



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 14 de junio de 2017

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

CRISTIAN ROJAS GARCIA, con C.C. No. 1075273949,

JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ, con C.C. No. 1054554071,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado

titulado **DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO**

presentado y aprobado en el año 2017 como requisito para optar al título de

\_\_\_\_\_INGENIERO DE PETROLEOS\_\_\_\_\_;

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.

Vigilada Mineducación

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.



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Firma:

Juan Carlos Rodríguez López

Vigilada Mineducación

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.



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS**



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

**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-07**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**1 de 4**

**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL  
ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO**

**AUTOR O AUTORES:**

<b>Primero y Segundo Apellido</b>	<b>Primero y Segundo Nombre</b>
ROJAS GARCIA RODRIGUEZ LOPEZ	CRISTIAN JUAN CARLOS

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

<b>Primero y Segundo Apellido</b>	<b>Primero y Segundo Nombre</b>
ORDUZ PEREZ	LUIS HUMBERTO

**ASESOR (ES):**

<b>Primero y Segundo Apellido</b>	<b>Primero y Segundo Nombre</b>

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO DE PETROLEOS**

**FACULTAD: INGENIERIA**

**PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERIA DE PETROLEOS**

**CIUDAD: NEIVA**

**AÑO DE PRESENTACIÓN: 2017**

**NÚMERO DE PÁGINAS: 81**

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

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

Vigilada mieducación

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.



**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. asentamiento	settling	6. Lechada	Slurry
2. cementación	cementing	7. _____	_____
3. equipo	equipment	8. _____	_____
4. Diseño	Desing	9. _____	_____
5. Construcción	Construction	10. _____	_____

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

Este artículo presenta el diseño y construcción de un equipo para simular el asentamiento de la lechada de cemento. En el diseño del equipo se consideraron el aumento de presión y temperatura, y accesorios necesarios para poder simular el proceso de cementación en el pozo; el proyecto permite visualizar de manera directa, práctica y eficaz el comportamiento de la lechada de cemento en el pozo. Una vez construido el equipo se realiza su instalación en el laboratorio y es puesto en operación para probar si el diseño que se realizó es el correcto, funcional y no representa ningún riesgo en su manipulación; para esto se realizaron las pruebas de hermeticidad, temperatura, cementación básica y simulación completa, las cuales corroboraron la finalidad del proyecto. Además se realiza la guía de operación y mantenimiento de este y la guía de laboratorio para corrida de pruebas.

Vigilada mieducación

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.



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

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

This article presents the design and construction of a team to simulate the cement slurry settling. In the design of the equipment were considered the increase of pressure and temperature, and necessary accessories to be able to simulate the process of cementation in the well; The project allows a direct, practical and efficient visualization of the behavior of the cement grout in the well. Once the equipment is built, it is installed in the laboratory and it is put into operation to test if the design that was performed is correct, functional and does not represent any risk in its handling; For this the tests of hermeticity, temperature, basic cementation and complete simulation were carried out, which corroborated the purpose of the project. In addition, the operation and maintenance guide for this and the test guide for the test run are carried out.



### APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS

Firma:

Nombre Jurado: HECTOR ENRIQUE SANCHEZ

Firma:

Vigilada mieducación

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.

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL  
ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO**



**Universidad  
Surcolombiana**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
PROGRAMA PETROLEOS  
NEIVA-HUILA  
2017**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL  
ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO**

**CRISTIAN ROJAS GARCIA COD 2010296157  
JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ COD 20121107546**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA INGENIERIA DE PETROLEOS  
NEIVA - HUILA  
2017**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL  
ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO**

**CRISTIAN ROJAS GARCIA COD 2010296157  
JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ COD 20121107546**

**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  
2017**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del Director**

---

**Firma del Evaluador**

---

**Firma del Evaluador**

## DEDICATORIAS

*A Dios*

*Doy gracias al Todo poderoso, por este objetivo alcanzado; sin Él nunca lo habría logrado. La Sabiduría e inteligencia de la cual me ha dotado permitiéndome aprovecharla, en busca del desarrollo social de la sociedad.*

*A Mis Padres Amados*

*Este gran logro que hoy se cumple, lo dedico a ustedes por su enorme sacrificio y esmero que han tenido para conmigo, acompañándome a lo largo de esta carrera de la Vida, de la cual se cumple una primera etapa; Gracias a vuestro apoyo en todas las áreas de la vida.*

*A Mis Padrinos*

*Su calidez y apoyo incondicional ha sido vital para superar esta meta que un día me trace y hoy veo cumplir, gracias por vuestra paciencia y comprensión.*

*JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ*

*A Dios, quien nos guía todos los días, nos da aliento y fuerzas para continuar en nuestros caminos. Siempre de la mano de él para lograr todos nuestros objetivos.*

*A Mis Padres Amados, por sus palabras de aliento, amor y oraciones en el momento adecuado, su apoyo incondicional, su paciente espera y por supuesto su gran sacrificio. Este logro es de ustedes.*

*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.*

**CRISTIAN ROJAS GARCIA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al ingeniero Luis Humberto Orduz por su dedicación, conocimiento aportado y soporte ilimitado en nuestro desarrollo personal e investigativo de este proyecto de grado.

A la ingeniera Constanza Vargas Castellanos y al ingeniero Héctor Enrique Sánchez, por sus valiosos aportes, contribuciones y consejos, así como su espíritu colaborador, claves para el desarrollo del proyecto.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	15
<b>1. JUSTIFICACIÓN</b>	16
<b>2. OBJETIVOS</b>	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
<b>3. MARCO TEÓRICO</b>	18
<b>3.1 CEMENTO PORTLAND</b>	18
3.1.1 Propiedades físicas del cemento	19
3.1.2 Propiedades químicas del cemento	19
3.1.3 Aditivos	21
<b>3.2 CEMENTACION DE POZOS DE PETROLEO</b>	22
3.2.1 Cementación primaria	22
3.2.1.1 Cementación en una etapa	23
3.2.1.2 Cementación en dos etapas	24
3.2.2 Cementación secundaria o remedial	25
3.2.3 Taponos de cemento	26
3.2.3.1 Abandonamiento de pozo	26
3.2.3.2 Aislamiento zonal	27
3.2.4 Perforación direccional	27
3.2.5 Control de pérdida de circulación	28
<b>3.3 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LECHADAS DE CEMENTO</b>	29
3.3.1 Determinación del contenido de agua en la lechada	29
3.3.2 Determinación de la densidad	30
3.3.3 Determinación del filtrado	30
3.3.4 Prueba de sedimentación	30
<b>4. DISEÑO EQUIPO ASENTAMIENTO</b>	32
<b>4.1 MATERIALES Y ALEACIONES REISTENTES A LA PRESION</b>	32
<b>4.2 DISEÑO DE LOS RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESION</b>	33
4.2.1 Celda de Presurización	34
4.2.2 Cilindro Contenedor de muestras	37
<b>4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE PRESION</b>	38
4.3.1 Mecanismo de Compresión de Aire	38
4.3.2 Selección de Mangueras	39

4.3.3 Selección de Instrumentos de Medición, Acoples y Roscas	39
<b>4.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE TEMPERATURA</b>	<b>40</b>
4.4.1 Dimensionamiento Recipiente Contenedor y Material Aislante	41
4.4.2 Control de Temperatura	43
4.4.2.1 Manejo de Temperatura	43
4.4.2.2 Termostato	43
<b>4.5 PLANOS DEL DISEÑO</b>	<b>44</b>
<b>5. CONSTRUCCION</b>	<b>49</b>
<b>5.1 EQUIPAMENTOS DEL PROCESO DE PRESURIZACIÓN</b>	<b>49</b>
5.1.1 Celda de Presurizacion	49
5.1.2 Tapa	49
5.1.3 Cilindro contenedor y accesorios de caucho sintetico	50
<b>5.2 CAMARA DE TEMPERATURA</b>	<b>51</b>
<b>5.3 ACCESORIOS EXTRAS</b>	<b>52</b>
<b>6. MANUAL DE MANTENIMIENTO Y MONTAJE DEL EQUIPO</b>	<b>57</b>
<b>6.1 MONTAJE DEL EQUIPO</b>	<b>57</b>
6.1.1 Procedimientos iniciales para la operación del equipo	57
6.1.2 Procedimientos al final de la operación del equipo	57
<b>6.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO</b>	<b>58</b>
6.2.1 Inspección	58
6.2.2 Lubricación	59
6.2.3 Ajustes	59
6.2.4 Limpieza	59
<b>7. FUNCIONALIDAD DEL EQUIPO</b>	<b>60</b>
<b>7.1 PRUEBA DE HERMETICIDAD</b>	<b>60</b>
<b>7.2 PRUEBA DE TEMPERATURA</b>	<b>62</b>
<b>7.3 CEMENTACION BASICA</b>	<b>63</b>
<b>7.4 CEMENTACION AUMENTO DE PRESION Y TEMPERATURA</b>	<b>65</b>
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>68</b>
<b>9. RECOMENDACIONES</b>	<b>69</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>70</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales componentes del cemento	18
Tabla 2. Clasificación API de los cementos	19
Tabla 3. Requerimientos físicos para distintos tipos de cemento	20
Tabla 4. Requerimientos químicos para distintos tipos de cementos	20
Tabla 5. Composición química de materiales para recipientes a presión	33
Tabla 6. Clasificación de sistemas de alivio	41
Tabla 7. Propiedades de la espuma de poliuretano	42

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cementación primaria	23
Figura 2. Cementación por etapas	24
Figura 3. Cementación secundaria o remedial	25
Figura 4. Tapón para abandono de pozo	26
Figura 5. Tapón para aislamiento zonal	27
Figura 6. Tapón para Side track	28
Figura 7. Tapón para pérdida de circulación	29
Figura 8. Proceso de sedimentación	30
Figura 9. Proceso de exudación	31
Figura 10. Tensiones en un cuerpo cilíndrico sometido a presión interna	34
Figura 11. Tipos de tapas para recipientes cilíndricos	36
Figura 12. Esquema de general de un compresor de aire	38
Figura 13. Componentes de la Manguera	39
Figura 14. Ángulos de Rosca y Cono	40
Figura 15. Roscas totalmente unidas – Sello por ajuste a Presión	40
Figura 16. Celda de Presurización	49
Figura 17. Tapa	50
Figura 18. Cilindro Contenedor	50
Figura 19. Accesorios de caucho sintético	51
Figura 20. Cámara de temperatura	51
Figura 21. Resistencia Calefactora	52
Figura 22. Termostato Mecánico	52
Figura 23. Manómetro	52
Figura 24. Rodamiento giratorio para mangera	53
Figura 25. Conexión en T	53
Figura 26. Niple	54
Figura 27. Reducción roscada	54
Figura 28. Tapon macho	54
Figura 29. Abrazaderas	55
Figura 30. Mangueras	55
Figura 31. Válvula de alivio	56
Figura 32. Registro de Presiones Iguales	61
Figura 33. Prueba de hermeticidad del equipo	61
Figura 34. Prueba de Temperatura	62

Figura 35. Montaje prueba básica	63
Figura 36. Espacio cementado prueba básica	64
Figura 37. Perfil de densidades para la prueba básica	64
Figura 38 Merma de la prueba básica.	65
Figura 39 Montaje prueba con aumento de P y T.	66
Figura 40 Espacio cementado prueba con aumento de P y T.	66
Figura 41 Perfil de densidades para la prueba con aumento de P y T.	67
Figura 42 Merma de la prueba con aumento de P y T.	67

## LISTA DE ANEXOS

- A. Guía de laboratorio: PRUEBAS DE ASENTAMIENTO PARA LECHADAS DE CEMENTO.
- B. Guía práctica para la elaboración de lechadas de cemento.
- C. Tabla. Máxima Presión Permisible de Operación para materiales ferrosos en función de la temperatura.
- D. Tabla. Tensiones máximas admisibles (S), para materiales ferrosos en función de la temperatura.
- E. Imagen. Factor C para distintos tipos tapas planas, UG-34 del ASME VIII. Div.1.
- F. Tabla. Rangos de Presión y Temperatura, para algunos materiales ferrosos, ANSI B-16.5

## RESUMEN

En este proyecto se diseña y construye un equipo para simular el asentamiento de la lechada de cemento de una sección de un pozo vertical considerando la teoría básica de las operaciones de cementación, como respuesta a la carencia de un equipo de laboratorio, en donde los estudiantes de Ingeniería de Petróleos que cursan la asignatura de Fluidos de Perforación y Completamiento, puedan afianzar de manera práctica los conocimientos acerca del asentamiento de la lechada de cemento.

En el diseño del equipo se consideran parámetros como los gradientes de presión y la implementación de ciertos accesorios necesarios, para simular las condiciones en que se realiza una cementación. Se realiza el diseño del equipo usando AutoCAD, para generar planos técnicos que se emplean en la construcción del equipo por parte de un taller especializado en trabajos de metalmecánica.

Una vez construido el equipo, se realiza su montaje e instalación en el laboratorio de Lodos y Cementos de la Facultad de Ingeniería, en donde se realizan modificaciones para suministrar aire que genere presión, y adecuaciones para el aumento de temperatura; comprobando 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 la 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, y así, prevenir accidentes y contaminación del medio ambiente. Todos estos aspectos se obtienen de manera teórica y se afianzan de manera práctica, donde el estudiante de ingeniería de petróleos tarda en asimilar dichos aspectos por falta de interacción con el medio que lo relaciona.

Se construye un equipo para simular el asentamiento de la lechada de cemento de un pozo, considerando el aumento de parámetros como la presión y la temperatura ambientes, y con ello permitiendo visualizar de manera directa, práctica y eficaz el comportamiento de la lechada de cemento en el pozo. Esta interacción permite, comprender y adquirir conocimientos del esquema de cementación de un pozo mucho más rápido; como se viene realizando en la Universidad mediante las prácticas de laboratorio, además se realiza el documento guía que sustente el diseño tomado en cuenta para el desarrollo de éste.

## 1. JUSTIFICACIÓN

Uno de los problemas generados en la aplicación de la lechada es asegurar su buena eficiencia, la cual es medida como; la capacidad de aislar las zonas, asegurar el revestimiento y la pared del pozo. Desarrollar las operaciones de cementación en el laboratorio conlleva a crear una visualización más amplia y detallada, por parte de los estudiantes, de las propiedades del mismo. Un equipo para simular estas operaciones permite interactuar de forma directa con prácticas operacionales dirigidas al proceso de cementación.

No siempre el diseño teórico de las mezclas de cemento es exactamente igual a los resultados ejecutados en campo, y cuando parámetros como la densidad no se cumplen a satisfacción, el pozo no tendrá la integridad óptima que se busca. Errores en los cálculos de densidad podrían causar resultados no deseados, tales como resistencia a la compresión inferior a la esperada, o excesiva agua libre.<sup>1</sup> Los riesgos de seguridad son altos, tanto del personal que trabaja en la operación como en la estructura misma del pozo y los equipos en superficie, por lo tanto, existe claridad en el comportamiento de las densidades de las lechadas y sus efectos.

El proyecto resulta útil debido a que el Laboratorio de Lodos y Cementos del Programa de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Surcolombiana no cuenta con un equipo para simular la sedimentación que sufren las lechadas bajo parámetros de presión y temperaturas controladas; así mismo, prestara servicio y apoyo, a futuros estudiantes del programa y allegados que requieran realizar estudios e investigaciones acerca de temas relacionados a este.

Otros proyectos de grado podrían ser considerados dentro las aplicaciones que generaría la construcción del equipo; algunos ejemplos de estos podrían ser: la evaluación en los cambios de densidad de la lechada de cemento basándose en las condiciones de diferentes formaciones del sector colombiano; otra pudiere ser plantear las condiciones de perforación offshore considerando ya no altas temperaturas si no bajas, y por último estas condiciones me afectan las otras propiedades necesarias para lograr una cementación óptima en el pozo.

---

<sup>1</sup> T.E. Allen and F.L. Sands, Halliburton Services, (1993), “Why Control Cement Slurry Density?” pag 117

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y construir un equipo para simular el asentamiento de la lechada y constatar su homogeneidad en una sección del pozo, durante la cementación.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar el modelo del equipo propuesto.
- Construir el equipo y realizar las pruebas de funcionamiento
- Elaborar una guía de trabajo y mantenimiento del equipo.
- Entregar el equipo al Laboratorio de Lodos y Cementos del Programa de Ingeniería de Petróleos en 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 un ejemplo de 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<sup>2</sup>. 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 propuesto para las operaciones de cementación de pozos petroleros.

Hay que 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 junto con los revestimientos y sellen las zonas productoras. Los principales componentes del cemento son:

Tabla 1. Principales componentes del cemento

Componente	Formula	Características
<b>Silicato tricalcico</b>	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}$	Factor principal para producir la consistencia temprana (de 1 a 28 días).
<b>Silicato de cálcico</b>	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Proporciona la resistencia gradual después de los 28 días.
<b>Aluminato tricalcico</b>	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaO}$	Proporciona resistencia al ataque de los sulfatos.
<b>Aluminato férrico tetra cálcico</b>	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 4\text{CaO}$	Es un compuesto de bajo calor de hidratación en el cemento y no influye en el fraguado inicial.

Fuente: Halliburton, Well Cementing (2010).

<sup>2</sup> American Petroleum Institute, API, (2002) “ Specification for Cements and for Well Cementing” pag 1

El American Petroleum Institute (API) ha identificado nueve tipos de cementos de acuerdo a su composición química y propiedades físicas, como se observa a continuación:

Tabla 2. Clasificación API de los cementos

	Profundidad (m)	Temperatura (°C)	OBSERBACIONES
<b>A</b>	Hasta 1830	77	No se requieren propiedades especiales.
<b>B</b>	Hasta 1830	77	Moderada resistencia a los sulfatos.
<b>C</b>	Hasta 1830	77	Alta resistencia a la compresión y moderada o alta resistencia a los sulfatos.
<b>D</b>	De 1830 a 3050	110	Moderada o alta resistencia a los sulfatos y se aplica presiones moderadas.
<b>E</b>	De 1830 a 4270	143	Moderada o alta resistencia a los sulfatos y se aplica presiones altas.
<b>F</b>	De 3050 a 4880	160	Moderada o alta resistencia a los sulfatos y se aplica presiones altas.
<b>G y H</b>	Hasta 2240	Amplio rango	Alta resistencia a los sulfatos, pueden modificarse para usarlos en un amplio rango de condiciones de presión.
<b>J</b>	De 3660 a 4880	177	Diseñado para emplearse sin necesidad de harina sílica, que evita la regresión de la resistencia a la compresión.

