparato más caro de un laboratorio de cementación, pero es necesario a fin de poder simular las condiciones del pozo.

El recipiente con la lechada a probar gira a velocidad constante, (movido por un motor eléctrico) dentro de un baño de aceite, a través del cual, se le aplica la temperatura y la presión deseada. Dentro del recipiente aislado, hay una paleta conectada a un resorte; a medida que la lechada gira, trata de arrastrar la paleta en el sentido de la corriente. Una lechada más viscosa ejercerá una fuerza mayor

en la paleta, la cual a su vez, transmitirá mayor torque al resorte y éste se mide por medio de un potenciómetro, del que está dotado el aparato.

El consistómetro está calibrado para poder leer directamente las unidades Bearden de consistencia (a veces llamadas Poises, por costumbre). Cuando la lechada alcanza 100 unidades de consistencia (Bc) se torna inbombeable. Así el tiempo de bombeabilidad, exportado por el laboratorio será el transcurrido desde que se introduce la mezcla en el consistómetro hasta que el aparato marca los 100 Bc. La presión y la temperatura aplicadas, son aquellas que indica la norma API RT 10B que especifica la forma en que se debe desarrollar la prueba y que corresponderán a las condiciones aproximadas que se necesitarán en el campo cuando se cimente a una determinada profundidad.

### 3.5.5 Determinación del Filtrado.

Aparatos:

- Filtro prensa para alta o baja presión.
- Medio de presión: Aire comprimido, Nitrógeno o CO<sub>2</sub> (que proporcionan una presión constante.)
- Filtro Núm. 325 (45 Micrones de la U.S. Standard Sieve Screen). Este deberá estar sostenido por una malla más fuerte para soportar la presión diferencial.
- Cilindro graduado: Para medir el volumen de filtrado.

Una vez que se ha mezclado la lechada correctamente, se le vierte en el filtro prensa, se le tapa y se le aplica presión.

- Filtrado de baja presión.

Se aplican 100 Psi, y se va leyendo la cantidad de líquido que cae en el cilindro graduado a los 1/4, Y., 1, 2, y 5 minutos de iniciada la prueba, y luego a intervalos de 5 minutos cada uno. Si la muestra se deshidrata totalmente antes de media hora, se registra el tiempo que tardó en hacerlo. El filtrado se reporta en cc/30 minutos a 100 Psi.

- Filtrado de alta presión.

La presión aplicada ahora será de 1000 Psi y las lecturas se efectuarán de la misma manera. Si la muestra se deshidrata antes de los 30 minutos se extrapola para reportar cc/30 minutos. Así durante el ensayo para la determinación del filtrado se asume que hay más lechada presente que lo que realmente tenemos en el recipiente que por otro lado es lo que sucede en el pozo.

El filtro prensa de alta presión, incorpora también un baño a una temperatura controlable a fin de simular las condiciones reales; la temperatura a la cual se hizo la prueba, deberá estar registrada en el reporte. Es debido a ésta ventaja que el filtro de alta presión se utiliza más que el de baja, y los resultados obtenidos son expresados como cc de filtrado cada 30 minutos a 1000 Psi.

#### 3.5.6. Pruebas de permeabilidad.

Se utiliza un aparato que mide la permeabilidad de las muestras de cemento fraguado de acuerdo a la ley de Darcy.

#### 3.5.7 Determinación de las propiedades reológicas.

El viscosímetro de Fann, es un aparato de tipo rotacional, movido por un motor " sincronizado a dos velocidades diferentes que permite obtener velocidades rotacionales de 600, 300, 200, 100, 6 y 3 RPM. Un cilindro exterior o rotor, gira a una velocidad constante para cada ajuste de RPM, que es transmitido a la lechada de cemento que lo rodea y ésta, a su vez, produce un cierto torque en un cilindro interior o sobre el que actúa un resorte. La torsión que adquiere el resorte puede relacionársela con la viscosidad de la lechada y medirla de esta manera. "Las lecturas obtenidas se emplean para la determinación de las propiedades reológicas (N y K) que son de fundamental importancia para el cálculo de caudales críticos y determinación del régimen de desplazamiento. (Turbulento, Laminar o Tapón) de las " cementaciones.

N\* = Índice de comportamiento

K+ = Índice de consistencia.

#### 3.5.8 Otras pruebas

Las pruebas que se han visto están determinadas por la norma API RP 10 B pero a veces, se necesita información específica para un cemento en especial, o para una lechada en particular. En esos casos, se hacen pruebas para determinar compatibilidades entre el cemento y del espaciador con el lodo, análisis de agua, granulometría.

### 3.6 MIGRACION DE GAS

Desde los primeros pozos, la migración no controlada de hidrocarburos a la superficie ha sido un desafío para la industria del petróleo y el gas. La migración de gas, también conocida como flujo anular, puede promover la acumulación de presión detrás de las tuberías de revestimiento (SCP, por sus siglas en inglés), fenómeno también conocido como existencia de presión anular (SAP, por sus siglas en inglés). La existencia de presión detrás de las tuberías de revestimiento puede definirse como el desarrollo de presión anular en la superficie que puede eliminarse pero que luego vuelve a aparecer. La acumulación de presión detrás de la tubería de revestimiento indica que hay comunicación con el espacio anular, desde una fuente de presión sustentable, debido a un inadecuado aislamiento de las distintas zonas. El flujo anular y la SCP son problemas importantes que afectan a los pozos perforados en diversas regiones productoras de hidrocarburos del mundo.

En el Golfo de México, hay aproximadamente 15,500 pozos productores, cerrados y temporariamente abandonados en el área de la plataforma continental externa (OCS, por sus siglas en inglés). Los datos del Servicio de Administración de Minerales de los Estados Unidos (MMS, por sus siglas en inglés) indican que 6692 de estos pozos, o un 43%, tienen SCP en un espacio anular de la tubería de revestimiento como mínimo. En este grupo de pozos con SCP, hay presión presente en 10,153 de todos los espacios anulares de las tuberías de revestimiento: 47.1% de los espacios anulares corresponden a las sartas de producción, 26.2% a la tubería de revestimiento de superficie, 16.3% a las sartas intermedias y 10.4% a la tubería de superficie.

La plataforma, que perforaba el pozo Macondo de la compañía Británica BP, se hundió en el golfo de México el 22 de abril de 2010 tras una gran explosión que costó la vida a 11 personas y un derrame de 4.9 millones de barriles de crudo. Según el informe de BP la lechada de cemento que se utilizó en el fondo del pozo, falló en su misión de contener los hidrocarburos dentro del yacimiento, lo cual permitió que se desplazaran hacia arriba por el espacio anular. Cuando los hidrocarburos alcanzaron la plataforma, el gas fluía directamente sobre la sala de motores a través del sistema de ventilación creando así el peligro de ignición.

El problema se generó debido a que el cemento no contaba con el debido diseño para controlar la migración de gas a la hora de fraguar la lechada, generando así canales que pueden transportar el gas a superficie a través del espacio anular.

La migración de gas se produce cuando la presión es menor en el espacio anular que en la cara de la formación. El gas luego migra ya sea a una formación de presión más baja o a la superficie. La gravedad del problema puede variar desde de unos pocos psi de presión en la cabeza del pozo a un reventón. Cualquiera que

sea la gravedad, los principales factores que contribuyen a la migración de gas son comunes. Lograr con éxito un sello de cemento anular a largo plazo comienza por la comprensión de estos factores que contribuyen y saber qué se puede hacer para minimizar o contrarrestar sus efectos. En el pasado, varias técnicas se han desarrollado para hacer frente a los factores individuales que contribuyen a la migración de gas. Sin embargo, la migración de gas es causada por numerosos factores relacionados. Sólo abordando cada factor de forma sistemática se puede esperar un grado razonable de éxito. No existe una única "solución mágica" para la migración de gas.

Una cementación exitosa en un pozo que tiene potencial para la migración de gas implica una amplia gama de parámetros: densidad del fluido, la estrategia de eliminación del lodo, diseño de la lechada de cemento (incluido el control de pérdida de fluido y de agua libre), procesos de hidratación del cemento, la unión cemento-revestimiento-formación y propiedades mecánicas del cemento. Aunque el gas puede entrar en el espacio anular por un número de mecanismos distintos, los requisitos de entrada de gas son similares. Debe haber una fuerza impulsora para iniciar el flujo de gas, y espacio en el anular cementado para que el gas ocupe. La fuerza impulsora viene cuando la presión en el espacio anular adyacente a una zona de gas cae por debajo de la presión de la formación. El espacio para que el gas ocupe puede estar en medio del cemento o adyacente a él.

