



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA EN PETROLEO

TEMA:

“DISEÑO DE UN REACTOR PARA ENSAYOS DE LABORATORIO
EN MUESTRAS DE ALTO CONTENIDO DE PARAFINAS Y
ASFALTENOS A CONDICIONES DE YACIMIENTO.”

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR (ES):

ALLAN JOEL RAMIREZ OTERO

TUTOR:

ING. CARLOS ALFREDO MALAVÉ CARRERA, MSc.

LA LIBERTAD, ECUADOR

2024

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROLEO**

TEMA:

**DISEÑO DE UN REACTOR PARA ENSAYOS DE
LABORATORIO EN MUESTRAS DE ALTO CONTENIDO
DE PARAFINAS Y ASFALTENOS A CONDICIONES DE
YACIMIENTO.**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

ALLAN JOEL RAMIREZ OTERO

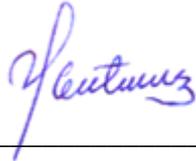
TUTOR:

ING. CARLOS ALFREDO MALAVÉ CARRERA, MSc.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2024

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



ING. MARLLELIS GUTIERREZ H. PhD.
DIRECTOR DE CARRERA



ING. CARLOS MALAVÉ C., MSc.
DOCENTE TUTOR



ING. EDISON BRITO AVILA. MSc.
DOCENTE ESPECIALISTA



ING. DAVID VEGA G.
SECRETARIO DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

A mis queridos padres, quienes han sido el pilar fundamental a lo largo de mi trayectoria académica. Agradezco su inquebrantable apoyo, su capacidad para infundir serenidad en momentos de confusión, y el amor incansable que han compartido para impulsarme hacia adelante.

A mis amados abuelos, quienes han ocupado un lugar especial como segundos padres, siempre deseándome lo mejor y esforzándose por buscar oportunidades para mi crecimiento.

A mis queridos tíos y hermanos, quienes han estado presentes durante todo este recorrido.

A mis amigos, quienes han convertido esta etapa en una de las mejores de mi vida, gracias a su compañía y apoyo constante.

A mi querida novia, a quien agradezco por las emociones y experiencias que ha compartido conmigo desde el momento en que nos conocimos.

Esta tesis está dedicada a cada una de estas personas extraordinarias que han dejado una huella imborrable en mi viaje académico y personal.

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema “**DISEÑO DE UN REACTOR PARA ENSAYOS DE LABORATORIO EN MUESTRAS DE ALTO CONTENIDO DE PARAFINAS Y ASFALTENOS A CONDICIONES DE YACIMIENTO**” elaborado por el estudiante **ALLAN JOEL RAMÍREZ OTERO** egresado de la carrera de Ingeniería en Petróleos, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio **COMPILATIO**, y luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 8% de la valoración permitida.

**INFORME DE ANÁLISIS**
magister

Tesis para Compilatio - Allan Ramirez

8%
Textos sospechosos

7% Similitudes
< 1% similitudes entre comillas

< 1% Idioma no reconocido

0% Textos potencialmente generados por la IA

| | | |
|--|--|------------------------------|
| Nombre del documento: Tesis para Compilatio - Allan Ramirez.docx | Depositante: CARLOS ALFREDO MALAVE CARRERA | Número de palabras: 10.060 |
| ID del documento: 390458cf3802bb53a6ef35f876e6536222caba9b | Fecha de depósito: 14/12/2023 | Número de caracteres: 66.143 |
| Tamaño del documento original: 78,32 kB | Tipo de carga: interface | |
| | fecha de fin de análisis: 14/12/2023 | |

FIRMA DEL TUTOR



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS ALFREDO
MALAVE CARRERA**

Ing. Carlos Malavé Carrera

C.I.: 0912370095

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **Allan Joel Ramirez Otero**, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado “**Diseño de un reactor para ensayos de laboratorio en muestras de alto contenido de parafinas y asfaltenos a condiciones de yacimiento.**”, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería en Petróleos, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de mi autoría.

Por medio de la presente declaración cedo los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,



ALLAN JOEL RAMIREZ OTERO

Autor de Tesis

C.I. 0942961657

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Carlos Alfredo Malavé Carrera, PhD/MSc.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo “Diseño de un reactor para ensayos de laboratorio en muestras de alto contenido de parafinas y asfaltenos a condiciones de yacimiento.” previo a la obtención del Título de Ingeniero en Petróleos, elaborado por el Sr/a. Allan Joel Ramirez Otero, egresado de la carrera de Ingeniería en Petróleos, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.

FIRMA DEL TUTOR



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS ALFREDO
MALAVE CARRERA**

ING. CARLOS ALFREDO MALAVÉ CARRERA
TUTOR

AGRADECIMIENTOS

Con profundo agradecimiento:

A mis amados padres, por ser mi mayor apoyo y guía a lo largo de mi trayectoria académica. Su amor, sacrificio y constante aliento han sido la luz que iluminó mi camino.

A Dios, por brindarme fuerza, sabiduría y bendiciones incontables a lo largo de este viaje. Su gracia ha sido mi mayor fortaleza.

A los Ingenieros Carlos Malavé y Roberto Silva, cuya experiencia y mentoría han sido fundamentales en el desarrollo de esta investigación. Aprecio su dedicación y conocimiento compartido, que han enriquecido mi aprendizaje.

Este logro es el resultado de la colaboración y apoyo de cada uno de ustedes. ¡Gracias por ser parte integral de mi éxito!

Tabla de contenido

| | |
|--|-------------|
| DEDICATORIA | iii |
| CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO | iv |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA | v |
| CERTIFICACIÓN DEL TUTOR | vi |
| AGRADECIMIENTOS | vii |
| LISTA DE FIGURAS | xii |
| LISTA DE ECUACIONES | xiv |
| RESUMEN | xvi |
| ABSTRACT | xvii |
| CAPITULO I: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | 1 |
| 1.3.1 Objetivo General | 4 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 4 |
| 1.4 ALCANCE | 4 |
| 1.5 VARIABLES | 5 |
| 1.5.1 Variables Dependientes: | 5 |
| 1.5.2 Variables Independientes | 5 |
| CAPITULO II: MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1 RECIPIENTES A PRESIÓN | 6 |
| 2.1.1 Funcionamiento | 7 |
| 2.2.1 Presión De Operación (Po) | 8 |
| 2.2.2 Presión De Diseño (p) | 8 |
| 2.2.3 Presión De Prueba (Pp) | 8 |
| 2.2.4 Presión De Trabajo Máxima Permisible | 9 |
| 2.2.5 Esfuerzo De Diseño A La Tensión (S) | 10 |
| 2.2.6 Eficiencia De Las Soldaduras (E) | 10 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 2.3 | CLASIFICACIÓN | 10 |
| 2.3.1 | Clasificación Por Su Uso: | 10 |
| 2.3.2 | Por Su Orientación | 11 |
| 2.3.3 | Por Su Geometría | 12 |
| 2.3.4 | Por Su Tipo De Material | 13 |
| 2.3.5 | Por La Presión De Diseño | 15 |
| 2.3.6 | Por La Normativa Y Código De Diseño. | 15 |
| 2.4 | TIPOS DE TAPAS | 15 |
| 2.4.1 | Tapas planas | 15 |
| 2.4.2 | Tapas planas con ceja | 15 |
| 2.4.3 | Tapas únicamente abombadas | 16 |
| 2.4.4 | Tapa abombadas con ceja invertida | 16 |
| 2.4.5 | Tapas toriesféricas | 16 |
| 2.4.6 | Tapas semielípticas | 16 |
| 2.4.7 | Tapas semiesféricas | 16 |
| 2.4.8 | Tapas 80:10 | 17 |
| 2.4.9 | Tapas cónicas | 17 |
| 2.4.10 | Tapas toricónicas | 17 |
| 2.5 | PROPIEDADES DE LOS MATERIALES. | 20 |
| 2.5.1 | Requisitos Técnicos. | 20 |
| 2.5.2 | Requisitos Económicos. | 20 |
| 2.6 | NORMAS DE FABRICACIÓN. | 21 |
| 2.7 | CÓDIGO ASME | 22 |
| 2.7.1 | Historia | 22 |
| 2.7.2 | Secciones Del Código A.S.M.E | 23 |
| 2.8 | ASFALTENOS | 23 |
| 2.8.1 | Deposición De Asfaltenos | 25 |
| 2.9 | PARAFINAS | 26 |
| 2.9.1 | Deposición De Parafinas | 28 |
| 2.10 | PROBLEMAS DERIVADOS DE LA PRECIPITACIÓN DE ASFALTENOS Y PARAFINAS | 28 |
| 2.10.1 | Métodos para el control de parafinas y asfaltenos | 30 |
| 3.2.1 | Selección y justificación del código ASME | 33 |
| 3.2.2 | Divisiones de la sección VIII del código ASME | 34 |
| 3.2.3 | Características que favorecen la elección de la sección VII del código ASME | 35 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.2.4 | Subsecciones de la sección VII división 1 del código ASME | 36 |
| 3.2.5 | Partes de las subsecciones necesarias para elaborar el diseño | 37 |
| 3.3 | UG-27 ESPESOR DE RECIPIENTES BAJO PRESIÓN INTERNA. DISEÑO. | |
| | 39 | |
| 3.3.1 | Recipientes cilíndricos | 40 |
| 3.3.2 | Recipientes esféricos | 40 |
| 3.4 | PROCESO PARA CÁLCULO DE ESPESOR REQUERIDO SEGÚN UG-27 | |
| | ASME VIII DIV.1 | 41 |
| 3.5 | DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y CRITERIOS TEÓRICOS PARA EL | |
| | DISEÑO | 43 |
| 3.5.1 | Presión interna de diseño | 43 |
| 3.5.2 | Temperatura de diseño | 44 |
| 3.5.3 | Geometría | 44 |
| 3.5.4 | Orientación | 44 |
| 3.5.5 | Tipo de tapas | 44 |
| 3.5.6 | Selección de material | 45 |
| 3.6 | CÁLCULOS Y PARÁMETROS INICIALES | 51 |
| 3.6.1 | Cuerpo | 51 |
| 3.6.2 | Cabeza semielíptica 1 | 53 |
| 3.6.3 | Cabeza semielíptica 2 | 54 |
| 3.6.4 | Uniones roscadas | 54 |
| 3.7 | COMPLEMENTOS ADICIONALES EN EL DISEÑO | 56 |
| 3.7.1 | Agitador | 56 |
| 3.7.2 | Cilindro de acero inoxidable | 58 |
| 3.7.3 | Resistencia eléctrica para el calentamiento | 58 |
| 3.7.4 | Atmosfera inerte (inyección de nitrógeno) | 59 |
| 3.7.5 | Boquillas | 60 |
| 3.7.6 | Medición de temperatura | 61 |
| 3.7.7 | Medición de presión | 61 |
| 3.7.8 | Sellos y empaques | 62 |
| 4.1.1 | Cuerpo | 63 |
| 4.1.2 | Cabeza semielíptica 1 | 65 |
| 4.1.3 | Cabeza semielíptica 2 | 66 |
| 4.1.4 | Sellos | 67 |
| 4.1.5 | Boquilla 1 | 67 |
| 4.1.6 | Boquilla 2 | 68 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.1.7 | Soportes | 69 |
| 4.1.8 | Agitador | 70 |
| 4.1.9 | Termómetro | 70 |
| 4.1.10 | Manómetro | 71 |
| 4.2 | FUNCIONAMIENTO ESPERADO | 71 |
| 4.3 | Limitaciones del diseño. | 72 |
| 4.3.1 | Variabilidad de propiedades de materiales | 72 |
| 4.3.2 | Ausencia de factores dinámicos externos | 72 |
| 4.3.3 | Limitaciones de tamaño y escala | 72 |
| 4.3.4 | Cambios en el diseño debido a accesorios externos | 73 |
| 4.3.5 | Importancia de pruebas de contenido de parafinas y asfaltenos en muestras de crudos | 74 |
| 4.3.6 | El diseño de un reactor cumple con el objetivo de caracterización de asfaltenos y parafinas | 74 |
| 4.3.7 | Limitaciones teóricas | 75 |
| 4.3.8 | Base teórica para diseño práctico | 75 |
| | <i>Bibliografía</i> | 76 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Recipiente a presión. | 6 |
| Figura 2. Recipientes de transporte | 10 |
| Figura 3. Recipiente horizontal | 11 |
| Figura 4. Recipiente vertical..... | 12 |
| Figura 5. Recipiente de geometría esférica | 12 |
| Figura 6. recipiente de geometría cónica..... | 13 |
| Figura 7. recipiente metálico | 13 |
| Figura 8. recipiente plástico..... | 14 |
| Figura 9. Recipiente de vidrio | 14 |
| Figura 10. Tipos de tapas en recipientes a presión | 18 |
| Figura 11. Agregación de asfaltenos | 26 |
| Figura 12. Reducción del diámetro de tuberías debido a precipitación de asfaltenos y parafinas..... | 29 |
| Figura 13. Partes de un recipiente a presión..... | 42 |
| Figura 14. Reactor para pruebas de parafinas y asfaltenos..... | 43 |
| Figura 15. Cabeza semielíptica..... | 45 |
| Figura 16. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 1A | 47 |
| Figura 17. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 1A | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 18. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 2A | 49 |
| Figura 19. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 2A | 50 |
| Figura 20. Diagramas del cuerpo del reactor | 52 |
| Figura 21. Diagrama de cabeza semielíptica #1 | 53 |
| Figura 22. Diagrama de cabeza semielíptica #2 | 54 |
| Figura 23. Diagramas de uniones roscadas en el cuerpo | 55 |
| Figura 24. Disco de agitador de fluido y dirección de movimiento | 57 |
| Figura 25. Agitador de fluidos | 57 |
| Figura 26. Recipiente de acero inoxidable para muestras | 58 |
| Figura 27. Resistencia calefactora | 59 |
| Figura 28. Diagrama de aberturas en recipientes a presión | 60 |
| Figura 29. boquilla de acero inoxidable clase 3000 | 60 |
| Figura 30. Termómetro de autoclave | 61 |
| Figura 31. Manómetro de autoclave | 62 |
| Figura 32. Sellos de Nitrilo | 62 |
| Figura 33. Planos del cuerpo del reactor | 64 |
| Figura 34. Planos de cabeza semielíptica #1 | 65 |
| Figura 35. Planos de cabeza semielíptica #2 | 66 |
| Figura 36. Planos de localización de boquillas | 68 |
| Figura 37. Planos de localización de soportes | 69 |

LISTA DE ECUACIONES

| | Pág. |
|--|-------------|
| Ecuación 1. Presión de diseño | 8 |
| Ecuación 2. Presión de prueba..... | 8 |
| Ecuación 3. Eficiencia de soldadura..... | 10 |
| Ecuación 4. Espesor por esfuerzos circunferenciales..... | 40 |
| Ecuación 5. Espesor por esfuerzos longitudinales..... | 40 |
| Ecuación 6. Espesor para recipientes esféricos | 40 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Normativas Internacionales. | 21 |
| Tabla 2. Variables que se presentan en la subsección UG-27. | 40 |
| Tabla 3. Pasos para el diseño de un recipiente a presión. | 41 |
| Tabla 4. Materiales recomendados para diferentes temperaturas. | 45 |
| Tabla 5. Resultados para el cuerpo. | 51 |
| Tabla 6. Resultados para cabeza semielíptica 1. | 53 |
| Tabla 7. Resultados de cabeza semielíptica 2. | 54 |
| Tabla 8. Resultados para uniones roscadas. | 55 |
| Tabla 9. Características - Cilindro. | 63 |
| Tabla 10. Características - Cabeza semielíptica 1. | 65 |
| Tabla 11. Características - Cabeza semielíptica 2. | 66 |
| Tabla 12. Características - Sellos. | 67 |
| Tabla 13. Características- Boquilla 1. | 67 |
| Tabla 14. Características - Boquilla 2. | 68 |
| Tabla 15. Características - Soportes. | 69 |
| Tabla 16. Características - Agitador. | 70 |
| Tabla 17. Características - Termómetro. | 70 |
| Tabla 18. Características - Manómetro. | 71 |

“DISEÑO DE UN REACTOR PARA ENSAYOS DE LABORATORIO
EN MUESTRAS DE ALTO CONTENIDO DE PARAFINAS Y
ASFALTENOS A CONDICIONES DE YACIMIENTO.”

Autor: Ramirez Otero Allan Joel

Tutor: Malavé Carrera Carlos Alfredo

RESUMEN

Esta investigación se centra en el diseño de un reactor destinado a ensayos de laboratorio que permitan la evaluación del contenido de parafinas y asfaltenos en muestras de crudo. Se aborda un enfoque metodológico teórico basado en las normas establecidas en el código ASME para recipientes a presión, donde se destaca la selección y justificación detallada de cada componente del recipiente, además de describir sus funcionalidades específicas que permitan la operación segura y correcta del reactor.

A pesar de que la metodológica teórica garantiza la eficacia del diseño y la caracterización de cada uno de sus componentes, se presentan una serie de limitaciones que son importantes considerar en futuras investigaciones.

PALABRAS CLAVE: *Diseño de reactor, Parafinas y Asfaltenos, Diseño teórico, Código ASME, Componentes.*

"DESIGN OF A REACTOR FOR LABORATORY TESTS ON
SAMPLES WITH HIGH CONTENT OF WAXES AND
ASPHALTENES UNDER RESERVOIR CONDITIONS"

Autor: Ramirez Otero Allan Joel

Tutor: Malavé Carrera Carlos Alfredo

ABSTRACT

“This research focuses on designing a reactor for laboratory tests to assess the content of waxes and asphaltenes in crude oil samples. It employs a theoretical methodological approach based on the standards established in the ASME code for pressure vessels. The selection and detailed justification of each component of the reactor are highlighted, along with the description of their specific functionalities to ensure the safe and proper operation of the reactor.

While the theoretical methodology ensures the effectiveness of the design and characterization of each component, a series of limitations are presented that are crucial to consider in future investigations.”

KEYWORDS: *Reactor Design, Waxes and Asphaltenes, Theoretical Design, ASME Code, Components.*

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la industria del petróleo y gas los problemas causados por la precipitación de parafinas y asfaltenos resultan comunes, esto genera desafíos operativos que deben ser solucionados.

Las parafinas causan problemas como:

- Deposición en tuberías y equipos, lo cual genera obstrucción y puede resultar en la reducción de la eficiencia operativa.
- A bajas temperaturas las parafinas se pueden solidificar y aumentar la viscosidad del petróleo haciendo que se dificulte el flujo de petróleo.
- Reducción de eficiencia en recuperación secundaria: al encontrarse en contacto con agua de inyección en el yacimiento puede causar emulsiones y obstrucciones, lo cual puede afectar las propiedades del yacimiento como la permeabilidad.

Los asfaltenos causan problemas como:

- Formación de sedimentos, los cuales se precipitan en el petróleo alterando las condiciones de presión y temperatura en las facilidades de superficie y en el yacimiento.
- Formación de emulsiones, lo que dificulta el tratamiento y separación de fluidos.
- Afectación en la composición del petróleo, que suelen ser difíciles de eliminar en la refinación y pueden incluir cantidades de azufre.

El diseño de recipientes a presión puede considerarse un desafío, pero también puede representar problemas al ser necesario cumplir con las normas de seguridad e integridad para el adecuado funcionamiento del equipo. (Centeno y otros, 2004) Por esta razón el diseño del reactor para pruebas de parafinas y asfaltenos busca

enfrentar los desafíos que puedan aparecer durante su diseño y evitar los siguientes problemas:

- Resistencia estructural inadecuada: es una de las características más importantes que se consideran en el diseño de recipientes a presión, este diseño implica asegurar que el recipiente tenga la resistencia estructural adecuada para soportar todas las cargas internas y externas a las que esté expuesto.
- Fatiga y vida útil limitada: los recipientes a presión están expuestos a ciclos de carga y descarga constantemente, lo que puede ocasionar en el material acumulación de daño por fatiga.
- Problemas de cálculo y diseño, estos problemas residen en espesores inadecuados, una mala selección de material o errores en el cálculo de su resistencia estructural
- No cumplir con las normativas y estándares: Principalmente se busca cumplir con el condigo ASME, pero existen otros estándares internacionales que buscan garantizar la integridad del equipo.

1.2 ANTEDECENTES

Arriola Eduardo (2017) indica que “Las parafinas y los asfaltenos normalmente están presentes en todos los crudos, en función del volumen y las condiciones a las que dicho crudo se somete, tienden a mantenerse diluidos o en caso contrario, a precipitarse al agruparse por las alteraciones que sufre en su ambiente, al dañar el medio poroso y bloquear las tuberías de producción o líneas de descarga, es aquí donde, por efecto de este fenómeno, la producción se puede ver afectada de forma muy severa.”

De esta manera se describe que el problema de la precipitación de las parafinas y los asfaltenos resulta ser muy común en actividades de producción. Cuando las técnicas convencionales para limpiar parafinas y asfaltenos no dan resultados se debe recurrir a tratamientos químicos que ayudarán a prevenir el depósito de estos compuestos orgánicos.

Para su mejor estudio y elección del método de tratamiento de estos compuestos orgánicos surge la necesidad de analizar su comportamiento frente al efecto de la presión y temperatura mediante el diseño de un reactor denominado también recipiente a presión.

El diseño de recipientes a presión es un campo especializado en la ingeniería que se centra en el diseño, análisis y fabricación de recipientes que contienen fluidos a presiones superiores a la atmosférica. Estos recipientes se utilizan en una amplia gama de industrias, como la petroquímica, la energía, la industria alimentaria y farmacéutica, entre otras.

Como lo indica el texto “ASME Boiler and Pressure Vessel Code” (2017) el diseño de los recipientes a presión debe cumplir con los estándares y códigos establecidos por organizaciones reconocidas internacionalmente, como la ASME (American Society of Mechanical Engineers) y la API (American Petroleum Institute). Estos estándares incluyen requisitos específicos para el diseño, fabricación, inspección y pruebas de los recipientes a presión”

Con en correcto diseño del reactor y mediante normas como la “ASTM D3279” de la American Society for Testing and Materials (ASTM) que describe un método estándar para la determinación de la estabilidad de los asfaltenos en los aceites crudos y productos derivados del petróleo mediante la medición de la cantidad de sedimentos formados, se podrá completar el objetivo del diseño del reactor.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

- Describir el diseño de un reactor que permita realizar pruebas de contenido de parafinas y asfaltenos a condiciones del yacimiento en un laboratorio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar el diseño geométrico del reactor.
- Calcular el espesor de pared requerido.
- Describir los componentes adicionales que permitan el correcto funcionamiento del reactor.
- Determinar la presión y temperatura de funcionamiento del reactor.

1.4 ALCANCE

Esta investigación tiene como objetivo plantear todos los conocimientos y conceptos necesarios que permitan el diseño conceptual de un reactor a presión que permita realizar pruebas de asfaltenos y parafinas, dichas pruebas se realizarán replicando las condiciones presentes en un yacimiento para poder presenciar el efecto que tienen los cambios de presión y temperatura en estos compuestos orgánicos, la investigación buscará establecer la geometría y tamaño requerido del diseño, considerando que el reactor será diseñado para operar en un laboratorio, estableciendo los componentes y diseño correcto, se espera que esta investigación sirva como base para que en el futuro pueda ser manufacturado e implementado en el laboratorio de Petróleos de nuestra carrera. El uso de un reactor a presión para pruebas de parafinas y asfaltenos complementaría de manera práctica el conocimiento teórico adquirido durante el tiempo de estudio.

1.5 VARIABLES

1.5.1 Variables Dependientes:

- Presión interna
- Temperatura interna
- Resistencia a la fatiga

1.5.2 Variables Independientes

- Diseño geométrico
- Espesor de pared
- Material del reactor
- Componentes adicionales

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 RECIPIENTES A PRESIÓN

Un recipiente a presión es cualquier estructura cerrada que tenga la capacidad de almacenar y manejar fluidos a alta presión.