Fuente: Halliburton, Well Cementing (2010).

### 3.1.1 Propiedades físicas del cemento

El cemento en polvo debe contar con unas propiedades físicas para el control de calidad como son: Finura o superficie específica, Distribución de grano y peso específico, como se indica en la tabla 3.

### 3.1.2 Propiedades químicas del cemento

Existe una cantidad considerable de componentes químicos presentes en los cementos, los cuales aportan diferentes características a los mismos, tabla 4.

Tabla 3. Requerimientos físicos para distintos tipos de cemento

REQUERIMIENTOS FISICOS PARA DISTINTOS TIPOS DE CEMENTOS										
TIPO DE CEMENTO		A	B	C	D	E	F	G	H	
Mezcla de agua, % en peso de cemento		46	46	56	38	38	38	44	38	
Prueba de finura (turbidímetro)		150	160	220	-	-	-	-	-	
Permeabilidad al aire		280	280	400	-	-	-	-	-	
Máximo contenido de fluido libre		-	-	-	-	-	-	3.5	3.5	
fuerza compe.,	Num. Sche- dule	Temp. final °F	Presión final psi	Esfuerzo compresivo Mínimo (psi)						

24 h de	-	100	Atmos	1800	1500	2000	-	-	-	-	-
fraguado	4S	170	3000	-	-	-	1000	1000	-	-	-
	6S	230	3000	-	-	-	2000	-	-	-	-
	8S	290	3000	-	-	-	-	2000	-	-	-
	9S	320	3000	-	-	-	-	-	1000	-	-
tiempo de	Especific. de	Maxima	Tiempo de Fraguado (minutos)								
Fraguado	schedule	15-30									
con	4	30	90	90	90	90	-	-	-	-	-
presión y	5	30	-	-	-	-	-	-	90	90	-
temperatu	5	30	-	-	-	-	-	-	120	120	-
ra	6	30	-	-	-	100	100	100	-	-	-
	8	30	-	-	-	-	154	-	-	-	-
	9	30	-	-	-	-	-	190	-	-	-

Fuente: American Petroleum Institute (1995). API Specification 10A, Specification for Cements and Materials for Well Cementing.

Tabla 4. Requerimientos químicos para distintos tipos de cemento

REQUERIMIENTOS QUIMICOS PARA CEMENTOS API						
ORDINARIO	A	B	C	D-E-F	G	H
Oxido de magnesio (Mg O) Máximo %	6	-	6	-	-	-
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) Máximo %	3.5	-	4.5	-	-	-
Perdida de Ignición Máximo %	3	-	3	-	-	-
Residuos insolubles Máximo %	0.75	-	0.75	-	-	-
Aluminato tricalcico (C <sub>3</sub> A) Máximo %	-	-	15	-	-	-
MODERADA RESIS. A SULFATOS (MSR)						
Oxido de magnesio (Mg O) Máximo %	-	6	6	6	6	6
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) Máximo %	-	3	3.5	3	3	3
Perdida de Ignición Máximo %	-	3	3	3	3	3
Residuos insolubles Máximo %	-	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato tricalcico (3CaO * SiO <sub>2</sub> ) Máximo %	-	-	-	-	58	58
Mínimo %	-	-	-	-	48	48
Aluminato tricalcico (C <sub>3</sub> A)	-	8	8	8	8	8
Alcalisis total expresado Na <sub>2</sub> O, Máxi %	-	-	-	-	0.75	0.75
ALTA RESISTENCIA A SULFATOS						
Oxido de magnesio (Mg O) Máximo %	-	6	6	6	6	6
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) Máximo %	-	3	3.5	3	3	3
Perdida de Ignición Máximo %	-	3	3	3	3	3
Residuos insolubles Máximo %	-	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato tricalcico (3CaO * SiO <sub>2</sub> ) Máximo %	-	-	-	-	65	65
Mínimo %	-	-	-	-	48	48
Alcalisis total expresado Na <sub>2</sub> O, Máxi %	-	-	-	-	0.75	0.75
Aluminoferrita tetra cálcico 2 veces C <sub>3</sub> A	-	24	24	24	24	24

Fuente: American Petroleum Institute (1995). API Specification 10A, Specification for Cements and Materials for Well Cementing.

### 3.1.3 Aditivos

Los pozos de petróleo se perforan en un amplio rango de profundidades y condiciones de temperatura. Las lechadas de cemento son diseñadas normalmente para condiciones por debajo del punto de congelamiento, hasta 500 F en pozos geotérmicos, y presiones de formación que varían hasta los 8000 psi; esto ha sido posible gracias al desarrollo de aditivos que modifican los distintos tipos de cementos, para cumplir con los requerimientos de cada pozo.

Para modificar las propiedades de las lechadas de cemento existen ocho tipos de aditivos, a continuación se nombran y se establecen sus aplicaciones:

- **Aceleradores:** 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.
- **Retardadores:** Incrementan el tiempo de fraguado e inhiben la hidratación.
- **Extendedores:** Aumentan el rendimiento del cemento y reducen la densidad.
- **Densificantes:** Usados en cementos cuando se necesita una densidad mayor a 16lpg.
- **Controladores de pérdida de filtrado:** Controlan la pérdida del agua hacia la formación.
- **Dispersantes:** 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.
- **Controladores de pérdida de circulación:** Controlan la migración de la lechada de cemento hacia la formación.
- **Aditivos especiales:** Se encuentran dos tipos, los antiespumantes que previenen o eliminan la espuma, previenen la cavitación, mantienen la densidad de la lechada 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<sup>3</sup>; teniendo como objetivos los siguientes:

- 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.

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

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

### 3.2.1 Cementación primaria

La cementación primaria es una técnica para colocar las lechadas de cemento en el espacio anular entre la tubería de revestimiento cuando se corre en el hueco 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

---

<sup>3</sup> T.E. Allen and F.L. Sands, Halliburton Services, (1993), "Why Control Cement Slurry Density?" pag 117

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 a través del zapato y desplaza al lodo de perforación mientras se mueve por el espacio anular.

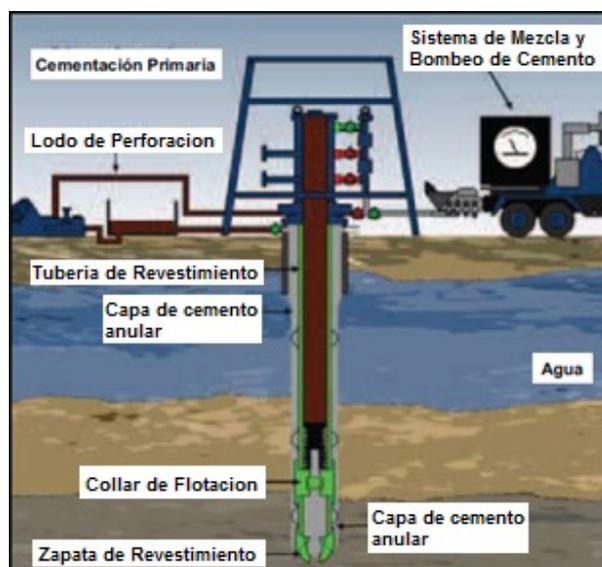


Figura 1. Cementación primaria

Fuente: <http://portal-perforacion.blogspot.com.co>

### 3.2.1.1 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 requiere de presiones de bombeo que superen las presiones de formación y el gradiente de fractura, y evitar que se produzcan pérdidas de circulación por las mismas.<sup>4</sup>

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, taponés de fondo y tope.

<sup>4</sup> Ingeniería Petrolera & Comp, (2014), "TIPOS DE CEMENTACION" Unidad 1: Cementación Primaria" pag 3

### 3.2.1.2 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.

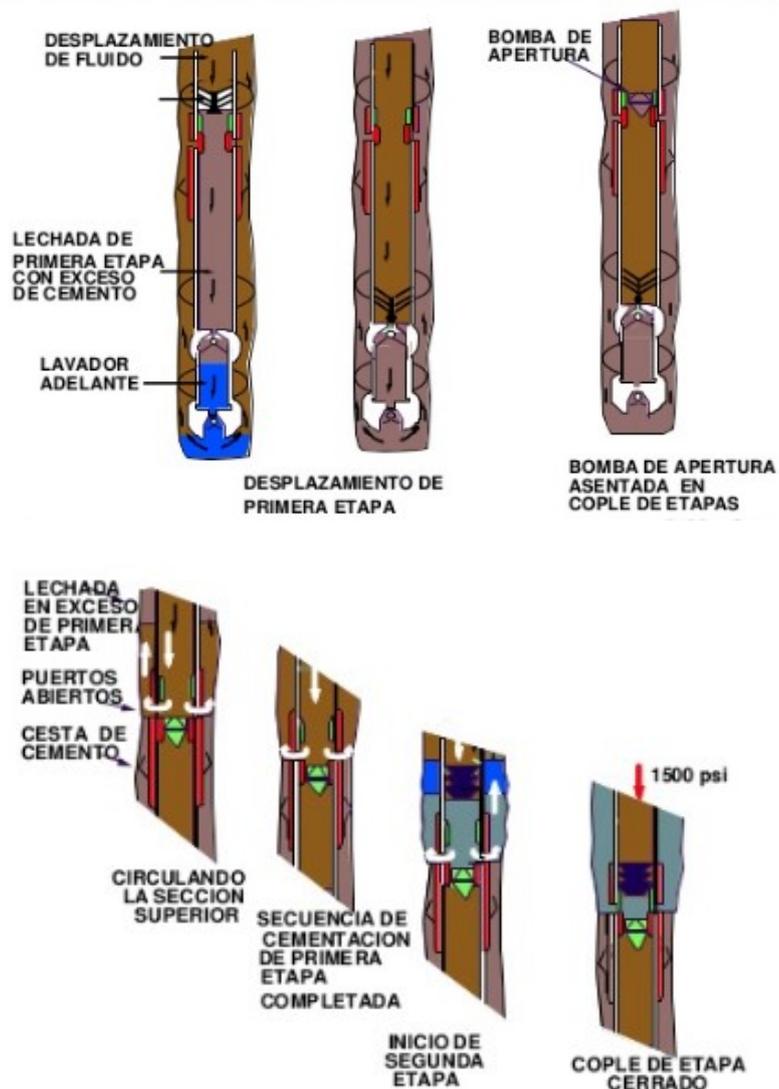


Figura 2. Cementación por etapas.

Fuente: <https://es.slideshare.net/AgustnPiccione.com.co>

### 3.2.2 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 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;<sup>5</sup> las más comunes son:

- 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.

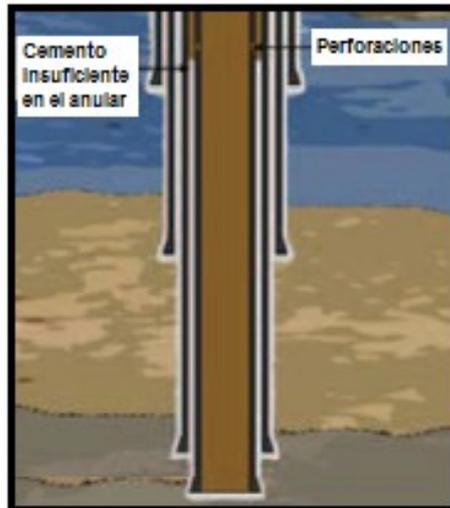


Figura 3. Cementación secundaria o remedial  
Fuente: <http://portal-perforacion.blogspot.com.co>

<sup>5</sup> Escalera Vincenti Fabricio , UPSA, (2011), “Manual De Cementacion De Pozos Level 1- JET 14- Introduccion a la Cementacion ” pag 33

### 3.2.3 Tapones de cemento

Cuando ocurren pegas durante la perforación se corre el riesgo de perder parte del ensamblaje del pozo (BHA) y tener la necesidad de colocar un tapón de cemento, que 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

#### 3.2.3.1 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.

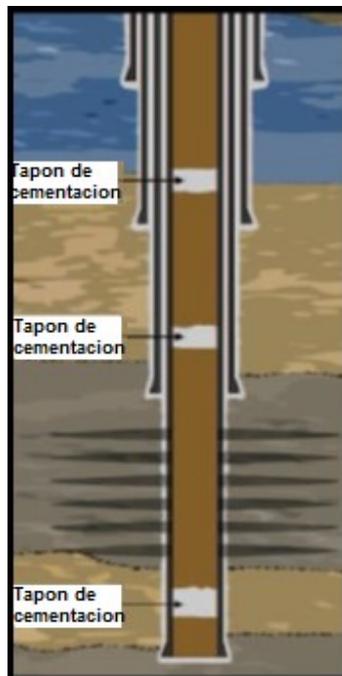


Figura 4. Tapón para abandono de pozo  
Fuente: <http://portal-perforacion.blogspot.com.co>

### 3.2.3.2 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 deplemada o una zona que no es rentable, colocando un tapón de cemento permanente para asilar esta zona.

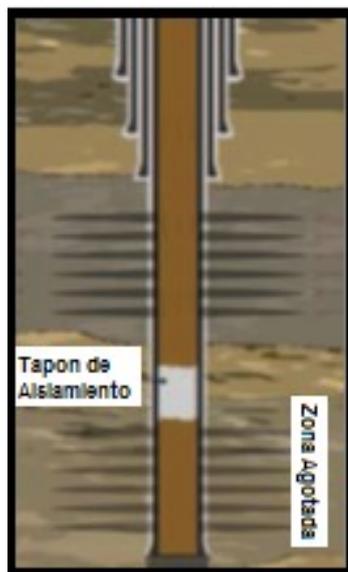


Figura 5. Tapón para Aislamiento zonal  
Fuente: <http://portal-perforacion.blogspot.com.co>

### 3.2.4 Perforación direccional

Un side track (desviación) es la reorientación de la dirección de la 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>

### 3.2.5 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.

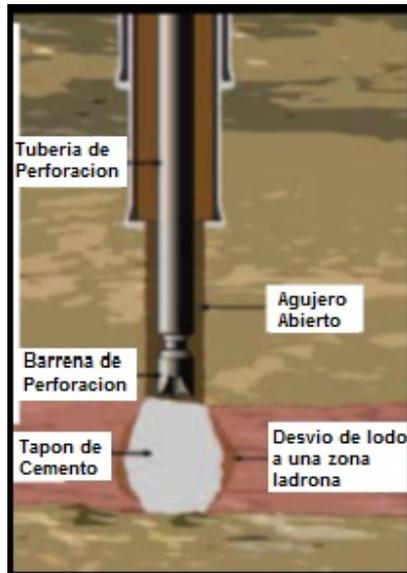


Figura 7. Tapón para pérdida de circulación  
Fuente: <http://portal-perforacion.blogspot.com.co>

### 3.3 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; algunas de estas pruebas se describen a continuación:

- Determinación del contenido de agua en la lechada
- Determinación de la densidad
- Determinación del filtrado

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

- Agua libre: Es la tendencia del fluido a separarse de la lechada antes del fraguado para lo cual se usa un consistómetro a presión atmosférica. En pozos verticales el agua libre evita que la lechada de cemento sea homogénea, por lo que la cantidad de agua es menor a la evaluada.
- Agua normal: Es el agua de una lechada de cemento, con la que alcanzara una consistencia de 11 BC (Unidades de consistencia) medidas en un consistómetro a presión atmosférica. Para determinar el contenido normal de agua hay que hacer muchas pruebas con diferentes porcentajes de agua.

- Agua mínima: Es la cantidad de agua de una lechada de cemento que alcanzara una consistencia de 30 BC, esto nos dará una lechada bastante espesa que puede ser usada para controlar pérdidas de circulación; 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.

### 3.3.2 Determinación de la densidad.

Es utilizada para llevar un control de la presión del pozo, se usa la balanza presurizada, teniendo especial cuidado en eliminar todo el aire contenido en la muestra de cemento.

### 3.3.3 Determinación del Filtrado.

Valora la pérdida de agua en la muestra, evitando el fragüe instantáneo y es medida como un volumen de fluido base separado después de una prueba; bajos volúmenes de filtrado indican un sello eficiente mientras los volúmenes grandes de filtrado indican unas ineficientes características del sello. Para la prueba se hace uso de una filtro-prensa por 30 minutos.

### 3.3.4 Prueba de Sedimentación.

La sedimentación ocurre cuando un material sólido mezclado con agua se deposita en el fondo. La mayoría de los procesos de sedimentación tienen lugar bajo la acción de la gravedad sobre las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua y no pueden retenerse por su finura o densidad, ni pueden separarse por flotación.



Figura 8. Proceso de Sedimentación

Fuente: <http://es.slideshare.net>

La segregación (exudación) de la lechada de cemento es un el fenómeno que se produce por el ascenso del agua que se separa de la lechada durante el tiempo que dura el fraguado, creando en la superficie de la lechada de cemento una capa delgada, débil y porosa que no tiene resistencia ni es durable; las lechadas con alto contenido en cemento presentan una menor exudación que otros que tengan menos cantidad de él.

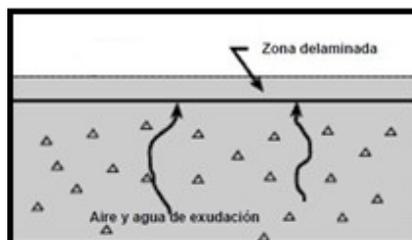


Figura 9. Proceso de Exudación

Fuente: <http://civilgeeks.com>

Esta prueba en conjunto con la prueba de fluido libre ayuda a determinar si una lechada de cemento experimenta sedimentación y determinar la estabilidad estática de la muestra de lechada en condiciones dinámicas de pozo; la lechada se deja estática para determinar si el fluido libre se separa de ella o para determinar si la lechada de cemento experimenta sedimentación de partículas.<sup>6</sup> Para la corrida de las pruebas se tienen en cuenta los siguientes aspectos más relevantes:

- a) El tubo de sedimentación debe tener un diámetro interior de 254 mm +/- 0,5 mm (1 in. +/- 0,02 in.).
- b) La longitud del tubo debe ser de un mínimo de 100 mm (3,9 pulg.). La longitud del tubo más común es de aproximadamente 200 mm (7,9 pulg.)
- c) El tubo debe ser inerte a los cementos así y no debe deformarse durante el transcurso de la prueba.
- d) Engrasar el interior del tubo y todas las juntas para asegurarse de que es a prueba de fugas y de manera que el cemento fraguado puede retirarse sin daño.
- e) Precalentar la cámara llena de agua y el tubo de sedimentación a 85°C (185°F) +/- 3°C (5°F), de temperatura ya que supone seguridad debido al punto de ebullición del agua 100°C (212°F).