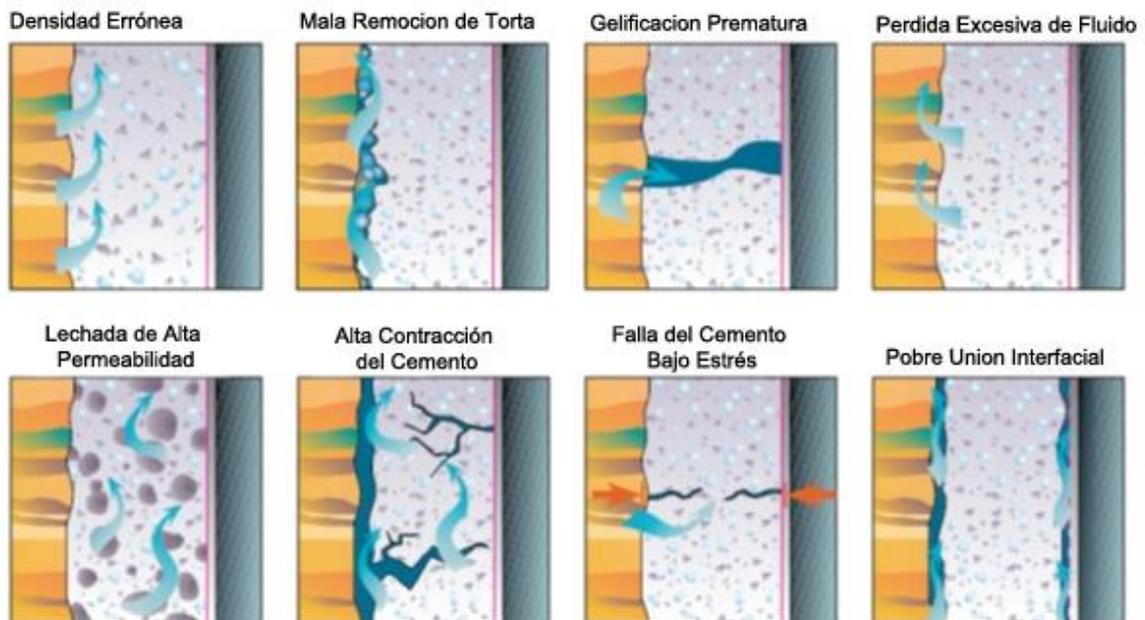


Figura 16. Principales parámetros que afectan la cementación  
Fuente: Getting to the roof of gas migration

Densidades de cemento incorrectas pueden dar lugar a un desequilibrio hidrostático. Pobre eliminación del lodo y del revoque deja una ruta para que el gas fluya hasta el anillo. La gelificación prematura conduce a la pérdida de control de la presión hidrostática. Pérdida excesiva de líquidos contribuye al espacio disponible en la columna de lechada del cemento para que el gas entre. Lechadas altamente permeables resultan en pobre aislamiento zonal y ofrecen poca resistencia al flujo de gas. Alta contracción del cemento conduce a un aumento de la porosidad que puede causar la formación de un micro espacio. Fallas en el cemento bajo tensión ayuda al gas a fracturar el cemento. La mala unión puede causar insuficiencia en las interfaces de cemento-revestimiento o cemento-formación.

#### Densidad:

El gas puede invadir y migrar dentro del cemento sólo si la presión de formación es superior a la presión hidrostática en la pared del pozo. Por lo tanto, como una exigencia principal, la densidad de la lechada debe ser correctamente diseñada para evitar el flujo de gas durante la colocación del cemento. Sin embargo, existe el peligro de perder circulación o fracturar un intervalo si las densidades son muy altas.

#### Remoción de lodo:

Si el lodo permanece en el espacio anular, las bajas tensiones de los fluidos de perforación pueden ofrecer una ruta preferencial para la migración de gas. Además, el agua puede caer del lodo cuando entra en contacto con el cemento. Esto puede conducir al agrietamiento del lodo, que también ofrece una ruta para que el gas fluya. Si el revoque de lodo se deshidrata después de asentarse el cemento, un anillo puede formarse en la interfaz formación-cemento, proporcionando así otro camino para que el gas migre.

#### Diseño de la lechada de cemento:

El control de pérdida de fluido es esencial. En condiciones estáticas siguientes al asentamiento del cemento, la pérdida de fluidos no controlada de la lechada de cemento en la formación contribuye a la reducción del volumen. Esto reduce la presión dentro de la columna de cemento y permite espacio para que el gas migre. Antes de que el cemento fragüe, el agua intersticial es móvil. Por lo tanto, un cierto grado de pérdida de fluido siempre se produce cuando la presión hidrostática anular excede la presión de la formación. El proceso se ralentiza cuando un revoque de baja permeabilidad se forma contra la pared de la formación, o se puede detener por completo cuando las presiones anulares y de formación se equilibran. Una vez que se alcanza el equilibrio, cualquier cambio de volumen dentro del cemento provocará una fuerte caída de presión de poro en la lechada

de cemento o la matriz en desarrollo, y una afluencia de gas severa puede ser inducida.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Getting to the root of gas migration. Oilfield Review 1996.

#### 4. DISEÑO EQUIPO MIGRACION DE GAS

La cementación primaria de un pozo se lleva a cabo a diferentes profundidades, dependiendo de la tubería de revestimiento a cementar. El cemento siempre va a ser colocado en el espacio anular, es decir, en el espacio que existe entre la formación y las paredes externas de la tubería de revestimiento. El fondo de la sección que se cementa, posee una presión de formación que varía de acuerdo al gradiente de presión en la región en donde se perfora el pozo. El gas que migra proviene de la formación que se perforo y que se cementara, este puede fluir desde el fondo del pozo o a través de las paredes de la formación.

De tal manera que en el diseño de un equipo para simular la migración de gas durante la cementación, se debe tener de manera general, un espacio anular, un fondo de la sección a cementar y un sistema de inyección y control de flujo de gas (aire).

##### 4.1 DISEÑO DEL ESPACIO ANULAR

El espacio anular en un pozo de petróleo o gas, está definido como el espacio existente entre la tubería de revestimiento y el hueco abierto o el revestimiento anterior. Se diseñó este espacio, utilizando dos tubos de acero de diferentes diámetros, introduciendo el de diámetro menor dentro del de diámetro mayor, de manera que el espacio entre los dos sea equidistante.

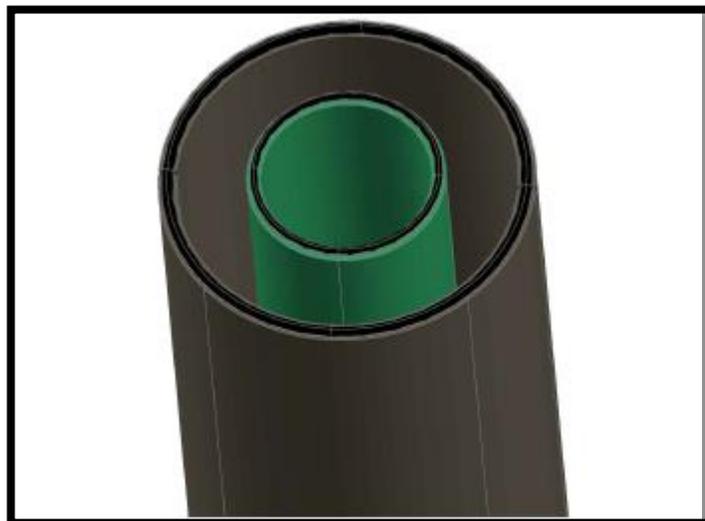


Figura 17: Espacio anular.

Fuente: Autores

## 4.2 DISEÑO DEL FONDO DEL POZO

La formación en el fondo del pozo siempre va estar descubierta a la hora de realizar una cementación primaria. Esta posee una presión que varía con la profundidad y el gradiente de presión de la zona. Para este diseño se considera simplemente una superficie donde reposara la lechada de cemento. Para el diseño del fondo del pozo se utiliza una platina de forma cuadrada con un diámetro igual al tubo exterior de la figura anterior, ya que esta debe soportar la lechada de cemento que se asentara en el espacio anular.

Esta platina cuadrada cuenta con dos ranuras guía del diámetro del tubo exterior e interior para que estos encajen de manera precisa y así generar un sello, evitando que la lechada de cemento se filtre.

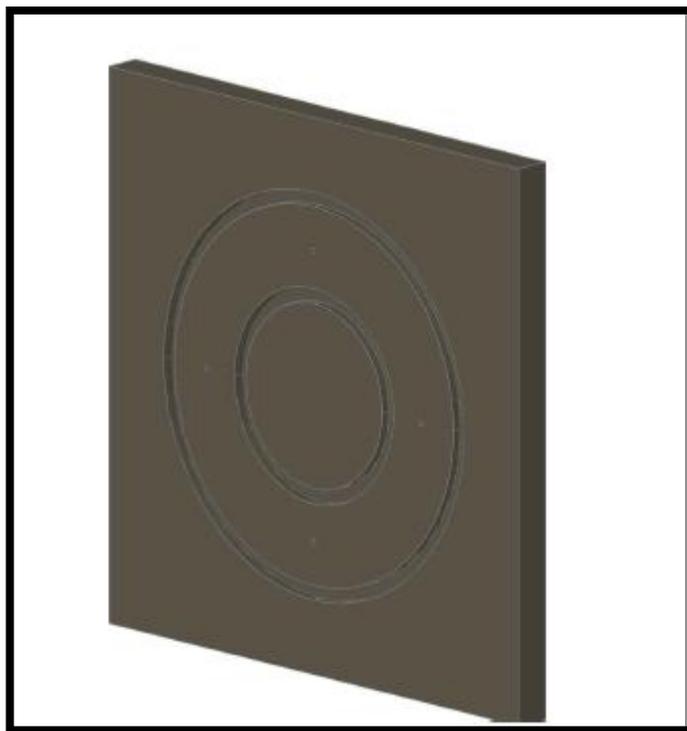


Figura 18. Tapa inferior

Fuente: Autores

### 4.3 DISEÑO DEL FLUJO DE GAS

El gas puede fluir desde el fondo del pozo y a través de las paredes de la formación. En este equipo, el flujo de gas se diseñó para que proviniera desde el fondo del pozo y por razones de seguridad se inyectara aire a presión en lugar de gas. Para esto se realizan cuatro perforaciones en la platina cuadrada que representa el fondo del pozo, por las cuales fluiría el gas hacia el espacio anular. Además, fue necesario diseñar un distribuidor de flujo para que la presión del aire que migra a través de cada uno de los orificios sea la misma.

