



CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

Proyecto Industrial Terminal

Conceptualización y diseño de una cámara a presión aplicando el código ASME y el software ANSYS para un permeámetro

Para obtener la especialidad de
“Tecnólogo en mecatrónica”

PRESENTA:

ERIK ARMANDO PRIETO SERRATOS

006947

TUTOR ACADÉMICO Y DE PLANTA:
DR. JOSÉ ALFREDO MANZO PRECIADO

Santiago de Querétaro, Qro. agosto 2012



Índice

Resumen	3
1. Introducción	4
1.1. Justificación	4
1.2. Objetivo	5
2. Antecedentes	5
2.1. Petróleo	5
2.2. La industria petrolera	6
2.3. Métodos de extracción petrolera	7
2.3.1. Surgencia natural	7
2.3.2. Surgencia artificial	8
2.4. Otros métodos de extracción de petróleo	9
2.5. Condiciones de un yacimiento	10
2.6. Permámetro	10
3. Cálculos usando código ASME	10
3.1. Diseño de contenedor	10
3.2. Diseño de contenedor bajo la norma ASME	11
3.3. Diseño de tapas bajo la norma ASME	14
3.3.1. Tapas planas	14
3.3.2. Tapa plana con ceja	14
3.3.3. Tapas únicamente abombadas	14
3.3.4. Tapas abombadas con ceja invertida	15
3.3.5. Tapas toriesféricas	15
3.3.6. Tapas semielípticas	15
3.3.7. Tapas semiesféricas	16
3.3.8. Tapas 80:10	16
3.3.9. Tapas cónicas	17
3.3.10. Tapas toricónicas	17
3.4. Cálculo de tapas	18
3.4.1. Cálculos para tapa semiesférica	18
3.4.2. Cálculos para tapa toriesférica	20
3.4.3. Selección de tapa.	21
3.4.4. Programa en LabView	21
4. Diseño en NX y análisis en ANSYS	23
4.1. Diseños en NX	23
4.1.1. Cilindro	23
4.1.2. Tapa	23
4.1.3. Permeámetro	24
4.2. Pre-Proceso en ANSYS	25
4.3. Solución	25

4.4. Resultados Pos-Proceso	26
4.4.1. Resultados Tapa	26
4.4.2. Resultados Cilindro	28
4.4.3. Resultados Permeámetro completo	30
5. Análisis de resultados	31
6. Conclusiones	32
7. Agradecimientos.	32

Índice de figuras

1. Petróleo	6
2. Típico yacimiento de petróleo	6
3. Suministro de energía primaria en 2009	7
4. Recuperación asistida por inyección.	8
5. Recuperación asistida por inyección de CO_2	9
6. Extracción mediante bombas.	9
7. Permeámetro.	11
8. Espesor de Pared	13
9. Tapa plana	14
10. Tapa plana con ceja	14
11. Tapa únicamente abombada	15
12. Tapa abombada con ceja invertida	15
13. Tapa toriesférica	15
14. Tapa semielíptica	16
15. Tapa semiesférica	16
16. Tapa 80:10	17
17. Tapa cónica	17
18. Tapa toricónica	18
19. Tapa semiesférica	18
20. Tapa semiesférica	20
21. Programa en labview para el cálculo de espesores. tapa y contenedor.	22
22. Cilindro con soportes	23
23. Tapa semiesférica NX	24
24. Permeámetro NX	24
25. Resultados de tapa con $P_T = 3500psi$	26
26. Resultados de tapa con $P_H = 5250psi$	27
27. Resultados de cilindro con $P_T = 3500psi$	28
28. Resultados de cilindro con $P_T = 5250psi$	29
29. Resultados de permeámetro completo con $P_T = 3500psi$	30
30. Resultados de permeámetro completo con $P_H = 5250psi$	31

Índice de tablas

1. Factor de seguridad en diseños	31
---	----

Resumen

Se presenta el diseño de un contenedor que funcionará como permeámetro, para realizar pruebas en rocas extraídas de pozos y yacimientos de petróleo. La principal motivación para este trabajo es que en la actualidad existen pozos productores de petróleo que están produciendo desde la década de los treinta y actualmente algunos ya tienen un factor de producción muy bajo, debido a eso, el FONDO CONACYT-SENER HIDROCARBUROS lanzó una convocatoria con diferentes tipos de proyecto con el objetivo de incrementar el factor de producción de dichos pozos, CIDESI participó en el consorcio conformado por el Instituto Politécnico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México y algunas empresas más, en el Proyecto denominado “Proceso de Recuperación Mejorada con la Tecnología de Inyección de Químicos” al cuál pertenece el proyecto de este permeámetro.