<sup>6</sup> American Petroleum Institute API, (2013) "Recommended Practice for Testing Well Cements" pag 70

## **4. DISEÑO EQUIPO ASENTAMIENTO**

En el diseño del equipo para simular el asentamiento de la lechada de cemento se debe tener de manera general un sistema de control de presión y temperatura, recreando el espacio de la sección a cementar y las condiciones de fondo del mismo.

En los esquemas de diseño se tienen en cuenta las reglas de recipientes a presión con geometrías y cargas típicas definidas en el Código ASME Sección VIII División 1 o BS5500, para las cuales se establecen unos cálculos sencillos, que permiten determinar cuerpos cilíndricos, cabezales de distinta concavidad, conexiones de boquilla y espesor de pared; de los componentes de un recipiente sometido a presión Interna o externa.

### **4.1 MATERIALES Y ALEACIONES RESISTENTES A LA PRESIÓN**

Como el equipo soporta presiones, la selección de los materiales de construcción es importante, sin embargo, el proyecto cuenta con limitaciones tales como costos, disponibilidad y operatividad del laboratorio, para lo cual se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- Presión de diseño (máxima presión que soporte el equipo).
- Presión de operación (máxima presión que pueda generar el compresor del laboratorio de lodos).
- Presión de prueba (presión con la cual se verifica la hermeticidad del equipo).
- Esfuerzo a la tensión (valor máximo al que se puede someter un material).

Las aleaciones existentes pueden ser identificadas por ASTM, ASME, DIN y otras especificaciones. Para el criterio de la selección del material a usar se basa en las normas ASTM de clasificación de aceros la cual mediante la aplicación o ámbito de empleo determina el tipo de acero.

Cuando se especifica la fabricación de un recipiente a presión con una aleación especial; tanto la tapa, la celda y todas las partes internas en contacto con el recipiente son hechas del material prescrito; las válvulas y accesorios externos son fabricadas de acero inoxidable, por lo general, las partes externas no están sujetas a las mismas condiciones corrosivas y mecánicas que existen dentro del recipiente, por lo tanto, el gran costo de las partes externas fabricadas de aleaciones especiales rara vez se justifica.

Teniendo en cuenta que la principal limitación del equipo es el costo de los materiales, se decide utilizar acero especificado en la norma ASTM A106, que soporta presiones medias, es de fácil acceso y recomendado para la construcción de recipientes a presión. Sus componentes son nombrados en la tabla 5.

Tabla 5. Composición química de materiales para recipientes a presión.

COMPASICION %	GRADO A	GRADO B	GRADO C
CARBONO	0.25	0.3	0.35
MANGANESO	0.27 – 0.93	0.29 – 1.06	0.29 – 1.06
FOSFORO	0.035	0.035	0.035
AZUFRE	0.035	0.035	0.035
SILICE	0.1	0.1	0.1
CROMO*	0.4	0.4	0.4
COBRE*	0.4	0.4	0.4
MOLIBDENO*	0.15	0.15	0.15
NIQUEL*	0.4	0.4	0.4
VANADIO*	0.08	0.08	0.08

\*La combinación de estos cinco elementos no superarán el 1%.

Fuente: Norma ASTM A-106 Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature.

## 4.2 DISEÑO DE LOS RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESION

Se diseña con los requerimientos básicos que se deben cumplir durante la construcción de un recipiente a presión; para que la operación del mismo sea confiable y segura. Se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Presión de operación ( $P_o$ ): Máxima presión de servicio a la cual se somete el equipo en condiciones de operación normal.<sup>7</sup>
- Presión de diseño: Es el valor que debe utilizarse en las ecuaciones para el cálculo de las partes constitutivas de los recipientes a presión, dicho valor es:

Si  $P_o > 300$  psi.      Presión de diseño =  $1.1 P_o$ .  
 Si  $P_o \leq 300$  psi.      Presión de diseño =  $P_o + 30$  psi.

<sup>7</sup> Eugene F. Megyesy, (1989), “Manual de Recipientes a Presión Diseño y Cálculo” pag 11

Como la presión de operación es 100 Psi, entonces:

Presión de diseño = 100 psi + 30 psi.

Presión de diseño = 130 psi

- Máxima Presión Permisible de Operación (MAWP): Máxima presión a la que se puede someter un recipiente. En condiciones de operación y a temperatura de operación especificada, para dicha presión.

La presión máxima permisible para el material SA-106 G°B, a una temperatura de 113°C obtenida del anexo 3 es de 15 MPa = 2175 Psi.

#### 4.2.1 Celda de Presurización

El recipiente de forma cilíndrica, acorde a la forma de las muestras a obtener, según recomendaciones de la API. Allí se somete la muestra a presiones mayores a la atmosférica lo que hace necesario y de vital importancia evaluar los esfuerzos que actúan dentro y sobre de él.

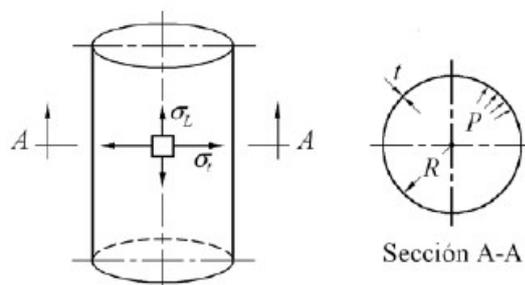


Figura 10. Tensiones en un cuerpo cilíndrico sometido a presión interna

Fuente: Compendio de Calculo Estructural II

- Esfuerzo tangencial: es el espesor requerido en función de la presión interior y la presión admisible en función del espesor. se calcula a partir del valor del radio interno<sup>8</sup>:

$$t_r = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (1)$$

$$P_a = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad (2)$$

Material SA-106 G°B, para 85°C (Anexo 4): S = 118 MP = 17114 Psi.

<sup>8</sup> J. Massa, J. Giro, A. Giudici, (2015), "Compendio de Calculo Estructural II" pag 374

La eficiencia de la junta longitudinal corresponde a un caño sin costura:  $E=1$ .

Se calcula espesor mínimo con la ecuación (1) y se estima en 0.0105 pulgadas el cual no es un tamaño comercial, así que en la ecuación (2) se usa un espesor de 0.14 pulgadas que es el que realmente se tiene, para calcular la presión admisible; cabe resaltar que este espesor hace referencia a la junta entre la celda y la tapa (rosca).

$$t_r = \frac{130 \cdot 1.375}{17114 \cdot 1 - 0.6 \cdot 130} = 0.0105 \text{ pul}$$

$$P_a = \frac{17114 \cdot 1 \cdot 0.14}{1.375 + 0.6 \cdot 0.14} = 1642 \text{ psi} / 1.1$$

$$P_a = 1492 \text{ psi}$$

- Esfuerzo Longitudinal: es el espesor requerido en función de la presión interior y la presión admisible en función del espesor; se calcula a partir del valor del radio interno:

$$t_r = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad (3)$$

$$P_a = \frac{2SET}{R - 0.4t} \quad (4)$$

Se utiliza la ecuación (3) para calcular el espesor mínimo requerido y la ecuación (4) para establecer la presión admisible.

$$t_r = \frac{130 \cdot 1.375}{2 \cdot 17114 \cdot 1 + 0.4 \cdot 130} = 0.0052 \text{ pul}$$

$$P_a = \frac{2 \cdot 17114 \cdot 1 \cdot 0.14}{1.375 - 0.4 \cdot 0.14} = 3632 \text{ psi} / 1.1$$

$$P_a = 3301 \text{ psi}$$

Dónde:

- $t$  Espesor de la celda
- $t_r$  Espesor mínimo requerido

- P Presión de diseño, Psi
- $P_a$  Presión admisible, Psi
- R Radio interno del recipiente, pg
- S Valor máximo de tensión admisible, Psi
- E Eficiencia de junta circunferencial

Además para crear un sello hermético y elevar las presiones de manera correcta sin correr ninguna clase de riesgo, se diseña una tapa la cual posee un orificio para la inyección de aire dentro del equipo; como es necesario que exista la menor cantidad de aire atrapado en el volumen de cemento, la tapa tendrá un bloque interno de manera que el aire atrapado sea comparable al valor que se obtendra en el fondo del pozo. Como se tiene de limitación el valor de los materiales, se decide utilizar una tapa plana con ceja, que soporta presiones bajas-medias y su costo también es relativamente bajo.

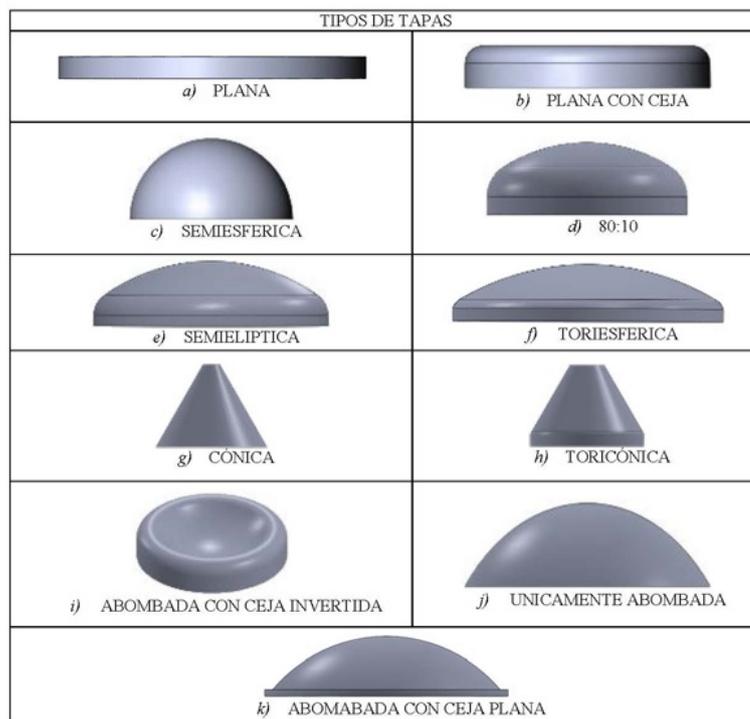


Figura 11. Tipos de Tapas Para Recipientes Cilíndricos.  
Fuente: Norma ASME Division 1, Seccion VIII.

$$t = d \sqrt{\frac{CP}{SE}} \tag{5}$$

Material SA-106 G°B, para 85°C (Anexo 4): S = 118 MP = 17114 Psi.

La eficiencia de la junta longitudinal corresponde a un caño sin costura:  $E=1$ .  
Como se decide trabajar con una tapa plana su constante  $C = 0.33$ .

$$t = 2.75 * \sqrt{\frac{0.33 * 130}{17114 * 1}} = 0.137 \text{ pul}$$

Se calcula el espesor mínimo con la ecuación (5) y se estima en 0.137 pulgadas el cual no es un tamaño comercial así que se usa un espesor de 0.196 pulgadas.

Dónde:

- d. diámetro del cabezal
- C Factor que depende del método de conexión del cabezal y su tipo de Construcción, UG-34 del ASME VIII. Div.1 (anexo 5)
- P Presión de diseño, Psi
- S Valor máximo de tensión admisible, Psi
- E Eficiencia de junta circunferencial
- t Espesor requerido

Teniendo las siguientes restricciones: debe ser circular, el espesor obtenido debe considerarse como mínimo, debe estar entre los rangos de presión y temperatura mostrados en la tabla **B-16.5** de las normas **ANSI**.<sup>9</sup> (Anexo 6)

#### 4.2.2 Cilindro Contenedor de muestras

Para tener fácil acceso de la muestra a estudiar y evitar que la misma se adhiera a las paredes del contenedor se decide utilizar un tubo de hierro galvanizado el cual se obtiene recubriendo hierro con varias capas de zinc; estas capas protegen al hierro evitando que se oxide haciéndole más duradero, resistente y no adherente.

El tubo se corta de manera longitudinal generando dos perfiles por separados lo que facilita la extracción de la muestra después de que fragüe. Se utilizan empaques de caucho sintético, en los costados del tubo de hierro galvanizado para que la muestra no se filtre entre las juntas de los dos perfiles.

---

<sup>9</sup> Juan Manuel León Estrada, (2001), “Diseño y Calculo de Recipientes a Presión” pag. 19

### 4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE PRESIÓN

Para lograr la presurización de la muestra a los niveles de prueba es necesario inyectar aire y ejercer una presión sobre el tope del cemento, la cual es un reflejo en el fondo de pozo; en el equipo se usa un compresor.

#### 4.3.1 Mecanismo de compresión de aire

El compresor es el componente principal del sistema, su función es tomar el aire del ambiente en la cantidad necesaria y lograr la presión de trabajo; los aspectos importantes a tener en cuenta son: Potencia, Tamaño del tanque reservatorio y el centro de trasmisión.

Generalmente todos los compresores disponen de una serie de dispositivos de seguridad y de control, tales como: regulador de presión, encargado de controlar la presión de trabajo del circuito neumático; el interruptor de presión, quien mantiene la presión en el interior del depósito que actúa entre márgenes de presión predeterminados; válvula de seguridad, permite escapar el aire al exterior cuando el dispositivo supera la presión especificada, evitando incidentes por exceso de presión.

En la siguiente imagen se puede apreciar un típico compresor de aire con todas sus partes nombradas con anterioridad.

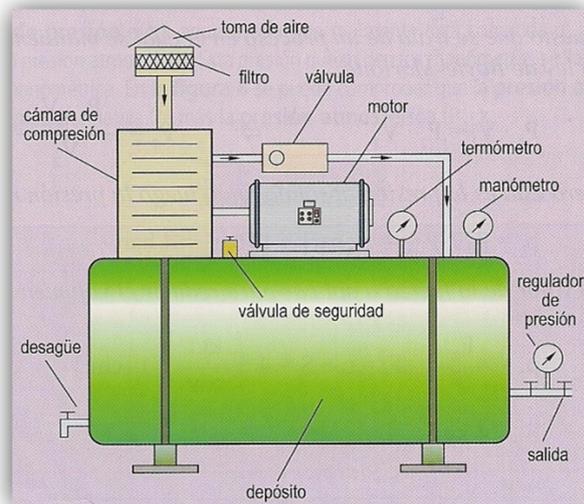


Figura 12. Esquema de general de un compresor de aire

Fuente: <https://neumaticabasicaepp.wordpress.com>

El Laboratorio del Lodos y Cementos de la Universidad Surcolombiana cuenta con el sistema de compresión necesario para poder realizar las pruebas con el equipo a construir, es por tal razón que el trabajo de grado no hace referencia en la selección o diseño de éste.

#### 4.3.2 Selección de Mangueras

El aire proveniente del compresor es transportado hacia el equipo a través de mangueras especiales que están construidas de un tubo interior de goma sintética cuyo objetivo es mantener en la manguera el fluido transportado; la naturaleza elastomérica de la goma hace necesaria una capa de refuerzo trenzada alrededor del tubo para contener la presión interna; Las capas de refuerzo son de material textil o de acero (o de ambos), para proteger estas capas de las condiciones ambientales, se usa una cubierta exterior de goma sintética<sup>10</sup>; el tubo interior de la manguera, cubierta exterior y demás deben ser químicamente compatibles tanto con el fluido transportado por la manguera (aire) como con el medio que la rodea.

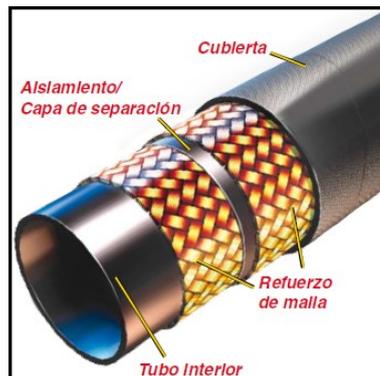


Figura 13. Componentes de la Manguera

Fuente: Manguera hidráulica, terminales y equipos. Manual técnico Parker

#### 4.3.3 Selección de instrumentos de medición, acoples y roscas.

Para monitorear el sistema de presión y detectar pérdidas o fallas en el mismo, se instala un medidor de presión, los más utilizados para equipos a presión son los medidores mecánicos.

Se usa un tipo de rosca que asegure un sello hermético; la conexión más conocida y ampliamente utilizada es la Rosca de Tubería Cónica Nacional Americana

<sup>10</sup> Manual técnico Parker, (2011), “Manguera hidráulica, terminales y equipos” pag A1

(NPT); la rosca NPT se aplica para la estandarización del roscado de los elementos de conexión empleados en los sistemas mecánicos e instalaciones con sello hidráulico (el cual se genera por el anillo de la rosca de 60° y un ángulo de cono de 1° 47').

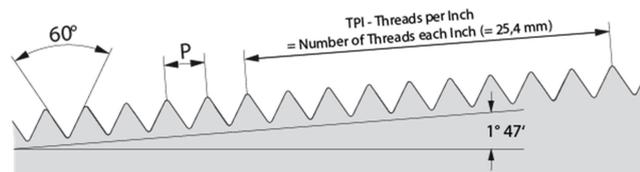


Figura 14. Ángulos de la Rosca y Cono  
Fuente: <http://www.gewindebohrer.de>

Las roscas más usadas en los circuitos hidráulicos mantienen la presión de las uniones por medio del sello de los hilos, son cónicas externas y paralelas o cónicas internas. El efecto de sellado se mejora usando un compuesto.

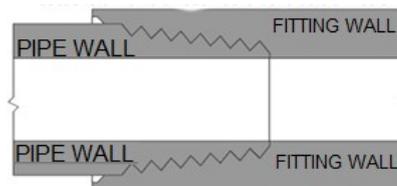


Figura 15. Roscas totalmente unidas – Sello por ajuste a Presión  
Fuente: <http://www.instrumentacionycontrol.net>

La norma ANSI B1.20.3 define una variante denominada National Pipe Taper Fuel (NPTF) las cuales se construyen con el mismo ángulo de rosca como el estándar NPT, pero tienen un adicional cuidado para evitar la espiral de fuga que normalmente tiene las roscas NPT; este diseño evita el uso de un sellador para lograr unir las piezas macho y hembra con una alta resistencia a fugas. Sin embargo, en la práctica es totalmente recomendado usar algún sellador para lograr un sello confiable.