Los dispositivos se diseñan con características específicas que le permitan soportar presiones internas y externas significativas, con el fin de que se logre un almacenamiento seguro y eficiente de los líquidos o gases (Structuralia, 2023). Estos deben ser diseñados con materiales resistentes a la corrosión y a las condiciones de presión y temperatura a las que estarán sometidos durante su operación

Estos equipos son utilizados en diversas industrias alrededor del mundo, requiriendo normativas y especificaciones de diseño específicas para garantizar la seguridad y eficiencia en su funcionamiento.

Estos recipientes por lo general se elaboran para almacenar gases. Entre los tipos de recipientes a presión, se encuentran los tanques esféricos y cilíndricos, las calderas para generación de vapor y los depósitos criogénicos de doble pared (Structuralia, 2023).

Figura 1. Recipiente a presión.



Fuente: Recuperado de Recipientes a presión, Safety Culture, 2021. (<https://safetyculture.com/es/>)

2.1.1 Funcionamiento

El funcionamiento de un dispositivo que opera en situaciones de alta presión involucra la contención de líquidos o gases en su interior, manteniendo un equilibrio adecuado de fuerzas y garantizando el cumplimiento de normas específicas relacionadas con la seguridad y el diseño.

Los recipientes que operan bajo presión son específicamente diseñados para resistir las cargas y tensiones que se generan debido a su contenido y las condiciones de funcionamiento, como la temperatura y la presión. Este logro se obtiene mediante la elección apropiada de materiales, la aplicación de técnicas especializadas en la fabricación y ensamblaje, así como la incorporación de sistemas y dispositivos de control y protección, como válvulas de seguridad y mecanismos de alivio de presión.

En líneas generales, un contenedor sometido a presión opera al alojar o procesar fluidos (líquidos o gases) a presiones superiores a la atmosférica. La presión interna, generada por el contenido, se equilibra con la resistencia ofrecida por las paredes del recipiente, que están diseñadas para soportar las fuerzas y tensiones resultantes.

Además, los contenedores sujetos a presión deben ser concebidos y fabricados de modo que puedan resistir las cargas adicionales que provienen de factores externos, como su propio peso, fuerzas causadas por el viento, sismos y variaciones de temperatura, entre otros.

El correcto funcionamiento de un recipiente bajo presión se basa en gran medida en la adhesión a las regulaciones y pautas pertinentes, así como en la aplicación de programas de mantenimiento y supervisión adecuados. El objetivo principal es garantizar la integridad estructural y operativa del equipo a lo largo de su vida útil, reduciendo al mínimo los riesgos de fallos y accidentes, y contribuyendo a la eficacia y seguridad de los procesos industriales en los que se emplean.

2.2 VARIABLES

2.2.1 Presión De Operación (P_o)

Conocida como presión de trabajo y es la presión en la que estará sometido el recipiente a condiciones de operación normal

2.2.2 Presión De Diseño (P)

Es el valor de presión que debe utilizarse en las ecuaciones cuando se realice el cálculo de las partes consecutivas.

Ecuación 1. Presión de diseño

$$\text{Si } P_o > 300 \text{ lb/pulg}^2$$

$$P = 1.1 P_o$$

$$\text{Si } P_o \leq 300 \text{ lb/pulg}^2$$

$$P = P_o + 30 \text{ lb/pulg}^2$$

Donde P es la presión de diseño y P_o es la presión de operación

Es importante considerar la presión hidrostática que ejerce la columna de fluido que se esté manejando, sobre todo en el diseño de recipientes cilíndricos verticales.

2.2.3 Presión De Prueba (P_p)

Es la presión hidrostática de prueba expresada por

Ecuación 2. Presión de prueba

$$P_p = P(1.5)S_{ta}/S_{td}$$

Donde:

P = Presión de diseño.

S_{ta} = Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura ambiente.

S_{td} = Esfuerzo a la tensión del material a la temperatura de diseño.

2.2.4 Presión De Trabajo Máxima Permisible

Es la presión máxima que puede resistir un recipiente cuando se encuentra en condiciones de operación, teniendo en cuenta que el recipiente está:

- a) En condiciones después de haber sido corroído.
- b) Bajo los efectos de la temperatura de diseño.
- c) En la posición normal de operación.
- d) Bajo los efectos de otras cargas, tales como fuerza debida al viento, presión hidrostática, etc., cuyos efectos deben agregarse a los ocasionadas por la presión interna. (León, 2001)

Se puede obtener la presión de trabajo permisible despejando “**p**” de las ecuaciones de espesor de cuerpo y tapas, se usa “**t**” el espesor real del equipo y su valor será el que resulte menor

Por lo general los diseñadores limitan la presión de trabajo máxima permisible teniendo en cuenta la resistencia de partes como el cuerpo o las tapas, mas no por partes pequeñas como bridas y boquillas.

En el cálculo y diseño de los recipientes a presión aparece el término “máxima presión de trabajo permisible nuevo y frio”, esta es utilizado cuando el recipiente está en las siguientes condiciones:

- a) El recipiente es totalmente nuevo y no existe corrosión.
- b) Se encuentra en un ambiente donde la temperatura no causa ningún efecto a la tensión del material (temperatura fría o temperatura ambiente).
- c) No existirá la consideración de fuerzas provocadas por la acción de viento o la presión hidrostática.

2.2.5 Esfuerzo De Diseño A La Tensión (S)

El límite superior (valor máximo) al que podemos exponer un material que constituye una parte de un recipiente a presión en condiciones normales de funcionamiento. Este valor generalmente equivale a aproximadamente el 25% de la resistencia última a la tracción del material en cuestión

2.2.6 Eficiencia De Las Soldaduras (E)

Es la relación entre la resistencia de una unión soldada y la resistencia del material base. Refleja el grado de confiabilidad que se tienen de las soldaduras, esta depende del nivel de ensayos no destructivos y optará valores menores a 1. Se tendrá mejor certeza de las soldaduras mientras haya más ensayos y mejor preparación. (Arveng , 2020)

Ecuación 3. Eficiencia de soldadura

$$E = \frac{\text{Resistencia de la soldadura}}{\text{Resistencia del material base}}$$

2.3 CLASIFICACIÓN

Clasificación de los recipientes a presión.

La clasificación de los recipientes a presión esa sujeta a una serie de criterios, pero entre los más comunes pueden ser divididos por:

2.3.1 Clasificación Por Su Uso:

Almacenamiento: Son los que están diseñados con el fin de contener fluidos a altas presiones (líquidos, gases o productos químicos) como lo son los tanques de almacenamiento de productos derivados de petróleo y agua.

Proceso: Son los recipientes utilizados en procesos o aplicaciones industriales como reactores químicos y columnas de destilación

Transporte: Son los recipientes diseñados para que fluidos a presión puedan ser transportados, como lo son los cilindros de gas

Figura 2. Recipientes de transporte



Fuente: Recuperado de Carretillas de almacén, Direct Industry. (<https://www.directindustry.es/>)

2.3.2 Por Su Orientación

Horizontales: Su estructura tiene una orientación horizontal (y se suelen utilizar para el transporte de líquidos)

Figura 3. Recipiente horizontal



Fuente: Recuperado de Compresores de aire, CBS. (<https://cbscompresores.com.mx/>)

Verticales: Su estructura tiene una orientación vertical y principalmente se almacenan gases.

Figura 4. Recipiente vertical



Fuente: Recuperado de Recipientes a presión, Talleres Valsi. (<https://www.talleresvalsi.com/>)

2.3.3 Por Su Geometría

Cilíndricos: Se consideran los más comunes y sus aplicaciones varían dependiendo la industria donde se utilice

Esféricos: Por su forma en esfera son utilizados para el almacenamiento que requiera el soporte de altas presiones internas

Figura 5. Recipiente de geometría esférica



Fuente: Recuperado de Esferas (ASME), TF Warren Group. (<https://tfwarren.com/>)

Cónicos: La parte inferior de la estructura del recipiente es cónica.

Figura 6. recipiente de geometría cónica



Fuente: recuperado de Tanque de fondo conico, Jinan Shunlong Machinery Co.

(<https://www.slbeerbrewing.com/>)

2.3.4 Por Su Tipo De Material

Metálicos: Para su fabricación se utilizan materiales como acero, aluminio y diferentes tipos de aleaciones

Figura 7. recipiente metálico



Fuente: Recuperado de Recipientes a presión ASME, Kosun Fluid. (<https://www.kosunes.com/>)

Plástico: Para su fabricación se utilizan materiales de plástico reforzado o termoplástico.

Figura 8. recipiente plástico



Fuente: Recipientes cilíndricos verticales, Discamp. (<https://www.discamp.com/>)

Vidrio: Solo suelen utilizados en la industria química, específicamente en situaciones donde la transparencia es importante, no son tan comunes.

Figura 9. Recipiente de vidrio



Fuente: Recuperado de Reactores de Vidrio Serie 5100. Parr Instrument Company.

[\(https://www.parrinst.com/es/\)](https://www.parrinst.com/es/)

2.3.5 Por La Presión De Diseño

Presión baja: Diseñados para soportar presiones bajas hasta 15 psi o 1.03 bar

Presión media: Utilizan presiones medias de operación desde 15 psi hasta 3000 psi (1.03 bar a 206.84 bar)

Presión alta: Diseñados con características y materiales que le permitan realizar procesos con presiones altas superiores a 3000 psi.

2.3.6 Por La Normativa Y Código De Diseño.

ASME (American Society of Mechanical Engineers): Utilizada en los Estados Unidos para regular y certificar recipientes a presión.

PED (Pressure Equipment Directive): Normativa europea que establece estándares para equipos a presión en la Unión Europea.

2.4 TIPOS DE TAPAS

Existen una diversidad de opciones de tapas al momento de diseñar un recipiente a presión, la elección de una dependerá de la forma en que se adapte, la función o las características del recipiente, a continuación, se describen los diversos tipos que existen:

2.4.1 Tapas planas

Son consideradas las tapas menos costosas, se usan para cerrar recipientes de presión atmosférica, aunque también son utilizados como fondos en tanques de almacenamiento. Cabe destacar que la tapa no debe tener aberturas ni boquillas, debe ser una tapa ciega y esta debe ser circular.

2.4.2 Tapas planas con ceja

También suelen ser usadas para presiones atmosféricas, con un costo económico bajo, además de tener como límite dimensional 6 metros máximo de diámetro.

2.4.3 Tapas únicamente abombadas

Son utilizadas en recipientes que usan presiones manométricas bajas, siguen teniendo un costo económico bajo, pero pueden soportar presiones relativamente altas.

2.4.4 Tapa abombadas con ceja invertida

Solamente utilizadas en casos especiales por su alto costo económico y la dificultad de fabricación.

2.4.5 Tapas toriesféricas

Pueden ser fabricadas en diámetros que varían desde 0.3 hasta 6 metros, suelen ser las más utilizadas en los diseños de recipientes a presión por su costo económico bajo, además de soportar altas presiones.

2.4.6 Tapas semielípticas

Son utilizadas cuando el cálculo del espesor de una tapa toriesférica es alto, estas soportan presiones mayores a las toriesféricas, estas se fabrican mediante un proceso llamado troquelado y pueden alcanzar hasta un diámetro de 3 metros.

2.4.7 Tapas semiesféricas

Su geometría es de la mitad de una circunferencia perfecta, pueden soportar presiones altas, no tienen límite dimensional, pero su fabricación significa un costo económico alto.

2.4.8 Tapas 80:10

Se utilizan cuando algún fabricante no es capaz de troquelar tapas semielípticas de dimensiones grandes, estas tienen de característica que el radio de abombado es el 80% del diámetro y el radio de esquina es el 10% del diámetro.

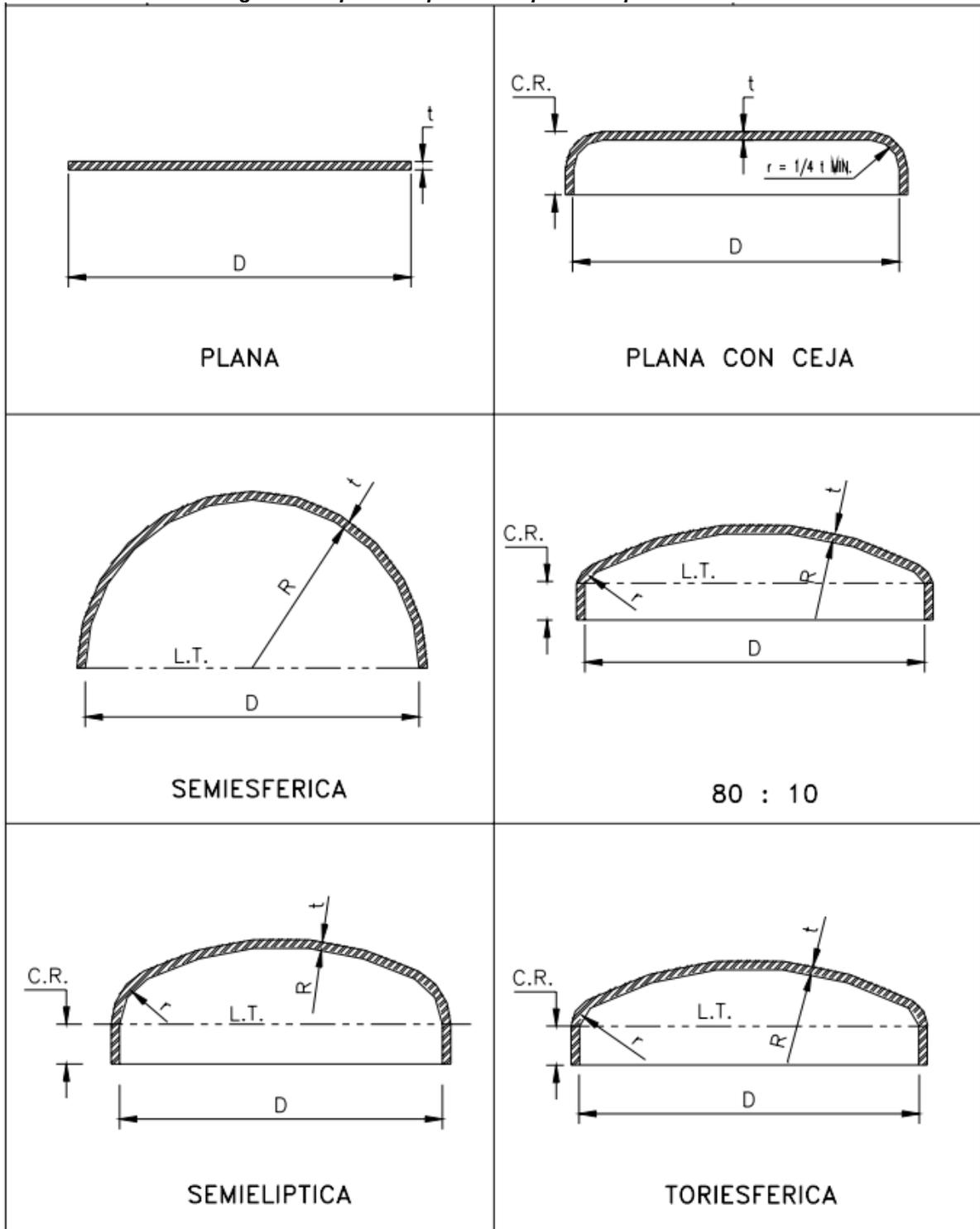
2.4.9 Tapas cónicas

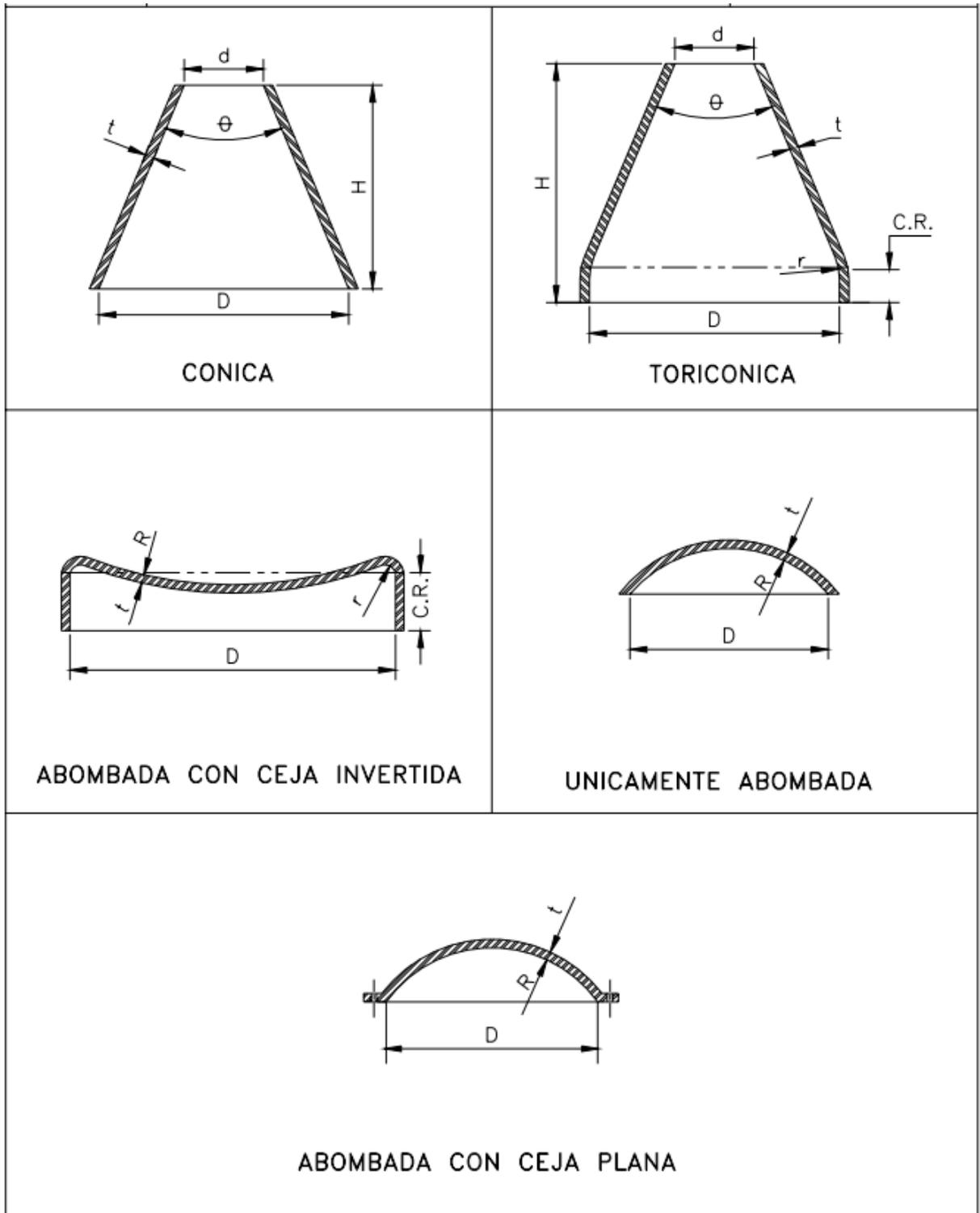
Suelen ser usadas en torres de fraccionamiento, destilación o recipientes donde pueda haber acumulación de sólidos, no tienen limitación de dimensionamiento, todo dependerá de la capacidad del fabricante, solo se limita en que el ángulo del vértice no deberá ser mayor de 60°.

2.4.10 Tapas toricónicas

Se diferencian de las cónicas en que tienen en su diámetro mayor un radio de transición que ni debe ser menor al 6% del diámetro mayor o 3 veces el espesor.

Figura 10. Tipos de tapas en recipientes a presión





Fuente: Diseño de recipientes a presión, Juan León, 2001.

2.5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

La selección del material adecuado se basa en aquel que cumpla la mayor cantidad de requisitos técnicos y económicos (León, 2001)

2.5.1 Requisitos Técnicos.

Es el requisito más importante para un material, de esto depende asegurar la integridad del equipo de las personas que lo operan, y su funcionamiento correcto.

2.5.2 Requisitos Económicos.

Se toman en cuenta los costos de operación y mantenimiento que garanticen una buena inversión sin sacrificar los requisitos técnicos

Además, deben contar con diversas propiedades que satisfagan las condiciones de servicio como:

a) PROPIEDADES MECÁNICAS.

Cuando se evalúan las características mecánicas de un material, es fundamental que exhiba una adecuada capacidad de resistencia a la tensión, un elevado punto de cedencia, una alta capacidad de elongación y una reducción mínima en su área. Estas características son especialmente cruciales para determinar los esfuerzos de diseño aplicados al material en cuestión.

b) PROPIEDADES FÍSICAS.

En el ámbito de las propiedades físicas, se pretende que el material deseado presente un bajo coeficiente de expansión térmica.

c) PROPIEDADES QUÍMICAS.

La característica química primordial que debemos considerar al seleccionar un material para la fabricación de recipientes a presión es su capacidad de resistencia a la corrosión. Esta variable posee un grado significativo de importancia, ya que la elección inapropiada de un material podría generar una serie de complicaciones."

2.6 NORMAS DE FABRICACIÓN.

Para asegurar de que no existan fallas y el correcto funcionamiento se han establecido normas internacionales que determinen los requisitos mínimos para su diseño, fabricación, inspección y montaje. Dentro del diseño mecánico de un recipiente a presión se busca garantizar tanto la seguridad del equipo, así como de las personas que lo operan, mundialmente existen diversos códigos para el diseño de recipientes a presión, cada país adopta la normativa más importante de su región.

El Código ASME (American Society of Mechanical Engineers) para Recipientes a Presión son utilizadas mundialmente y son aplicadas a una diversidad de industrias, estas normas son adoptadas y utilizadas en Ecuador.

En el Ecuador, como en otros países de América se rigen bajo el código de Estados Unidos el cual es “CÓDIGO A.S.M.E. SECCIÓN VIII, DIVISIÓN 1”. Este Código es publicado por la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos, su edición es trianual, sin embargo, este es modificado constantemente manteniéndolo actualizado.

Alrededor del mundo existen diversas normativas que son utilizadas dependiendo de la región o el país, a continuación, se enlistan los principales códigos existentes:

Tabla 1. Normativas Internacionales.

| Países | Códigos |
|--------------------------------|--|
| Alemania Occidental | A.D. Merkblatt Code |
| Estados Unidos de Norteamérica | A.S.M.E Code. Section VIII Division 1 y 2 |
| Inglaterra | British Code BS 5500 |
| Italia | Italian Pressure Vessel Code |
| Japón | Japanese Pressure Vessel Code Japanese |
| Japón | Std. Pressure Vessel Construction |

Fuente: Lista extraída de Diseño y cálculo de recipientes a presión , Juan León, 2001.

2.7 CÓDIGO ASME

2.7.1 Historia

El código para calderas y recipientes a presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (A.S.M.E.) surge de la necesidad de proteger a las personas de las continuas explosiones de calderas que sucedían antes de que exista un reglamento para su diseño y construcción.

A finales del siglo XVIII, se destacó el empleo de calderas y la importancia de salvaguardar a los trabajadores contra posibles accidentes catastróficos. Estas calderas estaban diseñadas para generar vapor a presiones superiores a la atmosférica. Sin embargo, la negligencia de los operadores, defectos en las válvulas de seguridad y una inspección inadecuada ocasionaron numerosos incidentes y explosiones de calderas en los Estados Unidos y Europa.

En junio de 1817, un comité del consejo de Filadelfia hizo público su preocupación por las explosiones de calderas en barcos, recomendando el establecimiento de una entidad legislativa y la regulación de la capacidad de presión, la instalación adecuada de válvulas de alivio y la implementación de inspecciones mensuales.

Hacia 1911, debido a la falta de uniformidad en la fabricación de calderas, tanto fabricantes como usuarios de calderas y recipientes a presión acudieron al consejo de la ASME en busca de una solución a esta problemática.

En respuesta a la necesidad evidente de estandarización y diseño, se formaron diversas sociedades entre 1911 y 1921, incluyendo la A.S.A. (Asociación Americana de Estándares), hoy conocida como ANSI (Instituto Americano de Estándares Nacionales), el A.I.S.C. (Instituto Americano del Acero de Construcción) y la A.W.S. (Sociedad Americana de Soldadura). Estas organizaciones establecieron códigos y estándares para proporcionar métodos de fabricación, así como registros y reportes de datos de diseño (Díaz, 2018).

2.7.2 Secciones Del Código A.S.M.E

Sección I. Normas para construir Calderas a presión.