Se presentan además los diseños del contenedor en CAD, basados en cálculos de la norma ASME y los análisis realizados con el software ANSYS, para los esfuerzos máximos. obteniendo factores de seguridad apropiados para este desarrollo tecnológico.

1. Introducción

Este trabajo se presenta como parte del Proyecto Industrial Terminal de la Especialidad de Tecnólogo en Mecatrónica, la cual es impartida en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Este proyecto tiene como finalidad que el alumno ponga en práctica los conocimientos adquiridos durante la especialidad, integrándolos en un proyecto de la elección del estudiante.

En este caso el proyecto constituye una propuesta para la medición de permeabilidad en rocas que se encuentran en yacimientos de petróleo, para conocer la facilidad con la cual se puede extraer crudo con la ayuda de químicos y una bomba. Esto para caracterizar los efectos de los productos químicos inyectados en los pozos petroleros de baja producción.

En este trabajo se presenta el cálculo para el diseño del contenedor (el permeámetro) basado en la norma para el diseño de contenedores de la ASME¹, dividido en dos partes fundamentales, el cilindro y la tapa, este contenedor deberá estar diseñado para resistir una presión semejante a la que se encuentra en los yacimientos petroleros (alrededor de 3500 *psi*), éste diseño se realiza con la norma ASME, para tener un contenedor que cumpla con las normas de seguridad para un buen funcionamiento y con las características para soportar las presiones a las que se someterá el contenedor.

Para la sección dos se presenta un breve resumen respecto a los yacimientos petroleros y los diversos métodos para extraer el crudo, así como una breve distinción entre los tipos de permeámetros que existen. Se presenta además la descripción teórica del permeámetro a construir, incluyendo las medidas que se propusieron para comenzar el trabajo.

En la sección tres se presenta el diseño de las piezas basados en las ecuaciones de la norma ASME, tanto para el cilindro como para la tapas, además se hace una breve explicación de los tipos de tapas, concluyendo esta sección se agrega una pequeña discusión acerca de la elección del tipo de tapa, así como el programa diseñado en LabView para el calculo de los espesores.

En la sección cuatro se muestra el análisis realizado con el software ANSYS, además de que se presentan los diseños finales de las partes. Se añaden las partes más importantes del análisis, el pre-proceso, la solución y los resultados.

Finalmente en la última sección se muestran las conclusiones del presente trabajo.

1.1. Justificación

En la actualidad existen pozos productores de petróleo que están produciendo desde la década de los treinta y actualmente algunos ya tienen un factor de producción muy bajo, en base a esta necesidad el FONDO CONACYT-SENER HIDROCARBUROS lanzó una convocatoria con diferentes tipos de proyecto con el objetivo de incrementar el factor de producción de dichos pozos, CIDESI participó en el consorcio conformado por el Instituto Politécnico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México y algunas empresas más, en el Proyecto denominado “Proceso de Recuperación Mejorada con la Tecnología de Inyección de Químicos”. Por este motivo se requiere de diferentes instrumentos

¹ ASME: American Society of Mechanical Engineers.

para probar el funcionamiento de esta tecnología y uno de estos instrumentos necesarios es la fabricación de un permeámetro.

Para la fabricación de un permeámetro (para obtener el valor de la permeabilidad en las rocas extraídas de los pozos petroleros) que apoye a la verificación del proceso de inyección de químicos. Por tal motivo es necesario fabricar un contenedor que sea expuesto a una presión interna de 3500Lbs/plg^2 , esto para simular la presión real en el yacimiento del pozo petrolero.

1.2. Objetivo

El objetivo general de este trabajo es el desarrollo de una cámara de presión positiva para 3500psi para realizar pruebas de permeabilidad de aceites de pozos petroleros.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Diseñar bajo norma el contenedor del permeámetro.
- Corroborar el diseño por medio de la simulación en el software ANSYS.

2. Antecedentes

Para comprender mejor la motivación de este proyecto se incluye una breve explicación de qué es el petróleo y las diversas maneras de extraerlo. Asimismo, se describen brevemente los tipos de permeámetros.