Es necesario contar con un sistema de alivio óptimo y así poder permitir el paso de suficiente cantidad de aire y mantener un valor seguro de presión logrando que esta exceda la máxima sobrepresión permitida, por encima de la presión de diseño; presión de alivio  $\leq$  MAWP.

Procedimiento de diseño:

- Determinar las fuentes potenciales de sobrepresión.

- Calcular la rata de flujo que debe ser liberada para mantener la presión dentro de los límites permitidos.
- Seleccionar el dispositivo de alivio más apropiado.

Tabla 6. Clasificación sistemas de alivio

Retornan a la posición de cerrado	No retornan a la posición de cerrado
Válvulas de alivio de presión con Resorte Precargado	Discos de ruptura
Válvulas de alivio de presión Operada por Piloto	Válvulas de alivio de presión de retorno manual
Válvulas de alivio de presión, actuada desde el exterior	Pin de ruptura a tensión o compresión

Fuente: Diseño Mecánico de Recipientes a Presión

Se decide utilizar una válvula de alivio de presión de retorno manual, la cual es operada por los estudiantes que realicen la prueba.

#### 4.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE TEMPERATURA

Para realizar correctamente la prueba es necesario elevar la temperatura de la muestra de lechada, por consiguiente, se crea un contenedor tipo baño maría en el cual se pueda contener la celda de presurización. Se deben tener en cuenta los parámetros de:

- Temperatura de operación: Máximo o mínimo valor de temperatura de servicio del recipiente.

$$\text{Temperatura de operación} = 85^{\circ}\text{C} = 185^{\circ}\text{F}.$$

- Temperatura de diseño:

$$\text{Máxima: Temperatura de operación} + 50^{\circ}\text{F}.$$

$$\text{Máxima: } 185^{\circ}\text{F} + 50^{\circ}\text{F} = 235^{\circ}\text{F} = 113^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Mínima: temperatura de operación.}$$

##### 4.4.1 Dimensionamiento del recipiente contenedor y material aislante

El contenedor permite almacenar la celda de presurización; es necesario tener las medidas exactas de la misma, los espesores del material aislante y complementos que lleguen a estar presentes.

El material del recipiente se estima en lamina de cold rolled; un producto de acero que se obtiene por laminación en frío de bobinas o bandas en caliente mediante reducción mecánica de espesor (estiramiento) y aplicando tratamientos térmicos. La disponibilidad del material y la gran cantidad de calibres existentes, lo hace la mejor opción así como su bajo costo; la lámina permite obtener las propiedades de necesaria y cubrir con la dureza y maleabilidad requeridas para el equipo.

Debido a la naturaleza de la materia prima mencionada, se debe realizar el contenedor de tipo caja rectangular y permita su fácil manipulación en las maquinas dobladoras.

Para evitar accidentes a los operadores del equipo se decide usar un material aislante de espuma de poliuretano, el cual es un material sintético y duroplástico, altamente reticulado y no fusible, que se obtiene de la mezcla de dos componentes generados mediante procesos químicos a partir del petróleo y el azúcar (Isocianato y el Polioli). En la tabla 7 se encuentran los beneficios más destacados de este material.

Tabla 7. Propiedades de la Espuma de Poliuretano

Propiedad	Comentarios
<b>Térmica</b>	Elevada capacidad aislante debido a la baja conductividad térmica que posee el gas espumante de sus células cerradas (0,022W/mK–0,028W/mK).
<b>Frente al agua</b>	Revestimiento continuo intermedio, resistente a la fisuración, adherencia, permeabilidad y estabilidad física y química.
<b>Frente a la humedad</b>	Ausente de condensaciones intersticiales, haciendo posible la transpiración, efecto que previene cualquier tipo de retención de humedad.
<b>Frente al fuego</b>	Material orgánico, por tanto combustible, la idoneidad de su uso dependerá de la resistencia al fuego de los materiales que se utilicen como superficie.
<b>Medio ambiental</b>	Posee un ciclo de vida de 50 años, lo cual hace que su mantenimiento sea prácticamente innecesario.
<b>Acústica</b>	Muy efectivo para disminuir la transmisión de sonidos, amortiguar vibraciones y eliminar resonancias.

Fuente: [http://www.construmatica.com/construpedia/Espuma\\_de\\_Poliuretano](http://www.construmatica.com/construpedia/Espuma_de_Poliuretano)

#### 4.4.2 CONTROL DE TEMPERATURA

Se recomienda que la temperatura en toda la prueba sea la misma y para esto se utiliza un sistema de control, en general, el termostato es una herramienta útil para detectar y ajustar la temperatura.

##### 4.4.2.1 Manejo de Temperatura

Basados en el efecto Joule, por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía de los electrones se transforma en calor, existen un incontable número de artefactos y procesos industriales, las resistencias de inmersión son uno de ellos, y están diseñadas para el calentamiento en contacto directo con el fluido y poder así introducirse en tuberías o tanques bajo presión; este tipo de resistencias calefactoras garantizan un óptimo intercambio térmico en muy poco espacio. Dado que todo el calor se genera dentro del líquido, se alcanza un rendimiento energético máximo.

Estas resistencias son elementos tubulares blindados de cobre niquelado aisladas con óxido de magnesio electro-fundido y comprimido por laminación; el equipo tiene como referente este tipo de resistencia y así otorgando la opción de un cambio fácil y practico de las mismas si lo llegase a necesitar.

##### 4.4.2.2 Termostato

Es el componente de un sistema de control simple que abre o cierra un circuito eléctrico al detectar la temperatura de un fluido, aire o gas y ajustar de acuerdo a requerimientos específicos, los termostatos se pueden instalar en cualquier lugar cerrado o maquinaria de diversos tipos.

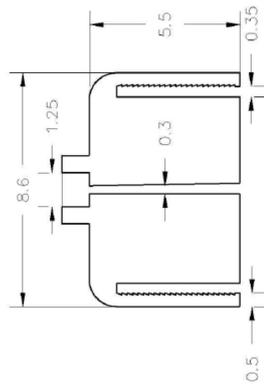
Los termostatos capilares, tipo bulbo, son los más acordes para ejercer el control de temperatura, estos se ajustan a las limitaciones del proyecto, tanto en costo como en disponibilidad.

En general dentro de los termostatos de funcionamiento mecánico es un fluido sensible a los cambios de temperatura y que determina el encendido y apagado del propio termostato, todos los termostatos están disponibles con distintas escalas de regulación de la temperatura siendo el más óptimo para el equipo el de reinicio automático.

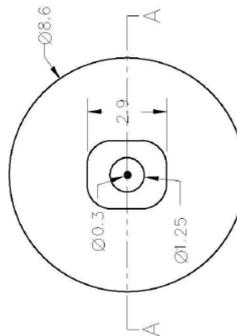
#### **4.5 PLANOS DEL DISEÑO**

Se realizan cuatro planos técnicos en AutoCAD, especificando cada uno de los componentes diseñados anteriormente en diferentes vistas con sus respectivas medidas en milímetros.

CORTE A - A



VISTA SUPERIOR



ESC=1:2



ESC=1:2

MODELADO 3D



ESC=1:2



FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA ACADÉMICO:  
INGENIERIA DE PETROLEOS

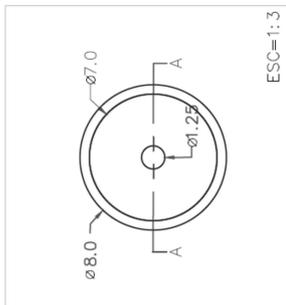
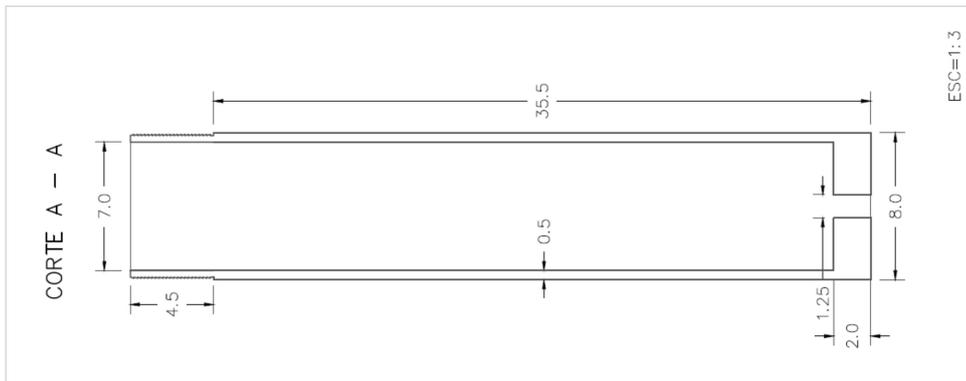
DIRECTOR:  
LUIS HUMBERTO ORDUZ PEREZ  
INGENIERO DE PETROLEOS

PRESENTADO POR:  
CRISTIAN ROJAS GARCIA  
JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ

CODIGOS:  
2010289157  
20121107546

PROYECTO:  
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO  
PARA SIMULAR EL ASENTAMIENTO DE LA  
LECHADA DE CEMENTO.

ESCALA:  
1:2  
UNIDADES:  
Centímetros (Cm)  
PLANO No  
1 DE 4  
FECHA:  
ABRIL/2017

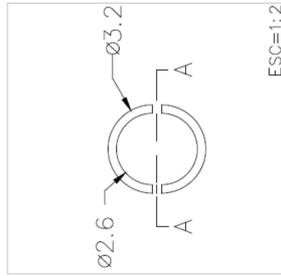
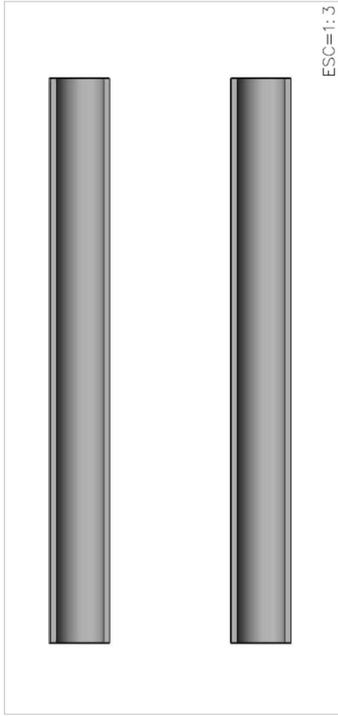


MODELADO 3D

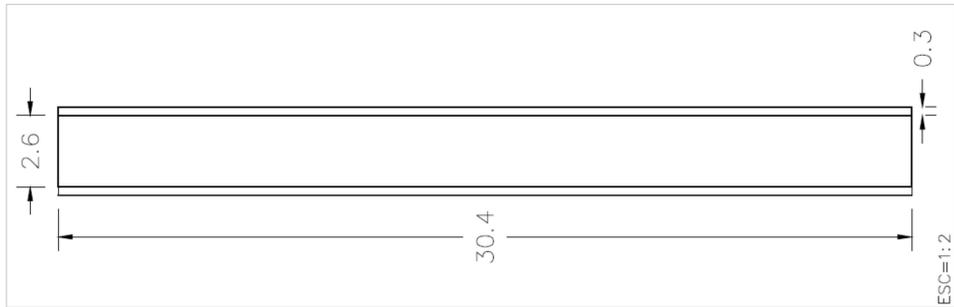


 <b>Universidad Surcolombiana</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA	DIRECTOR:	PRESENTADO POR:	CODIGOS:	PROYECTO:	ESCALA:	UNIDADES:
	PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERIA DE PETROLEOS	LUIS HUMBERTO ORDUZ PEREZ INGENIERO DE PETROLEOS	CRISTIAN ROJAS GARCIA JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ	2010296157 20121107546	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO.	1:3	Centímetros (cm)
							PLANO No 2 DE 4
							FECHA: ABRIL/2017

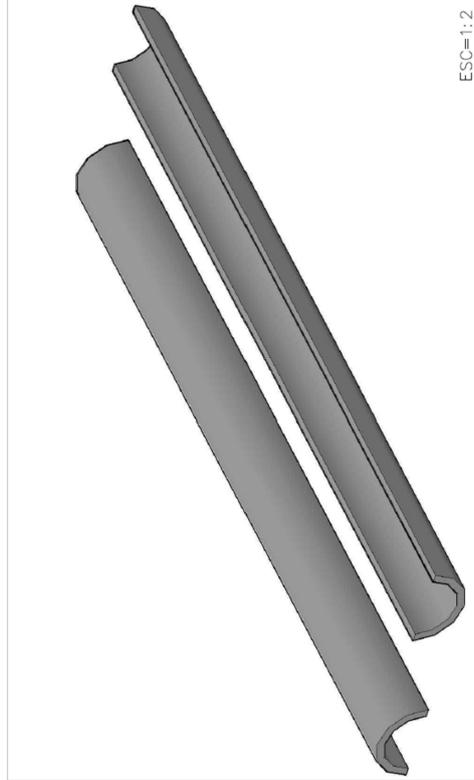
PERFILES



VISTA SUPERIOR

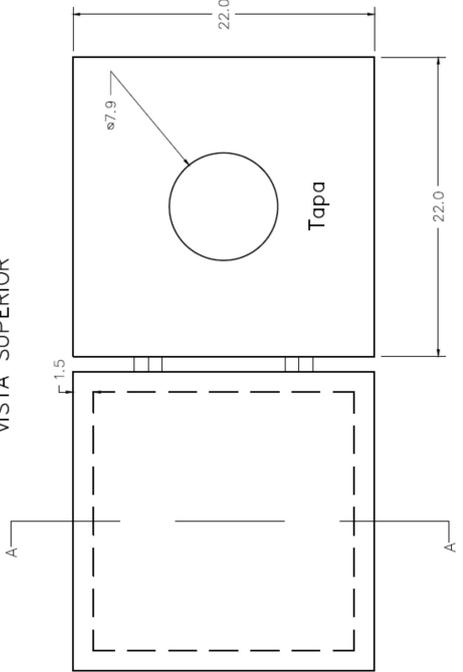
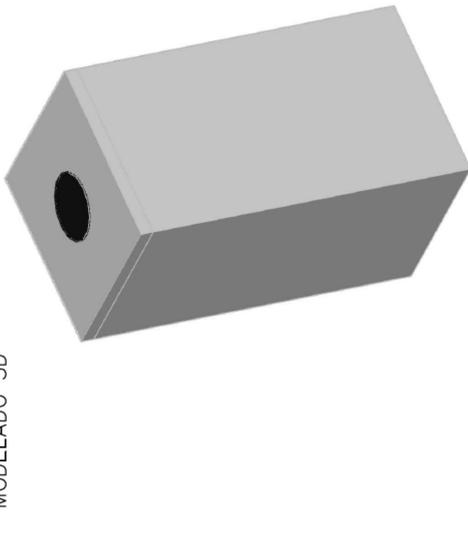
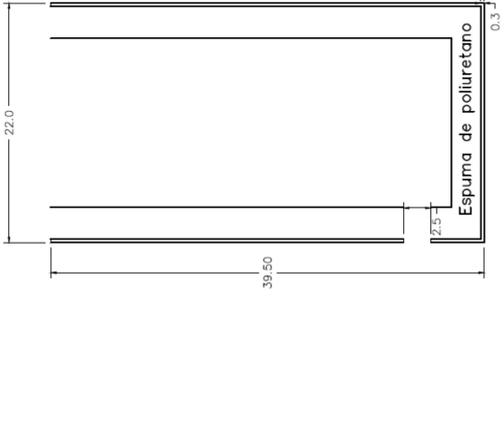
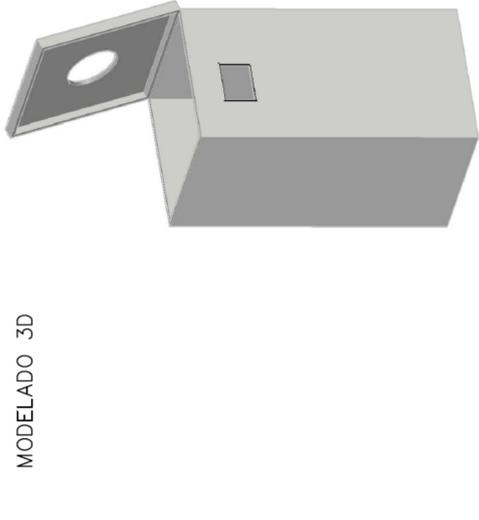


CORTE A - A



MODELADO 3D

 <b>Universidad Surcolombiana</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERIA DE PETROLEOS	DIRECTOR: LUIS HUMBERTO ORDUIZ PEREZ INGENIERO DE PETROLEOS	PRESENTADO POR: CRISTIAN ROJAS GARCIA JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ	CODIGOS: 2010296157 20121107546	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO.	ESCALA: 1:3	UNIDADES: Centímetros (cm)
				PLANO N°: 2 DE 4	FECHA: ABRIL/2017		

<p>VISTA SUPERIOR</p>  <p>ESC=1:1.5</p>	<p>MODELADO 3D</p>  <p>ESC=1:1.5</p>								
<p>CORTE A - A</p>  <p>ESC=1:1.5</p>	<p>MODELADO 3D</p>  <p>ESC=1:7</p>								
<table border="1"> <tr> <td data-bbox="1342 320 1374 1115">  <p><b>Universidad Surcolombiana</b></p> </td> <td data-bbox="1342 1115 1374 1912"> <p>FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERIA DE PETROLEOS</p> </td> <td data-bbox="1374 320 1406 1115"> <p>DIRECTOR: LUIS HUMBERTO ORDUZ PEREZ INGENIERO DE PETROLEOS</p> </td> <td data-bbox="1374 1115 1406 1912"> <p>PRESENTADO POR: CRISTIAN ROJAS GARCIA JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ</p> </td> <td data-bbox="1406 320 1439 1115"> <p>CODIGOS: 2010296157 20121107546</p> </td> <td data-bbox="1406 1115 1439 1912"> <p>PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE GEMENTO.</p> </td> <td data-bbox="1439 320 1471 1115"> <p>ESCALA: UNIDADES: Centímetros (Cm)</p> </td> <td data-bbox="1439 1115 1471 1912"> <p>PLANO No 2 DE 4 FECHA: ABRIL/2017</p> </td> </tr> </table>		 <p><b>Universidad Surcolombiana</b></p>	<p>FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERIA DE PETROLEOS</p>	<p>DIRECTOR: LUIS HUMBERTO ORDUZ PEREZ INGENIERO DE PETROLEOS</p>	<p>PRESENTADO POR: CRISTIAN ROJAS GARCIA JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ</p>	<p>CODIGOS: 2010296157 20121107546</p>	<p>PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE GEMENTO.</p>	<p>ESCALA: UNIDADES: Centímetros (Cm)</p>	<p>PLANO No 2 DE 4 FECHA: ABRIL/2017</p>
 <p><b>Universidad Surcolombiana</b></p>	<p>FACULTAD DE INGENIERIA PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERIA DE PETROLEOS</p>	<p>DIRECTOR: LUIS HUMBERTO ORDUZ PEREZ INGENIERO DE PETROLEOS</p>	<p>PRESENTADO POR: CRISTIAN ROJAS GARCIA JUAN CARLOS RODRIGUEZ LOPEZ</p>	<p>CODIGOS: 2010296157 20121107546</p>	<p>PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA SIMULAR EL ASENTAMIENTO DE LA LECHADA DE GEMENTO.</p>	<p>ESCALA: UNIDADES: Centímetros (Cm)</p>	<p>PLANO No 2 DE 4 FECHA: ABRIL/2017</p>		

## 5. CONSTRUCCION

Para construir el equipo se sigue el diseño que se menciona en el capítulo 4, se necesitan los planos técnicos del equipo y se emplean una diversa cantidad de materiales, los cuales son debidamente nombrados.