Sección II. Especificación de Materiales.

Sección III. Reglas para la construcción de componentes para plantas nucleares

Subsección NCA — Requisitos generales para la división 1 y la división 2.

Sección IV. Normas para construir Calderas para Calefacción.

Sección V. Pruebas no Destructivas.

Sección VI. Reglas y Recomendaciones para el cuidado y operación de las Calderas de Calefacción.

Sección VII. Guía y recomendaciones para el cuidado de Calderas de Potencia.

Sección VIII. Recipientes a Presión.

Sección IX. Calificación de Soldadura.

Sección X. Recipientes a Presión de Plástico reforzado en fibra de vidrio.

Sección XI. Reglas para Inspección en servicio de Plantas Nucleares.

Sección XII. Normas para la construcción y servicio de tanques de transporte.

2.8 ASFALTENOS

Los asfaltenos son compuestos sólidos que se encuentran en el petróleo crudo, subproductos del petróleo o sustancias bituminosas. Tienen una apariencia similar al polvo y pueden variar en color desde el negro hasta tonalidades de café oscuro. Estos materiales se obtienen mediante el uso de cartuchos de bajo peso molecular como el n-pentano y n-heptano.

Los asfaltenos son solubles en tolueno y otros solventes aromáticos, como el disulfuro de carbono y el cloroformo, así como en otros solventes de hidrocarburos clorados. Sin embargo, no presentan un punto de fusión definido. Cuando se calientan, tienden a formar espuma y expandirse, lo que puede resultar en la formación de residuos carbonáceos.

Estos compuestos son de interés en la industria del petróleo debido a su impacto en la producción, transporte y refinación del petróleo crudo. Los asfaltenos pueden causar problemas como la obstrucción de tuberías y equipos, la formación de emulsiones y la sedimentación en los tanques de almacenamiento.

Para comprender mejor las propiedades y comportamiento de los asfaltenos, se han realizado numerosas investigaciones científicas. Estos estudios han utilizado técnicas analíticas avanzadas como la espectroscopia infrarroja, la resonancia magnética nuclear y la microscopía electrónica para caracterizar la estructura química y morfología de los asfaltenos.

Además, se ha investigado cómo afectan los asfaltenos a las propiedades físicas y químicas del petróleo crudo. Se ha demostrado que los asfaltenos pueden influir en la viscosidad, densidad, estabilidad térmica y capacidad de flujo del petróleo crudo. También se ha estudiado su papel en la formación de emulsiones y la adsorción en las superficies de los materiales.

Los asfaltenos a menudo tienen un peso molecular aparente elevado, que varía entre 1000 y 20000, y un punto de ebullición superior a 540°C. Esta variación en el peso molecular sugiere la existencia de una interacción molecular entre los asfaltenos, ya que se ha observado que esta interacción conduce a valores elevados de peso molecular."

Los asfaltenos precipitan y agregan en los petróleos crudos como resultado de alteraciones en la presión y la temperatura o la composición, como un alcano normal cuando se mezcla con petróleo crudo.

2.8.1 Deposición De Asfaltenos

Son considerados la fracción pesada del crudo y debido a que las partículas de los asfaltenos se encuentran rodeadas de resinas de forma micelar este compuesto estará en suspensión coloidal en el petróleo.

Por la presencia de las resinas los asfaltenos se encuentran separados, de esta forma se mantiene al sistema en estabilidad, debido a que la fuerza de repulsión electrostática es mayor que la fuerza de atracción de Van Der Waals.

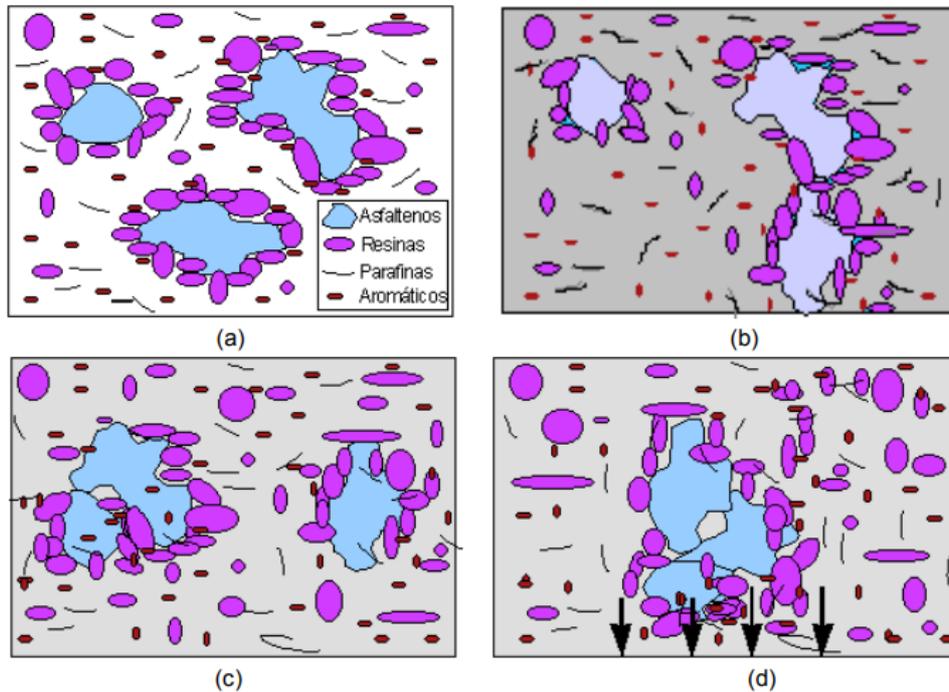
Al momento que a un sistema que se encuentra en estabilidad coloidal se le añade un solvente ionizador resultara en que la concentración de resina cambie, facilitando la interacción mutua de asfaltenos. (Delgado, 2006)

De esta forma cuando dos partículas de asfaltenos que tengan áreas libres de resina y se encuentren en movimiento browniano se toquen, se unirán y quedarán pegadas formando un cúmulo asfalténico, que al difundirse en el sistema se pegará con más partículas individuales u otros cúmulos.

A este proceso se lo conoce como agregación, donde partículas individuales o cúmulos de partículas se adhieren a otras haciendo que el agregado crezca. (Delgado, 2006)

Mientras este proceso transcurre en el tiempo, aumentan los agregados más grandes y pesados que por elementos externos como gravedad, adsorción provoca que se precipiten en el fondo o pegarse en paredes de tuberías o recipientes, este proceso se lo conoce como deposición orgánica.

Figura 11. Agregación de asfaltenos



- (a) Los asfaltenos en estado coloidal, se encuentran dispersos en presencia de resinas. (b) Luego de la introducción de un solvente ionizante (representado en gris), las resinas se separan de los asfaltenos. (c) Si, durante su desplazamiento, dos asfaltenos entran en contacto en áreas libres de resina, se unen para formar cúmulos. (d) Conforme aumenta el tamaño de estos cúmulos, se vuelven menos móviles y tienden a sedimentarse en el fondo.

Fuente. Recuperado de Asfaltenos composición, agregación, precipitación. José Delgado, 2006.

2.9 PARAFINAS

Las parafinas se forman por la mezcla de hidrocarburos sólidos, que al bajar la temperatura alcanzan su punto de solidificación. Las ceras parafínicas son un conjunto de parafinas normales, isoparafinas, cicloparafinas (Ariza y otros, 2007). Estudio comparativo de parafinas

"Las parafinas se dividen en dos categorías principales: ceras parafínicas y ceras microcristalinas, cada una con un mecanismo de daño distinto si se depositan, influenciado por el tamaño de sus cristales.

Las ceras parafínicas son depósitos originados a partir de aceites crudos, y están compuestas por parafinas que tienen cadenas lineales de carbono que varían de 16 a 30 átomos. Estas parafinas forman estructuras moleculares conocidas como macrocristales, que se asemejan a agujas. Cuando se agrupan, crean depósitos de cera de gran tamaño que pueden causar diversos problemas en la producción de pozos petroleros y en la formación misma. Esto se traduce en un aumento de la viscosidad debido a la acumulación de grandes cristales, lo que puede obstruir los poros de la formación o ciertos puntos del sistema de producción. El impacto exacto depende del punto de cristalización del crudo.

Por otro lado, las ceras microcristalinas se encuentran en las parafinas que contienen entre 30 y 60 átomos de carbono, con pesos moleculares que oscilan entre 450 y 800 unidades de masa atómica (uma). Estas ceras presentan cadenas lineales con ramificaciones y grupos cíclicos a lo largo de la cadena principal. A diferencia de las ceras parafínicas (macrocristalinas), sus cristales son pequeños e irregulares, lo que evita que tiendan a agruparse, manteniéndolos dispersos sin formar depósitos (Arriola, 2017).

El punto en el que las parafinas, así como los alcanos en general, cambian de estado de líquido a gas (punto de ebullición) y el punto en el que pasan de sólido a líquido (punto de fusión) están directamente relacionados con su peso molecular. Además, al seleccionar un tratamiento para parafinas, es crucial considerar otras propiedades esenciales, como el punto de fluidez, el punto de cristalización y el punto de nube. Estos últimos parámetros dependen de la temperatura a la que los componentes saturados del petróleo se solidifican y de la velocidad a la que se enfría la mezcla.

2.9.1 Deposición De Parafinas

Las parafinas permanecen en estado de solución en el petróleo crudo, siempre y cuando no se altere el equilibrio entre los estados sólido y líquido. Cuando factores termodinámicos afectan la fase líquida, los sólidos en la mezcla sobresaturan la solución y, eventualmente, se depositan en ubicaciones preferenciales a una velocidad determinada por la cinética del proceso (Cerdeño, 2010).

La precipitación de parafinas se origina principalmente por una disminución de la temperatura por debajo del punto de fluidez del crudo. Esto puede ocurrir debido a diversos factores, incluyendo:

- La pérdida de calor del crudo y el gas hacia su entorno (transferencia de calor).
- El enfriamiento que resulta de la expansión del gas al pasar a través de restricciones.
- La evaporación de componentes más livianos presentes en la mezcla.
(Dispersantes de Parafinas y Asfaltenos)

2.10 PROBLEMAS DERIVADOS DE LA PRECIPITACIÓN DE ASFALTENOS Y PARAFINAS

Por lo general, en todos los tipos de petróleo, los componentes conocidos como parafinas y asfaltenos están presentes. La cantidad de estos componentes y su tendencia a permanecer en forma diluida o, en su defecto, a precipitarse y agruparse, dependen en gran medida del volumen del crudo y las condiciones a las que se ve sometido. Cuando estos componentes se agrupan debido a cambios en su entorno, como daños en el medio poroso, pueden obstruir las tuberías de producción y las líneas de descarga. Este fenómeno tiene el potencial de causar un impacto significativo en la producción. (Arriola, 2017).

Figura 12. Reducción del diámetro de tuberías debido a precipitación de asfaltenos y parafinas



Fuente: Recuperado de Predicción de precipitación de parafinas bajo la presencia de inhibidores químicos y naturales, Oil Production. (<http://oilproduction.net/>)

Cuando los asfaltenos se precipitan, se produce un aumento en la viscosidad del petróleo crudo. Además, contribuyen a la formación de emulsiones entre el agua y el petróleo al actuar como estabilizadores. La precipitación de asfaltenos también puede generar problemas significativos, como la acumulación en bombas, tuberías de producción, cabezales de pozos, válvulas, líneas de flujo y sistemas de transporte. Esto puede tener un impacto negativo en todo el proceso de producción de hidrocarburos. (Delgado, 2006)

Mientras que los hidrocarburos parafínicos de alto peso molecular, como las ceras de parafina con más de 16 átomos de carbono, tienen la capacidad de cristalizar a temperaturas por debajo de su punto de enturbiamiento o temperatura de aparición de cera (W.A.T. en inglés). Esto puede resultar en la acumulación de sólidos en las tuberías de transporte de petróleo crudo, lo que ocasiona bloqueos parciales o totales en el conducto y, en consecuencia, conlleva a considerables costos económicos para su eliminación. (Beckmann, 2018)

2.10.1 Métodos para el control de parafinas y asfaltenos

Existen diversos métodos para el control de parafinas y asfaltenos, para controlar la acumulación de parafinas en las tuberías de transporte de crudo se puede utilizar los siguientes métodos:

Método Mecánico

Este método implica la eliminación de los sólidos mediante el uso de raspadores, lo cual es una opción económicamente viable. Sin embargo, puede dar lugar a obstrucciones durante el proceso de limpieza debido a la acumulación de cera en los raspadores.

Método Operacional

En este enfoque, se trabaja a un caudal máximo, lo que facilita la eliminación de las ceras más blandas presentes en la superficie de los depósitos. No obstante, este método no es tan efectivo para eliminar las parafinas más duras que están fuertemente adheridas a la superficie de la tubería, lo que puede hacer que la eliminación sea más complicada en el futuro.

Método Térmico

Este método implica la inyección de fluidos calientes con el fin de fundir las parafinas que se han depositado en la tubería.

Tratamiento Químico

Aquí se requiere una inyección constante de inhibidores de depósitos de parafinas, los cuales previenen la acumulación de ceras en la tubería.

Cada uno de estos enfoques tiene sus ventajas y desventajas, y su elección dependerá de la situación específica y los recursos disponibles. (González y otros, 2010)

Para controlar la acumulación de asfaltenos en las tuberías de transporte de crudo se suelen utilizar los siguientes métodos:

Cambios en el esquema de producción.

Se busca evitar la precipitación de los asfaltenos mediante la modificación de características como la presión de operación, temperatura y tasa de producción. La temperatura, la presión del flujo en la cabeza del pozo, y la relación gas-aceite son parámetros que pueden ser modificados por los cambios ocurridos en el tamaño de la tubería y del estrangulador, la estimulación del pozo y el aislamiento del espacio anular. (Padilla & Watt, 2015)

Métodos de tratamiento químico.

Es el método más utilizado para la remediación de deposición de asfaltenos, este método debe ser vigilado constantemente por el impacto ambiental que puede tener y problemas de corrosión que podría causar. es aplicable tanto en el pozo como en las formaciones productoras.

Solventes.

Método donde se utiliza un aditivo químico formulado principalmente de tolueno que es mezclado con cualquier tipo de petróleo, este aditivo estabiliza los asfaltenos presentes evitando que se precipiten y manteniéndolos en suspensión

Inhibidores.

Esta tecnología es colocada mediante inyección continua o tratamientos de compresión, funciona como agente inhibidor en la floculación y precipitación de asfaltenos, ejerciendo efecto que aumenta el umbral de floculación que genera que los asfaltenos en la mezcla se mantengan estables

Dispersantes.

Se utilizan resinas como agentes dispersantes que favorecen la estabilidad de los asfaltenos en la solución, las resinas rodean los asfaltenos, estas interactúan con los coloides y no permiten que los asfaltenos se unan.

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA.

Una parte importante de esta investigación y del proceso de diseñar un recipiente a presión es elegir una metodología correcta. Para poder desarrollar el diseño se ha optado por un enfoque teórico que se basa en la recopilación de información necesaria que permita comprender y modelar con seguridad y eficiencia todas las características que deba cumplir y asegure el correcto funcionamiento de un recipiente a presión utilizado en un laboratorio, que tenga la función de realizar pruebas de asfaltenos y parafinas en muestras de crudo.

En esta sección se describirá las razones y la importancia de haber elegido este tipo de metodología. El diseño teórico se construye sobre las bases de los fundamentos teóricos, que abarcan desde su normativa, la determinación de los esfuerzos a los que estará sometido, hasta las ecuaciones necesarias para determinar los espesores de paredes. Se elige esta metodología con el fin servir como base en la construcción del reactor descrito en esta investigación, además de ayudar a proporcionar los conocimientos adecuados del campo de ingeniería de recipientes a presión, estos conocimientos permitirán entender la ingeniería detrás de la implementación de un reactor así en un laboratorio, y la relación e importancia a nuestra industria que tienen este tipo de pruebas.

La metodología escogida abarca varios aspectos como los conocimientos generales del diseño de recipientes a presión, las normativas, la sección correcta que debe utilizarse, los cálculos y la caracterización del reactor.

Además, se sigue rigurosamente los diversos manuales de diseño asegurando que los resultados sean correctos, coherentes, tengan consistencia y sean respaldados por los principios teóricos.

Esta metodología también nos permite una mejor descripción de las características necesarias que se plantean antes de realizar el diseño, estas son consideradas variables importantes que pueden alterar el proceso de diseño.

Posteriormente se describirán los pasos y los conceptos que se tuvieron que abordar en el proceso del diseño teórico, los requerimientos previos a considerar un diseño, así como también las limitaciones de esta metodología.

A través de esta metodología no solo se busca establecer los conocimientos y el proceso del diseño del recipiente, esta investigación busca también servir como base sólida para futuros proyectos donde se busque implementar dicho reactor en un laboratorio.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología escogida para elaborar el diseño del reactor para pruebas de asfaltos y parafinas se fundamenta en secciones específicas del código ASME (American Society of Mechanical Engineers), código que presenta las pautas del diseño de diferentes tipos de recipientes a presión y establece los estándares a cumplir por seguridad.

3.2.1 Selección y justificación del código ASME

El código ASME es conocido, aceptado y utilizado alrededor del mundo por profesionales dedicados a la ingeniería, lo que facilita la normalización internacional en los conceptos bases y pautas a seguir.

Como se a descrito en esta investigación el código está compuesto totalmente por las siguientes secciones:

Sección I. Normas para construir Calderas a presión.

Sección II. Especificación de Materiales.

Sección III. Reglas para la construcción de componentes para plantas nucleares

Subsección NCA — Requisitos generales para la división 1 y la división 2.

Sección IV. Normas para construir Calderas para Calefacción.

Sección V. Pruebas no Destructivas.

Sección VI. Reglas y Recomendaciones para el cuidado y operación de las Calderas de

Calefacción.

Sección VII. Guía y recomendaciones para el cuidado de Calderas de Potencia.

Sección VIII. Recipientes a Presión.

Sección IX. Calificación de Soldadura.

Sección X. Recipientes a Presión de Plástico reforzado en fibra de vidrio.

Sección XI. Reglas para Inspección en servicio de Plantas Nucleares.

Sección XII. Normas para la construcción y servicio de tanques de transporte.

3.2.2 Divisiones de la sección VIII del código ASME

Al momento de caracterizar esta investigación y establecer los requisitos previos, la sección que resultan relevante y que se adapta al resultado que se busca obtener es la Sección VIII, la cual a su vez tiene las siguientes divisiones

División 1:

Diseño por reglas (Conservador)

Teoría: Esfuerzo Normal

Factores de diseño elevados

Recipientes hasta 210 kg/cm² (bares)?

Presiones mayores a 1atm

(En esta división se puede hacer el diseño de recipiente a presión por reglas, como comparar las tensiones y esfuerzos.)

División 2:

Diseño reglas/análisis (Rigurosos)

Evaluación detalla de esfuerzos

Teoría: máxima energía distorsión

Esfuerzos admisibles mayores

(A diferencia de la división 1 se añade un análisis, evaluación al proceso de diseño del equipo, esto genera un diseño más específico.)

División 3:

Equipos con muy alta presión

Muy alta presión (705 bar)

(Esta división es aplicada a equipos de muy alta presión, más de 700 bares.)

Teniendo en cuenta los parámetros y criterios iniciales que describirán posteriormente se opta por elegir la Sección VIII División 1 del código ASME como fundamento central para el diseño teórico del reactor de este estudio, esta sección aborda los requisitos para el diseño, construcción y prueba de este tipo de equipos.

3.2.3 Características que favorecen la elección de la sección VII del código ASME

Además, por las siguientes razones favorece y es adecuada para este estudio:

Sección reconocida internacionalmente.

La sección VII división 1 es ampliamente aplicada en varias industrias y el campo de la ingeniería por lo que resulta en una base fuerte como referencia para esta investigación.

Aplicable a recipientes a presión simples

La división 1 es diseñada para recipientes a presión que no estarán sujetos a cargas extremas significativas ni a condiciones operativas altas, por lo que resulta idónea para las características del reactor del estudio

Importancia a la seguridad y fiabilidad de resultados

La sección VIII división 1 del código ASME garantiza seguridad, compromiso con la integridad estructural y con la operación del recipiente, además de que el código se presenta como guía para determinar la selección de material, sus dimensiones y sus pruebas.

Antecedentes de éxito en su aplicación y práctica

La gran cantidad de proyectos exitosos que se han realizado mediante el uso de esta sección garantiza la eficacia de la normativa al ser aplicada al reactor en cuestión.

Adaptabilidad con normas y estándares industriales

Esta sección garantiza la compatibilidad con las regulaciones y estándares de la industria.

Esto es ayuda a facilitar la aceptación regulatoria y el cumplimiento de los requisitos legales y de seguridad específicos nuestra industria en la que se utilizará el recipiente a presión.

3.2.4 Subsecciones de la sección VII división 1 del código ASME

A su vez la división 1 de la sección VII del código ASME se organiza en 3 subsecciones con diferentes partes:

Subsección A. Parte UG, Requerimientos Generales.

Subsección B. Requerimientos de fabricación

Parte UW.- Aplicada a recipientes fabricados por soldadura.

Parte UF.- Aplicada a recipientes fabricados por forjado

Parte UB.- Aplicada a recipientes fabricados usando un material de relleno no ferroso.
(Brazing)

Subsección C. Requerimientos de materiales

Parte UCS.- Aplicada a recipientes fabricados con acero al carbón de baja aleación.

Parte UNF.- Aplicada a recipientes fabricados con materiales no ferrosos.

Parte UCI.- Aplicada a recipientes fabricados con fierro fundido.

Parte UCL.- Aplicada a recipientes fabricados con una placa "clad" integral o con recubrimiento tipo "lining".

Parte UCD.- Aplicada a recipientes fabricados con fierro fundido dúctil.

Parte UNT.- Aplicada a recipientes fabricados con aceros ferríticos con propiedades de tensión mejoradas por tratamiento térmico.

Parte ULW.- Aplicada a recipientes fabricados por el método de multicapas.

Parte ULT.- Aplicada a recipientes fabricados con materiales con esfuerzos permisibles más altos a bajas temperaturas.

Apéndices, Obligatorios o No Obligatorios

3.2.5 Partes de las subsecciones necesarias para elaborar el diseño

UG-16 Diseño General

Existen algunas excepciones, pero generalmente el espesor mínimo permitido para cuerpos y cabezales es de 1/16 pulg. (1.5mm), sin tomar en cuenta el espesor extra por corrosión.

Además, este apartado describe ciertas características como:

- El espesor mínimo no es aplicado a láminas de transferencia de calor o intercambiadores tipo placa.
- Para corazas y cabezales de calderas de vapor deberá ser 6 mm incluido el espesor por corrosión

En esta división se indican las ecuaciones de se deben utilizar para realizar el cálculo del espesor adecuado de componentes como cilindros, esferas, fondos que son sometidos a

presión interna y externa. Y los cálculos de los esfuerzos causados por otras cargas como peso propio, contenido, viento, terremotos y soportes quedan a cuestión del diseñador.

UG-17 Métodos De Fabricación En Conjunto

Cuando se realiza el diseño y fabricación de un recipiente combinando métodos el recipiente se limita por el método de fabricación que tenga los requerimientos más restrictivos.

UG-20 Temperatura De Diseño

Máxima: esta no debe ser menor que la temperatura media a través del espesor y puede ser determinada tanto por cálculos matemáticos como por mediciones a través de equipos. Las temperaturas de diseño son determinadas por las tablas UG-23 y cualquier temperatura que supere el límite determinado no será aceptada.

Mínima: se debe tener en cuenta la temperatura más baja de operación que se determinó en el diseño, además de factores externos que puedan contribuir a la reducción de la temperatura como desvíos en la operación, algún mecanismo de refrigeración, temperatura atmosférica u otro factor externo.

UG-22 Cargas

Para que las cargas sean consideradas en el diseño deben caracterizarse por:

- Presión interna o externa de diseño
- Peso del volumen del contenido y del mismo recipiente
- Las cargas generadas por motores, maquinarias, recipientes, tubería, revestimiento y aislamiento
- Variaciones térmicas o de presión
- Reacciones causadas por choque de fluido
- Expansión térmica

UG-25 Corrosión

Se debe aumentar cierta cantidad de espesor con el fin de que prevea su pérdida por corrosión, erosión o abrasión mecánica durante su vida útil.