2.1. Petróleo

El petróleo es una mezcla homogénea de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. También es conocido como crudo. La palabra petróleo viene del latín *petroleum* (aceite de piedra) y este del griego *πετρέλαιον* (petrelaion) con igual significado. El petróleo brotaba de los esquistos rocosos impregnados presentes en algunas áreas del Medio Oriente, de ahí su nombre. El petróleo se presenta en la naturaleza en los tres estados de la materia: El sólido (betún natural), el líquido (crudo) y el gaseoso (gas natural).

Este combustible tiene un origen fósil, gracias a la transformación de materia orgánica la cual fue depositada en grandes cantidades en fondos anóxicos² de mares o zonas lacustres hace aproximadamente 430 millones de años, estos fueron posteriormente enterrados bajo diversas y pesadas capas de sedimentos. La transformación química debida al calor y a la presión ocurridos durante la diagénesis³ produce, en etapas sucesivas, desde un betún a hidrocarburos cada vez más ligeros. Estos productos ascienden hacia la superficie, por su menor densidad, gracias a la porosidad de las rocas sedimentarias. Cuando se dan las circunstancias geológicas que impiden dicho ascenso (trampas petrolíferas como rocas impermeables, etc.) se forman entonces los yacimientos petrolíferos. Estos yacimientos

²de Anoxia: Falta casi total de oxígeno en la sangre o en tejidos corporales.

³La diagénesis es el proceso de formación de una roca a partir de sedimentos sueltos que sufren un proceso de compactación y cementación.

se ubican en el subsuelo, a diferentes profundidades (llegando hasta 6 000 m). Al fondo de los yacimientos se encuentra agua, por debajo de las mezclas de hidrocarburos pastosos y líquidos (que son menos pesadas que el agua) y en la parte más alta del depósito se ubican los hidrocarburos en estado gaseoso. En algunos yacimientos se encuentran pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno y oxígeno. [3].

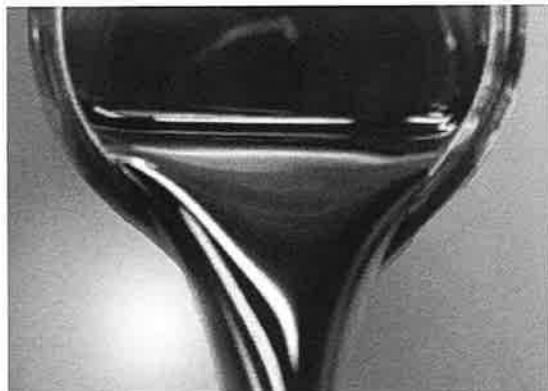


Figura 1: Petróleo

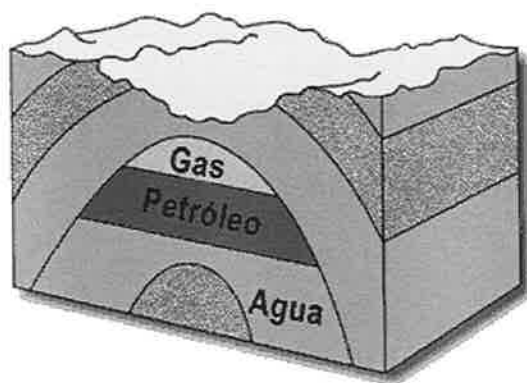


Figura 2: Típico yacimiento de petróleo

006947

2.2. La industria petrolera

La industria petrolera que se vio engrandecida durante la revolución industrial cuando se descubrió que el queroseno podía extraerse del petróleo y usarse como combustible. El petróleo ha tenido muchos y muy diversos cambios a lo largo de los años y se tiene como fuente principal de energía en el mundo. Según un reporte de la Agencia Internacional de Energía (AIE), en 2009 el total de suministro de energía primaria en el mundo fue de 12150 Mtep⁴, cantidad equivalente a 1.413×10^{11}

⁴Millones de toneladas de equivalente en petróleo.

MWh. Los combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) representan el 80 % (Figura 3)[1], lo cual nos habla de la importancia de los combustibles fósiles en el suministro de energía mundial y en este caso nacional.