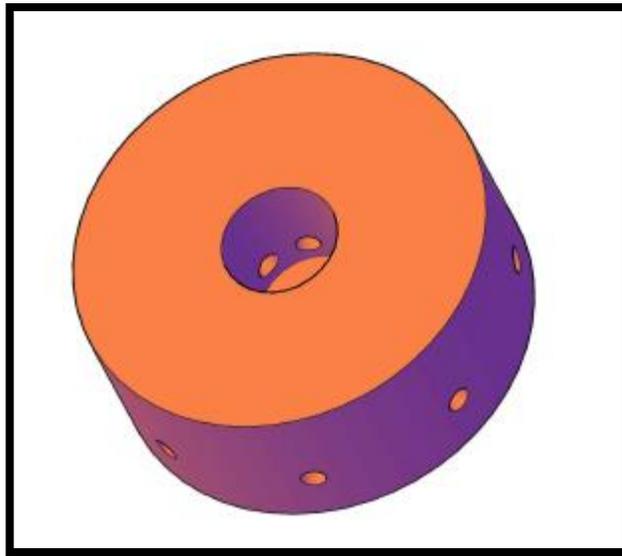


Figura 19. Distribuidor de gas  
Fuente: Autores

#### 4.3.1 Diseño para aumentar la presión hidrostática

La presión hidrostática es la presión que ejerce una columna de fluido sobre un área. En el equipo para simular la migración de gas durante la cementación, se agregara una lechada de cemento dentro del espacio anular, la cual ejercerá una presión hidrostática en el fondo del pozo. Esta presión por ser pequeña, se debe aumentar para poder igualarla a la presión de la formación o a la presión en que está migrando el gas. Por consiguiente, es necesario dejar un área sin cementar dentro del espacio anular para así inyectar aire y ejercer una presión sobre la superficie del cemento, la cual se reflejara en el fondo del pozo, aumentando la presión hidrostática. Para esto se debe perforar un orificio sobre la tapa superior

del equipo, por donde se introducirá aire a presión, además se pondrá un manómetro con regulador para registrar la presión a la que se encuentra esta área.

#### **4.4 DISEÑO DE ACCESORIOS EXTRAS**

Para realizar la simulación de la migración de gas durante la cementación de un pozo, es necesario además de los elementos anteriormente diseñados, algunos otros accesorios que complementan el diseño y ayudan a simular las condiciones en las que se encuentra la lechada de cemento.

##### **4.4.1 Diseño tapa superior**

Se diseñó una tapa superior en el equipo para crear un espacio hermético, donde se pueda elevar la presión mediante la inyección de aire. Esta tapa al igual que la tapa que representa el fondo del pozo, es una platina, en este caso circular que cuenta con dos ranuras guía del diámetro del tubo exterior e interior para que estos encajen de manera precisa. En estas dos ranuras se deben instalar dos empaques para así generar un sello hermético entre la tapa y los tubos.

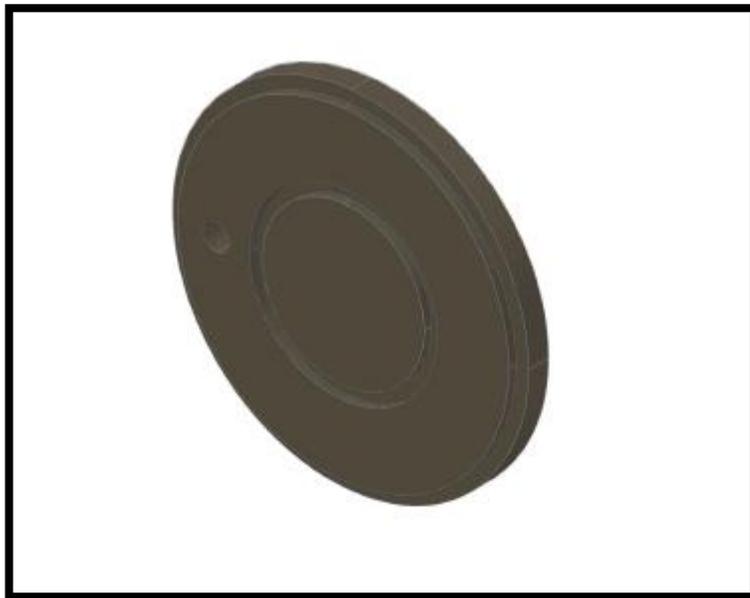


Figura 20. Tapa superior  
Fuente: Autores

#### 4.4.2 Sistema de cierre para del equipo

El equipo debe estar aislado herméticamente y para esto se deben asegurar de manera óptima todos sus componentes. Para este fin se diseñaron cierres de sujeción con bridas fijas.

##### 4.4.2.1 Cierres laterales

Para poder extraer el cemento ya fraguado después de realizar cualquier prueba en el equipo, el tubo exterior debe dividirse en dos partes, las cuales deben poder abrir y cerrar entre sí.

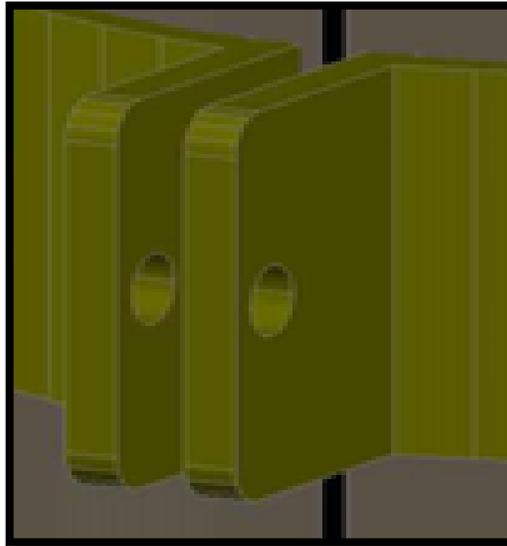


Figura 21. Cierres laterales  
Fuente: Autores

##### 4.4.2.2 Cierres de las tapas superior e inferior.

Tanto la tapa superior, como la inferior deben acoplarse a los tubos para generar sello hermético. Para lograr esto se diseñaron los siguientes mecanismos de cierre que se ilustran en las figuras 22 y 23.