Este espesor extra no necesariamente debe ser el mismo en todas las partes del recipiente, dependerá de zona que este expuesta a estos desgastes.

Los equipos que se encuentren en condiciones que puedan causar corrosión deben tener una abertura de drenaje en su punto más bajo.

Se pueden aplicar agujeros testigos cuando el espesor se ha reducido por corrosión, estos agujeros testigos están prohibidos en recipientes que contengan fluidos letales.

Los agujeros testigos son perforaciones que se realizan al momento de la inspección con el fin de evaluar la integridad de las paredes. De esta forma se recogen muestras del metal que posteriormente se someterán a pruebas para determinar el nivel de desgaste. Estos tendrán un diámetro entre 1-6 y 4.8 mm, una profundidad no menor del 80% y deben situarse en la superficie opuesta a donde se espera que ocurra la corrosión.

3.3 UG-27 ESPESOR DE RECIPIENTES BAJO PRESIÓN INTERNA. DISEÑO.

Se presentan las fórmulas y el proceso para calcular los espesores mínimos de un recipiente a presión sometido a presión interna.

Esta subsección indica que los esfuerzos circunferenciales aproximadamente serán dos veces el valor de los esfuerzos longitudinales, considerando un recipiente a presión de cuerpo cilíndrico con pared delgada y sin costura.

Entre el cálculo de los esfuerzos longitudinales y circunferenciales se elegirá el espesor de pared que resulte mayor entre los dos. Por lo general al realizar los cálculos mediante

las fórmulas indicadas en la subsección UG-27 el esfuerzo circunferencial gobernará el espesor requerido en el diseño.

Tabla 2. Variables que se presentan en la subsección UG-27.

| Símbolos | Datos |
|----------|---|
| t | Espesor mínimo de la coraza. Pulg |
| P | Presión interna de diseño. Psi |
| R | Radio interno del recipiente. Pulg |
| S | Esfuerzo máximo admisible. Psi |
| E | Eficiencia de junta para recipiente cilíndrico o esférico |

Fuente: Código ASME, sección VIII, 2015.

3.3.1 Recipientes cilíndricos

Esfuerzos circunferenciales

Ecuación 4. Espesor por esfuerzos circunferenciales

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$$

Esfuerzos longitudinales

Ecuación 5. Espesor por esfuerzos longitudinales

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P}$$

$$P = \frac{2SEt}{R - 0.4t}$$

3.3.2 Recipientes esféricos

Ecuación 6. Espesor para recipientes esféricos

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$$

$$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t}$$

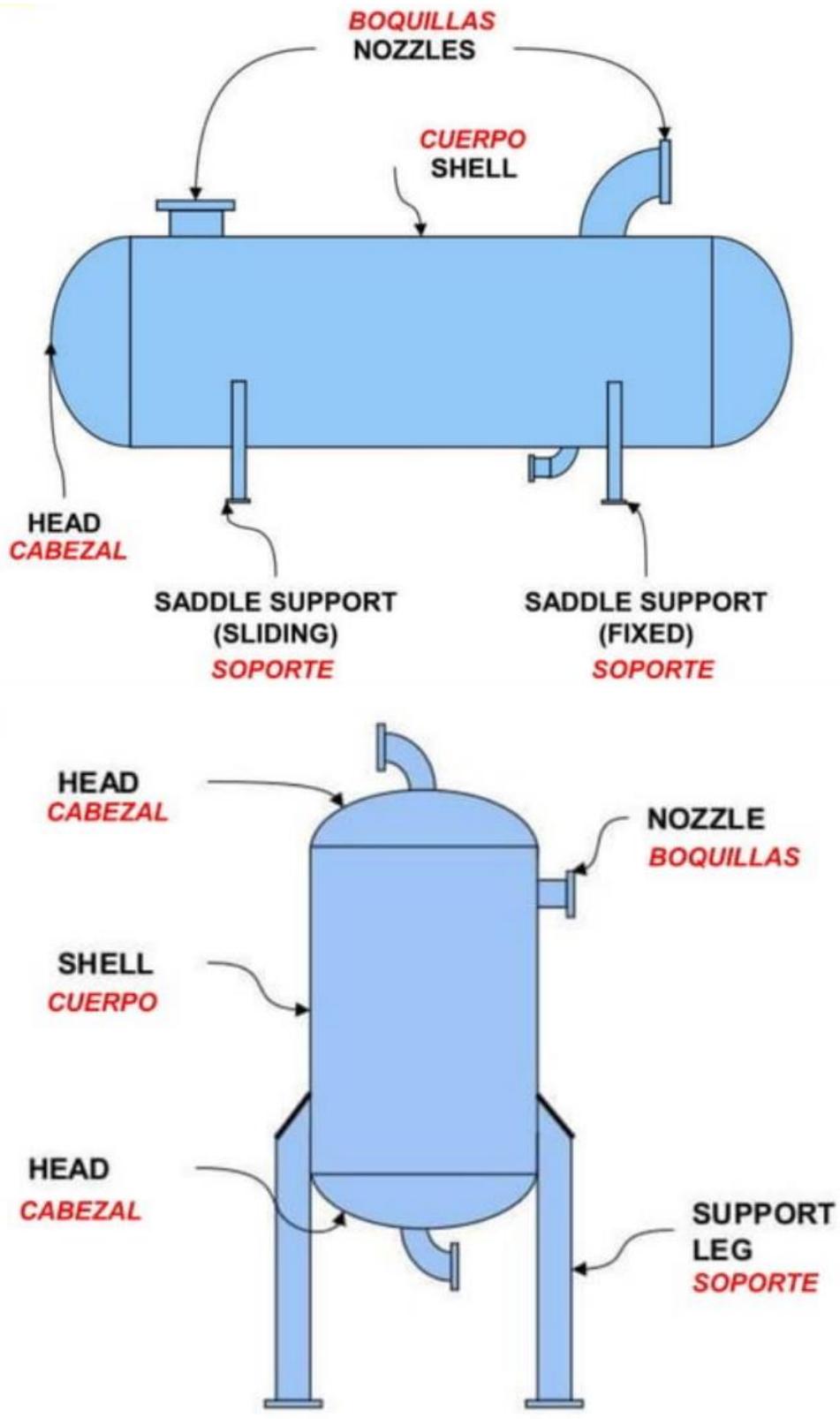
3.4 PROCESO PARA CÁLCULO DE ESPESOR REQUERIDO SEGÚN UG-27 ASME VIII DIV.1

Mediante el análisis de toda la división y la recopilación de información de esta misma, se puede determinar la siguiente guía general de pasos a seguir en el diseño de un recipiente a presión.

Tabla 3. Pasos para el diseño de un recipiente a presión.

| | | |
|--------|---|--|
| Paso 1 | Datos geométricos diseño, proceso, cargas y presión, consideraciones de materiales, tolerancias permisibles | Presión de diseño (UG-21) Otras cargas (UG-22) |
| Paso 2 | Selección de la ecuación adecuada | UG-27(C)(1) Apéndices 1- 1(a)(1) o 1-2(a)(1) |
| Paso 3 | Determinación de la eficiencia y el esfuerzo permisible | Apéndices L, UW-12, UG- 27, UW-11, Tabla 1 A del ASME SECC 2 PARTE D. |
| Paso 4 | Sustitución de datos en las ecuaciones | UG-27(C)(1), apéndices 1- 1(a)(1) o 1-2(a)(1) |
| Paso 5 | Verificación de otras de consideraciones | UG-16, UG-16(c), UG-22, UW-51, UCS-57 |

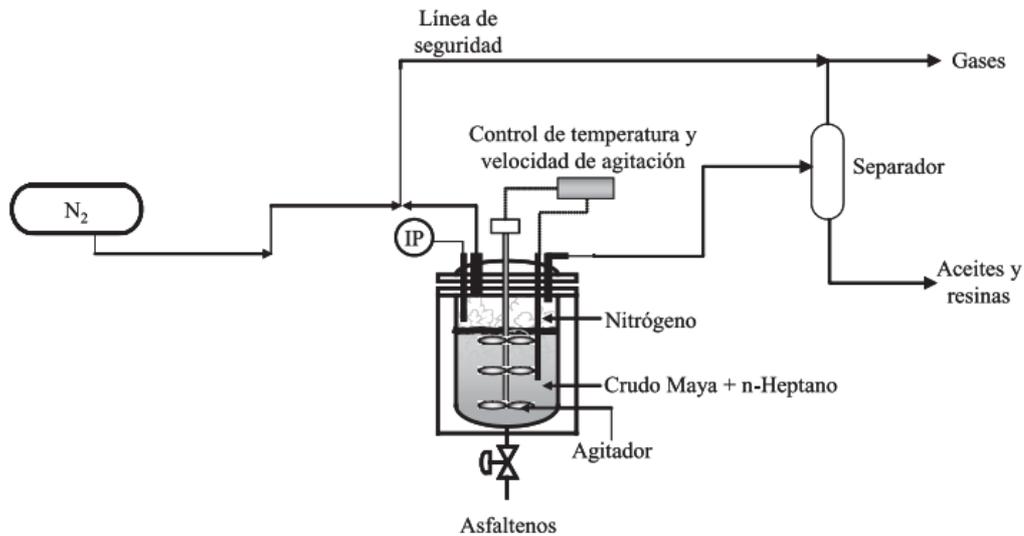
Figura 13. Partes de un recipiente a presión



Fuente: recuperado de Aspectos básicos de los recipientes a presión, UNEXPO.

3.5 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y CRITERIOS TEÓRICOS PARA EL DISEÑO

Figura 14. Reactor para pruebas de parafinas y asfaltenos



Fuente: Recuperado de Precipitación de asfaltenos del crudo Maya en un sistema a presión, Centeno & Otros, 2004.

3.5.1 Presión interna de diseño

Es estableció una presión de 300 psi, con el fin de que sirva como la presión base en este proyecto inicial, y si se considera posible en próximas investigaciones ir aumentando estos valores.

Precautelando la integridad del diseño se establece un factor de seguridad de 1.5

| | |
|-------------------------|---------|
| Presión de operación | 300 psi |
| Factor de seguridad | 1.5 |
| Presión para el cálculo | 450 psi |

3.5.2 Temperatura de diseño

Es estableció una presión de 300 psi, con el fin de que sirva como la presión base en este proyecto inicial, y si se considera posible en próximas investigaciones ir aumentando estos valores.

Precautelando la integridad del diseño se establece un factor de seguridad de 1.5

| | |
|--------------------------|--------|
| Temperatura de operación | 200 F° |
| Factor de seguridad | 1.5 |
| Presión para el cálculo | 300 F° |

3.5.3 Geometría

Buscando que exista una distribución igual de todas las fuerzas en las paredes del recipiente se elige una geometría cilíndrica, contribuyendo así a su resistencia estructural. Otra consideración importante es que este tipo de recipiente es más fácil de fabricar, lo que genera una disminución en el tiempo y costo de fabricación, además de que por su geometría se presta para agregar accesorios que serán necesarios en el diseño del presente reactor

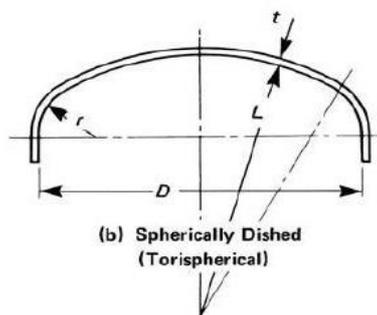
3.5.4 Orientación

En el caso del diseño de un recipiente para pruebas de parafinas y asfaltenos la característica más importante que hará que cumpla con su objetivo es que sea eficiente en procesos de gravedad, en este caso se busca la deposición de estos compuestos, por lo que se opta por una orientación vertical

3.5.5 Tipo de tapas

Se elige una tapa semielíptica, por su capacidad de soportar presiones altas, además de que su estructura facilita la fabricación de las roscas que las unirán al cuerpo del recipiente.

Figura 15. Cabeza semielíptica



Fuente: Diseño de recipientes a presión, Juan León, 2001.

3.5.6 Selección de material

Por lo general los recipientes a presión suelen ser fabricados con aceros al carbón y de baja aleación, principalmente por su bajo costo económico.

Los aceros al carbón tienen la mayor disponibilidad entre los aceros, siendo ideal para utilizarlos en recipientes donde sus condiciones no impliquen altas presiones, ni temperaturas.

Los aceros de baja aleación contienen bajo porcentajes de elementos como níquel, cromo, etc. Estos suelen ser manufacturados para cumplir con condiciones específicas, más costosos que los aceros al carbón, no tienen tanta resistencia a la corrosión, pero tienen mejor resistencia mecánica a altas temperaturas que los aceros al carbón.

Los tipos de acero más comunes en la fabricación de estos recipientes suelen ser SA-7, SA-113 C y SA-283 A, B, C, y D, y se deben tener en consideración las siguientes restricciones:

- 1.- Los recipientes no contengan líquidos o gases letales.
- 2.- La temperatura de operación está entre -20 y 650°F .
- 3.- El espesor de la placa no exceda de $5/8$ "
- 4.- El acero sea manufacturado por horno eléctrico u horno abierto.
- 5.- El material no sea usado para calderas. (Hernández, 2017)

Tabla 4. Materiales recomendados para diferentes temperaturas.

| Temperatura en C° | Temperatura en F° | Material para el cuerpo | Cabezas y plantillas de refuerzo |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|
| -67 a -46.1 | -90 a -51 | SA-203 B* | SA-203 A |
| -45.6 a -40.5 | -50 a -41 | SA-516-65 | SA-203 B |
| -40 a 15.6 | -40 a 60 | SA-615-70+ | SA-516-65 |
| 15.6 a 343 | 60 a 650 | SA-285-C | SA-515-70 |
| 344 a 412.8 | 651 a 755 | SA-515-70 | |

Fuente: Código ASME, sección II, 2015

Acero al carbón SA-285-C.

Este acero cubre tres grados de baja y media tensión de acero al carbono para soldadura por fusión hasta un máximo de 2” de espesor, pueden soldarse por cualquier método convencional. Tiene la misma resistencia a la corrosión atmosférica que el acero al carbono simple peor puede ser mejorado usando cobre adicional.

Este acero, aunque se considera el ideal para los rangos de temperatura y presión del proyecto, se manufactura principalmente en placas lo que significaría más gastos y tiempo en el proceso de fabricación del cuerpo. (FERCOM, 2019)

Con el fin de reducir estos valores se opta como material para el diseño del reactor al acero al carbono SA 414.

Acero al carbono SA 414

Este es un acero de temple en aceite de medio carbono aleado con cromo y molibdeno de buena penetración de temple y se destaca por su estabilidad en caliente hasta 400°C sin fragilidad de revenido, resistencia a esfuerzos de fatiga y torsión. (Cía. General de Aceross, 2021)

Además de ser encontrado comercialmente en cilindros o formas tubulares lo que encaja perfectamente con las características de operación y la geometría elegida para el cuerpo del reactor.

Figura 16. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 1A

| Line No. | Nominal Composition | Product Form | Spec. No. | Type/Grade | Alloy | | Size/Thickness, in. | P-No. | Group No. |
|----------|---------------------|--------------|---------------|------------|----------------|-------------------------|---------------------------------------|-------|-----------|
| | | | | | Desig./UNS No. | Class/Condition/ Temper | | | |
| 1 | Carbon steel | Plate | SA/GB 713 | Q345R | .. | .. | $\frac{5}{8} < t \leq 1.5$ | 1 | 2 |
| 2 | Carbon steel | Plate | SA-455 | .. | K03300 | .. | $\frac{3}{8} < t \leq 0.58$ | 1 | 2 |
| 3 | Carbon steel | Plate | SA/GB 713 | Q345R | .. | .. | $\frac{1}{8} \leq t \leq \frac{5}{8}$ | 1 | 2 |
| 4 | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. |
| 5 | Carbon steel | Plate | SA/EN 10028-2 | P355GH | .. | .. | ≤ 2.5 | 1 | 2 |
| 6 | Carbon steel | Forgings | SA-266 | 3 | K05001 | .. | .. | 1 | 2 |
| 7 | Carbon steel | Plate | SA-455 | .. | K03300 | .. | $\leq \frac{3}{8}$ | 1 | 2 |
| 8 | Carbon steel | Plate | SA-299 | A | K02803 | .. | > 1 | 1 | 2 |
| 9 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CK75 | K02803 | .. | > 1 | 1 | 2 |
| 10 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | N75 | K02803 | .. | > 1 | 1 | 2 |
| 11 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMS-75 | K02803 | .. | > 1 | 1 | 2 |
| 12 | Carbon steel | Plate | SA-299 | A | K02803 | .. | ≤ 1 | 1 | 2 |
| 13 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMS-75 | K02803 | .. | ≤ 1 | 1 | 2 |
| 14 | Carbon steel | Forgings | SA-372 | B | K04001 | .. | .. | 1 | 2 |
| 15 | Carbon steel | Sheet | SA-414 | G | K03103 | .. | .. | 1 | 2 |
| 16 | Carbon steel | Plate | SA-738 | A | K12447 | .. | .. | 1 | 2 |
| 17 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 3 | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 3 |
| 18 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 2 | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 3 |
| 19 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMSH-80 | K12437 | .. | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 3 |
| 20 | Carbon steel | Plate | SA-738 | C | K02008 | .. | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 3 |
| 21 | Carbon steel | Plate | SA-299 | B | K02803 | .. | > 1 | 1 | 3 |
| 22 | Carbon steel | Plate | SA-299 | B | K02803 | .. | ≤ 1 | 1 | 3 |
| 23 | Carbon steel | Forgings | SA-765 | IV | K02009 | .. | .. | 1 | 3 |
| 24 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 3 | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 25 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 2 | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 26 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CD80 | K12437 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 27 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | D80 | K12437 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 28 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMSH-80 | K12437 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 29 | Carbon steel | Plate | SA-738 | C | K02008 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 30 | Carbon steel | Plate | SA-841 | B | .. | 2 | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 31 | Carbon steel | Plate | SA-612 | .. | K02900 | .. | $\frac{1}{2} < t \leq 1$ | 10C | 1 |
| 32 | Carbon steel | Plate | SA-612 | .. | K02900 | .. | $\leq \frac{1}{2}$ | 10C | 1 |
| 33 | Carbon steel | Plate | SA-738 | B | K12007 | .. | .. | 1 | 3 |
| 34 | Carbon steel | Forgings | SA-372 | C | K04801 | .. | .. | .. | .. |
| 35 | Carbon steel | Plate | SA-724 | A | K11831 | .. | .. | 1 | 4 |
| 36 | Carbon steel | Plate | SA-724 | C | K12037 | .. | .. | 1 | 4 |
| 37 | Carbon steel | Plate | SA-724 | B | K12031 | .. | .. | 1 | 4 |
| 38 | C-Mn-Si-Cb | Plate | SA-737 | B | K12001 | .. | .. | 1 | 2 |
| 39 | C-Mn-Si-Cb | Plate | SA/AS 1548 | PT490N | .. | Normalized | ≤ 6 | 1 | 2 |
| 40 | C-Mn-Si-Cb | Plate | SA/AS 1548 | PT490NR | .. | Norm. rld. | ≤ 6 | 1 | 2 |

Figura 17. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 1A

| Line No. | Min. Tensile Strength, ksi | Min. Yield Strength, ksi | Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only) | | | | External Pressure Chart No. | Notes |
|----------|----------------------------|--------------------------|--|------------------|--------|-----|-----------------------------|----------------------------|
| | | | I | III | VIII-1 | XII | | |
| 1 | 72.5 | 47 | 800 | NP | 800 | NP | CS-2 | T1 |
| 2 | 73 | 37 | NP | 400 (Cl. 3 only) | 650 | 650 | CS-2 | ... |
| 3 | 74 | 50 | 800 | NP | 800 | NP | CS-2 | T1 |
| 4 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 5 | 74 | ... | 850 | NP | 1000 | NP | CS-2 | G10, G18, S1, T1 |
| 6 | 75 | 37.5 | 1000 | 700 | 1000 | NP | CS-2 | G10, S1, T2, W8, W11 |
| 7 | 75 | 38 | NP | 400 (Cl. 3 only) | 650 | 650 | CS-2 | ... |
| 8 | 75 | 40 | 1000 | 700 | 1000 | 650 | CS-2 | G10, S1, T2 |
| 9 | 75 | 40 | NP | 700 | NP | NP | CS-2 | S6, W10, W12 |
| 10 | 75 | 40 | NP | 700 | NP | NP | CS-2 | S6, W10, W12 |
| 11 | 75 | 40 | NP | 700 | NP | NP | CS-2 | S6, W10, W12 |
| 12 | 75 | 42 | 1000 | 700 | 1000 | 650 | CS-2 | G10, S1, T1 |
| 13 | 75 | 42 | NP | 700 | NP | NP | CS-2 | T1, W10, W12 |
| 14 | 75 | 45 | NP | NP | 650 | 650 | CS-3 | W11 |
| 15 | 75 | 45 | NP | NP | 900 | 650 | CS-3 | G10, T1 |
| 16 | 75 | 45 | NP | NP | 700 | 650 | CS-2 | T1 |
| 17 | 75 | 50 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | G23, T1, W11 |
| 18 | 75 | 55 | NP | 700 | 650 | 650 | CS-5 | G23, T1, W11 |
| 19 | 75 | 55 | NP | 700 | NP | NP | CS-5 | G26, T1, W10, W12 |
| 20 | 75 | 55 | NP | 650 | 650 | 650 | CS-5 | G23, W11 |
| 21 | 80 | 45 | 800 | NP | 1000 | 650 | CS-3 | G10, S1, T1 |
| 22 | 80 | 47 | 800 | NP | 1000 | 650 | CS-3 | G10, S1, T1 |
| 23 | 80 | 50 | NP | NP | 700 | NP | CS-3 | ... |
| 24 | 80 | 55 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | G23, T1, W11 |
| 25 | 80 | 60 | NP | 700 | 650 | 650 | CS-5 | G23, S6, T1, W10, W11, W12 |
| 26 | 80 | 60 | NP | 700 | NP | NP | CS-5 | S6, T1, W10, W12 |
| 27 | 80 | 60 | NP | 700 | NP | NP | CS-5 | S6, T1, W10, W12 |
| 28 | 80 | 60 | NP | 700 | NP | NP | CS-5 | S6, T1, W10, W12 |
| 29 | 80 | 60 | NP | 650 | 650 | 650 | CS-5 | G23, W11 |
| 30 | 80 | 60 | NP | NP | 650 | NP | CS-3 | ... |
| 31 | 81 | 50 | NP | 700 | 650 | 650 | CS-3 | T1 |
| 32 | 83 | 50 | NP | 650 | 650 | 650 | CS-3 | ... |
| 33 | 85 | 60 | NP | 650 | 650 | 650 | CS-5 | ... |
| 34 | 90 | 55 | NP | NP | 650 | 650 | CS-3 | W11 |
| 35 | 90 | 70 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | ... |
| 36 | 90 | 70 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | ... |
| 37 | 95 | 75 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | ... |
| 38 | 70 | 50 | NP | 700 | 700 | 650 | CS-3 | T1 |
| 39 | 71 | ... | 1000 | NP | 1000 | NP | CS-2 | G10, G18, S1, T1 |
| 40 | 71 | ... | 1000 | NP | 1000 | NP | CS-2 | G10, G18, S1, T1 |