### 5.1 EQUIPAMENTOS DEL PROCESO DE PRESURIZACIÓN

#### 5.1.1 Celda de Presurización

En la selección de la celda de presurización se emplea un tubo de acero A106 de 40 cm de longitud, diámetro externo de 7.7 cm y espesor de 0.5 cm en el cuerpo 0.35 cm en la rosca.



Figura 16. Celda de Presurización

Fuente: Autores

#### 5.1.2 Tapa

Para la selección de la tapa se emplea una tapa roscada de acero A106 de diámetro interno de 7cm y espesor de 0.5 cm, con una perforación tipo rosca NPT ½, por la cual se introduce aire a presión para aumentar la presión hidrostática en la columna de cemento.



Figura 17. Tapa  
Fuente: Autores

### 5.1.3 Cilindro contenedor y accesorios de caucho sintético

Como es necesario evitar que la muestra se adhiera a las paredes del contenedor se decide utilizar un tubo de hierro galvanizado de 31 cm de longitud y diámetro interno de 2.6 cm; basado en las recomendaciones de la API.



Figura 18. Cilindro Contenedor  
Fuente: Autores

También es necesario un empaque de caucho sintético en el fondo del contenedor para que la muestra no se adhiera, permita un mejor sello y este centrado dentro de la celda, este empaque tendrá un diámetro de 7 cm y espesor de 2.5 cm.



Figura 19. Accesorios de caucho sintético

Fuente: Autores

## 5.2 CAMARA DE TEMPERATURA

Para construir la cámara de temperatura se emplean 4 láminas de acero cold rolled de 22x40 cm y 2 láminas de 22x22 cm, con un espesor de 0.3 cm, las cuales están revestidas internamente por espuma de poliuretano que aísla la cámara del medio, a su vez dentro de ella hay un tubo de PVC de 35 cm de longitud y 15.5 cm diámetro.



Figura 20. Camara de Temperatura

Fuente: Autores

Contiene tanto una resistencia calentadora, figura 21, fabricada en cobre con 8mm de diámetro aisladas con óxido de magnesio electro-fundido, para calentar agua de 60°C a 150°C, con alimentación de 110 V y de 100W de potencia. Tiene un

termostato, figura 22, el cual está ubicado en la parte derecha del equipo, con las siguientes características: rango de 0 a 90 °c; exactitud de +/- 2,5%; contactos de 16 A y 110 V; capilar de cobre con una longitud de 35 cm y bulbo de cobre de 85 mm de longitud y diámetro de 5 mm

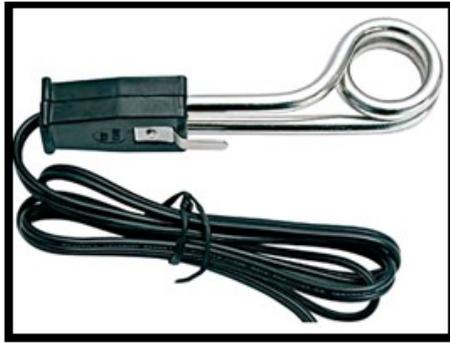


Figura 21. Resistencia Calefactora  
Fuente: Autores



Figura 22. Termostato mecánico  
Fuente: Autores

### 5.3 ACCESORIOS EXTRAS

Para el ensamble y funcionamiento del equipo también son necesarios otros componentes, los cuales son:

- Los manómetros: instrumentos que miden la presión en fluidos (líquidos y gases) en circuitos cerrados, con un rango de 0 a 160 psi en seco; con conexión vertical de ¼ en bronce.



Figura 23. Manómetro  
Fuente: Autores

- Conector rosca JIC (flare) hembra giratoria: son elementos con acople integrado que protegen a la manguera de la torsión, echos en acero

inoxidable disponibles en gran variedad de diámetros; este acople es de espiga manguera a hembra de 3/16" X ESPIGA 3/4":

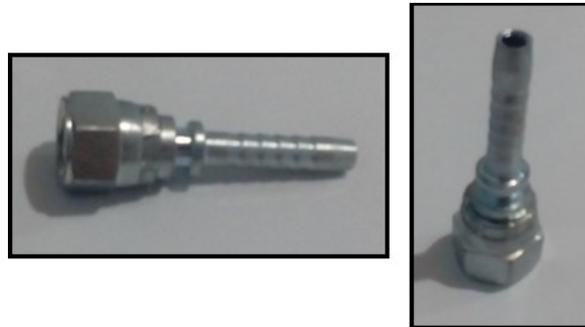


Figura 24. Rodamiento giratorio para mangera  
Fuente: Autores

- La conexión en T hembra: ofrece un medio alternativo de acceso al cabezal principal, sin necesidad de reforzar; fabricada en acero inoxidable, de 1/4" para cada entrada, de rosca NPT.



Figura 25. Conexión en T  
Fuente: Autores

- Los acoples: son un tramo de tubería doblemente roscado en sus extremos que permiten unir válvulas y accesorios; el acople es macho - macho, de 1/4" x 1/4", tipo de rosca NPT y fabricados en acero inoxidable.



Figura 26. Niple  
Fuente: Autores

- Conector flare SAE 45 a macho: El macho conector de flare duradero y de alta estándar; generalmente utilizado para conectar las líneas de aire, agua, combustible, aceite y gases inertes de un modo rápido y sencillo .fabricado en acero inoxidable, con 3/16" OD SAE 45° flare x 1/8" Macho NPT. accesorio de macho conector de conexión.

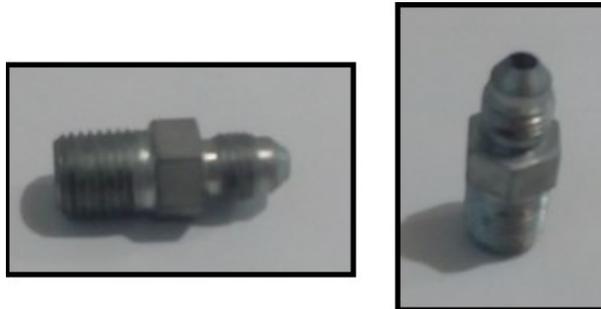


Figura 27. Reducción roscada  
Fuente: Autores

- Tapón Macho: se usan en tuberías de servicios (aire, vapor, agua, etc.), para bloquear el flujo; fabricado en acero inoxidable, rosca NPT de 1/4" y cuadrante hexagonal.

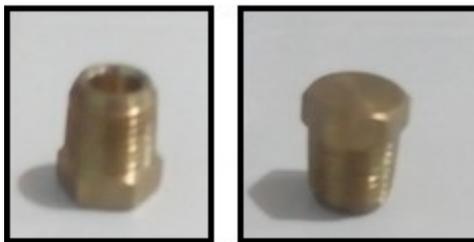


Figura 28. Tapon macho  
Fuente: Autores

- Abrazaderas: se utilizan para asegurar tuberías o la fijación de tubos flexibles de gas sobre un soporte rígido; sus características son: Banda: Acero Inoxidable; Ancho: 0.312" (7.9 mm.); Espesor: 0.023" (0.58 mm.); Tapa: Acero Inoxidable; Tornillo: Acero Inoxidable y Torque 20 lb/pulg.



Figura 29. Abrazaderas

Fuente: Autores

- Las mangueras: son tubos diseñados para transportar fluidos a baja, mediana, o alta presión; fluidos hidráulicos y aceites de lubricación a base de petróleo, agua, agua/glicol y fluidos hidráulicos de emulsión de agua/aceite, aire o gas; temperatura de trabajo: -40 a 100° C. diámetro de 3/4 " y presión de operación de 1523 psi.



Figura 30. Mangueras

Fuente: Autores

- Mini válvula de alivio macho - macho: es el mecanismo que permite la liberación de presión; dentro de sus características tenemos: Cuerpo, Latón niquelado caliente presionado; Manija, Aluminio revestido del polvo del color negro; Bola, Cromo duro plateado latón caliente presionado; presión de trabajo, 10KG / 150 LBS; Temperatura de trabajo: -30 ° C a 80 ° C; Tipo: Puerto reductor; su tamaño es de 1/4" y rosca NPT.



Figura 31. Válvula de alivio  
Fuente: Autores

## **6. MANUAL DE MANTENIMIENTO Y MONTAJE DEL EQUIPO**

### **6.1 MONTAJE DEL EQUIPO**

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.

Se debe utilizar el equipo de seguridad sugerido, para el trabajo dentro del laboratorio: gafas de seguridad, bata de laboratorio y zapatos cerrados.

Verificar que el equipo se encuentre libre de sustancias y artículos extraños para evitar alteraciones en su funcionamiento y fallas.

#### **6.1.1 Procedimientos iniciales para la operación del equipo.**

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

1. Trasladar los equipos de la prueba a una superficie plana y ubicarlos en el sector más apropiado, es decir, cerca de las conexiones de salida del compresor de aire y una toma de corriente a 110 v.
2. Verificar que las conexiones del sistema de presión y temperatura estén debidamente aseguradas y funcionales; y que no contengan suciedad y cuerpos extraños.
3. Realizar una revisión de la manguera proveniente de la válvula reguladora de presión y trasladarla cerca al sistema de acoples situado en la parte superior de la tapa de la celda de presurización.
4. Engrasar todas las juntas para asegurarse de que el proceso de apertura y cierre de la celda de presurización, antes y después de la prueba se realice sin inconvenientes. La grasa debe ser suficiente pero no en exceso de la misma.
5. Verter 5500 ml de agua dentro de la caja del sistema de temperatura.

#### **6.1.2 Procedimientos al final de la operación del equipo.**

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

1. Una vez extraída la muestra, procedemos a limpiar el cilindro contenedor, los accesorios de caucho sintético, el interior de la celda de presurización y la tapa, de cualquier suciedad provocada por la lechada de cemento.
2. Tirar en los desagües del laboratorio el agua contenida en la recámara de temperatura.
3. Asegurar la tapa a la celda de presurización e introducirla en la recámara de temperatura y trasladar el equipo al lugar destinado en el laboratorio.

## **6.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO**

El objetivo principal de darle un buen mantenimiento a este equipo, es lograr que no se presenten fallas y evitar accidentes durante su operación; existen áreas críticas en la realización del mantenimiento, y por esto, se dividieron en los siguientes parámetros: Inspección, Lubricación, Ajustes y Limpieza.

### **6.2.1 Inspección.**

Se recomienda una inspección de todo el equipo antes de utilizarlo para encontrar piezas dañadas, fallas leves o imperfecciones; como el equipo se trabaja con presión, se debe monitorear durante el proceso en caso de que ocurran pérdidas de la misma; 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.

Además de inspeccionar el equipo, se debe también inspeccionar la línea principal de suministro de aire a presión, verificando que no haya algún tipo de fuga o anomalía que se pueda presentar en las mangueras, válvulas, reguladores y manómetros.

De manera general se tendrá en cuenta para las inspecciones el siguiente ordenamiento:

- NIVEL A - INSPECCIÓN EN SERVICIO: Inspección visual
- NIVEL B - INSPECCIÓN FUERA DE SERVICIO: Comprobación de espesores, Comprobación y prueba de accesorios de seguridad, Ensayos No Destructivos

(END) que se consideren necesarios, por ejemplo; emisión acústica o líquidos penetrantes.

- NIVEL C - INSPECCIÓN FUERA DE SERVICIO CON PRUEBA DE PRESIÓN: Prueba de presión hidrostática, Condiciones y presiones iguales a las primeras pruebas o a las indicadas en placa.

#### 6.2.2 Lubricación

Se debe aplicar un lubricante o grasa sobre la parte interna de la celda de presurización de presurización, con el fin de evitar que los accesorios de caucho se adhieran a la pared de la misma, lo cual generaría inconvenientes a la hora de desmontar el equipo; cuando el equipo no se encuentre en uso por tiempo prolongado es recomienda cada mes realizar una lubricación sencilla al sistema de rocas de las tapas y la celda de presurización.

#### 6.2.3 Ajustes

Durante el montaje del equipo se deben ajustar todas las partes para lograr la hermeticidad del espacio a cementar; cada componente debe encajar de manera precisa; por consiguiente se debe tener cuidado con los acoples que intervienen en todo sistema de presión, estos no deben ser deformados ni oxidados a la hora de llegar a correr las pruebas, se recomienda verificar que las condiciones de almacenamiento de los mismo sean optimas, es decir sin humedad o presencia de polvo y animales.

#### 6.2.4 Limpieza

Se debe realizar una limpieza general del equipo después de realizar cada prueba para mantenerlo en condiciones óptimas de operación; al finalizar cada prueba, se debe desmontar el equipo y realizar una limpieza tanto de la tapa inferior, superior como del tubo, removiendo las posibles suciedades que hayan quedado en él, 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.

En cuanto al baño de María la rutina recomendada está enfocada a la limpieza de los componentes externos y el cuidado del sistema de calentamiento, 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**

El equipo es puesto en operación para probar si el diseño que se realizó es el correcto, funcional y no representa ningún riesgo en su manipulación. Para esto se realizaron las siguientes pruebas:

### **7.1 PRUEBA DE HERMETICIDAD**

Se debe realizar esta prueba antes de realizar cualquier tipo de procedimiento, para confirmar que se registre prolongadamente una determinada presión; esta prueba se lleva a cabo en el laboratorio con los siguientes pasos:

1. Se asegura la tapa al cuerpo de la celda de presurización.
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. Abrir parcialmente la válvula de paso de la línea de aire principal y leer la presión en el regulador.
5. 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 regulador ubicado en la línea de aire principal.
6. Preparar una solución de agua y jabón y aplicarla en cada uno de los lugares por donde pueda existir pérdida de presión.
7. 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 logró la hermeticidad del equipo. La figura 32 muestra la presión constante de 25 psi que registra el manómetro en el equipo y la figura 33 muestra la aplicación de la solución de agua y jabón sobre el equipo.



Figura 32. Registro de Presiones Iguales  
Fuente: Autores



Figura 33. Prueba de hermeticidad del equipo  
Fuente: Autores

## 7.2 PRUEBA DE TEMPERATURA

Esta prueba es realizada a presión atmosférica; y cuyo objetivo es elevar la temperatura de una muestra de agua, hasta los 85°C; para llevar a cabo la prueba se realizaron los siguientes pasos:

1. Se realiza el montaje inicial del equipo (descrito en el capítulo 6.1) y la guía de laboratorio, omitiendo tapar la celda de presurización y sin acoplar el mecanismo de presión.
2. Se preparan 800 ml de lechada de cemento tipo comercial, con una densidad de 14.2 libras/galón, sin agregar ningún tipo de aditivo.
3. Se colocan 610 ml de lechada de cemento dentro del tubo del cilindro contenedor que está en la celda de presurización.
4. Cuando la luz del termostato ya no este encendida, que será el indicativo de que se ha alcanzado la temperatura deseada (entre 50 y 55 minutos desde el inicio del calentamiento), se pondrá la celda con la lechada dentro de la cámara y se leen cada 5 min los cambios de temperatura de la lechada.

Se logra calentar la muestra hasta los 80°C después de un tiempo de 35 minutos. La figura 34 muestra la lectura directa de esta prueba.



Figura 34. Prueba de Temperatura

Fuente: Autores

### 7.3 CEMENTACION BASICA (PRESION Y TEMPERATURA AMBIENTE)

Esta prueba es realizada a presión y temperatura ambiente. Para llevar a cabo la prueba se realizaran los siguientes pasos:

1. Se realiza el montaje inicial del equipo (descrito en el capítulo 6.1) y la guía de laboratorio, omitiendo el sistema de control de temperatura y sin acoplar el mecanismo de presión.
2. Se prepararan 800 ml de lechada de cemento tipo comercial, con una densidad de 14.2 libras/galón, sin agregar ningún tipo de aditivo.
3. Se colocaron 610 ml de lechada de cemento en el tubo.
4. Luego se dejó fraguar el cemento.



Figura 35. Montaje prueba básica  
Fuente: Autores

5. Después de fraguado el cemento, se retira la muestra ya fraguada. En la figura 36 podemos observar lo anterior.



Figura 36. Espacio cementado prueba básica  
Fuente: Autores

6. Luego se procedió a realizar los cortes para así poder medir la variación de su densidad y construir su respectivo perfil.