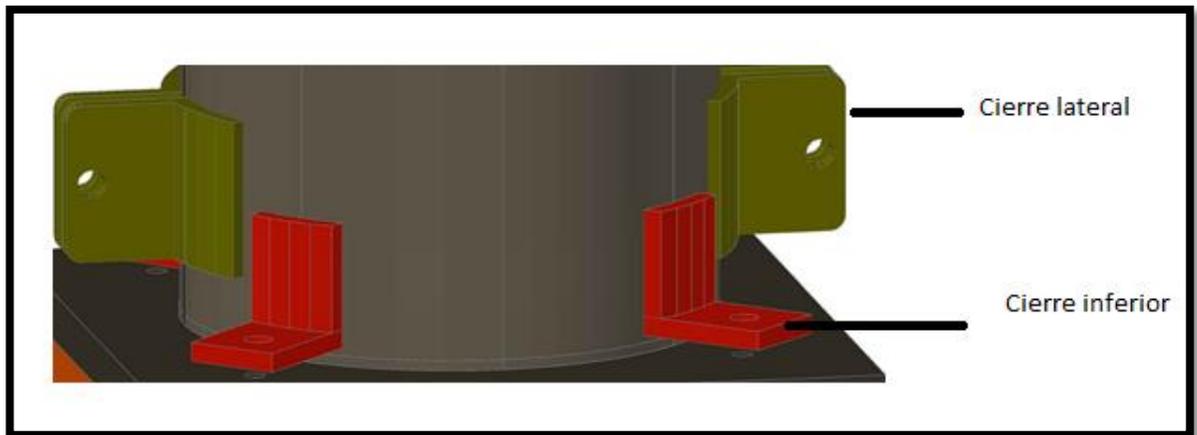


Figura 22. Cierre inferior  
Fuente: Autores

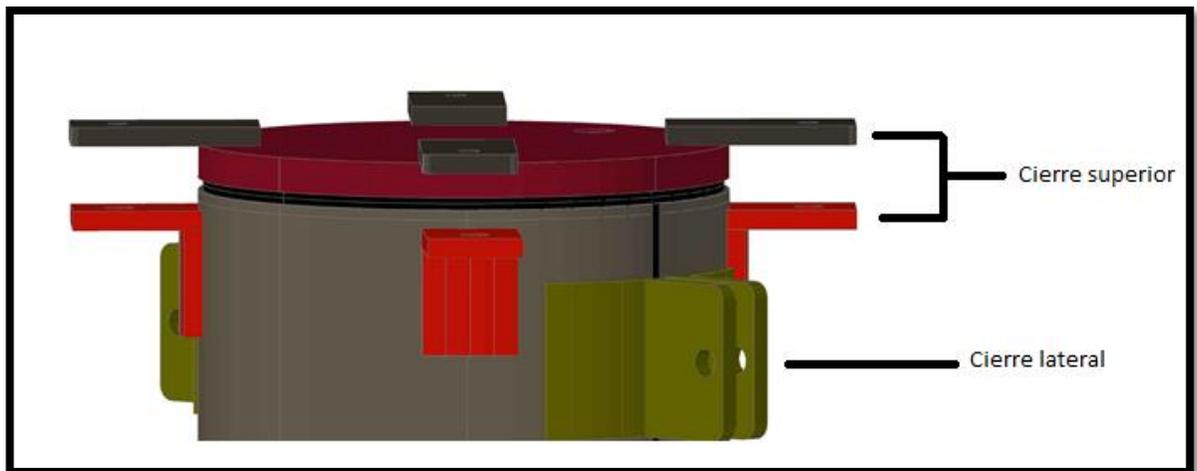
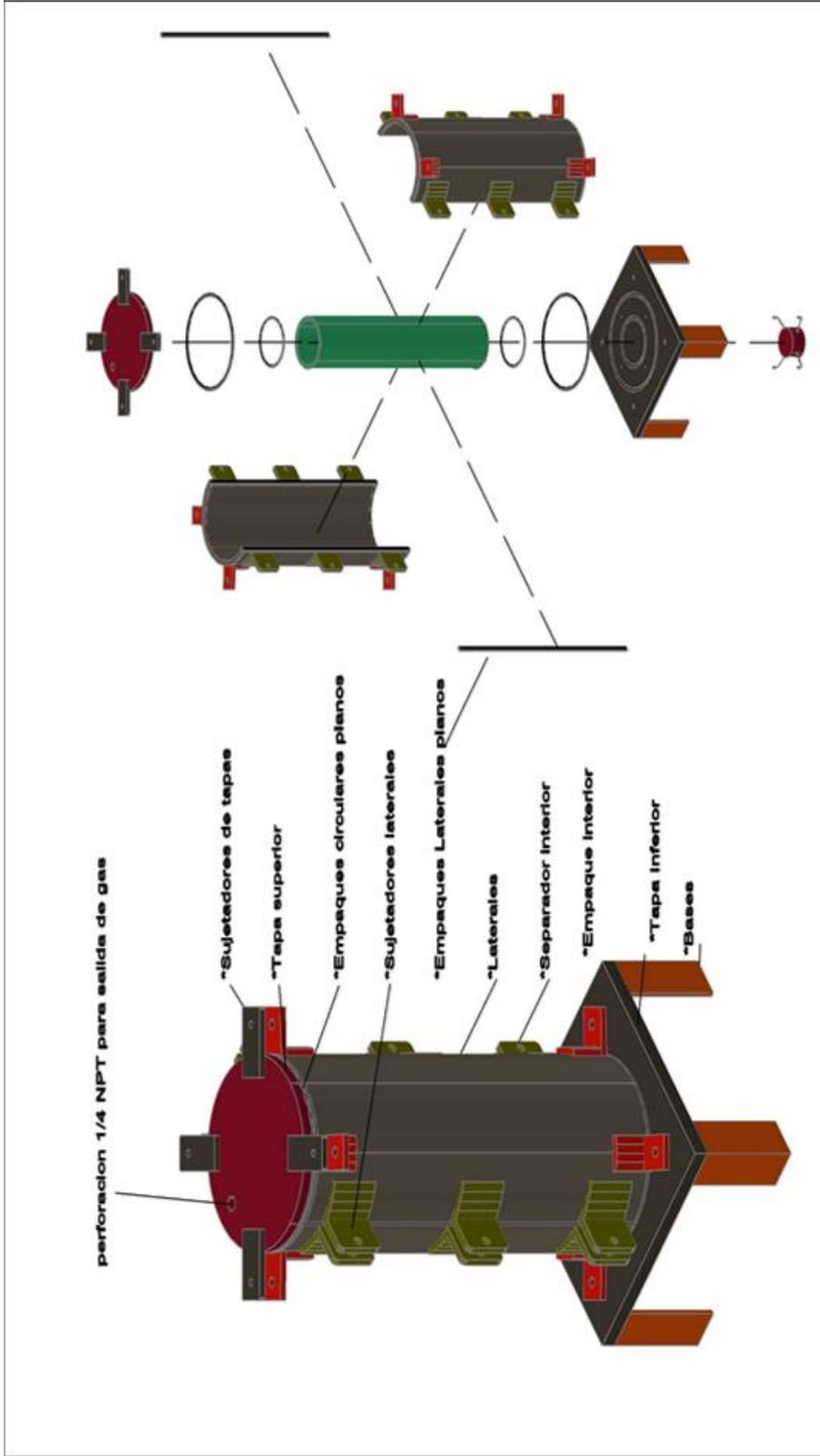


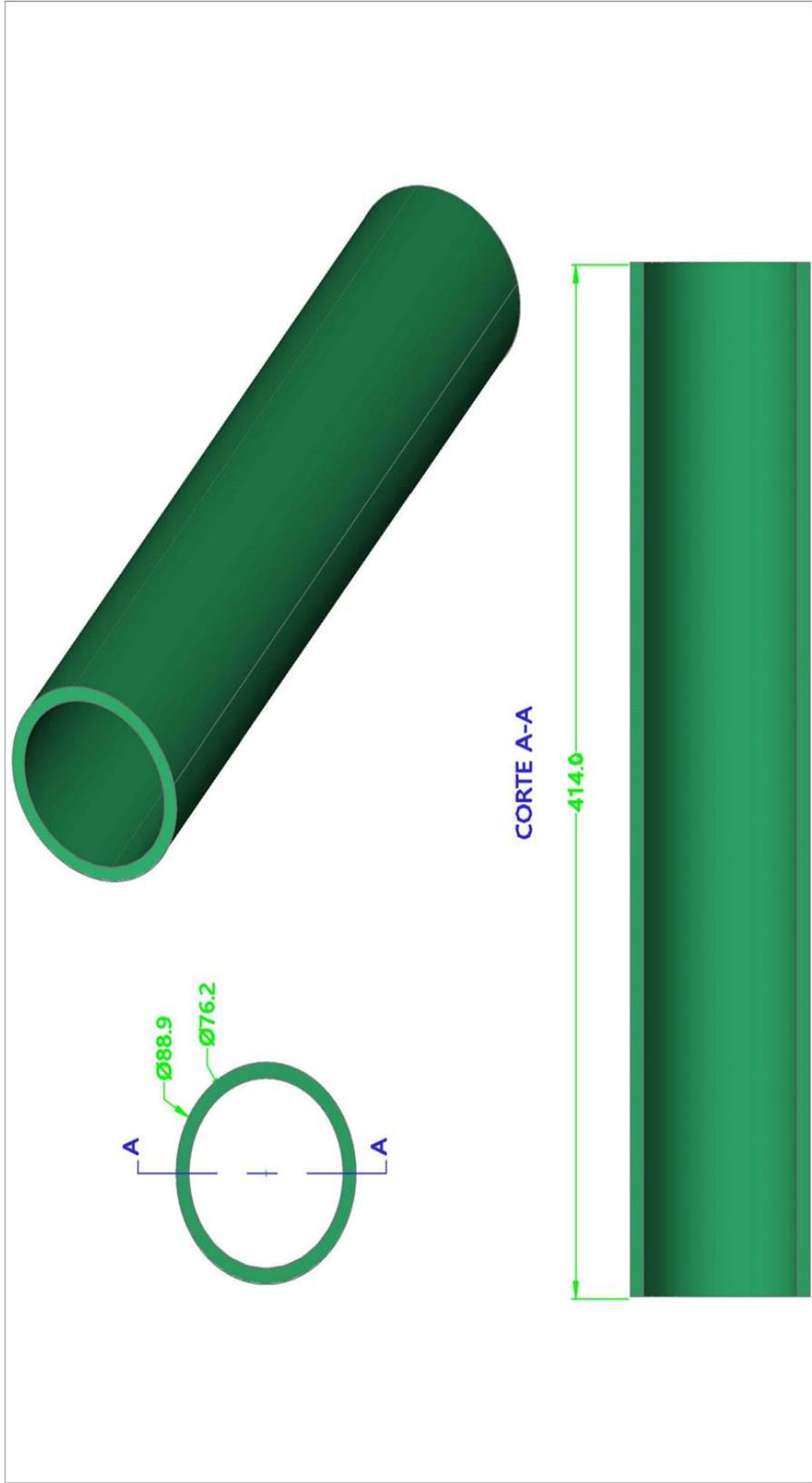
Figura 23. Cierre superior  
Fuente: Autores

#### 4.5 PLANOS DEL DISEÑO

Se realizaron seis planos técnicos en el software AutoCAD, especificando cada uno de los componentes diseñados anteriormente en diferentes vistas y con sus respectivas medidas en milímetros.