Figura 18. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 2A

| Line No. | Nominal Composition | Product Form | Spec. No. | Type/Grade | Alloy Desig./UNS No. | Class/Condition/ Temper | Size/ Thickness, in. | P-No. | Group No. |
|----------|---------------------|---------------|-----------|------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-------|-----------|
| 1 | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. |
| 2 | Carbon steel | Bar | SA-696 | B | K03200 | .. | .. | 1 | 1 |
| 3 | Carbon steel | Forgings | SA-727 | .. | K02506 | .. | .. | 1 | 1 |
| 4 | Carbon steel | Wld. tube | SA-178 | C | K03503 | .. | .. | 1 | 1 |
| 5 | Carbon steel | Smls. tube | SA-210 | A-1 | K02707 | .. | .. | 1 | 1 |
| 6 | Carbon steel | Castings | SA-352 | LCB | J03003 | .. | .. | 1 | 1 |
| 7 | Carbon steel | Plate | SA-515 | 65 | K02800 | .. | .. | 1 | 1 |
| 8 | Carbon steel | Plate | SA-516 | 65 | K02403 | .. | .. | 1 | 1 |
| 9 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CB65 | K02800 | .. | .. | 1 | 1 |
| 10 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CC65 | K02403 | .. | .. | 1 | 1 |
| 11 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | B65 | K02800 | .. | .. | 1 | 1 |
| 12 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | C65 | K02403 | .. | .. | 1 | 1 |
| 13 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 1 | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 2 |
| 14 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMSH-70 | K12437 | .. | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 2 |
| 15 | Carbon steel | Forgings | SA-105 | .. | K03504 | .. | .. | 1 | 2 |
| 16 | Carbon steel | Forgings | SA-181 | .. | K03502 | 70 | .. | 1 | 2 |
| 17 | Carbon steel | Castings | SA-216 | WCB | J03002 | .. | .. | 1 | 2 |
| 18 | Carbon steel | Forgings | SA-266 | 2 | K03506 | .. | .. | 1 | 2 |
| 19 | Carbon steel | Forgings | SA-350 | LF2 | K03011 | .. | .. | 1 | 2 |
| 20 | Carbon steel | Forgings | SA-508 | 1 | K13502 | .. | .. | 1 | 2 |
| 21 | Carbon steel | Forgings | SA-508 | 1A | K13502 | .. | .. | 1 | 2 |
| 22 | Carbon steel | Forgings | SA-541 | 1 | K03506 | .. | .. | 1 | 2 |
| 23 | Carbon steel | Forgings | SA-541 | 1A | K03020 | .. | .. | 1 | 2 |
| 24 | Carbon steel | Cast pipe | SA-660 | WCB | J03003 | .. | .. | 1 | 2 |
| 25 | Carbon steel | Plate | SA-515 | 70 | K03101 | .. | .. | 1 | 2 |
| 26 | Carbon steel | Plate | SA-516 | 70 | K02700 | .. | .. | 1 | 2 |
| 27 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CB70 | K03101 | .. | .. | 1 | 2 |
| 28 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CC70 | K02700 | .. | .. | 1 | 2 |
| 29 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | B70 | K03101 | .. | .. | 1 | 2 |
| 30 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | C70 | K02700 | .. | .. | 1 | 2 |
| 31 | Carbon steel | Smls. pipe | SA-106 | C | K03501 | .. | .. | 1 | 2 |
| 32 | Carbon steel | Castings | SA-216 | WCC | K02503 | .. | .. | 1 | 2 |
| 33 | Carbon steel | Fittings | SA-234 | WPC | K03501 | .. | .. | 1 | 2 |
| 34 | Carbon steel | Wld. fittings | SA-234 | WPC | K03501 | W | .. | 1 | 2 |
| 35 | Carbon steel | Castings | SA-352 | LCC | J02505 | .. | .. | 1 | 2 |
| 36 | Carbon steel | Castings | SA-487 | 16 | .. | A | .. | 1 | 2 |
| 37 | Carbon steel | Cast pipe | SA-660 | WCC | J02505 | .. | .. | 1 | 2 |
| 38 | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. |
| 39 | Carbon steel | Bar | SA-696 | C | K03200 | .. | .. | 1 | 2 |
| 40 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 2 | $4 < t \leq 6$ | 1 | 3 |
| 41 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 1 | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 2 |
| 42 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CD70 | K12437 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 2 |
| 43 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | D70 | K12437 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 2 |
| 44 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMSH-70 | K12437 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 2 |

Figura 19. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 2A

| Table 2A (Cont'd) | | | | | |
|---|----------------------------|--------------------------|--|-----------------------------|------------|
| Section III, Division 1, Classes 1 and MC, and Section III, Division 3, Classes TC and SC | | | | | |
| Design Stress Intensity Values S_m for Ferrous Materials | | | | | |
| Line No. | Min. Tensile Strength, ksi | Min. Yield Strength, ksi | Max. Temp. Limit (SPT = Supports Only) | External Pressure Chart No. | Notes |
| 1 | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2 | 60 | 35 | 700 | CS-2 | E2 |
| 3 | 60 | 36 | 700 (SPT) | CS-2 | E2 |
| 4 | 60 | 37 | 700 | CS-2 | E2 |
| 5 | 60 | 37 | 700 | CS-2 | E2 |
| 6 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | -- |
| 7 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | -- |
| 8 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | -- |
| 9 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 10 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 11 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 12 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 13 | 65 | 45 | 700 | CS-2 | E2 |
| 14 | 65 | 45 | 700 | CS-2 | E2, G1, G2 |
| 15 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 16 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 17 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 18 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 19 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 20 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 21 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 22 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 23 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 24 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 25 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | -- |
| 26 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | -- |
| 27 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | G1, G3 |
| 28 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 29 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | G1, G3 |
| 30 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 31 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 32 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 33 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 34 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 35 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 36 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 37 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 38 | -- | -- | -- | -- | -- |
| 39 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 40 | 70 | 46 | 700 | CS-3 | E2 |
| 41 | 70 | 50 | 700 | CS-3 | E2 |
| 42 | 70 | 50 | 700 | CS-3 | E2, G1, G4 |
| 43 | 70 | 50 | 700 | CS-3 | E2, G1, G4 |
| 44 | 70 | 50 | 700 | CS-3 | E2, G1, G4 |

Fuente: Código ASME, Sección III, 2015.

3.6 CÁLCULOS Y PARÁMETROS INICIALES

| | |
|---------------------------------------|------------|
| Presión interna de diseño | 300 psi |
| Temperatura de diseño | 200 F° |
| Diámetro interno | 4.72441 in |
| Material del cuerpo | SA 414 |
| Eficiencia de junta | 1 |
| Esfuerzo permisible en tensión | 75000 |
| Corrosión permisible | 0,0625 in |
| Espesor para rosca | 0,11811 |

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} = \frac{300 * \frac{4.72441}{2}}{75000 * 1 - 0.6 * 300} = 0.01422 \text{ in}$$

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} = \frac{300 * \frac{4.72441}{2}}{2 * 75000 * 1 - 0.2 * 300} = 0.00710 \text{ in}$$

$$0.01422 + 0.0625 + 0.11811 = 0.19483 \text{ in}$$

$$D \text{ externo} = 12 + (2 * 0.19483) = 5.11408 \text{ in}$$

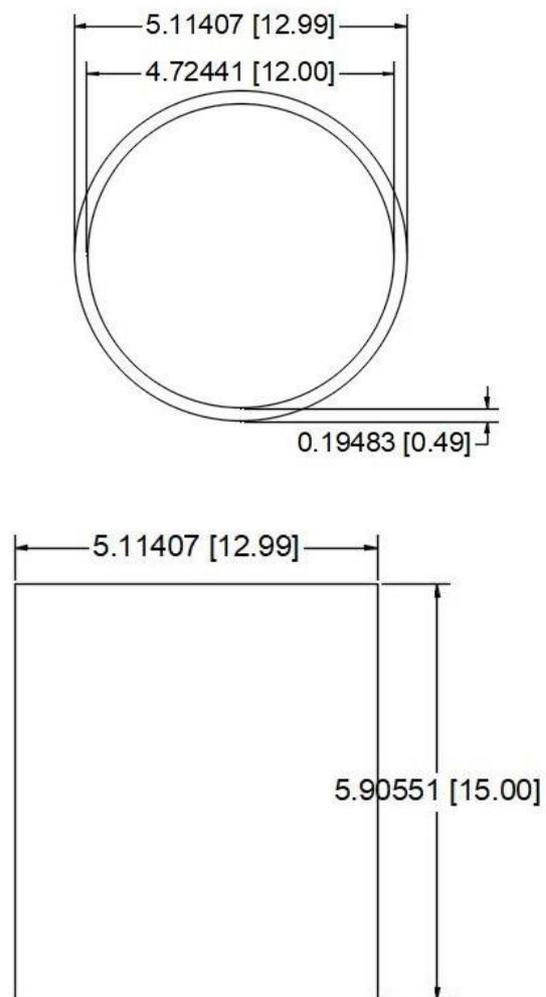
3.6.1 Cuerpo

Tabla 5. Resultados para el cuerpo.

| Resumen de Resultados | |
|---|-----------------------|
| Condición Gobernante | Presión interna |
| Espesor mínimo por UG-16 | 0.0625 in (corrosión) |
| Espesor considerando conexión roscada en el cuerpo | 0,7874 in |

| | |
|---|-------------|
| Diseño de espesor debido a esfuerzos circunferenciales | 0.01422 in |
| Diseño de espesor debido a esfuerzos longitudinales | 0.00710 in |
| Espesor total del diseño | 0.194883 in |
| Altura del cuerpo | 5.90551 in |
| Diámetro externo del cilindro | 5.11407 in |
| Diámetro interno del cilindro | 4.72441 in |

Figura 20. Diagramas del cuerpo del reactor



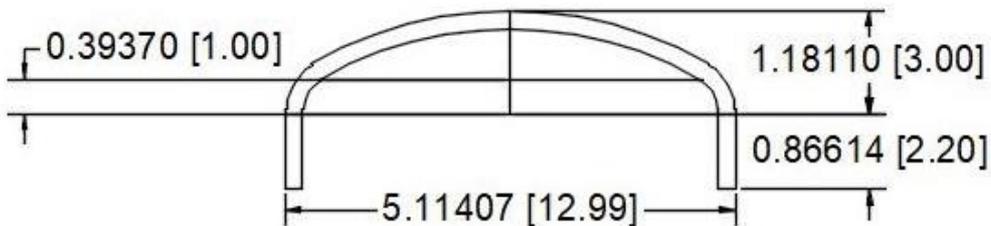
3.6.2 Cabeza semielíptica 1

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} = \frac{300 * \frac{4.72441}{2}}{2 * 75000 * 1 - 0.2 * 300} = 0.00710 \text{ in}$$

Tabla 6. Resultados para cabeza semielíptica 1.

| Resumen de Resultados | |
|---|-----------------------|
| Condición Gobernante | Presión interna |
| Espesor mínimo por UG-16 | 0.0625 in (corrosión) |
| Espesor considerando conexión roscada en el cuerpo | 0,11811 in |
| Diseño de espesor debido a esfuerzos circunferenciales | 0.03613 in |
| Diseño de espesor debido a esfuerzos longitudinales | 0.01802 in |
| Espesor total del diseño | 0.19483 in |
| Altura de la cabeza acoplada | 1.18110 in |
| Altura total de la cabeza | 2.04724 in |

Figura 21. Diagrama de cabeza semielíptica #1



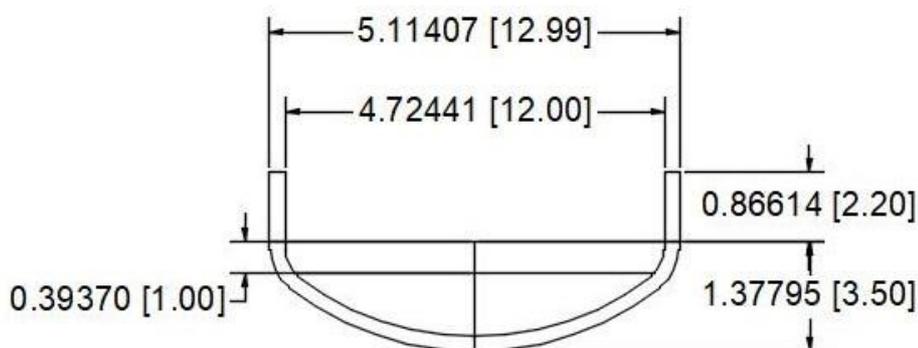
3.6.3 Cabeza semielíptica 2

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} = \frac{300 * \frac{4.72441}{2}}{2 * 75000 * 1 - 0.2 * 300} = 0.00710 \text{ in}$$

Tabla 7. Resultados de cabeza semielíptica 2.

| Resumen de Resultados | |
|---|-----------------------|
| Condición Gobernante | Presión interna |
| Espesor mínimo por UG-16 | 0.0625 in (corrosión) |
| Espesor considerando conexión roscada en el cuerpo | 0,11811 in |
| Diseño de espesor debido a esfuerzos circunferenciales | 0.03613 in |
| Diseño de espesor debido a esfuerzos longitudinales | 0.01802 in |
| Espesor total del diseño | 0.19483 in |
| Altura de la cabeza acoplada | 1.37795 in |
| Altura total de la cabeza | 2.24409 in |

Figura 22. Diagrama de cabeza semielíptica #2



3.6.4 Uniones roscadas

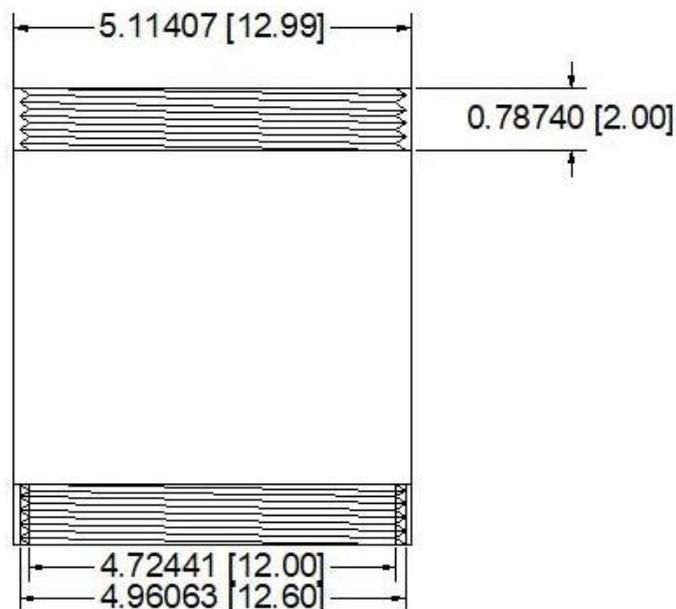
Para las conexiones del diseño se planea usar roscas métricas (ISO) aprobadas internacionalmente por la norma ISO 68-1 donde definen que las roscas son simétricas en forma de V con un ángulo de flanco de 60° y las roscas macho y hembra son paralelas. (Joy, 2022). La rosca para el diseño tendría las siguientes especificaciones:

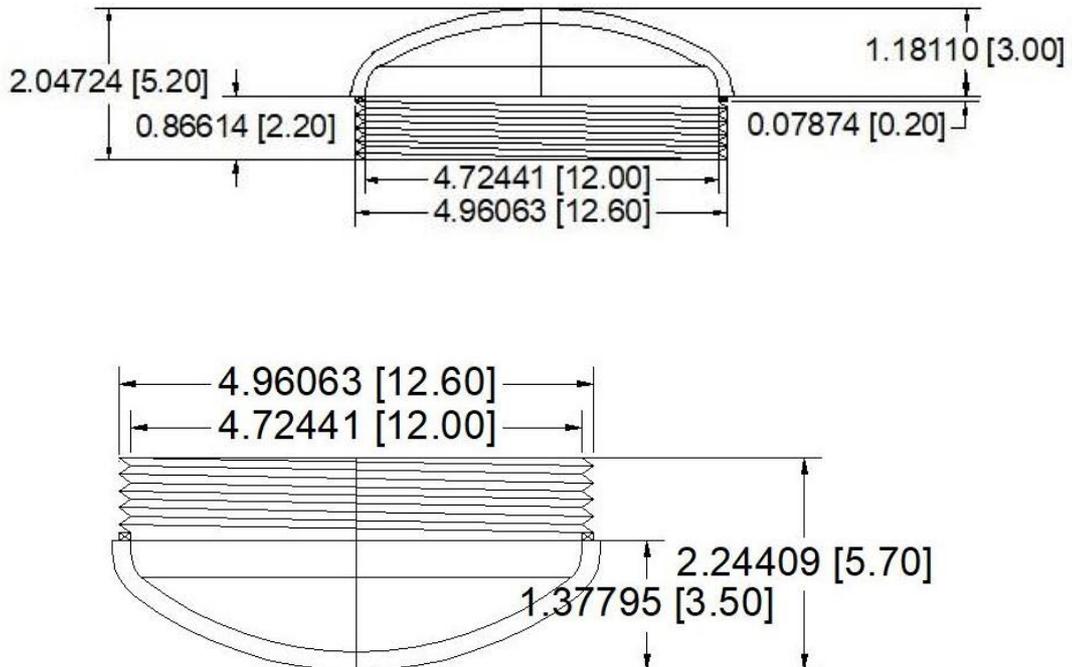
Tabla 8. Resultados para uniones roscadas.

| Resumen de Resultados | |
|---|------------------|
| Diámetro exterior (mm) | 126 (4.96063 in) |
| Diámetro interior (mm) | (120) 4.72441 in |
| Numero de pasos de vueltas por pulgada | 11 |
| Paso de rosca | 2.31 |
| Tubería recomendada | 5 |
| Métrica | M130x6 |
| Profundidad (mm) | 3 |

Nota: el tipo de rosca podría variar si se considera apropiado

Figura 23. Diagramas de uniones roscadas en el cuerpo



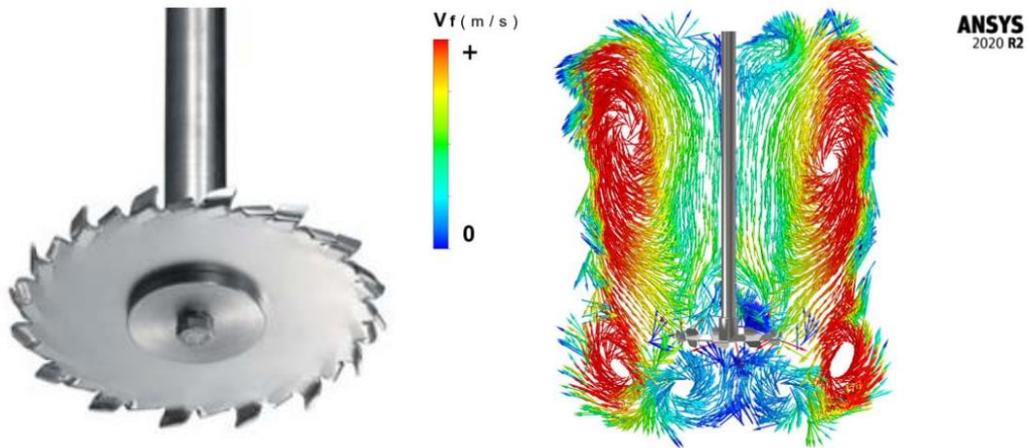


3.7 COMPLEMENTOS ADICIONALES EN EL DISEÑO

3.7.1 Agitador

Los agitadores permiten que el fluido se encuentre es constante movimiento que resulta un factor importante en procesos de deposición, para el presente diseño se escoge un agitador tipo turbina. Este tipo de agitador generalmente son usados en procesos de emulsión y dispersión. Se escoge este agitador por ser eficiente a diversas viscosidades y servir a todo tipo de velocidades. (INOXPA: Source of solutions, 2020). Aunque existe gran variedad de turbinas para este tipo de turbinas, el disco que se adapta mejor a las condiciones operacionales es el disco Cowles, usado para fluidos líquidos con alta viscosidad que contienen solidos dispersos.

Figura 24. Disco de agitador de fluido y dirección de movimiento



Fuente: Extraído de Agitadores Industriales, Fluid Mix, 2023. (<https://www.agitadoresfluidmix.com/>)

El disco está compuesto por una gran cantidad de dientes perpendiculares y uniformemente en toda su circunferencia, esta distribución podría tener pequeñas variaciones dependiendo del distribuidor. (Fluid Mix, 2023)

Figura 25. Agitador de fluidos



Fuente: Extraído de Agitadores Verticales, Fluid Mix, 2023. (<https://www.agitadoresfluidmix.com/>)

3.7.2 Cilindro de acero inoxidable

Es el cilindro de acero inoxidable que contendrá la muestra de crudo, se elige al acero inoxidable por su alta resistencia a la corrosión, característica importante para las condiciones y sustancias con las que el reactor está diseñado a operar.

Figura 26. Recipiente de acero inoxidable para muestras



Fuente: Extraído de Recipientes de acero inoxidable, Pallomaro. (<https://tienda.pallomaro.com/>)

3.7.3 Resistencia eléctrica para el calentamiento

Para poder alcanzar la temperatura se necesita una resistencia calefactora, las resistencias calefactoras funcionan mediante el efecto “Joule” donde la electricidad se transforma en calor y son usadas para calentar materiales y fluidos. Existen una gran variedad de resistencias calefactoras para sólidos, pero para el diseño se opta por una resistencia de abrazadera, estas son capaces de abrazar cualquier longitud y diámetro administrando una potencia variable, estas características encajan perfectamente con la geometría y uso del diseño. (Martinez, 2023)

Se emplearía una resistencia calefactora con aislamiento de mica capaz de trabajar hasta 250 °C y con una carga de superficie máxima admisible es de 4W/cm². Las características podrían variar ligeramente dependiendo del proveedor, pero la mayoría se asemeja en sus características.

Figura 27. Resistencia calefactora



Fuente: Recuperado de Resistencias de abrazadera, Julio Martinez Naya S.A.

[\(https://juliomartineznaya.com/\)](https://juliomartineznaya.com/)

3.7.4 Atmosfera inerte (inyección de nitrógeno)

A través de la inyección de nitrógeno al interior del reactor se busca generar una atmosfera inerte, estas condiciones se consideran químicamente inactivas, el nitrógeno se utiliza para sustituir la cantidad de oxígeno en un sistema cerrado. De esta forma se evitarán la oxidación, corrosión o cualquier otra reacción producida por el oxígeno y la humedad.

En la industria resulta eficiente y económico la utilización de nitrógeno por ser el gas más abundante en el aire. Además, es ampliamente utilizado por aumentar la seguridad en sistemas con riesgo de ser inflamables donde evitará que cualquier compuesto reaccione con el oxígeno. Para lograr esta atmosfera se implementas dos boquillas, una para la inyección de nitrógeno y otra de extracción de gas.

Para la implementación de las boquillas se toman en cuentan las normas especificadas en la sección de Aberturas y refuerzos (UG-36 a UG-46). En esta parte se indica que para boquillas mayores a 3 in de diámetro se le debe añadir una placa de refuerzo en la unión entre la boquilla y el recipiente. En el caso de aplicar refuerzos se sigue el principio de reemplazo de área.

Remplazo de área (UG-37).

Esta norma indica que cuando se inserta una boquilla en un recipiente, el agujero será el punto más débil, por lo que la unión debe ser reforzada por la misma área equivalente a la que fue removida.

3.7.5 Boquillas

Se piensa utilizar boquillas hexagonales de acero inoxidable de ½ pulgada, clase 3000 fabricada en acero inoxidable, este tipo de boquillas tienen gran resistencia a esfuerzos y generalmente se utilizan para inyectar agua, gas o aceite.

Figura 28. Diagrama de aberturas en recipientes a presión

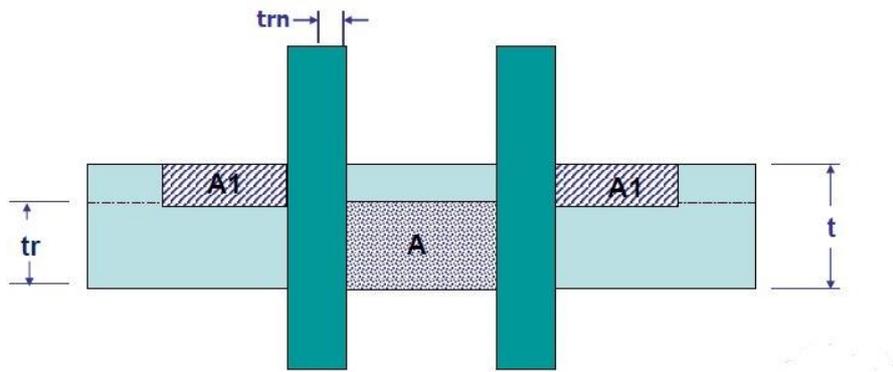


Figura 29. boquilla de acero inoxidable clase 3000



Fuente: Recuperado de Clase de rosca, Made in China. (<https://es.made-in-china.com/>)

3.7.6 Medición de temperatura

Para la medición de temperatura se utilizará un termómetro bimetálico, este dispositivo generalmente construido en acero inoxidable es capaz de medir la temperatura en un recipiente a presión, está compuesto por una banda bimetálica con dos laminas metálicas con coeficiente de dilatación térmica diferente. (Tameson, 2020)

El termómetro bimetálico será adaptado a la cabeza metálica superior como se muestra en el diagrama, la entrada dependerá del proveedor o de las unidades disponibles al momento de la manufactura.