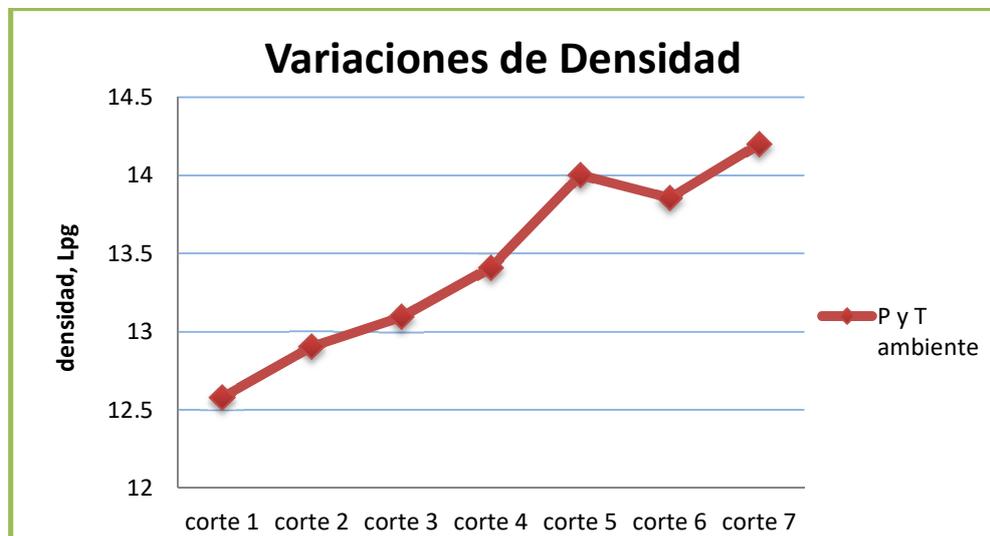


Figura 37. Perfil de densidades para la prueba básica  
Fuente: Autores

- Durante la realización de la prueba se puede observar un merma en el volumen de espacio que debía estar cementado, figura 39; para la prueba de cementación básica fue de 3 cm medidos desde donde teóricamente debería estar el tope de la muestra.



Figura 38. Merma de la prueba básica  
Fuente: Autores

#### 7.4 CEMENTACION CON AUMENTO DE PRESION Y TEMPERATURA

El objetivo de esta prueba es simular el asentamiento de la lechada de cemento, aplicando una presión de hasta 100 psi y una temperatura de hasta 85°C. Para llevar a cabo la prueba se realizan los siguientes pasos:

1. Se realiza el montaje inicial del equipo (descrito en el capítulo 6.1) y la guía de laboratorio.
2. Se prepararan 800 ml de lechada de cemento tipo comercial, con una densidad de 14.2 libras/galón, sin agregar ningún tipo de aditivo.
3. Se regula la presión de la línea de aire principal que va al distribuidor en 100 psi y se colocan 610 ml de lechada de cemento en el tubo.
4. Luego se empieza a inyectar aire a una presión constante de 100 psi a través del distribuidor hacia la celda de presurización; a su vez se regulo el control de temperatura a 90°C.



Figura 39. Montaje prueba con aumento de P y T.  
Fuente: Autores

5. Luego de seis horas, se cerró la entrada de aire al sistema, cerrando la válvula en la línea principal para luego despresurizar el equipo y se retira el equipo del sistema de temperatura.
6. Se retira la tapa superior del equipo y se extrae la muestra fraguada.



Figura 40. Espacio cementado prueba con aumento de P y T.  
Fuente: Autores

7. Se procede al respectivo corte de la muestra para evaluar la variación de la densidad; donde el corte 1 es el tope de la muestra y el corte 2 la base o fondo de la muestra.
- Durante la realización de la prueba se puede observar un merma en el volumen de lechada inicial utilizada para la prueba, figura 42; para la prueba de cementación con aumento de presión y temperatura fue de 5 cm de longitud medidos desde donde teóricamente debería estar el tope de la muestra.



Figura 41. Perfil de densidades para la prueba con aumento de P y T  
Fuente: Autores



Figura 42. Merma de la prueba con aumento de P y T  
Fuente: Autores

## 8. CONCLUSIONES

- Se diseña y construye un equipo para simular el asentamiento de la lechada de cemento de una sección de pozo con aumento de presión y temperatura controladas.
- Se verifica la funcionalidad del equipo a través de los ensayos propuestos, y con esto, que el equipo cumple con los objetivos de la creación del mismo.
- Se hace entrega de la guía de laboratorio para realizar las pruebas de asentamiento para lechadas de cementos, y el respectivo manual de mantenimiento y montaje del equipo.
- Se hace entrega del equipo al laboratorio de lodos y cementos de la facultad de ingeniería de la Universidad Surcolombiana.
- Durante las pruebas se observa que existe una diferencia de densidades entre la base y el tope en los cortes de la lechada, lo que nos indica una inestabilidad en la lechada, es por ello que para lograr una buena homogeneidad en la densidad de la lechada se deben utilizar en campo diferentes aditivos y pruebas piloto para corroborar su estado óptimo.
- Con las dos pruebas se confirma que al momento de cementar siempre se debe tener en cuenta el porcentaje de exceso de lechada. En la prueba con aumento de presión y temperatura, el tope de cemento disminuye un 16% de la longitud total, colocando este punto en lugares no deseados; y por ende sugiriendo correcciones en las características de las lechadas de cemento.

## 9. RECOMENDACIONES

- El equipo construido y las pruebas que se realizaran en este trabajo de grado siguen las recomendaciones de la normatividad API. Para más énfasis se recomienda leer la norma API RP 10 B: Prueba de Sedimentación.
- Las pruebas no deben ser llevadas a cabo con valores superiores de presión y temperatura, a los tomados en las pruebas realizadas en este trabajo: 100 psi y 85 °c.
- El equipo brinda la posibilidad de realizar diferentes tipos de pruebas en las lechadas de cemento, pudiendo modificar variables y obtener datos para su estudio.
- El termostato debe ser ajustado a su mayor temperatura (90°C), para asegurar que la temperatura de la muestra sea la óptima para la prueba.
- El agua que se utiliza dentro del sistema de calentamiento debe ser extraída de la cámara cada vez que se dé por terminada la prueba.
- Monitorear constantemente tanto el sistema de presión como de temperatura, durante el transcurso de la prueba; y que los valores indicados en los instrumentos sean los requeridos para la prueba.
- En el instante de sacar la muestra a estudiar del cilindro contenedor se sugiere realizar de manera suave unos golpes sobre la superficie metálica y así facilitar la extracción.
- Para evitar problemas con el fragüe anticipado de la muestra se recomienda iniciar la preparación de la lechada 30 minutos, como mínimo, después de iniciado con el precalentamiento del sistema.
- Con el fin de que no se presenten problemas futuros, se recomienda cambiar el agua por aceite dieléctrico en el sistema de temperatura; y de la misma forma verificar que la conexión eléctrica este bien enchufada para evitar cualquier electrocución.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

1. American Petroleum Institute. API Specification 10A, Specification for Cements and Materials for Well Cementing. Twenty Third Edition, April 2002.
2. American Petroleum Institute. API Specification 10B-2, Recommended Practice for Testing Well Cements. Second Edition, April 2013.
3. American Society of Testing Materials. ASTM A-106 Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature.
4. Arturo Lopez G., "Programa de cementos petroleros PET 219".
5. ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), section II – Materials, The American Society of Mechanical Engineers, 2013.
6. British Petroleum, "DeepWater Horizon Accident Investigation Report", Septiembre 2010.
7. Eugene F. Megyesy. (1989). "Manual de Recipientes a Presión Diseño y Cálculo". Primera Edición.
8. Juan Manuel León Estrada. (2001). "Diseño y Calculo de Recipientes a Presión".
9. J. Massa, J. Giro, A. Giudici. (2015). "Compendio de Calculo Estructural II".
10. Manual técnico Parker. (2011). "Manguera hidráulica, terminales y equipos"
11. NPT Pipe Threads, General Purpose (Inch) per ANSI/ASME B1.20.1. (2013).
12. Petróleos mexicanos (PEMEX), perforación y mantenimiento de pozos "manual para el ITP y coordinador de perforación y mantenimiento de pozos".
13. Schlumberger. (2012). Un giro a la derecha: una visión general de las operaciones de perforación.
14. T.E. Allen and F.L. Sands, Halliburton Services. (1993). Why Control Cement Slurry Density? SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference & Exhibition held in Singapore.

**ANEXO A.**  
**Guía de laboratorio: PRUEBAS DE ASENTAMIENTO PARA LECHADAS DE CEMENTO.**

PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN

FACULTAD: **INGENIERIA**  
PROGRAMA: **PETROLEOS**  
NOMBRE DEL CURSO: **CEMENTACION DE POZOS**

PRACTICA BASADA SEGÚN LA NORMA API 10 B.

### **1. JUSTIFICACION.**

Poder desarrollar las operaciones de cementación en el laboratorio no lleva a crear una visualización más amplia y detallada de las propiedades del mismo. No siempre el diseño teórico de las mezclas de cemento es igual al llevado a la práctica, y cuando parámetros como la densidad no se cumplen a satisfacción, el pozo no tendrá una integridad óptima e incluso causar resultados no deseados.

### **2. OBJETIVO.**

- Determinar la estabilidad de las lechadas de cemento a través del cálculo de las variaciones de densidad en una muestra representativa de las mismas.

### **3. MATERIALES Y REACTIVOS.**

- Cemento
- Agua
- Balanza de lodos
- Bikers
- Balanza electrónica
- Aditivos químicos
- Mezcladora
- Grasa lubricante.
- Cortadora de núcleos

#### **4. PROCEDIMIENTO: Corrida de la prueba**

1. Preparar la mezcla de lechada de cemento con la cual se realizara la prueba.
2. Ubicar dentro de la celda de presurización las siguientes partes en su respectivo orden: platina metálica circular, empaque circular y el cilindro contenedor y se procede a sellar la parte inferior de la celda de presurización enroscando el tapón.
3. Precalentar 5200ml de agua el en la cámara de temperatura con la celda de presurización hasta 85°C (185°F).
4. Una vez alcanzada la temperatura se introduce de manera lenta la mezcla de cemento dentro del cilindro contenedor que se encuentra dentro de la celda de presurización.
5. Se asegura la tapa hasta cubrir la parte roscada e inmediatamente conectamos el acople de la manguera del sistema de presión y se abre la válvula de paso de aire para presurizar la celda. Previamente la válvula reguladora de presión deberá estar configurada a 100 psi.
6. La prueba deberá ser monitoreada en un rango de 6 horas para asegurar que tanto la presión como la temperatura actúan adecuadamente en la lechada de cemento.

#### **Extracción de la muestra**

1. Una vez transcurridas las 6 horas, se apagan todos los sistemas y se procede a dejar la muestra en un periodo de fragüe de 24 horas; una vez ha transcurrido el tiempo total, se extrae la celda de presurización del sistema de temperatura.
2. Se introduce una varilla en el orificio de la parte inferior donde se encontraba el tapón y se procede a empujar el conjunto del cilindro contenedor de la muestra.
3. Se desmontan las abrazaderas superiores e inferiores del cilindro contenedor y teniendo cuidado con los empaques laterales del mismo, se desprenden los perfiles y se retira la muestra de cemento fraguada por completo.

### Calculo de las densidades

1. Una vez obtenida la muestra, se cortan en partes iguales despreciando los 2 cm superiores, se deben realizar un mínimo de 5 cortes. Con los cortes obtenidos y a partir del principio de Arquímedes se calculan densidades de diferentes cuerpos.
2. Se tara la balanza para que marque cero y se pesan (m air). Cada parte es sumergida dentro de un recipiente que contenga agua hasta que estos sean pesados
3. se extraen los cortes del agua se secan cuidadosamente. En la balanza se coloca un beaker con agua y se tara a cero. Con un hilo extra fino se suspenden las muestras dentro del agua y se registra el peso (m wáter).
4. Con la siguiente formula se calcula la densidad para cada caso:

$$\rho_{rel} = \frac{m_{air}}{m_{water}}$$

Observación: se puede construir el perfil de densidades y calcular el porcentaje de variación de densidad entre la muestra de cemento líquido y la muestra de cemento fraguado:

$$\Delta\rho_{rel} = \frac{\rho_{rel\ sec}}{\rho_{lechada}} * 100$$

$\rho$  rel sec: densidad de cada plug

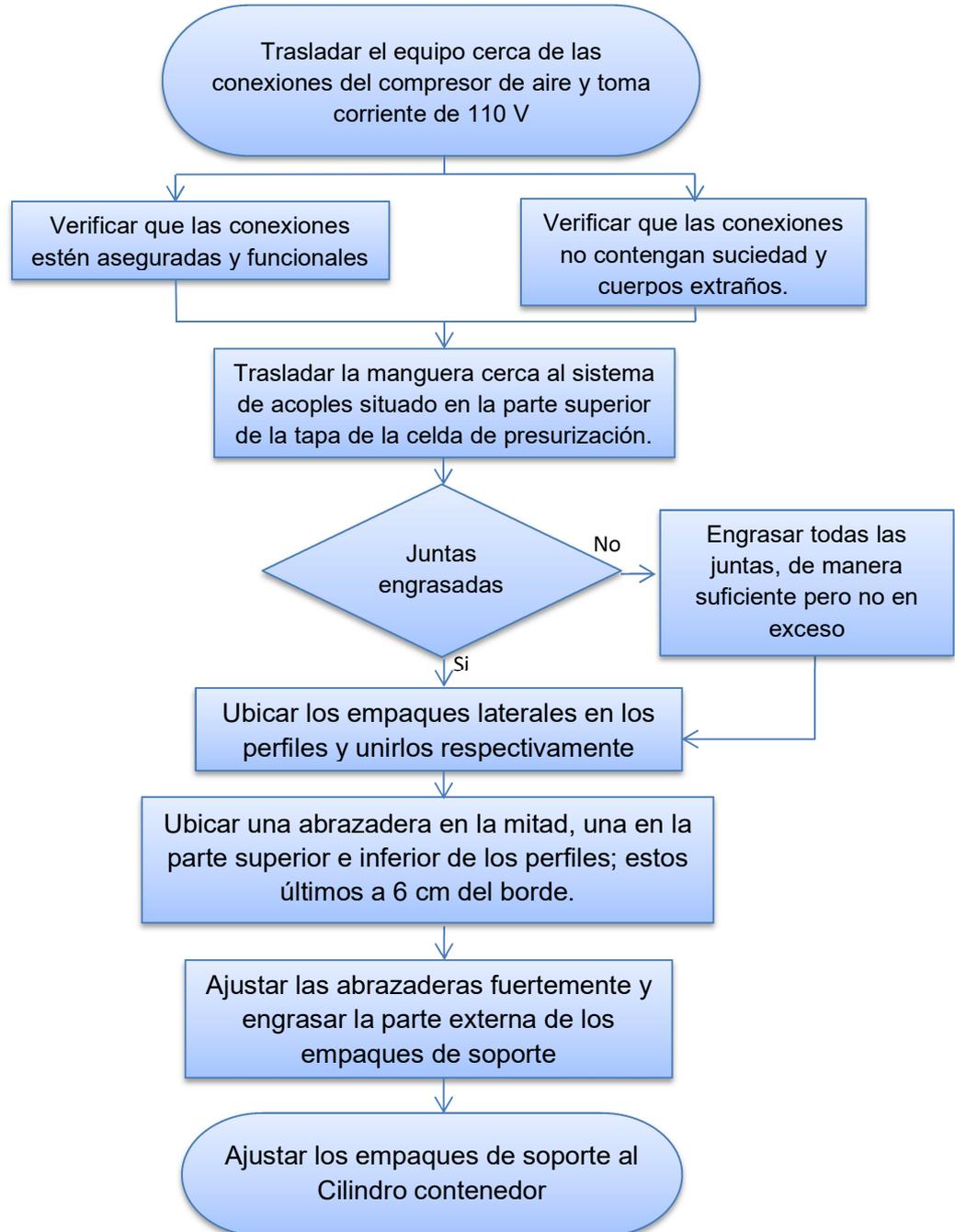
$\rho$  lechada: densidad de la lechada antes de prueba

En la siguiente tabla se deben anexar los resultados.

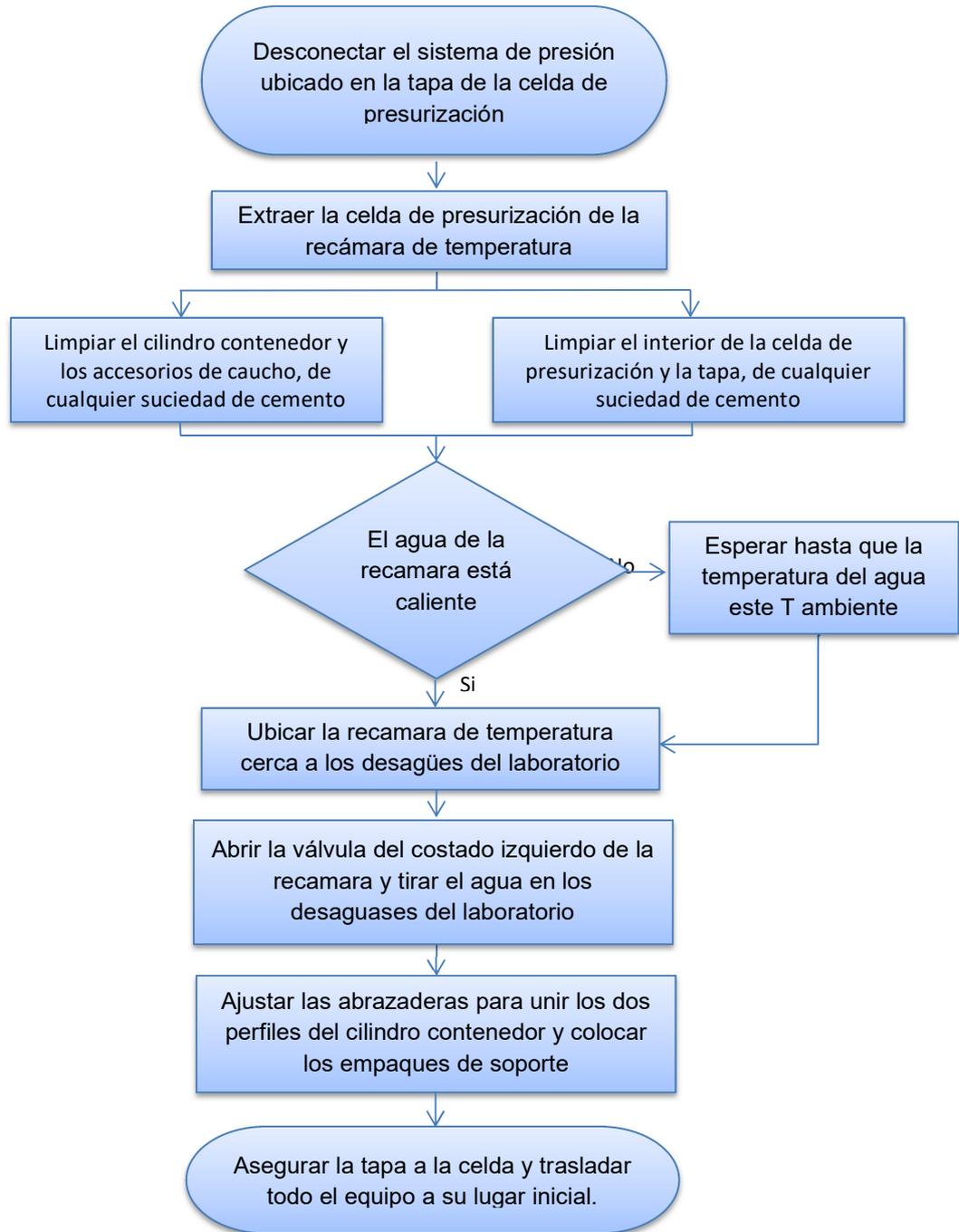
Segmento No.	M air	M water	$\rho$ rel	$\rho$ de lechada	% variacion de densidad
1 (top)					
2					
3					
4					
base					

Nota: use las casillas que necesite para el numero de segmentos.