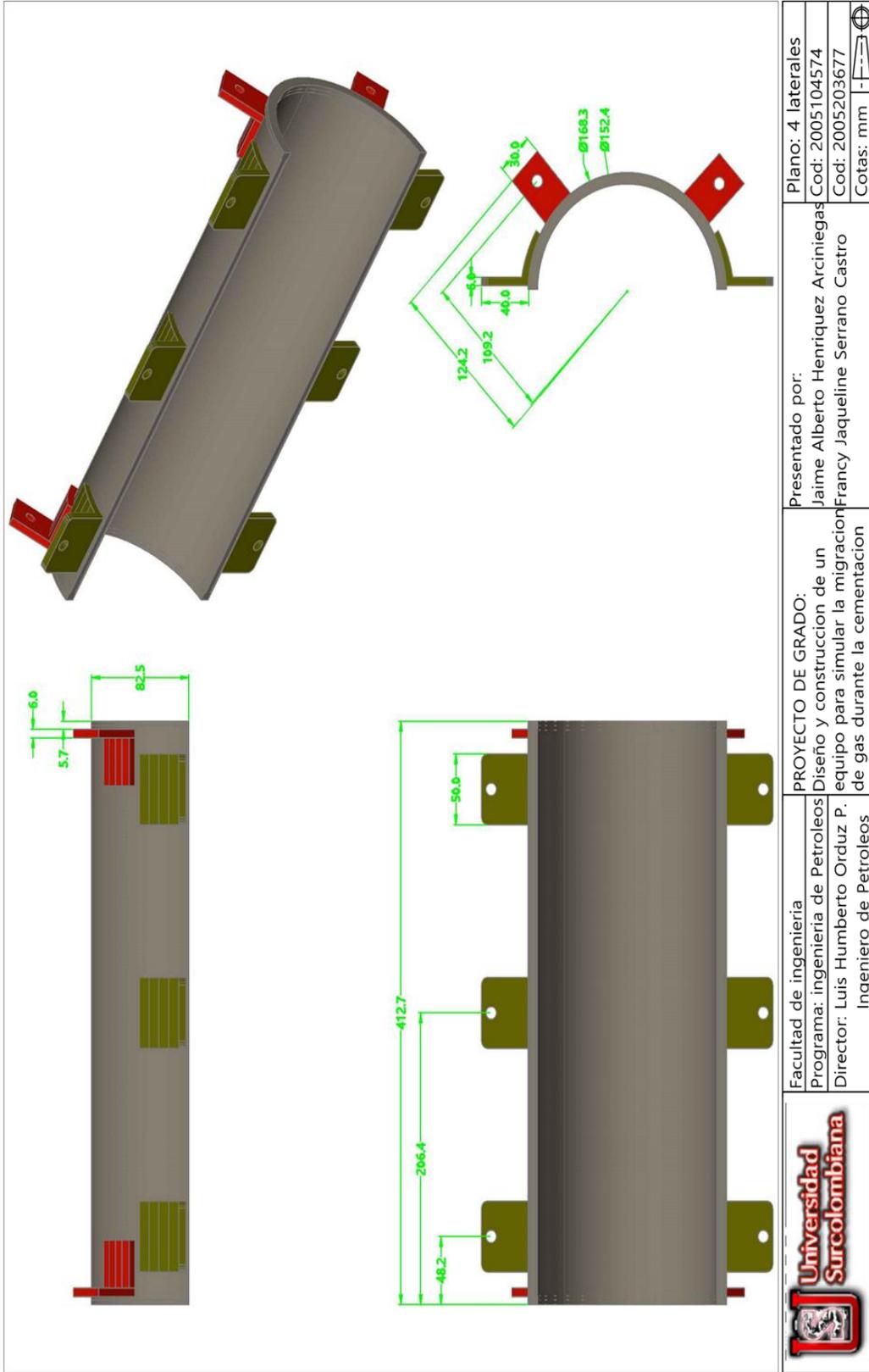


	<p>Facultad de Ingeniería          Programa: Ingeniería de Petróleos          Director: Luis Humberto Ordúz P.          Ingeniero de Petróleos</p>	<p>PROYECTO DE GRADO:          Diseño y construcción de un          equipo para simular la migración          de gas durante la cementación.</p>	<p>Presentado por:          Jaime Alberto Henríquez Arciniegas          Francy Jaqueline Serrano Castro</p>	<p>Plano: 1.- Explosión          Cod: 2005104574          Cod: 2005203677</p>
---	--	--	---	---