Figura 30. Termómetro de autoclave



Fuente: extraído de Termómetro para autoclave, FEMTO. (<https://femto.es/termometro-para-autoclave>)

3.7.7 Medición de presión

Para poder medir la presión en el interior del sistema del reactor se implementará un manómetro de presión, estos son dispositivos analógicos de forma redonda y un puntero accionado mecánicamente. Las características de un manómetro pueden variar dependiendo las condiciones o el fin de su uso, teniendo cambios en el tamaño del dial, el material de la carcasa o material de la conexión. (CloudTec, 2021) En nuestro diseño

se implementará un manómetro para autoclave, estos son capaces de resistir y medir presiones superiores a los manómetros básicos.

Figura 31. Manómetro de autoclave



Fuente: Recuperado de Manómetros, Equaboiler. (<https://equaboiler.com.ec/>)

3.7.8 Sellos y empaques

Las condiciones de alta presión y temperatura hacen que sean necesarios sellos que sean capaces de resistir estas fuerzas y ayuden a mantener la integridad y correcto funcionamiento del reactor. El sello de nitrilo y sellos derivados son capaces de soportar temperaturas arriba de los 100°C, son resistentes a hidrocarburos y aceites, además de evitar el paso de gas, por estas características es que se considera el sello ideal para las conexiones del reactor. (Xiamen Better Silicone, 2020)

Figura 32. Sellos de Nitrilo



Fuente: Recuperado de Sello de nitrilo, Xiamen Better Silicone Rubber Co. Ltd. (<http://www.grommet-seal.com/>)

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS.

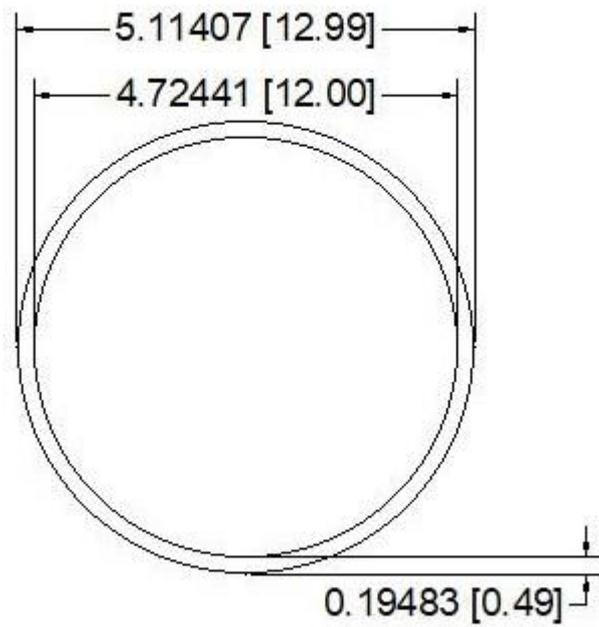
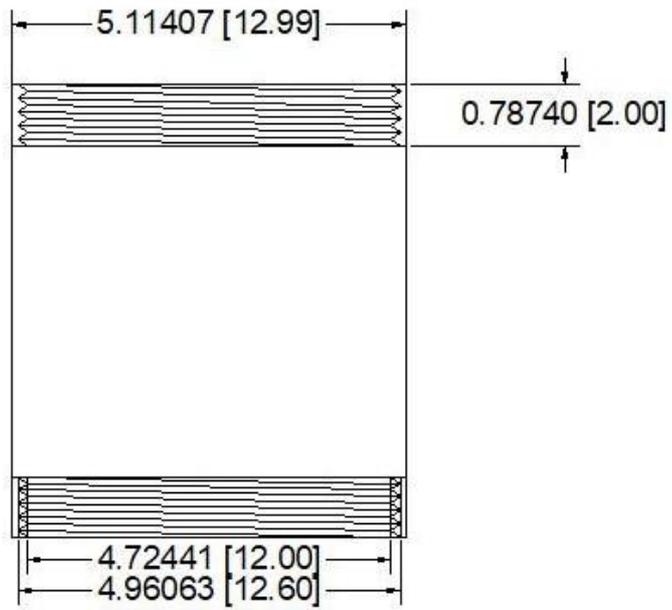
A continuación, se presentan cada parte del reactor con sus descripciones exactas:

4.1.1 Cuerpo

Tabla 9. Características - Cilindro.

| Componente - Cilindro | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Material | SA 414 |
| Presión de operación | 300 psi |
| Presión máxima teórica | 450 psi |
| Temperatura de operación | 200 F° |
| Temperatura máxima teórica | 300 F° |
| Condición gobernante | Presión interna |
| Corrosión permisible | 0,0625 |
| Diámetro externo | 5.11407 in (12.99 cm) |
| Diámetro interno | 4.72441in (12 cm) |
| Espesor de diseño | 0.19483in (0.49 cm) |
| Longitud | 5.11407 in (15 cm) |
| Tipo de rosca | Hembra |
| Diámetro exterior de rosca | 4.72441 in (12.00 cm) |
| Diámetro interior de rosca | 4.96063 in (12.60 cm) |
| Longitud de rosca | 0.78740 in (2.00 cm) |

Figura 33. Planos del cuerpo del reactor

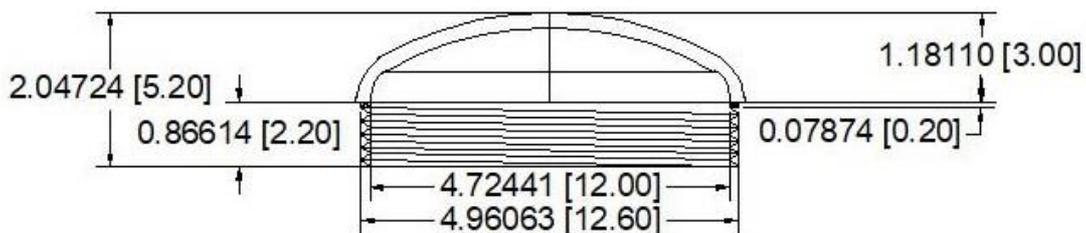


4.1.2 Cabeza semielíptica 1

Tabla 10. Características - Cabeza semielíptica 1.

| Componente - Cabeza semielíptica superior | |
|---|-----------------------|
| Material | SA 414 |
| Presión de operación | 300 psi |
| Presión máxima teórica | 450 psi |
| Temperatura de operación | 200 F° |
| Temperatura máxima teórica | 300 F° |
| Condición gobernante | Presión interna |
| Corrosión permisible | 0,0625 |
| Diámetro externo | 5.11407 in (12.99 cm) |
| Diámetro interno | 4.72441 in (12 cm) |
| Espesor de diseño | 0.19483 in (0.49 cm) |
| Longitud total | 2.04724 in (5.20 cm) |
| Longitud acoplada al cuerpo | 1.18110 in (3.00 cm) |
| Tipo de rosca | Macho |
| Diámetro exterior de unión roscada | 4.96063 in (12.60 cm) |
| Diámetro interior de unión roscada | 4.72441 in (12.00 cm) |
| Longitud de rosca | 0.78740 in (2.00 cm) |
| Espacio para sellos | 0.07874 in (0.20 cm) |

Figura 34. Planos de cabeza semielíptica #1

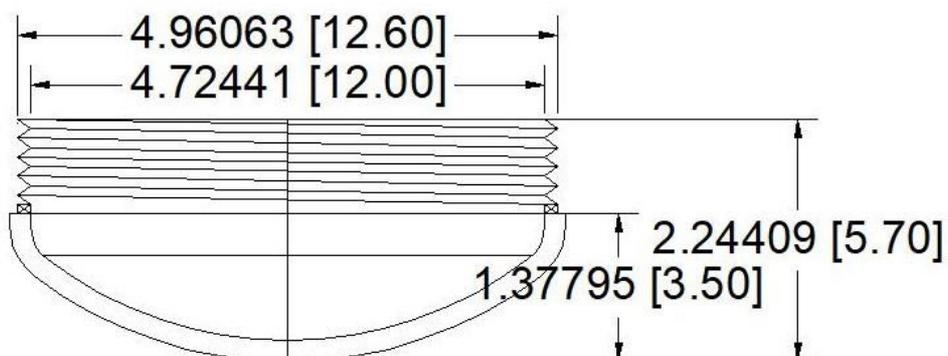


4.1.3 Cabeza semielíptica 2

Tabla 11. Características - Cabeza semielíptica 2.

| Componente - Cabeza semielíptica inferior | |
|---|-----------------------------|
| Material | SA 414 |
| Presión de operación | 300 psi |
| Presión máxima teórica | 450 psi |
| Temperatura de operación | 200 F° |
| Temperatura máxima teórica | 300 F° |
| Condición gobernante | Presión interna |
| Corrosión permisible | 0,0625 |
| Diámetro externo | 5.11407 in (12.99 cm) |
| Diámetro interno | 4.72441 in (12 cm) |
| Espesor de diseño | 0.19483 in (0.49 cm) |
| Longitud total | 2.24409 in (5.70 cm) |
| Longitud acoplada al cuerpo | 1.37795 in (3.50 cm) |
| Tipo de rosca | Macho |
| Diámetro exterior de unión roscada | 4.96063 in (12.60 cm) |
| Diámetro interior de unión roscada | 4.72441 in (12.00 cm) |
| Longitud de rosca | 0.78740 in (2.00 cm) |
| Espacio para sellos | 0.07874 in (0.20 cm) |

Figura 35. Planos de cabeza semielíptica #2



4.1.4 Sellos

Tabla 12. Características - Sellos.

| Componente - Sellos | |
|----------------------------|---------|
| Cantidad | 2 |
| Material | Nitrilo |
| Espesor | 2 mm |
| Diámetro exterior | 126 mm |
| Diámetro interior | 120 mm |

4.1.5 Boquilla 1

Tabla 13. Características- Boquilla 1.

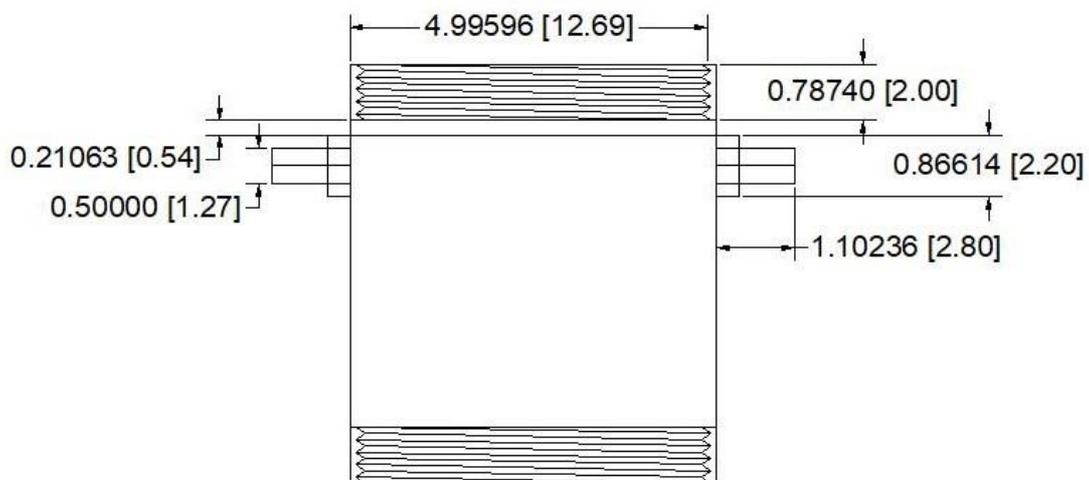
| Componente Boquilla #1 | |
|--|------------------------------------|
| Localizada en | Cilindro |
| Orientación | 90° |
| Distancia debajo de la rosca | 0.3937 in (1.00 cm) |
| Longitud total de la boquilla | 1.88976 (4.8 cm) |
| Longitud desde el cuerpo hasta fin de la boquilla | 1.10236 in (2.80 cm) |
| Diámetro | ½ in (1.27 cm) |
| Descripción | Utilizada para la inyección de gas |
| Material | Acero inoxidable 304 |
| Soldadura | Opcional |

4.1.6 Boquilla 2

Tabla 14. Características - Boquilla 2.

| Componente - Boquilla #2 | |
|--|------------------------------------|
| Localizada en | Cilindro |
| Orientación | 90° |
| Distancia debajo de la rosca | 0.3937 in (1.00 cm) |
| Longitud total de la boquilla | 1.88976 (4.8 cm) |
| Longitud desde el cuerpo hasta fin de la boquilla | 1.10236 in (2.80 cm) |
| Diámetro | ½ in (1.27 cm) |
| Descripción | Utilizada para la inyección de gas |
| Material | Acero inoxidable 304 |
| Soldadura | Opcional |

Figura 36. Planos de localización de boquillas

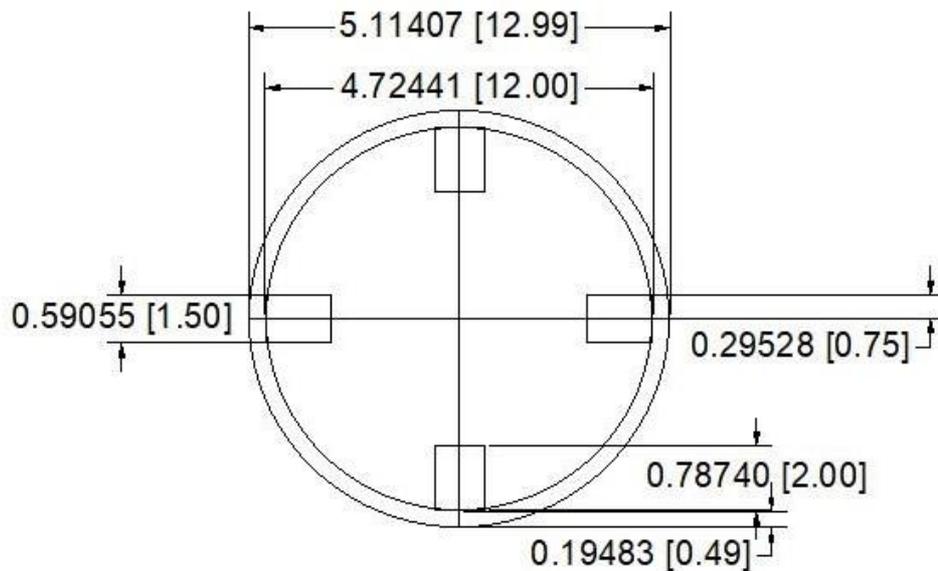


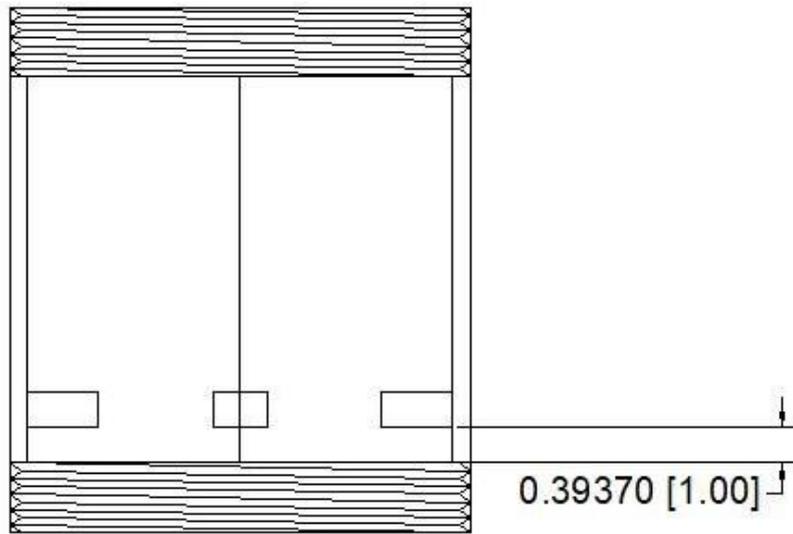
4.1.7 Soportes

Tabla 15. Características - Soportes.

| Componente - Soportes | |
|-----------------------|--|
| Numero de soportes | 4 |
| Dimensiones | 1 x 2 cm |
| Espesor | 1 cm |
| Ubicación | 0°, 90°, 180°, 270° |
| Material | SA 414 |
| Función | Servir como soporte al recipiente donde se ubican las muestras |
| Soldadura | Necesaria |

Figura 37. Planos de localización de soportes





4.1.8 Agitador

Tabla 16. Características - Agitador.

| Componente – Agitador | |
|-----------------------|-----------------------|
| Tipo de agitador | Turbina |
| Disco | Cowles |
| Ubicación | Cabeza semielíptica 1 |
| Material | Acero Inoxidable |

4.1.9 Termómetro

Tabla 17. Características - Termómetro.

| Componente - Termómetro | |
|-------------------------|----------------------|
| Tipo | Banda bimetálica |
| Material | Acero inoxidable |
| Unión | Roscada |
| Ubicación | Cabeza Semi-elíptica |

4.1.10 Manómetro

Tabla 18. Características - Manómetro.

| Componente – Manómetro | |
|------------------------|---------------------|
| Tipo | Alta presión |
| Material | Acero inoxidable |
| Unión | Roscada |
| Ubicación | Cabeza Semielíptica |

4.2 FUNCIONAMIENTO ESPERADO

Se debe ensamblar la cabeza inferior del reactor al cuerpo, la muestra irá dentro del cuerpo en el recipiente de acero inoxidable, y posteriormente se ensambla la cabeza superior con los accesorios necesarios como lo son el agitador, el manómetro y el termómetro, se coloca la chaqueta térmica que será la generadora de temperatura, y se conecta el sistema de bombeo de nitrógeno, el funcionamiento consiste en inyectar nitrógeno hasta alcanzar la presión de operación, de misma forma suministrar energía mediante la chaqueta térmica hasta que se llegue a la temperatura deseada.

El agitador debe estar funcionando previamente para que la muestra se encuentre en constante movimiento, se deja que la muestra se exponga a estas condiciones durante cierto periodo de tiempo y al finalizar se podrá observar el comportamiento de los compuestos orgánicos como lo son las parafinas y asfaltenos al someterse a estos cambios de presión y temperatura.

Cabe destacar que este es el funcionamiento previsto para el reactor luego de ser manufacturado y haberse sometido a pruebas propias de este proceso y que esta investigación se ha limitado al diseño en bases teóricas.

4.3 Limitaciones del diseño.

A pesar de seguir estrictamente los manuales de diseño de recipientes a presión, la elaboración de planos referentes, esta investigación por su metodología teórica tiene un alcance limitado, donde podemos resumir sus principales limitaciones como las siguientes:

4.3.1 Variabilidad de propiedades de materiales

Aunque se ha elegido los materiales mediante una selección teórica basada en sus propiedades mecánicas y resistencias a la corrosión, estas pueden cambiar por condiciones de fabricación o condiciones ambientales provocando que las propiedades reales del material varíen.

4.3.2 Ausencia de factores dinámicos externos

Para la elaboración del diseño se consideran condiciones estáticas sin variaciones. En la realidad el reactor puede estar expuesto a factores externos imprevistos como cambios de temperatura o vibraciones. Estos factores no se abordan en el diseño teórico, pero deben ser incluidos en pruebas posteriores para garantizar el rendimiento estructural del reactor.

4.3.3 Limitaciones de tamaño y escala

Por esta razón el diseño propuesto en esta investigación propone condiciones y escalas básicas. Las condiciones al aumentar la escala podrían variar considerablemente, sin embargo, esta investigación inicial sienta todas las bases teóricas la creación de un reactor mas grande que sea utilizado en laboratorio

4.3.4 Cambios en el diseño debido a accesorios externos

Para que el reactor funcione correctamente y cumpla su objetivo es necesario el uso de accesorios externos que deben ser adaptados a su estructura, aunque este diseño se han utilizado los diámetros y medidas comerciales generales, las aberturas y conexiones pueden variar dependiendo de la disponibilidad y características del fabricante de los accesorios externos. Esto generaría cambios en el diseño inicial, pero siguiendo todas las normas descritas no alteraría su funcionamiento.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

4.3.5 Importancia de pruebas de contenido de parafinas y asfaltenos en muestras de crudos

Conocer el contenido de parafinas y asfaltenos en muestras de crudo tiene gran importancia en la industria petrolera, siendo considerado un problema desde las operaciones de producción hasta el proceso de refinación, donde las parafinas pueden formar depósitos de sólidos y los asfaltenos obstruir tuberías y equipos.

La comprensión de su comportamiento cuando es sometido a cambios de presión y temperatura permite anticipar problemas, optimizar procesos y maximizar producciones del hidrocarburo. Evitar estos problemas también reduce costos operativos o tiempos de paradas, la información obtenida de estos compuestos permite prevenir problemas y planificar acciones de remediación, siendo así una característica importante en toda la industria.

4.3.6 El diseño de un reactor cumple con el objetivo de caracterización de asfaltenos y parafinas

Los resultados obtenidos durante la fase de diseño demuestran teóricamente que el reactor es capaz de caracterizar el comportamiento el contenido de asfaltenos y parafinas en muestras de crudos, las cantidades obtenidas mediante pruebas servirán para tomar acciones preventivas en procesos de la industria petrolera

4.3.7 Normas y estándares teóricos aplicables

La metodología aplicada sigue estrictamente las normativas y estándares establecidos en la sección VII del código ASME y otras referencias utilizadas en el diseño. Por lo que garantiza resultados coherentes y respaldados en una gran base teórica

4.3.8 Limitaciones teóricas

A pesar de que se cumplen los objetivos planteados en la investigación, el diseño es limitado y propenso a cambios, ya que existen accesorios cuyas características dependen netamente del fabricante y la disponibilidad del mercado, siendo un diseño que se puede configurar o modificar constantemente en investigaciones futuras donde aborden el diseño práctico o temas fuera del alcance propuesto.

4.3.9 Base teórica para diseño práctico

La investigación proporciona toda la información necesaria para el conocimiento general del diseño de un reactor para pruebas de asfaltenos y parafinas en un laboratorio, esta investigación puede ser redirigida a un futuro a la elaboración de un diseño práctico y la elaboración de este.

5.2 RECOMENDACIONES

A pesar de que se cumplen mayormente los objetivos establecidos para las condiciones planteadas, se recomienda que en investigaciones futuras se indague de manera específica los datos y características de todos los accesorios externos que deben ser acoplados al diseño. El correcto diseño que considere las características específicas de cada instrumento externo logrará una operación segura y diseño eficiente del reactor.

Existen características ajenas a esta investigación, como requisitos de instalación o disponibilidad de accesorios que a futuras investigaciones deben ser consideradas con gran importancia en el diseño, esto promoverá una compresión más completa del reactor con su entorno operativo y la toma de decisiones acertada durante el diseño, instalación y operación del recipiente.