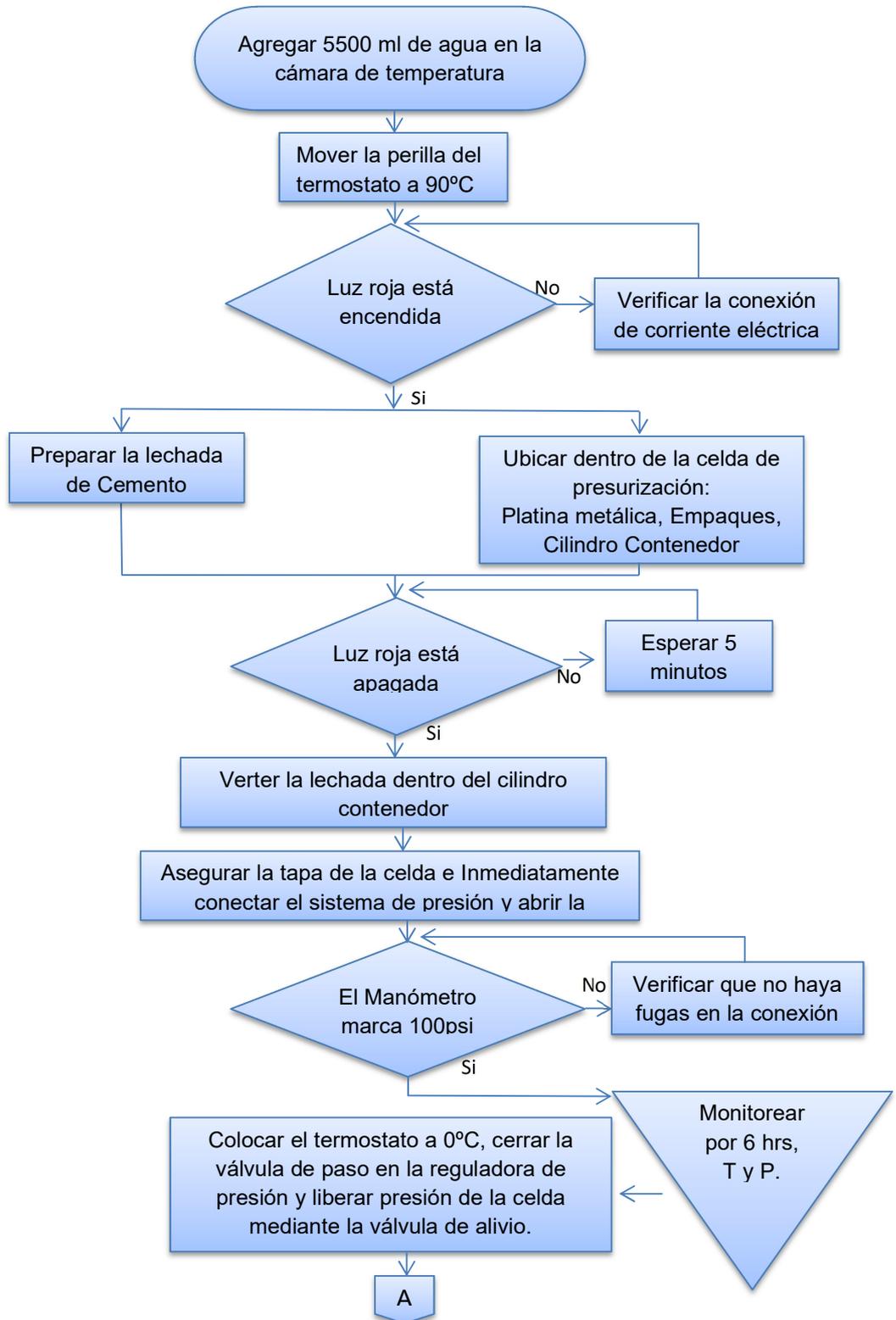
## FLUJOGRAMA PARA EL MONTAJE DEL EQUIPO

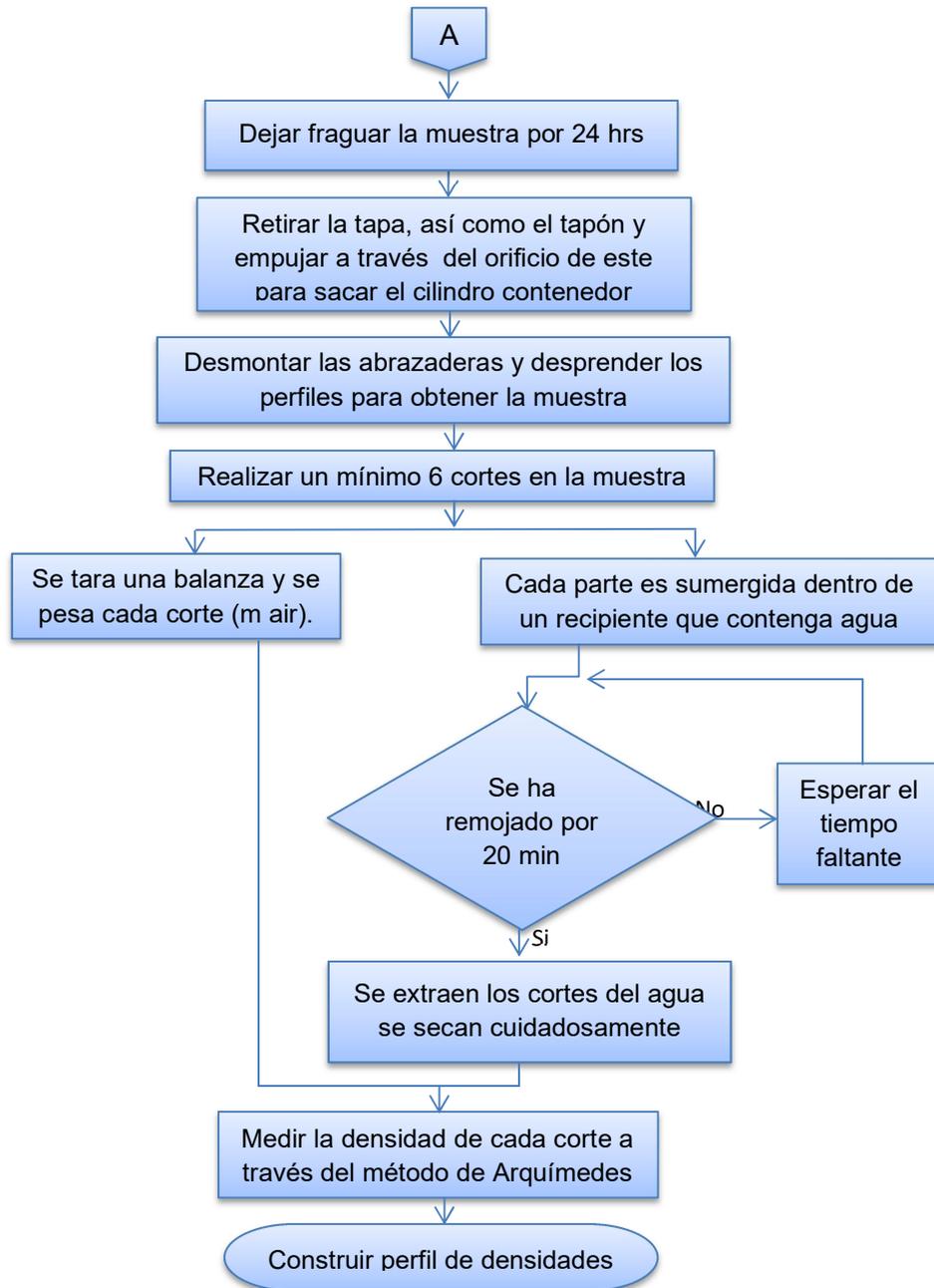


## FLUJOGRAMA PARA EL DESMONTAJE DEL EQUIPO



### FLUJOGRAMA DE LA GUIA DE LABORATORIO





**ANEXO B.**  
**Guía práctica para la elaboración de lechadas de cemento.**

PREPARACION LECHADA DE CEMENTO

PRACTICA BASADA SEGÚN LA NORMA API 10 A.

La cantidad requerida de los componentes para la preparación de lechada de cemento se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1B. Requerimientos de la lechada.

Components	Classes A and B	Class C	Classes D, E, F, H	Class G
	g	g	g	g
Mix water	355 ± 0,5	383 ± 0,5	327 ± 0,5	349 ± 0,5
Cement	772 ± 0,5	684 ± 0,5	860 ± 0,5	792 ± 0,5

Fuente: American Petroleum Institute (2002). API Specification 10A, Specification for Cements and Materials for Well Cementing.

La cantidad indicada deberá tener una precisión de 0,1%.

La temperatura del agua y del cemento 60 segundos antes de ser mezclados en el recipiente debe ser de 23°C +/- 1°C (73°F +/- 2° F).

Procedimiento para realizar la lechada de cemento.

1. Pesar la cantidad de agua, cemento y aditivos en la balanza electrónica.
2. Mezclar el cemento, agua y aditivos en una mezcladora API.  
15 segundos a 4000 rpm se mezclan los aditivos.  
30 segundos a 12000 rpm se mezcla toda la lechada.
3. Se mide la densidad de la lechada en una balanza.
4. Se procede a realizar las debidas pruebas.

### ANEXO C.

**Tabla. Máxima Presión Permissible de Operación para materiales ferrosos en función de la temperatura.**

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES: ACERO AL CARBONO Y DE BAJO CONTENIDO DE ELEMENTOS DE ALEACION												
Especificación		Para temperatura del metal no mayor de, grados F										
Número	Grado	- 20 a 650	700	750	800	850	900	950	1050	1100	1150	1200
SA-283	C	12.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SA-285	C	13.8	13.3	12.1	10.2	8.4	6.5	-	-	-	-	-
SA-515	55	13.8	13.3	12.1	10.2	8.4	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-515	60	15.0	14.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-515	65	16.3	15.5	13.9	11.4	9.0	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-515	70	17.5	16.6	14.8	12.0	9.3	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-516	55	13.8	13.3	12.1	10.2	8.4	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-516	60	15.0	14.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-516	65	16.3	15.5	13.9	11.4	9.0	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-516	70	17.5	16.6	14.8	12.0	9.3	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-105		17.5	16.6	14.8	12.0	9.3	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-181	I	15.0	14.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-350	LF1	15.0	14.4	13.0	10.8	7.8	5.0	3.0	1.5	-	-	-
	LF2	17.5	16.6	14.8	12.0	7.8	5.0	3.0	1.5	-	-	-
SA-53	B	15.0	14.4	13.0	10.8	8.7	6.5	-	-	-	-	-
SA-106	B	15.0	14.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	-	-	-
SA-193	B7 ≤ 2½"	25.0	25.0	23.6	21.0	17.0	12.5	8.5	4.5	-	-	-
SA-194	2H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SA-307	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* Los valores de esfuerzo de esta tabla pueden interpolarse para determinar los valores para temperaturas intermedias.

ANEXO D.

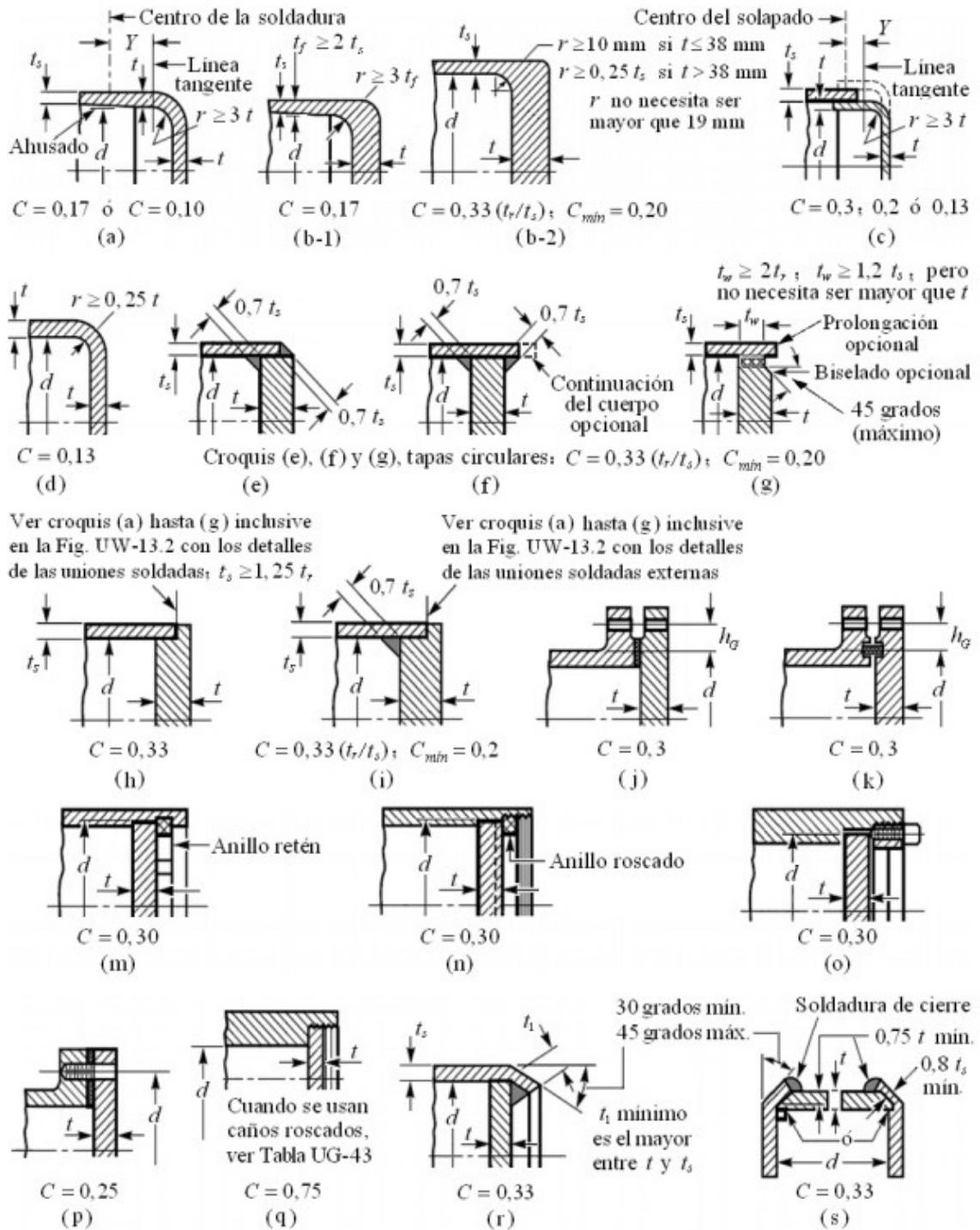
Tabla. Tensiones máximas admisibles, S, para materiales ferrosos en función de la temperatura.

Re- gión N°	Forma del (2) producto	Denomi- nación	Tipo Grado Clase	Grupo N°	Tensión de rotura		Tensión de fluencia	Máxima tensión admisible (MPa), en función de la temperatura en °C												
					MPa	MPa		-30 a 40	65	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
1	Placa	SA-283	C	1	380	205	205	108	108	108	108	108	108	108	107	101	...	...	...	...
2	Placa	SA-285	C	1	380	205	205	108	108	108	108	108	108	108	107	101	89,1	62,6	31,6	...
3	Placa	SA-515	60	1	415	220	220	118	118	118	118	118	118	118	115	108	88,9	62,7	31,6	12,7
4	Placa	SA-515	65	1	450	240	240	128	128	128	128	128	128	128	125	118	95	63,2	31,7	12,7
5	Placa	SA-515	70	2	485	260	260	138	138	138	138	138	138	136	128	101	67,1	33,6	12,9	...
6	Placa	SA-516	55	1	380	205	205	108	108	108	108	108	108	108	107	101	89,1	62,6	31,6	12,7
7	Placa	SA-516	60	1	415	220	220	118	118	118	118	118	118	118	115	108	88,9	62,7	31,6	12,7
8	Placa	SA-516	65	1	450	240	240	128	128	128	128	128	128	128	125	118	95	63,2	31,7	12,7
9	Placa	SA-516	70	2	485	260	260	138	138	138	138	138	138	136	128	101	67,1	33,6	12,9	...
10	Accesorios (1)	SA-234	WPB	1	415	240	240	118	118	118	118	118	118	118	118	117	88,9	62,7	31,6	12,7
11	Forjado	SA-105	...	2	485	250	250	138	138	138	138	136	129	122	101	67	33,6	12,9	...	...
12	Forjado	SA-181	60	1	415	205	205	118	118	118	118	114	107	101	89,1	62,6	31,6	12,7	...	...
13	Forjado	SA-350	LFI	1	415	205	205	118	118	118	118	114	107	101	89,1	62,6	31,6	12,7	...	...
14	Forjado	SA-350	LFI2	2	485	250	250	138	138	138	138	136	129	122	101	67	33,6	12,9	...	...
15	Cable soldado	SA-53	E/B	1	415	240	240	118	118	118	118	118	118	118	117	88,9	62,7	31,6	...	...
16	Cable sin costura	SA-106	B	1	415	240	240	118	118	118	118	118	118	118	117	88,9	62,7	31,6	12,7	...
17	Perno (3)	SA-193	B7	...	690	515	515	130	130	130	130	130	130	130	130	130	115	68,4	18,9	...
18	Tuerca	SA-194	H2	...	1206	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
19	Perno	SA-307	B	...	415	...	...	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	48,3	...	...	...	...	...	...	...
20	Placa, lámina	SA-36	...	1	400	250	250	114	114	114	114	114	114	114	114	114	...	...	...	...
21	Barra	SA-36	...	1	400	250	250	114	114	114	114	114	114	114	114	114	88,9	62,6	28,2	...