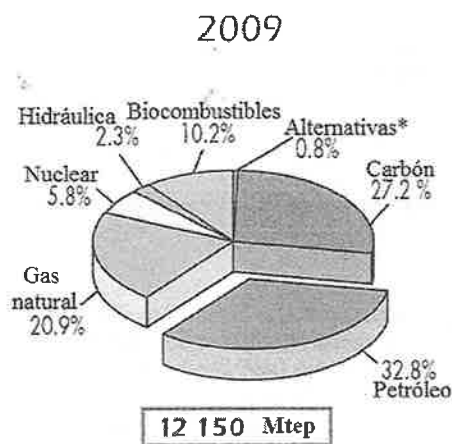


Figura 3: Suministro de energía primaria en 2009

En nuestro país las reservas probadas de hidrocarburos, estimadas por PEMEX, son de aproximadamente 13.81 miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente, esto al 1 de enero del 2012, lo cual corresponde a una vida promedio⁵ de 10.2 años[2]. Esta clase de datos nos muestra la importancia de una profunda investigación en el sector de la extracción de petróleo. Existen diversos métodos de extracción de petróleo que han resultado benéficas para esta industria, pero se requiere hacer más investigación para poder realizar una mejor y mayor extracción de petróleo.

2.3. Métodos de extracción petrolera

Inicialmente debido a las presiones que se encuentran en los yacimientos, el petróleo brota de una manera natural, con lo cual sólo se conectan oleoductos para realizarle tratamientos. Si el petróleo no fluye naturalmente o deja de fluir, se aplican diferentes métodos para la *surgencia* del crudo, de esta manera se tienen dos tipos de *surgencia*, natural y artificial.

2.3.1. Surgencia natural

Tres son las causas que pueden originar la *surgencia* natural.

- La presión del agua que está debajo al transmitirse al petróleo, le provoca subir. Es la más efectiva.
- La presión del gas libre que cubre al petróleo se transmite a éste y lo impulsa en su ascenso.

⁵Vida promedio se refiere a la relación reserva-producción.

- Cuando no existe gas libre y el agua no tiene presión suficiente o tampoco existe, al disminuir la presión por la perforación del pozo, el gas disuelto en el petróleo se desprende y al expandirse lo hace surgir. Es la menos efectiva de las tres.

2.3.2. Surgencia artificial

La surgencia artificial es también conocida como *recuperación asistida*, la cual es generalmente considerada como la tercer o última etapa de la secuencia de procesamiento del petróleo. El primer paso o etapa inicial del procesamiento del petróleo comienza con el descubrimiento del yacimiento, utilizando los mismo recursos que la naturaleza provee para facilitar la extracción y la salida del crudo a la superficie (generalmente se utiliza la expansión de los componentes volátiles y/o el pumping o bombeo forzado para removerlo hacia la superficie). Cuando se produce una considerable disminución de esta energía, la producción declina y se ingresa en la etapa secundaria donde energía adicional es administrada al reservorio mediante inyección de agua. Cuando la inyección de agua deja de ser efectiva por la evaluación entre una pequeña extracción de crudo y un elevado costo de la operación, se considera de mayor provecho el tratamiento del pozo. Se inicia en este punto el tratamiento terciario o recuperación asistida del pozo de petróleo. El pozo se encuentra en la etapa final de su historia utilizable y por lo tanto se comienza a suministrarle energía química y térmica con el fin de aprovecharlo y recuperar al máximo la producción. Así se tienen los siguientes métodos.

- Inyección
 - Inyección a presión de agua, gas (CO_2) o aire.

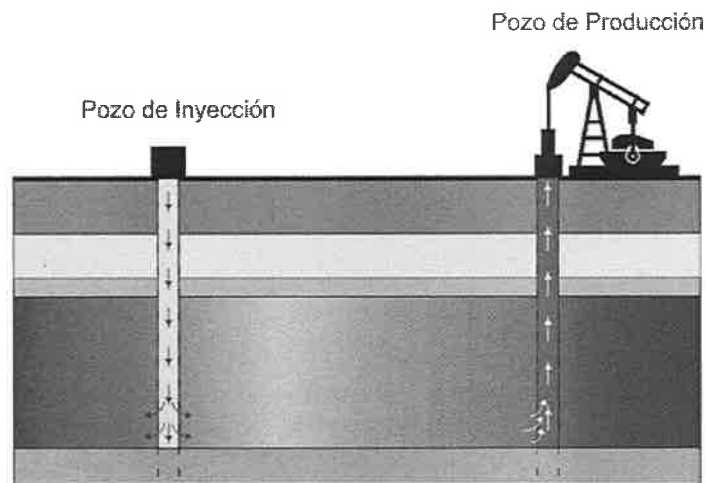


Figura 4: Recuperación asistida por inyección.