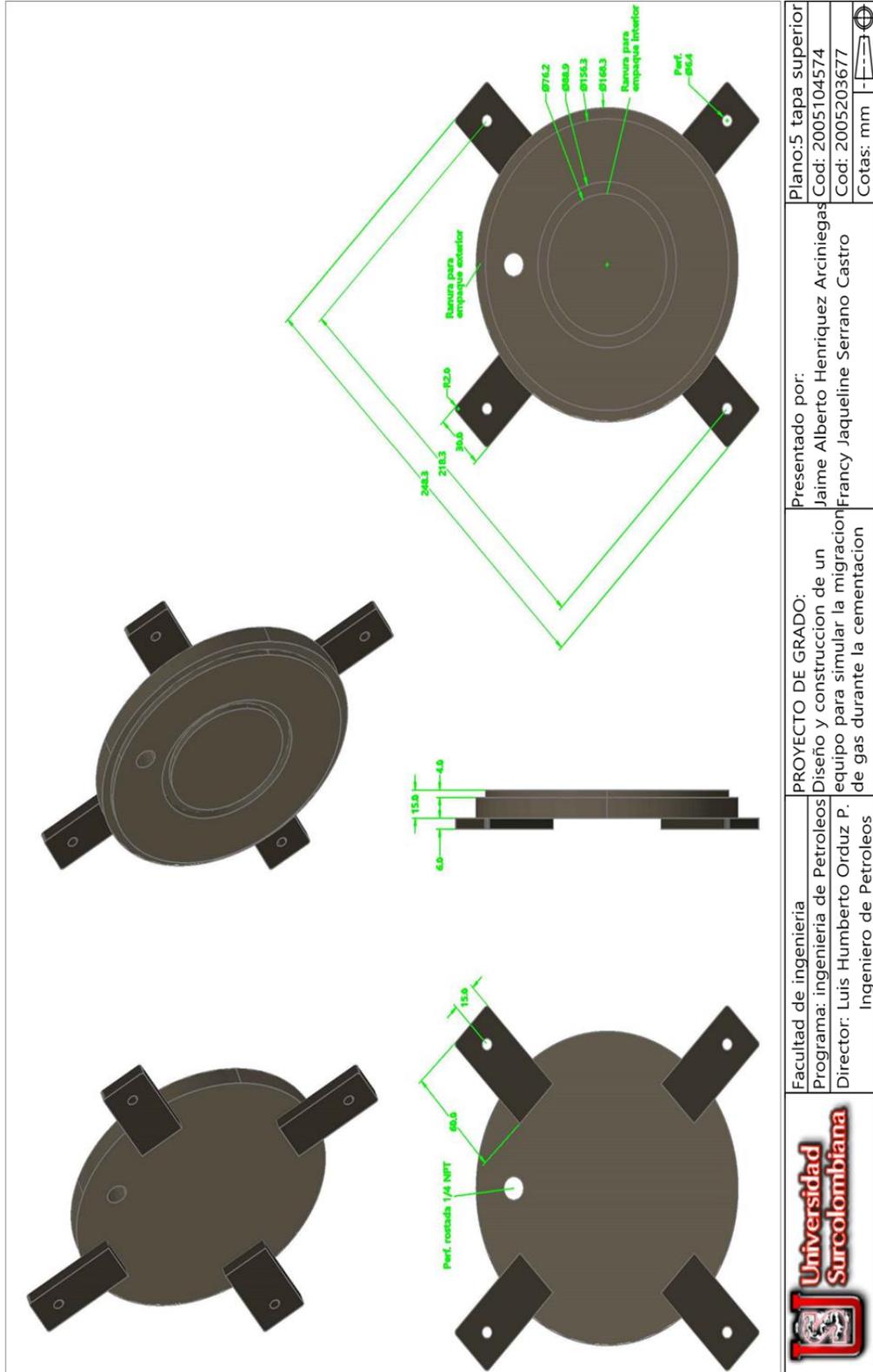


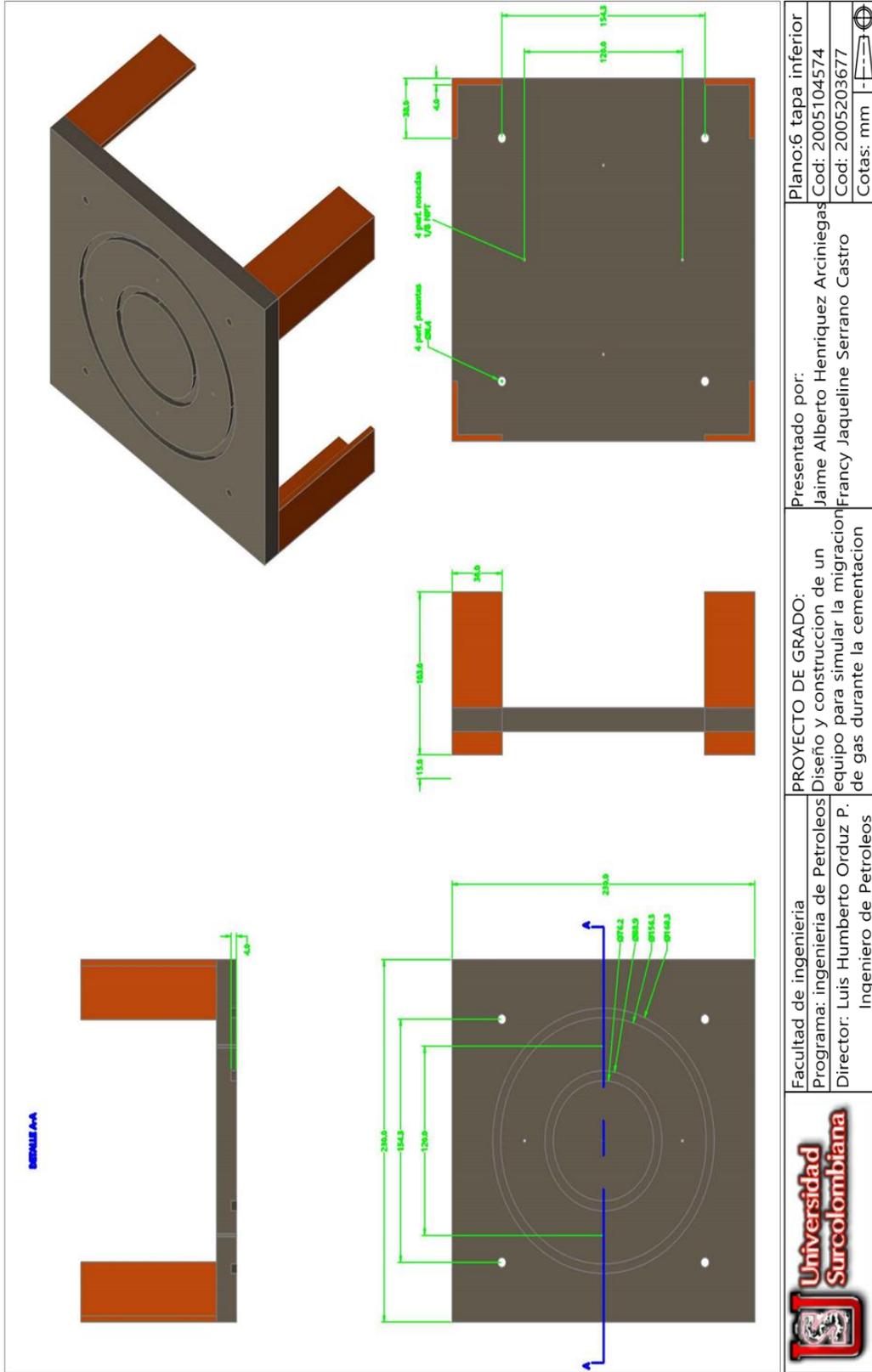
 <b>Universidad Surcolombiana</b>	Facultad de ingeniería Programa: ingeniería de Petroleos Director: Luis Humberto Orduz P. Ingeniero de Petroleos	PROYECTO DE GRADO: Diseño y construcción de un equipo para simular la migración de gas durante la cementación	Presentado por: Jaime Alberto Henríquez Arciniegas Francy Jaqueline Serrano Castro	Plano: 2 Separador Cod: 2005104574 Cod: 2005203677 Cotas: mm

	 <p><b>Universidad Surcolombiana</b></p>	<p>Facultad de ingeniería Programa: ingeniería de Petroleos Director: Luis Humberto Orduz P. Ingeniero de Petroleos</p>	<p>PROYECTO DE GRADO: Diseño y construcción de un equipo para simular la migración de gas durante la cementación</p>	<p>Presentado por: Jaime Alberto Henríquez Arciniegas Francy Jaqueline Serrano Castro</p>	<p>Plano 3: Distribuidor Cod: 2005104574 Cod: 2005203677 Cotas: mm</p> 
--	---	---	--	---	--



	Facultad de ingeniería Programa: ingeniería de Petroleos Director: Luis Humberto Orduz P. Ingeniero de Petroleos	PROYECTO DE GRADO: Diseño y construcción de un equipo para simular la migración de gas durante la cementación	Presentado por: Jaime Alberto Henríquez Arciniegas Francy Jaqueline Serrano Castro	Plano: 4 laterales Cod: 2005104574 Cod: 2005203677 Cotas: mm
				





## 5. CONSTRUCCION

Para construir el diseño que se mencionó en el capítulo anterior, se necesitaron los planos técnicos del diseño y se emplearon los siguientes materiales:

Tubo de acero de diámetro externo 17.2 cm, espesor 0.635 cm, longitud 41.27 cm.

Tubo de acero de diámetro externo 8.89 cm, espesor 0.25 cm, longitud 41.4 cm.

Platina circular de espesor 1.5 cm.

Platina cuadrada de 23cm x 23 cm, espesor 1.5 cm.

Acero y acoples para el distribuidor.

Mangueras para distribuidor.

Ángulos de acero.

### 5.1 ESPACIO ANULAR

En la construcción del espacio anular se empleó un tubo de acero de diámetro externo de 17.2 cm, espesor 0.635 cm, longitud 41.27 cm, el cual se dividió en dos partes y se denominó con el nombre de tubo exterior. A este tubo se soldaron ángulos en su parte lateral, superior e inferior con perforaciones para tornillos para poder cerrarlo y asegurarlo a los demás componentes del equipo. Además, se utilizó un tubo de acero de diámetro externo de 8.89 cm, espesor 0.25 cm, longitud 41.4 cm el cual se denominó tubo interior, debido a que debe posicionarse dentro del tubo exterior para constituirse el espacio anular.

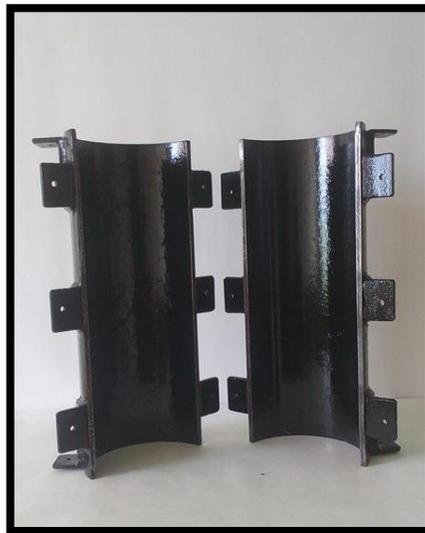


Figura 24. Tubo externo

Fuente: Autores



Figura 25. Tubo interno  
Fuente: Autores



Figura 26. Espacio anular  
Fuente: Autores

## 5.2 FONDO DEL POZO

Para construir el fondo del pozo se empleo una platina cuadrada de 23cm x 23 cm, espesor 1.5 cm. En esta se realizaron dos ranuras circulares que corresponden al diametro del tubo exterior e interior. Ademas se perforaron cuatro orificios tipo rosca de ¼ NPT por los cuales fluira el aire y cuatro orificios para introducir los tornillos que aseguran el tubo exterior a la platina, la cual se denomino con el nombre de tapa inferior. A esta tapa inferior se soldaron cuatro angulos en sus extremos para darle soporte. La figura 27 ilustra la tapa inferior.

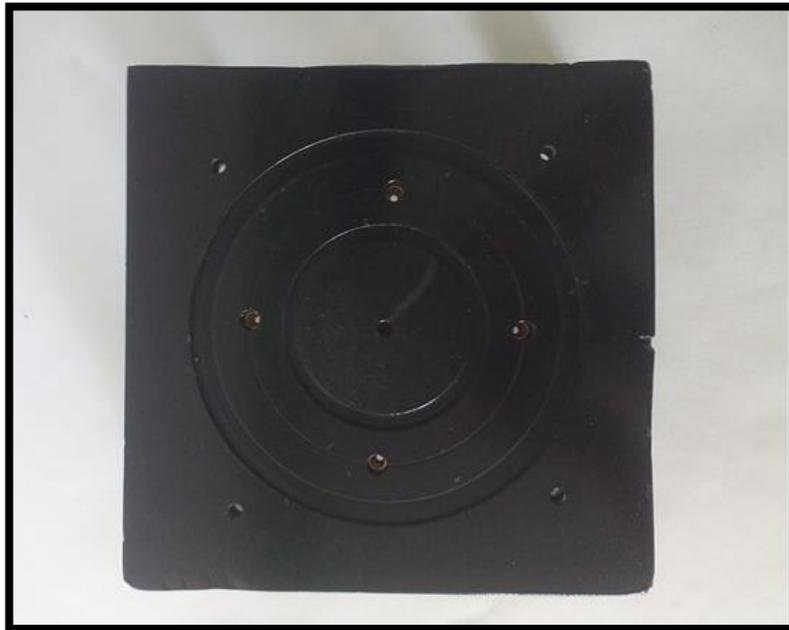


Figura 27. Tapa inferior  
Fuente: Autores

## 5.3 FLUJO DE GAS

Como se mencionó anteriormente, el flujo de gas pasa al espacio anular a través de los orificios perforados en la tapa inferior. De la otra cara de la tapa inferior se encuentra el distribuidor de gas el cual se construyó con un cilindro de acero de 5.08 cm de diámetro y 3 cm de espesor. Se perforaron cuatro orificios tipo rosca de 1/8 NPT alrededor del cilindro, donde se instalan acoples para asegurar mangueras que se conectaran a los orificios de la tapa inferior y una perforación tipo rosca de 3/8 NPT en el centro, por donde se conectara la línea principal de

aire al equipo. La siguiente figura ilustra el distribuidor de flujo con acoples y mangueras instaladas.