Bibliografía

- Ariza, E., Calvete, F., & Zapata, J. (2007). Estudio comparativo de los modelos de precipitación de parafinas. *Fuentes, el reventón energético*, V, 21-34.
- Arriola, E. (2017). Dispersantes de Parafinas y Asfáltenos, una Solución para el Sostenimiento y Optimización en la Producción de Crudo. *PetroQuiMex*, 48-52.
- Arveng . (2020). *Arveng training & engineering* . Obtenido de <https://arvengtraining.com>
- Beckmann, L. G. (2018). Evaluación de la Disminución del Depósito de Parafinas Empleando Modificadores de Cristales en Petróleo Liviano. *Revista Politécnica*, 41.
- Centeno, G., Trejo, F., Ancheyta, J., & Carlos, A. (2004). *Precipitación de asfaltenos del crudo Maya en un sistema a presión*. UNAM.
- Cerdeño, G. (2010). *Estudio de la precipitación de parafinas en presencia de aditivos* . Madrid: Biblioteca Universidad Rey Juan Carlos .
- Cía. General de Aceross. (2021). *Acero AISI/SAE 4140*. Obtenido de Cía. General de Aceross: <https://www.cga.com.co/>
- CloudTec. (2021). *Manómetro De Presión*. Obtenido de CloudTec: <https://cloudtec.pe/blog/>
- Delgado, J. (2006). *Asfaltenos: composición, agregación, precipitación* (Vol. I). Mérida: Biblioteca ULA.
- Díaz, F. (2018). *Recipientes a presión*. México: Biblioteca UNAM.
- FERCOM. (2019). *A-285 ACERO AL CARBÓN PARA RECIPIENTES A PRESIÓN CON BAJA Y MEDIA TENSIÓN*. Obtenido de Aceros FERCOM: <https://acerosfercom.com/inicio>

- Fluid Mix. (2023). *Agitadores Industriales*. Obtenido de Fluid Mix: Effective Mixing: <https://www.agitadoresfluidmix.com/>
- González, D., Villabona, C., & Vargas, H. (2010). Métodos para el Control e Inhibición de la Acumulación de depósitos Parafínicos. *Revista UIS Ingenierías*, IX(2), 193-206.
- Hernández, L. (2017). *Aplicacion de código ASME sección VII, División 1, Edición 2015 para el diseño de un recipiente sujeto a presión interna*. Escuela Superior De Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco.
- INOXPA: Source of solutions. (2020). *Agitadores para los Depósitos Estándares*.
- Joy, A. T. (27 de Diciembre de 2022). *Rosca Métrica (ISO)*. Obtenido de Tameson: <https://tameson.es/>
- León, J. (2001). *Diseño y cálculo de recipientes a presión* . Inglesa .
- Martinez, J. (2023). *Resistencias para calentamiento de sólidos* . Obtenido de Julio Martinez Naya S.A: <https://juliomartineznaya.com/>
- Padilla, D., & Watt, K. (2015). *Precipitación de asfaltenos: Técnicas de predicción y control*. Universidad de San Buenaventura.
- Structuralia. (15 de Junio de 2023). *Structuralia*. Obtenido de Structuralia: <https://blog.structuralia.com/recipientes-sujetos-a-presion>
- Tameson. (14 de Diciembre de 2020). *Cómo Funcionan Los Termómetros Bimetalicos* . Obtenido de Tameson: <https://tameson.es/>
- Xiamen Better Silicone. (2020). *Sello de nitrilo*. Obtenido de Xiamen Better Silicone Co.: <http://www.grommet-seal.com/>

ANEXOS

Anexo A. Recipiente a presión.



Anexo B. Recipientes de transporte



Anexo C. Recipiente horizontal



Anexo D. Recipiente vertical



Anexo E. Recipiente de geometría esférica



Anexo F. recipiente de geometría cónica



Anexo G. recipiente metálico



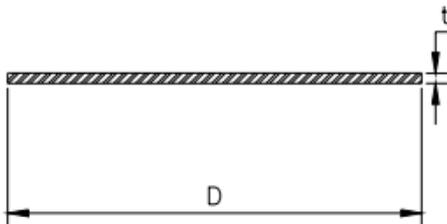
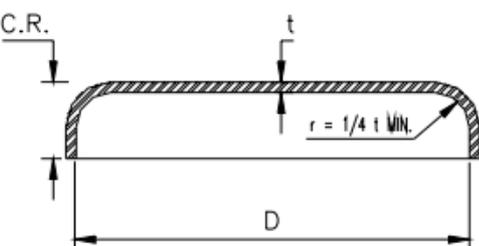
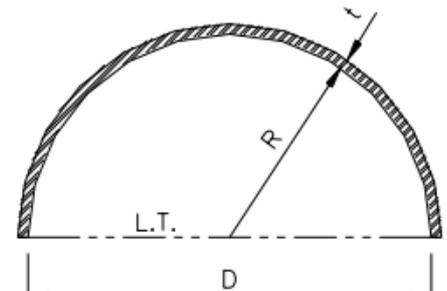
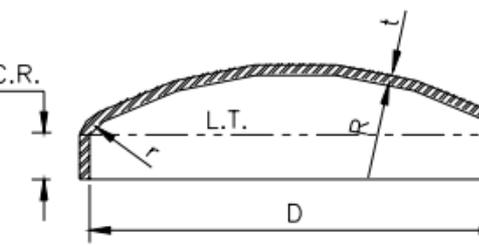
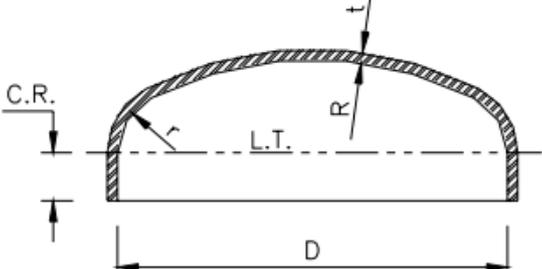
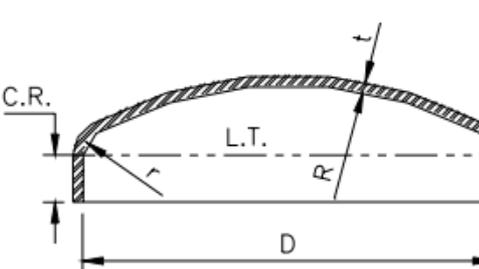
Anexo H. recipiente plástico

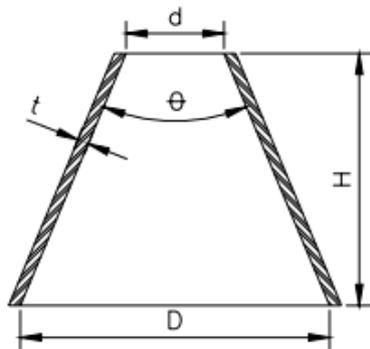


Anexo I. Recipiente de vidrio

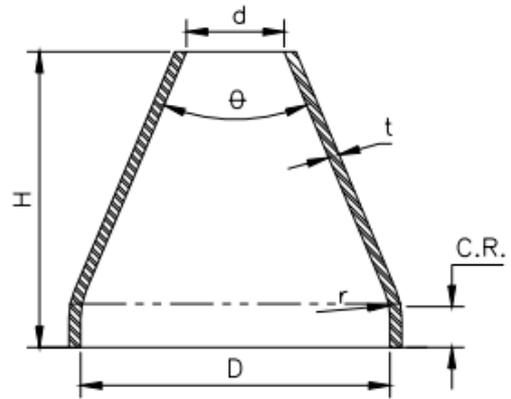


Anexo J. Tipos de tapas en recipientes a presión

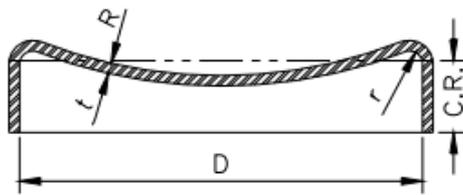
| | |
|---|--|
|  <p style="text-align: center;">PLANA</p> |  <p style="text-align: center;">PLANA CON CEJA</p> |
|  <p style="text-align: center;">SEMIESFERICA</p> |  <p style="text-align: center;">80 : 10</p> |
|  <p style="text-align: center;">SEMIELIPTICA</p> |  <p style="text-align: center;">TORIESFERICA</p> |



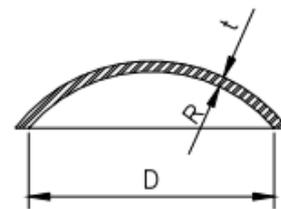
CONICA



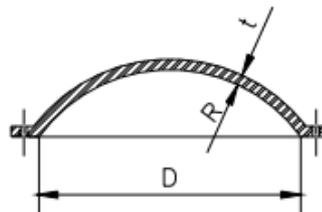
TORICONICA



ABOMBADA CON CEJA INVERTIDA

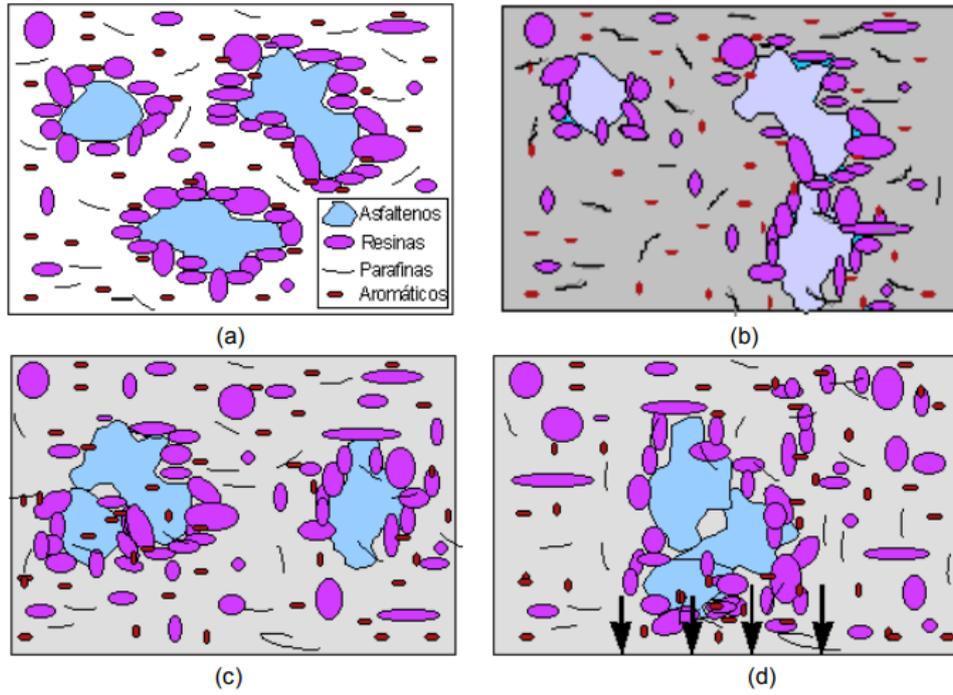


UNICAMENTE ABOMBADA



ABOMBADA CON CEJA PLANA

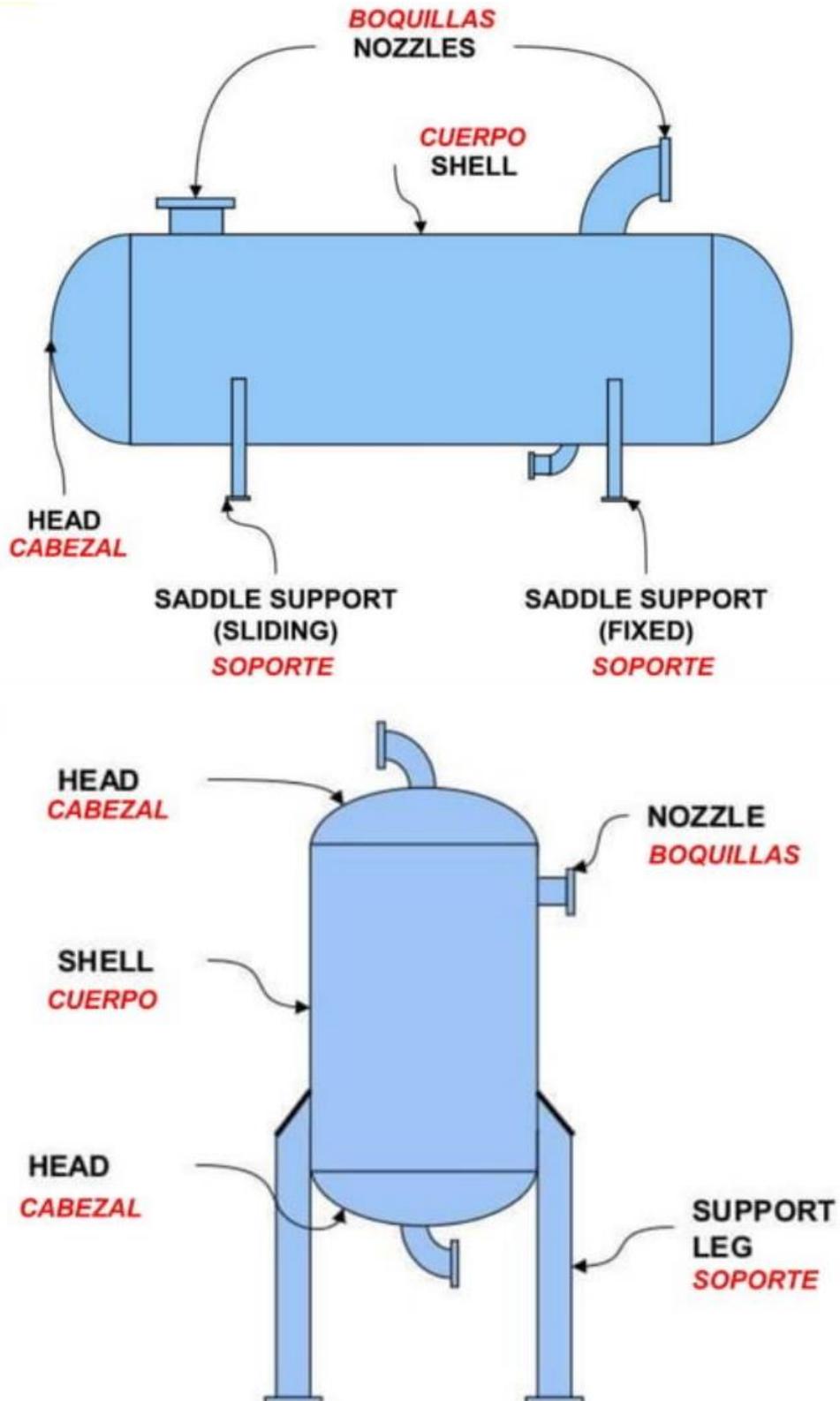
Anexo K. Agregación de asfaltenos



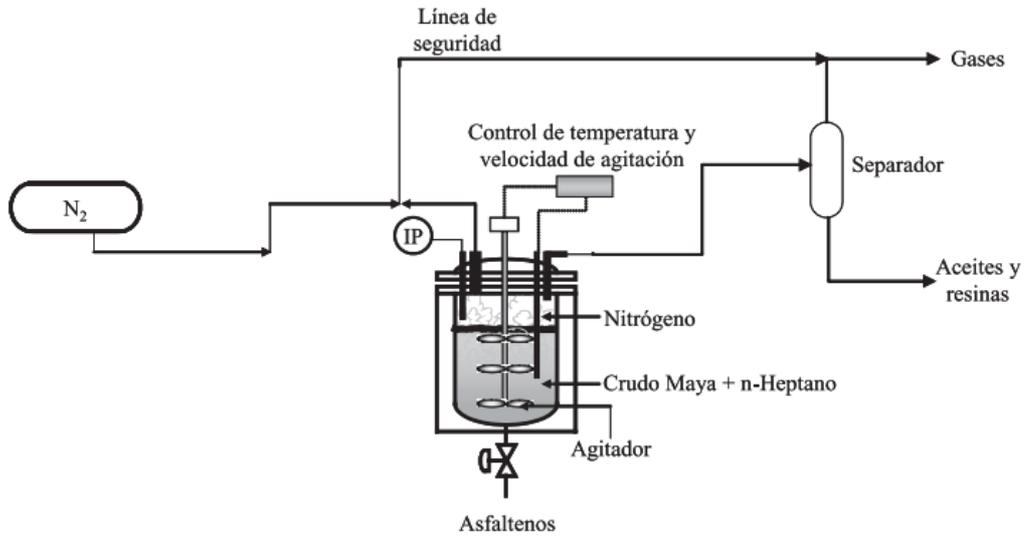
Anexo L. Reducción del diámetro de tuberías debido a precipitación de asfaltenos y parafinas



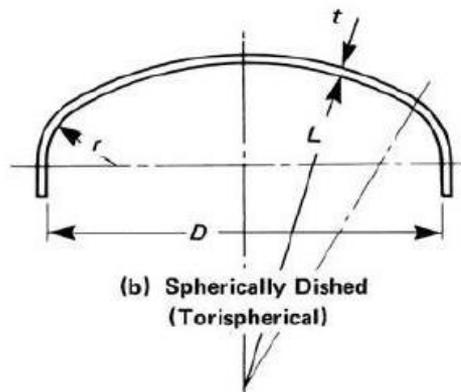
Anexo M. Partes de un recipiente a presión



Anexo N. Reactor para pruebas de parafinas y asfaltenos



Anexo O. Cabeza semielíptica



Anexo P. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 1A

| Line No. | Nominal Composition | Product Form | Spec. No. | Type/Grade | Alloy | | Size/Thickness, in. | P-No. | Group No. |
|----------|---------------------|--------------|---------------|------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------|-----------|
| | | | | | Desig./UNS No. | Class/Con- dition/ Temper | | | |
| 1 | Carbon steel | Plate | SA/GB 713 | Q345R | ... | ... | $\frac{5}{8} < t \leq 1.5$ | 1 | 2 |
| 2 | Carbon steel | Plate | SA-455 | ... | K03300 | ... | $\frac{3}{8} < t \leq 0.58$ | 1 | 2 |
| 3 | Carbon steel | Plate | SA/GB 713 | Q345R | ... | ... | $\frac{1}{8} \leq t \leq \frac{5}{8}$ | 1 | 2 |
| 4 | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. |
| 5 | Carbon steel | Plate | SA/EN 10028-2 | P355GH | ... | ... | ≤ 2.5 | 1 | 2 |
| 6 | Carbon steel | Forgings | SA-266 | 3 | K05001 | ... | .. | 1 | 2 |
| 7 | Carbon steel | Plate | SA-455 | ... | K03300 | ... | $\leq \frac{3}{8}$ | 1 | 2 |
| 8 | Carbon steel | Plate | SA-299 | A | K02803 | ... | > 1 | 1 | 2 |
| 9 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CK75 | K02803 | ... | > 1 | 1 | 2 |
| 10 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | N75 | K02803 | ... | > 1 | 1 | 2 |
| 11 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMS-75 | K02803 | ... | > 1 | 1 | 2 |
| 12 | Carbon steel | Plate | SA-299 | A | K02803 | ... | ≤ 1 | 1 | 2 |
| 13 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMS-75 | K02803 | ... | ≤ 1 | 1 | 2 |
| 14 | Carbon steel | Forgings | SA-372 | B | K04001 | ... | .. | 1 | 2 |
| 15 | Carbon steel | Sheet | SA-414 | G | K03103 | ... | .. | 1 | 2 |
| 16 | Carbon steel | Plate | SA-738 | A | K12447 | ... | .. | 1 | 2 |
| 17 | Carbon steel | Plate | SA-537 | ... | K12437 | 3 | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 3 |
| 18 | Carbon steel | Plate | SA-537 | ... | K12437 | 2 | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 3 |
| 19 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMSH-80 | K12437 | ... | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 3 |
| 20 | Carbon steel | Plate | SA-738 | C | K02008 | ... | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 3 |
| 21 | Carbon steel | Plate | SA-299 | B | K02803 | ... | > 1 | 1 | 3 |
| 22 | Carbon steel | Plate | SA-299 | B | K02803 | ... | ≤ 1 | 1 | 3 |
| 23 | Carbon steel | Forgings | SA-765 | IV | K02009 | ... | .. | 1 | 3 |
| 24 | Carbon steel | Plate | SA-537 | ... | K12437 | 3 | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 25 | Carbon steel | Plate | SA-537 | ... | K12437 | 2 | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 26 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CD80 | K12437 | ... | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 27 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | D80 | K12437 | ... | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 28 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMSH-80 | K12437 | ... | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 29 | Carbon steel | Plate | SA-738 | C | K02008 | ... | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 30 | Carbon steel | Plate | SA-841 | B | ... | 2 | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 3 |
| 31 | Carbon steel | Plate | SA-612 | ... | K02900 | ... | $\frac{1}{2} < t \leq 1$ | 10C | 1 |
| 32 | Carbon steel | Plate | SA-612 | ... | K02900 | ... | $\leq \frac{1}{2}$ | 10C | 1 |
| 33 | Carbon steel | Plate | SA-738 | B | K12007 | ... | .. | 1 | 3 |
| 34 | Carbon steel | Forgings | SA-372 | C | K04801 | ... | .. | .. | .. |
| 35 | Carbon steel | Plate | SA-724 | A | K11831 | ... | .. | 1 | 4 |
| 36 | Carbon steel | Plate | SA-724 | C | K12037 | ... | .. | 1 | 4 |
| 37 | Carbon steel | Plate | SA-724 | B | K12031 | ... | .. | 1 | 4 |
| 38 | C-Mn-Si-Cb | Plate | SA-737 | B | K12001 | ... | .. | 1 | 2 |
| 39 | C-Mn-Si-Cb | Plate | SA/AS 1548 | PT490N | ... | Normalized | ≤ 6 | 1 | 2 |
| 40 | C-Mn-Si-Cb | Plate | SA/AS 1548 | PT490NR | ... | Norm. rld. | ≤ 6 | 1 | 2 |

Anexo Q. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 1A

| Line No. | Min. Tensile Strength, ksi | Min. Yield Strength, ksi | Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only) | | | | External Pressure Chart No. | Notes |
|----------|----------------------------|--------------------------|--|------------------|--------|-----|-----------------------------|----------------------------|
| | | | I | III | VIII-1 | XII | | |
| 1 | 72.5 | 47 | 800 | NP | 800 | NP | CS-2 | T1 |
| 2 | 73 | 37 | NP | 400 (Cl. 3 only) | 650 | 650 | CS-2 | .. |
| 3 | 74 | 50 | 800 | NP | 800 | NP | CS-2 | T1 |
| 4 | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. |
| 5 | 74 | .. | 850 | NP | 1000 | NP | CS-2 | G10, G18, S1, T1 |
| 6 | 75 | 37.5 | 1000 | 700 | 1000 | NP | CS-2 | G10, S1, T2, W8, W11 |
| 7 | 75 | 38 | NP | 400 (Cl. 3 only) | 650 | 650 | CS-2 | .. |
| 8 | 75 | 40 | 1000 | 700 | 1000 | 650 | CS-2 | G10, S1, T2 |
| 9 | 75 | 40 | NP | 700 | NP | NP | CS-2 | S6, W10, W12 |
| 10 | 75 | 40 | NP | 700 | NP | NP | CS-2 | S6, W10, W12 |
| 11 | 75 | 40 | NP | 700 | NP | NP | CS-2 | S6, W10, W12 |
| 12 | 75 | 42 | 1000 | 700 | 1000 | 650 | CS-2 | G10, S1, T1 |
| 13 | 75 | 42 | NP | 700 | NP | NP | CS-2 | T1, W10, W12 |
| 14 | 75 | 45 | NP | NP | 650 | 650 | CS-3 | W11 |
| 15 | 75 | 45 | NP | NP | 900 | 650 | CS-3 | G10, T1 |
| 16 | 75 | 45 | NP | NP | 700 | 650 | CS-2 | T1 |
| 17 | 75 | 50 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | G23, T1, W11 |
| 18 | 75 | 55 | NP | 700 | 650 | 650 | CS-5 | G23, T1, W11 |
| 19 | 75 | 55 | NP | 700 | NP | NP | CS-5 | G26, T1, W10, W12 |
| 20 | 75 | 55 | NP | 650 | 650 | 650 | CS-5 | G23, W11 |
| 21 | 80 | 45 | 800 | NP | 1000 | 650 | CS-3 | G10, S1, T1 |
| 22 | 80 | 47 | 800 | NP | 1000 | 650 | CS-3 | G10, S1, T1 |
| 23 | 80 | 50 | NP | NP | 700 | NP | CS-3 | .. |
| 24 | 80 | 55 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | G23, T1, W11 |
| 25 | 80 | 60 | NP | 700 | 650 | 650 | CS-5 | G23, S6, T1, W10, W11, W12 |
| 26 | 80 | 60 | NP | 700 | NP | NP | CS-5 | S6, T1, W10, W12 |
| 27 | 80 | 60 | NP | 700 | NP | NP | CS-5 | S6, T1, W10, W12 |
| 28 | 80 | 60 | NP | 700 | NP | NP | CS-5 | S6, T1, W10, W12 |
| 29 | 80 | 60 | NP | 650 | 650 | 650 | CS-5 | G23, W11 |
| 30 | 80 | 60 | NP | NP | 650 | NP | CS-3 | .. |
| 31 | 81 | 50 | NP | 700 | 650 | 650 | CS-3 | T1 |
| 32 | 83 | 50 | NP | 650 | 650 | 650 | CS-3 | .. |
| 33 | 85 | 60 | NP | 650 | 650 | 650 | CS-5 | .. |
| 34 | 90 | 55 | NP | NP | 650 | 650 | CS-3 | W11 |
| 35 | 90 | 70 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | .. |
| 36 | 90 | 70 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | .. |
| 37 | 95 | 75 | NP | NP | 700 | 650 | CS-5 | .. |
| 38 | 70 | 50 | NP | 700 | 700 | 650 | CS-3 | T1 |
| 39 | 71 | .. | 1000 | NP | 1000 | NP | CS-2 | G10, G18, S1, T1 |
| 40 | 71 | .. | 1000 | NP | 1000 | NP | CS-2 | G10, G18, S1, T1 |