(1) Accesorios soldados o sin costura. (2) En todos los renglones el material es acero al carbono excepto el renglón 17 que es una aleación 1Cr-1/2Mo

## ANEXO E.

### Imagen Factor C para distintos tipos tapas planas, UG-34 del ASME VIII. Div.1

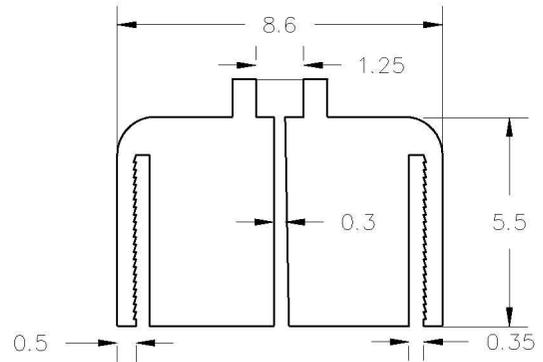


## ANEXO F.

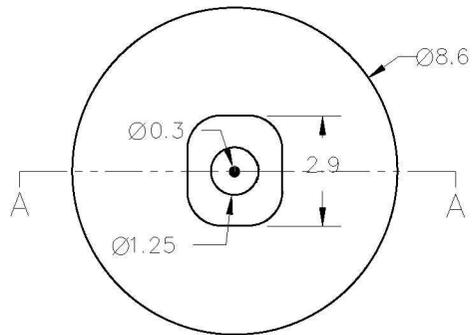
**Tabla. Rangos de Presión y Temperatura, para algunos materiales ferrosos, ANSI B-16.5**

Nominal Designation	Forgings		Castings		Plates		
C-Si	A 106 (1)		A 216 Gr. WCB (1)		A 515 Gr. 70 (1)		
C-Mn-Si	A 350 Gr. LF2 (1)				A 516 Gr. 70 (1), (2)		
C-Mn-Si-V	A 350 Gr. LF6 Cl. (4)						
3½ Ni	A 350 Gr. LF3				A 537 Cl. 1 (3)		
<b>Working Pressure by Classes, bar</b>							
Class							
Temp., °C	150	300	400	600	900	1500	2500
-29 to 38	19.6	51.1	68.1	102.1	153.2	255.3	425.5
50	19.2	50.1	66.8	100.2	150.4	250.6	417.7
100	17.7	46.6	62.1	93.2	139.8	233.0	388.3
150	15.8	45.1	60.1	90.2	135.2	225.4	375.6
200	13.8	43.8	58.4	87.6	131.4	219.0	365.0
250	12.1	41.9	55.9	83.9	125.8	209.7	349.5
300	10.2	39.8	53.1	79.6	119.5	199.1	331.8
325	9.3	38.7	51.6	77.4	116.1	193.6	322.6
350	8.4	37.6	50.1	75.1	112.7	187.8	313.0
375	7.4	36.4	48.5	72.7	109.1	181.8	303.1
400	6.5	34.7	46.3	69.4	104.2	173.6	289.3
425	5.5	28.8	38.4	57.5	86.3	143.8	239.7
450	4.6	23.0	30.7	46.0	69.0	115.0	191.7
475	3.7	17.4	23.2	34.9	52.3	87.2	145.3
500	2.8	11.8	15.7	23.5	35.3	58.8	97.9
538	1.4	5.9	7.9	11.8	17.7	29.5	49.2

CORTE A - A



VISTA SUPERIOR



ESC=1:2

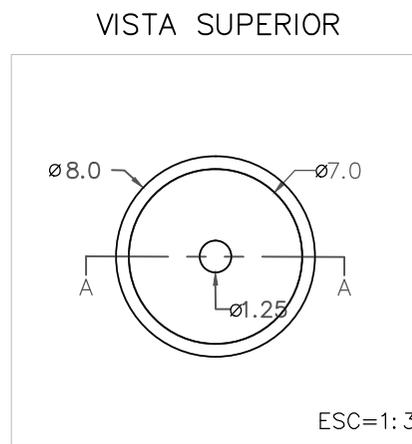
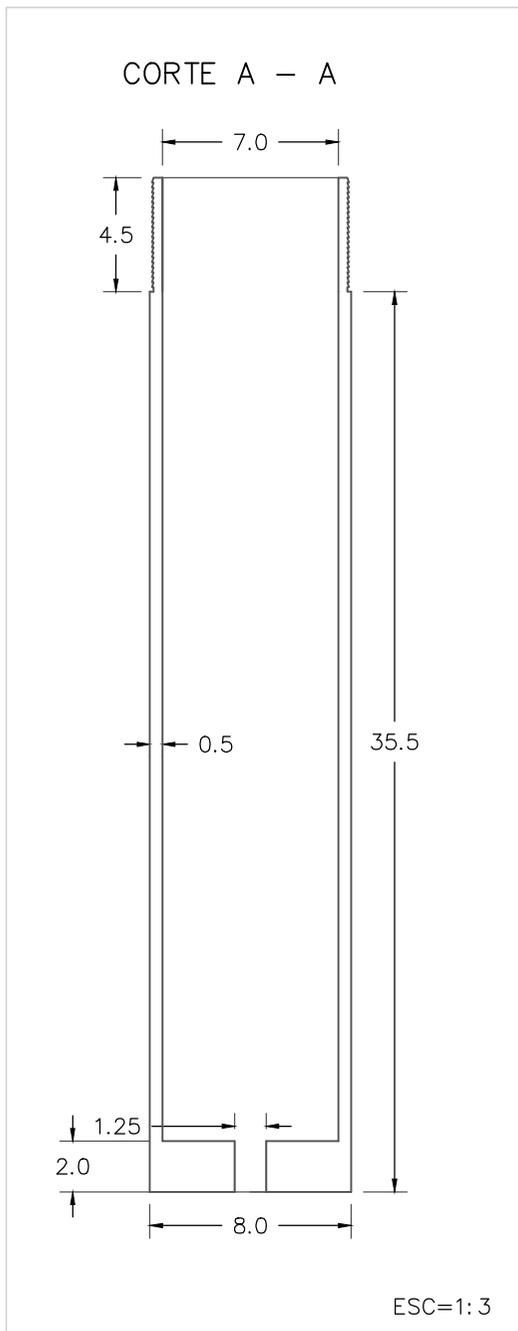


ESC=1:2

MODELADO 3D



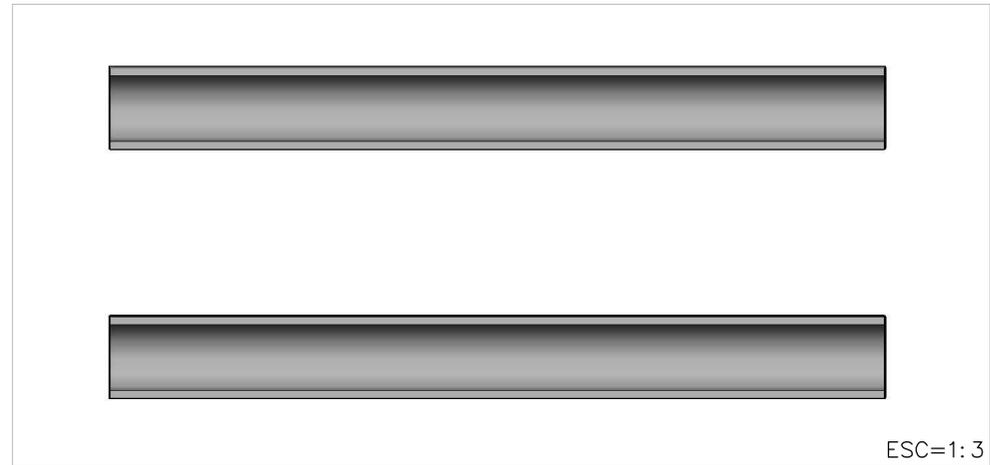
ESC=1:2



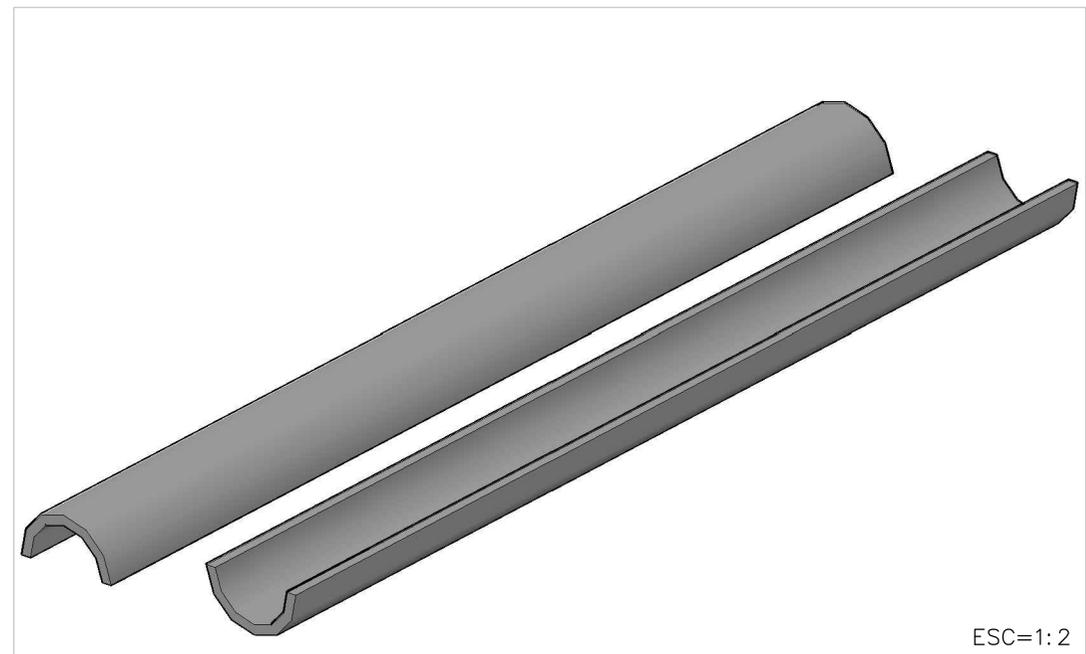
MODELADO 3D



PERFILES

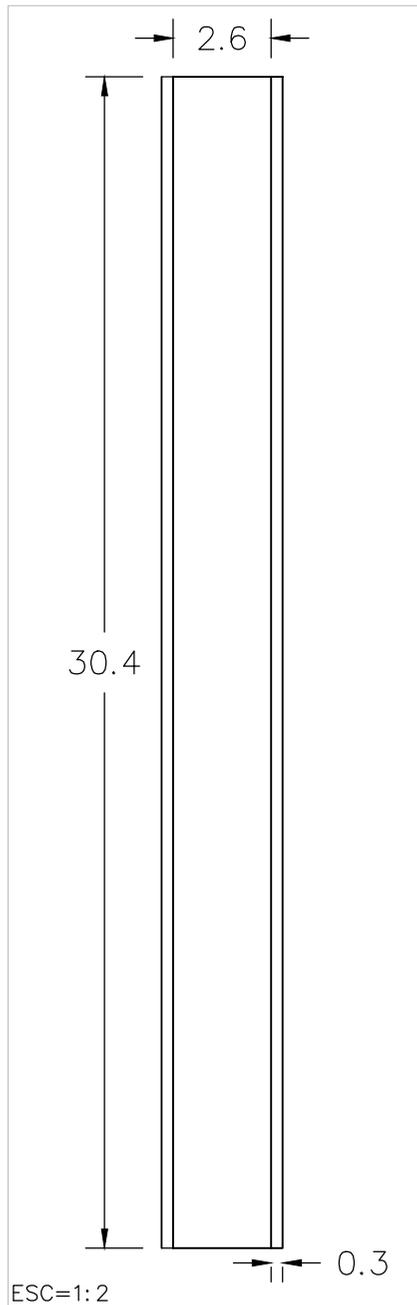


ESC=1:3



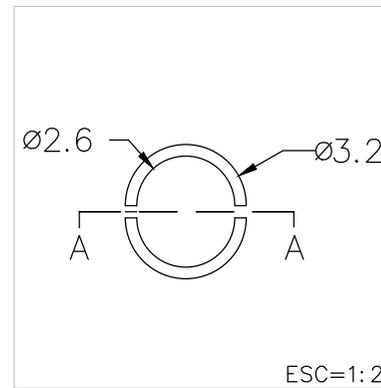
ESC=1:2

MODELADO 3D



ESC=1:2

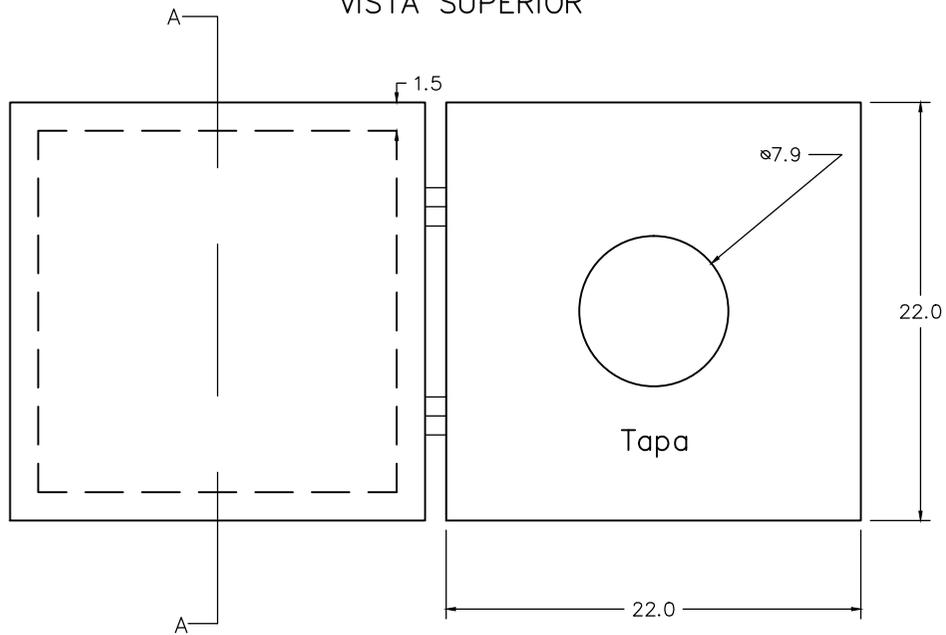
CORTE A - A



ESC=1:2

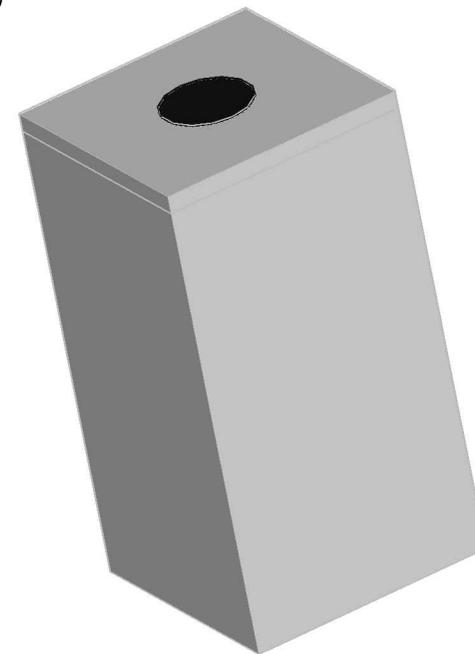
VISTA SUPERIOR

VISTA SUPERIOR

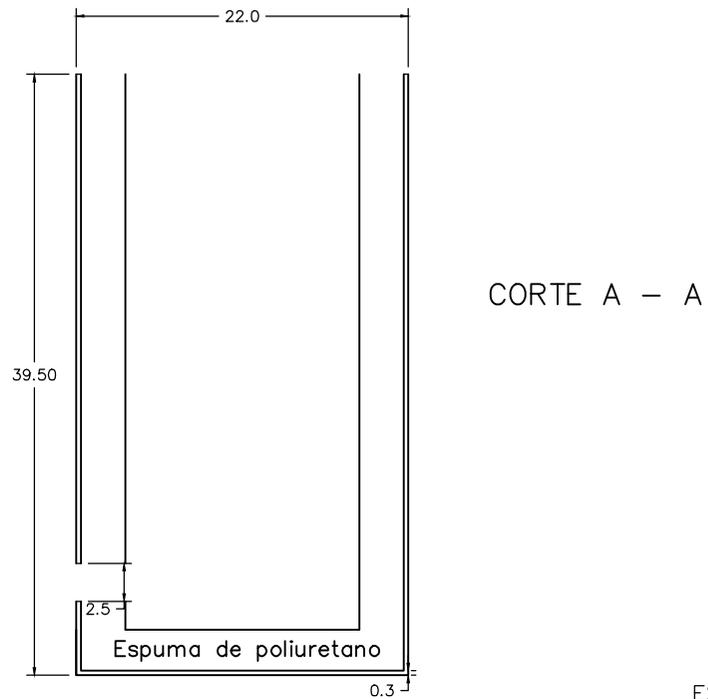


ESC=1: 4

MODELADO 3D

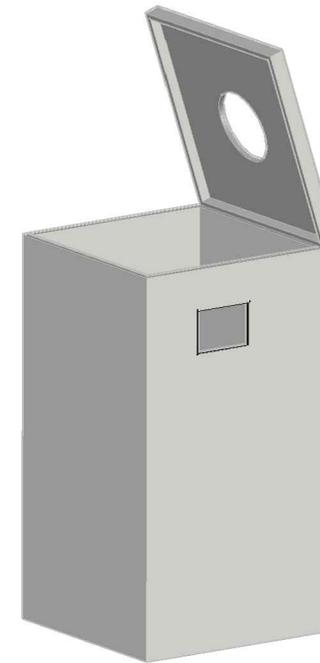


ESC=1: 5



ESC=1: 5

MODELADO 3D



ESC=1: 7