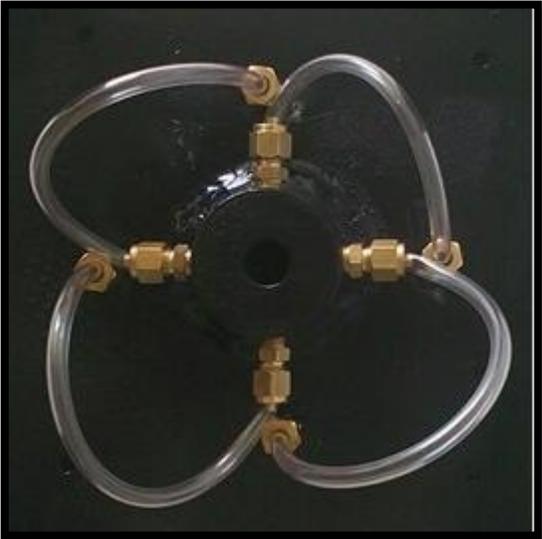


Figura 28. Distribuidor de gas  
Fuente: Autores



Figura 29. Tapa inferior y soporte del equipo  
Fuente: Autores

#### 5.4 ACCESORIOS EXTRAS

Se construyó la tapa superior del equipo a partir de una platina de acero circular de diámetro externo de 17.2 cm y 1.5 cm de espesor. En esta se realizaron dos ranuras circulares que corresponden al diámetro del tubo exterior e interior. Se realizó una perforación tipo rosca 1/8 NPT, por la cual se introducirá aire a presión en caso de necesitar aumentar la presión hidrostática en el fondo de la columna de cemento. Además, se soldaron cuatro platinas rectangulares con orificios para tornillos y de esta manera concluir el sistema de cierre de la tapa superior.



Figura 30. Tapa superior  
Fuente: Autores

## **6. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

### **6.1 MANUAL DE OPERACIÓN**

1. Es muy importante que antes de operar el equipo se realice la lectura minuciosa del manual de operación y mantenimiento. Si se realiza una adecuada instalación, se lleva a cabo el plan de mantenimiento y se opera según los manuales, el equipo no presentará problemas de ningún tipo. El plan de mantenimiento va relacionado directamente con la buena operación del mismo, ya que el usuario deberá entender y conocer las precauciones de seguridad antes de usarlo.
2. Se debe utilizar el equipo de seguridad sugerido. Dentro de este equipo se encuentra: gafas de seguridad, bata de laboratorio.
3. Verificar que el equipo se encuentre libre de sustancias y artículos extraños para evitar alteraciones en su funcionamiento y fallas.
4. Asegurarse de que todos los sistemas y componentes se encuentren en su estado y posición óptima para comenzar a operar.
5. El equipo debe trabajar a temperatura ambiente y sin la presencia de factores externos tales como corrientes bruscas de aire y polvo.
6. Comprobar que el espacio donde será colocado el equipo cuente con una superficie totalmente plana, ya que de lo contrario esto afectaría a la operación.

#### **6.1.1 Montaje del equipo**

Para realizar el montaje del equipo se deben seguir los pasos siguientes:

1. Colocar la tapa inferior sobre una superficie plana. Insertar los empaques en las ranuras circulares de la tapa.



Figura 31. Montaje tapa inferior  
Fuente: Autores

2. Unir y atornillar las dos caras del tubo exterior del equipo. Una de las caras debe tener dos empaques, los cuales generaran sello.



Figura 32. Montaje tubo externo  
Fuente: Autores

3. Montar el tubo exterior sobre la tapa inferior del equipo asegurándose de que se encuentre en la posición correcta y asegurarlo. Seguidamente introducir el tubo interior.



Figura 33. Montaje espacio anular  
Fuente: Autores

4. Instalar la tapa superior del equipo asegurándose de que el tubo interior encaje en la ranura circular. La tapa debe tener los dos empaques en las ranuras circulares.



Figura 34. Montaje tapa superior  
Fuente: Autores

### 6.1.2 Desmontaje del equipo

Para realizar el desmontaje del equipo se deben seguir los pasos siguientes:

1. Remover los tornillos que aseguran la tapa superior y retirarla.
2. Remover los tornillos de los cierres laterales y del fondo del tubo exterior.
3. Retirar el tubo exterior de la tapa inferior o base del equipo.
4. Separar las dos caras del tubo exterior.
5. Retirar el tubo interior, para que el espacio anular cementado este libre.

## 6.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO

El objetivo principal de darle un buen mantenimiento a este equipo, es lograr que no se presenten fallas y al mismo tiempo evitar accidentes durante su operación. Existen áreas críticas en la realización del mantenimiento, y para este mecanismo se contemplaron las siguientes:

- Inspección
- Limpieza
- Ajustes

### 6.2.1 Inspección.

Se recomienda una inspección de todo el equipo antes de utilizarlo para encontrar piezas dañadas, fallas leves o imperfecciones. Si el equipo se trabaja con presiones se debe monitorear durante el proceso en caso de que ocurran pérdidas de presión. Si esto sucede se debe realizar una inspección para encontrar la fuga, luego cerrar el paso de aire, despresurizar el equipo y realizar las correcciones necesarias. Durante la inspección si se encuentran empaques o tornillos defectuosos, éstos deben ser reemplazados antes de poner el equipo en marcha.

Además de inspeccionar el equipo, se debe también inspeccionar la línea principal de suministro de aire a presión. De esta manera se busca cualquier tipo de fuga o anomalía que se pueda presentar en las mangueras, válvulas, reguladores y manómetros.

### 6.2.2 Lubricación

El equipo se debe asegurar y cerrar mediante tornillos. Estos se pueden lubricar de vez en cuando para que no exista demasiada fricción entre el tornillo y la tuerca a la hora de enroscar y apretar o viceversa. Por otro lado, se debe aplicar un lubricante o grasa sobre las paredes de los tubos que conforman el espacio anular, antes de cementarlo, con el fin de evitar que el cemento se adhiera a las paredes de los tubos, lo cual generaría inconvenientes a la hora de desmontar el equipo.

### 6.2.3 Ajustes

Durante el montaje del equipo se deben ajustar todas las partes para lograr la hermeticidad del espacio anular. Cada componente debe encajar de manera precisa. Se deben ajustar todos los tornillos con sus respectivas tuercas y arandelas. Si durante la operación del equipo se presenta una pérdida de presión, debido a que un empaque no está generando un buen sello, se deben ajustar un poco más los tornillos que están uniendo las piezas separadas por este empaque.

### 6.2.4 Limpieza

Se debe realizar una limpieza general del equipo después de realizar cada prueba para mantenerlo en condiciones óptimas de operación. Durante la operación, se debe observar si el cemento está descendiendo a través de las mangueras del distribuidor. Si esto ocurre, se recomienda parar el equipo o aumentar la presión del aire para evitar que el cemento fragüe dentro del distribuidor y ocasione taponamiento. Al finalizar cada prueba, se debe desmontar el equipo y realizar una limpieza del distribuidor de flujo, limpiando cualquier residuo de cemento en los orificios de la tapa inferior por donde fluye el aire. Luego se debe inyectar aire a presión a través del distribuidor, para retirar cualquier residuo de agua o cemento que se acumule en las mangueras.

Después de terminada cada prueba se debe remover la grasa o lubricante que se aplica para prevenir que el cemento se adhiera a las paredes del equipo.

## **7. PRUEBA DEL EQUIPO**

Después de que el equipo fue construido, se puso en operación para probar si el diseño que se realizó funciona y puede simular la migración de gas durante la cementación de un pozo totalmente vertical. Para esto se realizaron las siguientes pruebas:

- Prueba de hermeticidad
- Prueba 1. Cementación básica
- Prueba 2. Cementación con presión diferencial

### **7.1 PRUEBA DE HERMETICIDAD**

Debido a que en el equipo se pueden llevar a cabo simulaciones con presiones, se debe realizar una prueba de hermeticidad antes de realizar este tipo de procedimientos, para confirmar que en el espacio anular se registre y mantenga una determinada presión. Esta prueba se lleva a cabo en el laboratorio siguiendo los siguientes pasos:

1. Armar el equipo según las instrucciones del manual de operación.
2. Conectar la línea de aire a la entrada del distribuidor de flujo.
3. Conectar la línea de aire en la tapa superior del equipo.
4. Realizar una inspección de todas las líneas de aire.
5. Abrir parcialmente la válvula de paso de la línea de aire principal y leer la presión en el manómetro.
6. Leer la presión que registra el manómetro que se encuentra en la parte superior de equipo. Esta debe ser igual a la presión que registra el manómetro ubicado en la línea de aire principal.
7. Preparar una solución de agua y jabón y aplicarla en cada uno de los lugares por donde pueda existir pérdida de presión.
8. Si las presiones que registran los manómetros son iguales y al aplicar la solución de agua y jabón no se identifican escapes de aire, el equipo esta hermético.