Anexo R. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 2A

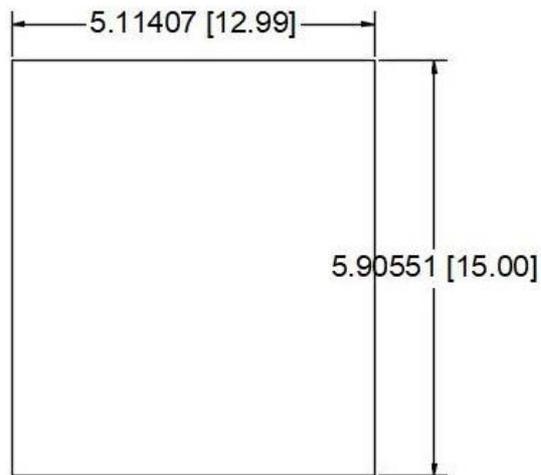
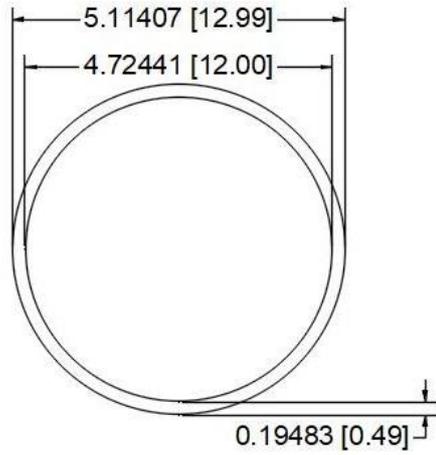
| Line No. | Nominal Composition | Product Form | Spec. No. | Type/Grade | Alloy Desig./UNS No. | Class/Condition/ Temper | Size/Thickness, in. | P-No. | Group No. |
|----------|---------------------|---------------|-----------|------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-------|-----------|
| 1 | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. |
| 2 | Carbon steel | Bar | SA-696 | B | K03200 | .. | .. | 1 | 1 |
| 3 | Carbon steel | Forgings | SA-727 | .. | K02506 | .. | .. | 1 | 1 |
| 4 | Carbon steel | Wld. tube | SA-178 | C | K03503 | .. | .. | 1 | 1 |
| 5 | Carbon steel | Smls. tube | SA-210 | A-1 | K02707 | .. | .. | 1 | 1 |
| 6 | Carbon steel | Castings | SA-352 | LCB | J03003 | .. | .. | 1 | 1 |
| 7 | Carbon steel | Plate | SA-515 | 65 | K02800 | .. | .. | 1 | 1 |
| 8 | Carbon steel | Plate | SA-516 | 65 | K02403 | .. | .. | 1 | 1 |
| 9 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CB65 | K02800 | .. | .. | 1 | 1 |
| 10 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CC65 | K02403 | .. | .. | 1 | 1 |
| 11 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | B65 | K02800 | .. | .. | 1 | 1 |
| 12 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | C65 | K02403 | .. | .. | 1 | 1 |
| 13 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 1 | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 2 |
| 14 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMSH-70 | K12437 | .. | $2\frac{1}{2} < t \leq 4$ | 1 | 2 |
| 15 | Carbon steel | Forgings | SA-105 | .. | K03504 | .. | .. | 1 | 2 |
| 16 | Carbon steel | Forgings | SA-181 | .. | K03502 | 70 | .. | 1 | 2 |
| 17 | Carbon steel | Castings | SA-216 | WCB | J03002 | .. | .. | 1 | 2 |
| 18 | Carbon steel | Forgings | SA-266 | 2 | K03506 | .. | .. | 1 | 2 |
| 19 | Carbon steel | Forgings | SA-350 | LF2 | K03011 | .. | .. | 1 | 2 |
| 20 | Carbon steel | Forgings | SA-508 | 1 | K13502 | .. | .. | 1 | 2 |
| 21 | Carbon steel | Forgings | SA-508 | 1A | K13502 | .. | .. | 1 | 2 |
| 22 | Carbon steel | Forgings | SA-541 | 1 | K03506 | .. | .. | 1 | 2 |
| 23 | Carbon steel | Forgings | SA-541 | 1A | K03020 | .. | .. | 1 | 2 |
| 24 | Carbon steel | Cast pipe | SA-660 | WCB | J03003 | .. | .. | 1 | 2 |
| 25 | Carbon steel | Plate | SA-515 | 70 | K03101 | .. | .. | 1 | 2 |
| 26 | Carbon steel | Plate | SA-516 | 70 | K02700 | .. | .. | 1 | 2 |
| 27 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CB70 | K03101 | .. | .. | 1 | 2 |
| 28 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CC70 | K02700 | .. | .. | 1 | 2 |
| 29 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | B70 | K03101 | .. | .. | 1 | 2 |
| 30 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | C70 | K02700 | .. | .. | 1 | 2 |
| 31 | Carbon steel | Smls. pipe | SA-106 | C | K03501 | .. | .. | 1 | 2 |
| 32 | Carbon steel | Castings | SA-216 | WCC | K02503 | .. | .. | 1 | 2 |
| 33 | Carbon steel | Fittings | SA-234 | WPC | K03501 | .. | .. | 1 | 2 |
| 34 | Carbon steel | Wld. fittings | SA-234 | WPC | K03501 | W | .. | 1 | 2 |
| 35 | Carbon steel | Castings | SA-352 | LCC | J02505 | .. | .. | 1 | 2 |
| 36 | Carbon steel | Castings | SA-487 | 16 | .. | A | .. | 1 | 2 |
| 37 | Carbon steel | Cast pipe | SA-660 | WCC | J02505 | .. | .. | 1 | 2 |
| 38 | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. | .. |
| 39 | Carbon steel | Bar | SA-696 | C | K03200 | .. | .. | 1 | 2 |
| 40 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 2 | $4 < t \leq 6$ | 1 | 3 |
| 41 | Carbon steel | Plate | SA-537 | .. | K12437 | 1 | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 2 |
| 42 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-671 | CD70 | K12437 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 2 |
| 43 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-672 | D70 | K12437 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 2 |
| 44 | Carbon steel | Wld. pipe | SA-691 | CMSH-70 | K12437 | .. | $\leq 2\frac{1}{2}$ | 1 | 2 |

Anexo S. Máximos esfuerzos permisibles para materiales ferrosos Tabla 2A

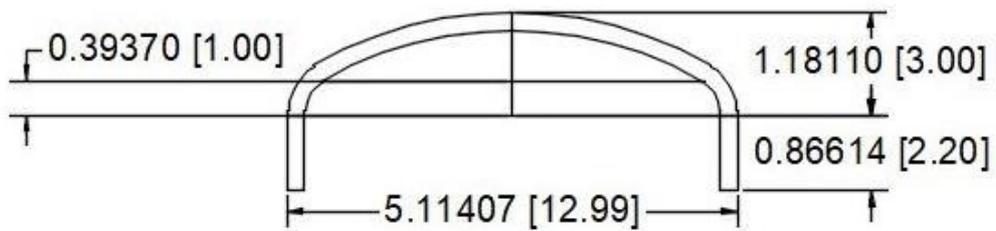
Table 2A (Cont'd)
Section III, Division 1, Classes 1 and MC, and Section III, Division 3, Classes TC and SC
Design Stress Intensity Values S_m for Ferrous Materials

| Line No. | Min. Tensile Strength, ksi | Min. Yield Strength, ksi | Max. Temp. Limit (SPT = Supports Only) | External Pressure Chart No. | Notes |
|----------|----------------------------|--------------------------|--|-----------------------------|------------|
| 1 | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2 | 60 | 35 | 700 | CS-2 | E2 |
| 3 | 60 | 36 | 700 (SPT) | CS-2 | E2 |
| 4 | 60 | 37 | 700 | CS-2 | E2 |
| 5 | 60 | 37 | 700 | CS-2 | E2 |
| 6 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | -- |
| 7 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | -- |
| 8 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | -- |
| 9 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 10 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 11 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 12 | 65 | 35 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 13 | 65 | 45 | 700 | CS-2 | E2 |
| 14 | 65 | 45 | 700 | CS-2 | E2, G1, G2 |
| 15 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 16 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 17 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 18 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 19 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 20 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 21 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 22 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 23 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 24 | 70 | 36 | 700 | CS-2 | -- |
| 25 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | -- |
| 26 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | -- |
| 27 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | G1, G3 |
| 28 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 29 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | G1, G3 |
| 30 | 70 | 38 | 700 | CS-2 | G1, G4 |
| 31 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 32 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 33 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 34 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 35 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 36 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 37 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 38 | -- | -- | -- | -- | -- |
| 39 | 70 | 40 | 700 | CS-2 | E2 |
| 40 | 70 | 46 | 700 | CS-3 | E2 |
| 41 | 70 | 50 | 700 | CS-3 | E2 |
| 42 | 70 | 50 | 700 | CS-3 | E2, G1, G4 |
| 43 | 70 | 50 | 700 | CS-3 | E2, G1, G4 |
| 44 | 70 | 50 | 700 | CS-3 | E2, G1, G4 |

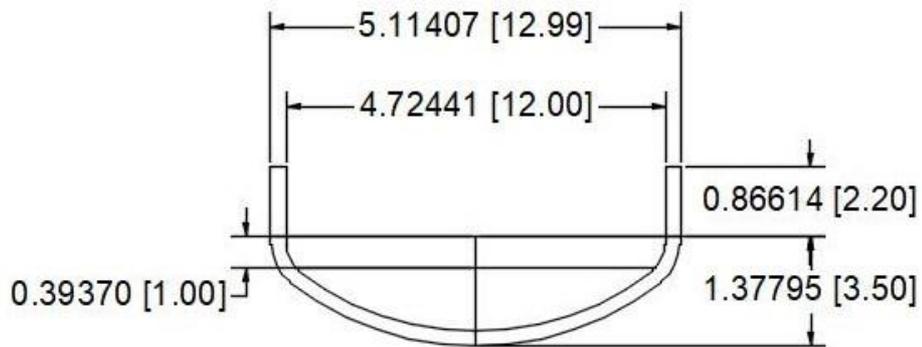
Anexo T. Diagramas del cuerpo del reactor



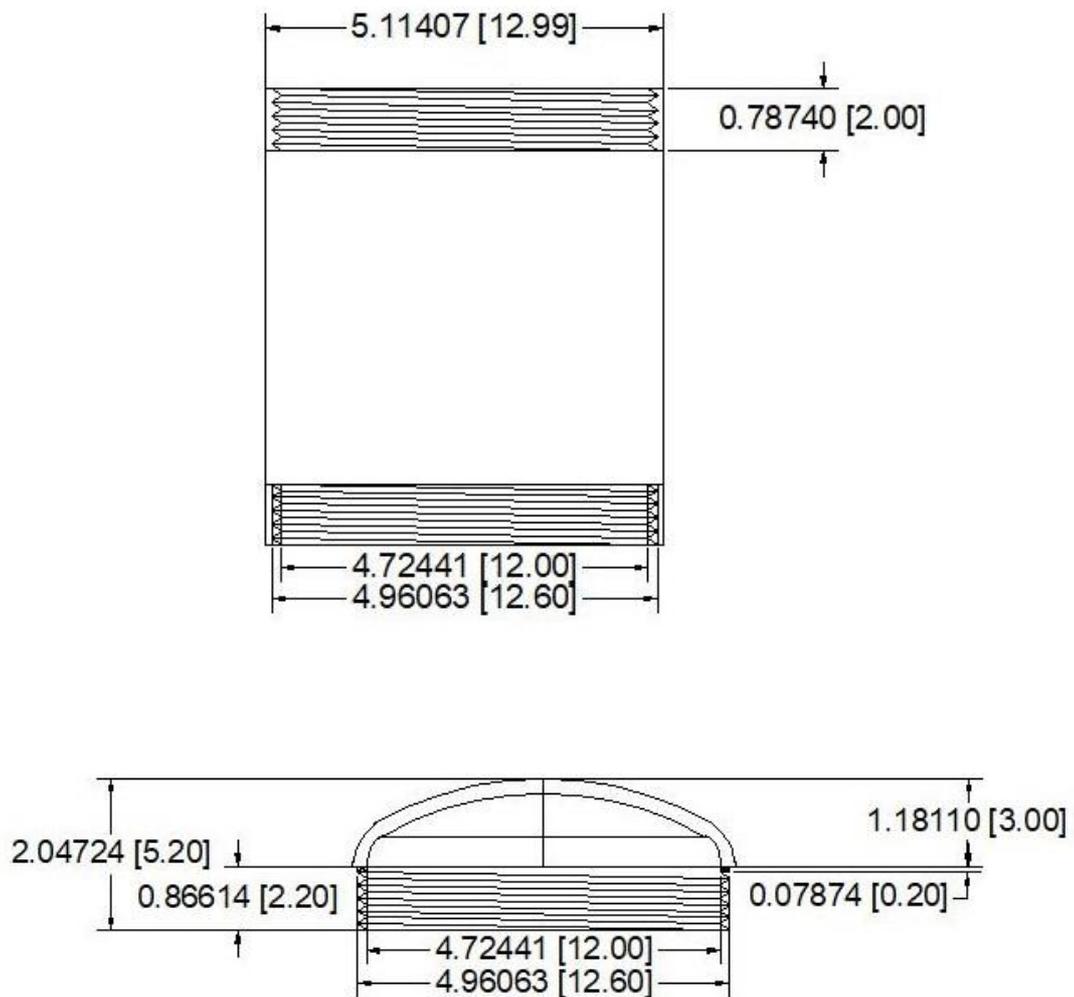
Anexo U. Diagrama de cabeza semiéptica #1

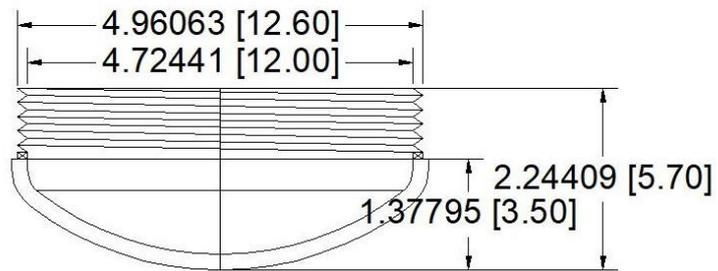


Anexo V. Diagrama de cabeza semielíptica #2

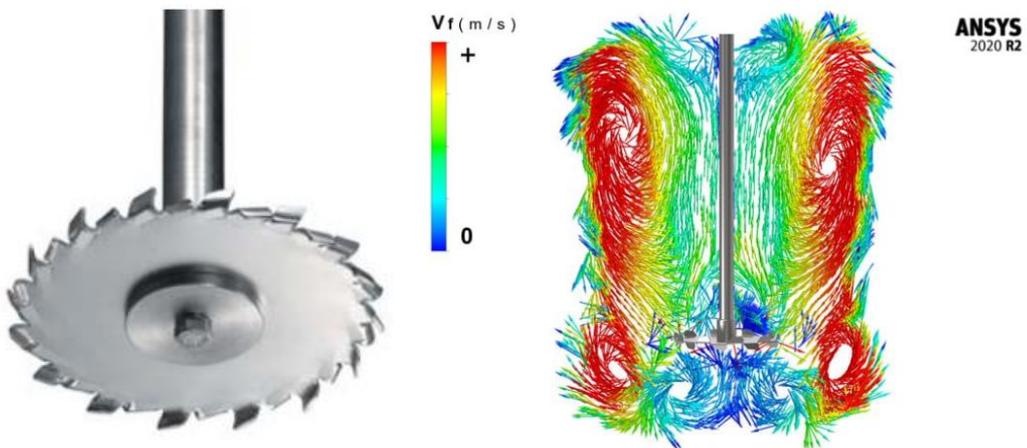


Anexo W. Diagramas de uniones roscadas en el cuerpo





Anexo X. Disco de agitador de fluido y dirección de movimiento



Anexo Y. Agitador de fluidos



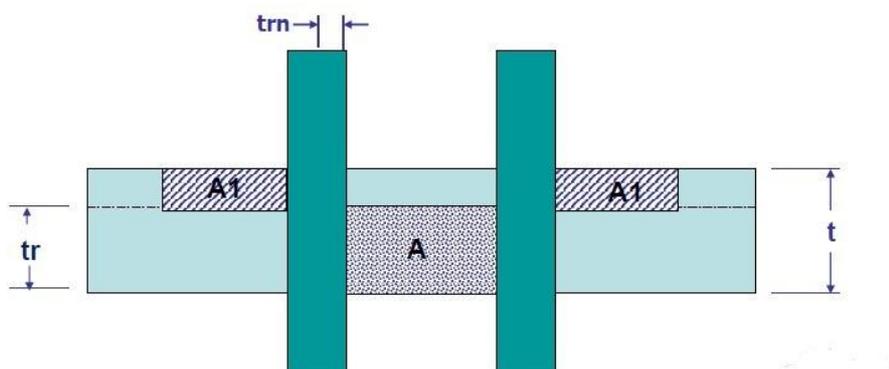
Anexo Z. Recipiente de acero inoxidable para muestras



Anexo AA. Resistencia calefactora



Anexo BB. Diagrama de aberturas en recipientes a presión



Anexo CC. boquilla de acero inoxidable clase 3000



Anexo DD. Termómetro de autoclave



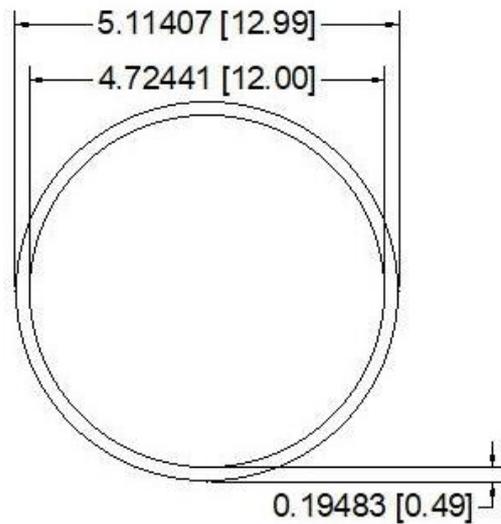
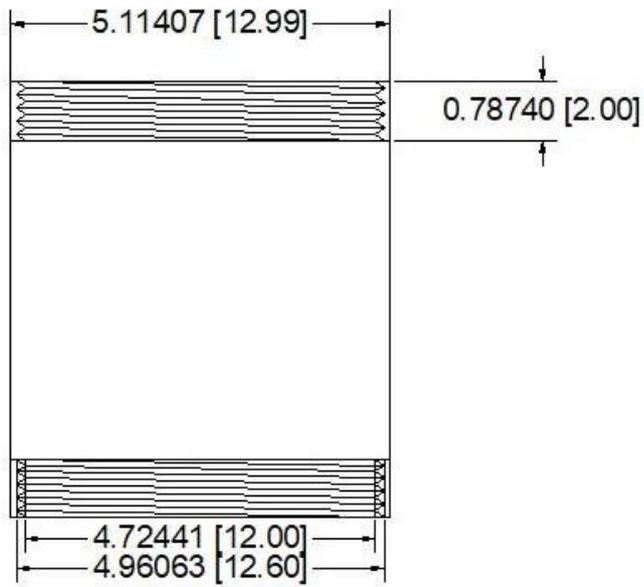
Anexo EE. Manómetro de autoclave



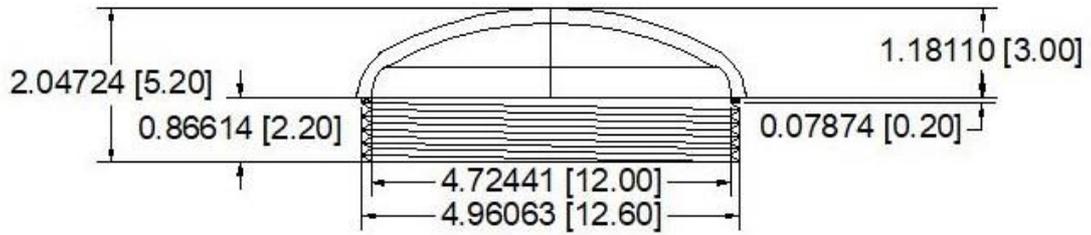
Anexo FF. Sellos de Nitrilo



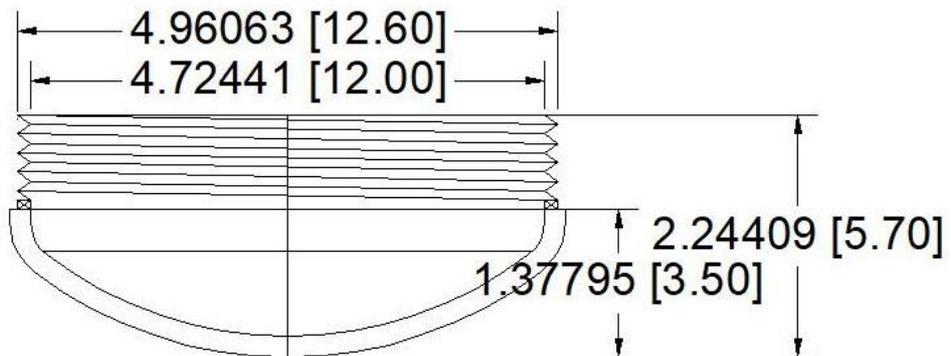
Anexo GG. Planos del cuerpo del reactor



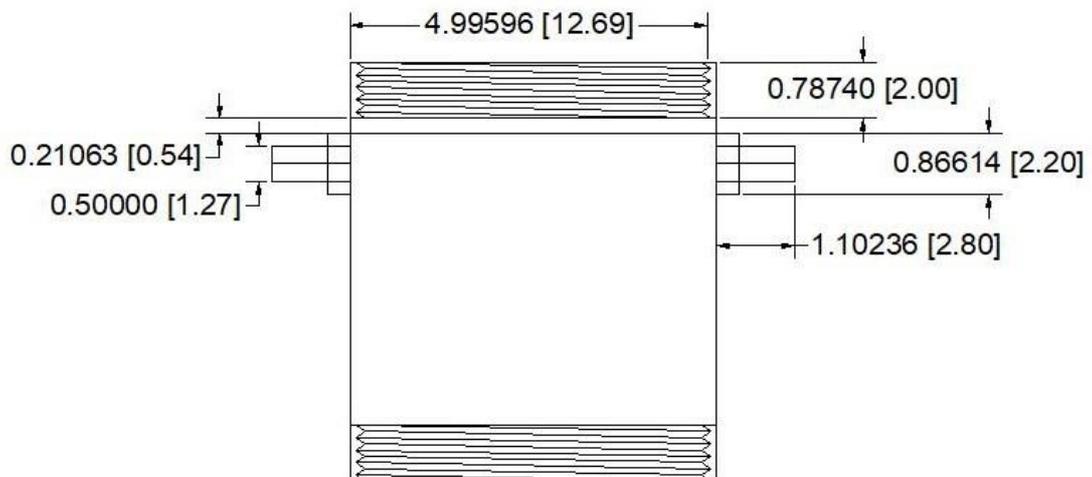
Anexo HH. Planos de cabeza semielíptica #1



Anexo II. Planos de cabeza semielíptica #2



Anexo JJ. Planos de localización de boquillas



Anexo KK. Planos de localización de soportes