La prueba se realizó en el laboratorio como se mencionó anteriormente y se encontraron algunos escapes de aire debido a falla de los empaques. Luego de cambiarlos y realizar ajustes se logró la hermeticidad del equipo. La figura muestra la presión constante de 25 psi que registra el manómetro en el equipo y la figura muestra la aplicación de la solución de agua y jabón sobre el equipo.



Figura 35. Registro presión prueba 1  
Fuente: Autores



Figura 36. Prueba de hermeticidad del equipo  
Fuente: Autores

## 7.2 PRUEBA 2. CEMENTACION BASICA

La finalidad de esta prueba fue simular la migración de gas durante la cementación a presión atmosférica. Para llevar a cabo esta prueba se siguieron los pasos siguientes:

1. Se armó el equipo según las instrucciones del manual de operación, omitiendo el último paso, es decir sin instalar la tapa superior del equipo. Además se aplicó un lubricante sobre las paredes de los tubos que conforman el espacio anular para evitar que el cemento se adhiriera a estas.
2. Se regulo la presión de la línea de aire que va al distribuidor en 3 psi.
3. Se prepararon 4000 ml de lechada de cemento, con una densidad de 15.5 libras/galón, con cemento tipo A, sin agregar ningún tipo de aditivo.
4. Se colocaron 3500 ml de lechada de cemento en espacio anular.
5. Luego se empezó a inyectar aire a una presión constante de 3 psi a través del distribuidor hacia el espacio anular y se dejó fraguar el cemento.



Figura 37. Espacio anular cementado.

Fuente: Autores.

- Después de fraguado el cemento, se agregó una pequeña cantidad de agua por encima del espacio anular cementado y se inyectó aire desde el fondo a 3 psi de presión. Luego se observó cómo se generaban burbujas debido a la migración del aire a través del cemento ya fraguado. La figura siguiente muestra lo observado.



Figura 38. Migración de aire a través del cemento.

Fuente: Autores

- Luego se procedió al desarme del equipo para descubrir el espacio anular cementado y buscar posibles rutas de migración.



Figura 39. Espacio anular cementado prueba 2

Fuente: Autores



Figura 40. Fondo del espacio anular prueba 2  
Fuente: Autores

La figura anterior muestra los puntos por donde se inyectó el aire a través del cemento.

En la figura 41 se observan los canales de migración en el cemento.



Figura 41. Canal de migración del aire  
Fuente: Autores

### 7.3 PRUEBA 3. CEMENTACION CON PRESION DIFERENCIAL

El objetivo de esta prueba fue simular la migración de gas durante la cementación, aplicando un diferencial de presión de 5 psi. Para llevar a cabo la prueba se siguieron los pasos a continuación:

1. Se armó el equipo según las instrucciones del manual de operación, se aplicó un lubricante sobre las paredes de los tubos que conforman el espacio anular para evitar que el cemento se adhiera a estas.
2. Se regulo la presión de la línea de aire principal que va al distribuidor en 30 psi.
3. Se prepararon 4000 ml de lechada de cemento, con una densidad de 15.2 libras/galón, con cemento tipo A sin agregar ningún tipo de aditivo.
4. Se colocaron 3500 ml de lechada de cemento en espacio anular.
5. Luego se empezó a inyectar aire a una presión constante de 30 psi a través del distribuidor hacia el espacio anular. De la misma manera se regulo la presión por encima del cemento en 25 psi, obteniendo así un diferencial de 5 psi entre las presiones de entrada en el equipo.

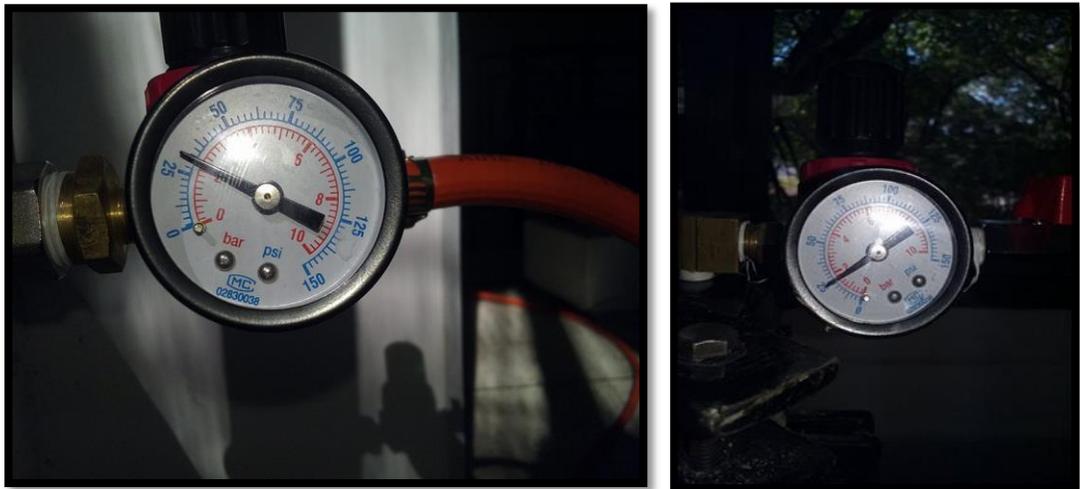


Figura 42. Manómetro línea de aire principal y manómetro del equipo  
Fuente: Autores

6. Luego de que el cemento fraguara, se cerró la entrada de aire al sistema, cerrando la válvula en la línea principal para luego despresurizar el equipo.
7. Se retiró la tapa superior del equipo y se agregó cierta cantidad de agua sobre el tope del cemento para luego inyectar desde el fondo una presión de 3 psi. Se observaron burbujas debido a la migración de aire a través del cemento ya fraguado.



Figura 43. Prueba migración de aire # 2  
Fuente: Autores

8. Luego se procedió al desarme del equipo para descubrir el espacio anular cementado y buscar posibles canales de migración.



Figura 44. Espacio anular Prueba 3  
Fuente: Autores

Se encontró un orificio bien definido en la superficie del espacio anular por donde migro el aire desde el fondo.



Figura 45. Orificio migración de aire.  
Fuente: Autores



Figura 46. Orificio con ondas  
Fuente. Autores

La figura anterior muestra el mismo orificio a una mayor profundidad del espacio anular, donde se observa el rastro de las ondas de presión que se generaron alrededor del orificio.

## 8. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un equipo para simular la migración de gas durante la cementación de una sección de un pozo vertical.
- Se corrieron tres pruebas con el equipo. La primera prueba consistió en comprobar la hermeticidad del equipo. La segunda prueba se realizó cementando el espacio anular e inyectando aire desde el fondo para que migrara a través del cemento, sin aplicar ninguna presión por encima del cemento. La tercera prueba se realizó inyectando aire desde el fondo y por encima del cemento con un diferencial de 5 psi entre estas.
- En las pruebas 2 y 3 se comprobó la migración de aire a través del cemento fraguado, observando burbujas de aire en el agua que se agregó por encima del cemento. Se notaron además canales y orificios por donde ocurrió la migración de aire a través del cemento.
- Se elaboró un manual de operación y mantenimiento del equipo.
- Se hace entrega del equipo al laboratorio de lodos y cementos de la facultad de ingeniería de la Universidad Surcolombiana.

## 9. RECOMENDACIONES

- El equipo construido y las pruebas que se realizaron en este, no siguen ninguna normatividad API.
- Las pruebas se deben llevar a cabo a presiones no mayores de 70 psi.
- El equipo queda a disposición para que futuros tesis realicen pruebas con diferentes presiones, densidades de lechada de cemento, aditivos como aceleradores, retardadores, controladores de migración de gas, con el fin de estructurar y establecer las pruebas que se llevaran a cabo por los estudiantes de la asignatura de cementación.
- Se recomienda adecuar el equipo para realizar pruebas a temperaturas mayores a la ambiente.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Agip ENI. Drilling design manual. 1999.
- Albarrán Flores Diego, Hernández Sandoval Luis Armando. Cementacion de pozos petroleros en aguas profundas. 2012.
- Anthony Lannacchione Julie Vandenbossche, Donald Janssen. Experiments to better understand Pennsylvania's gas migration problem. 2013.
- Erik Nelson. Well cementing. 1990.
- F. PRASSL F. Wolfgang. Drilling Engineering.
- Halliburton. Well Cementing. 2010.
- <http://portal-perforacion.blogspot.com.co/2014/10/conceptos-de-cementacion-secundaria.html>
- Introduccion a la cementacion. JET 14.
- Khandka RUPAK Kumar. Leakage behind casing. 2007.
- OILFIELD REVIEW. Getting to the roof of gas migration. 1996.
- Pinto G. H. V. P. 1 [y otros]. New methodology for gas prediction before oil well cementing. Brazilian Journal of Petroleum and Gas, 2012.
- Posibles causas del accidente de la plataforma Deepwater Horizon Petrotecnia. 2010.
- Preston MOORE L. Drilling practices manual. Pennwell publising company, 1986.
- Schlumberger. Un giro a la derecha: Una vision general de las operaciones de perforacion. 2012.