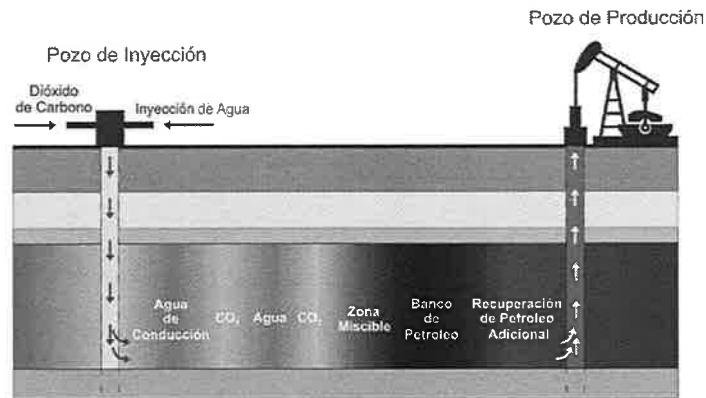


Figura 5: Recuperación asistida por inyección de CO_2 .

■ Bombeo

- Bombeo mecánico con bombas aspirantes de profundidad, accionadas por gatos de bombeo. Por lo general se efectúa el bombeo simultáneo de una serie de pozos vecinos, conectando sus gatos de bombeo mediante largas varillas de acero, a un excéntrico que se hace girar en una estación central.
- Bombeo hidráulico, inyectando petróleo a presión que regresa a la superficie bombeado; y bombeo centrífugo, con bombas centrífugas de varias etapas, ubicadas cerca del fondo del pozo y accionadas por motores eléctricos controlados desde la superficie.

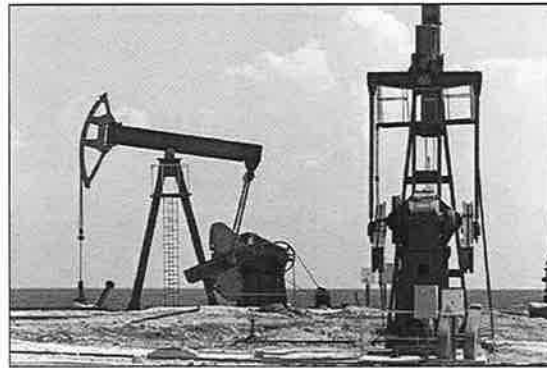


Figura 6: Extracción mediante bombas.

2.4. Otros métodos de extracción de petróleo

Dentro de las ideas para la extracción de crudo en México se encuentra una muy interesante que resulta ser la motivación para este trabajo, y se encuentra resumida de la siguiente manera. Inyectando una sustancia química en el yacimiento del petróleo se busca que este reaccione con el petróleo

adherido a la roca, para después succionar dicho petróleo con una bomba y de esta manera aprovecha lo más posible el pozo petrolero. Para saber si este procedimiento es viable es necesario hacer un estudio de permeabilidad de la roca en los pozos petroleros, para ello se busca diseñar un permeámetro que asemeje las condiciones de los pozos petroleros.

2.5. Condiciones de un yacimiento

Existen ciertas características en un pozo petrolero que se desean reproducir dentro del permeámetro. Las dos más importantes son las siguientes.

- **Presión:** Los pozos petroleros tienen presiones de hasta 13000 *psi*, según su profundidad. Se estudiará un caso donde la presión está alrededor de 3500 *psi*.
- **Temperatura:** La temperatura promedio en un pozo de petróleo oscila entre los 100°C y 150°C.

2.6. Permeámetro

Aparato sirve para medir la permeabilidad de los materiales ante el paso de fluidos a través de ellos. Es un método directo de medir el coeficiente de permeabilidad. Existen dos tipos de permeámetros: pasivos y activos.

- **Permeámetro de caudal variable.** En este método se mide el caudal de agua que atraviesa una muestra de suelo saturada colocada en un dispositivo llamado permeámetro. El volumen de agua se mide registrando el nivel de agua en un tubo alimentador conectado al aparato.
- **Permeámetro de caudal constante.** En este método se mantiene constante el nivel de agua en el tubo conectado al permeámetro, mientras en el otro lado de la muestra el agua que sale es recolectada para medir su volumen.
En este método el caudal de agua debe ser constante en el tiempo debe ser igual al caudal de agua que sale de la muestra.

3. Cálculos usando código ASME

En esta sección se describe detalladamente la forma en la que se calculó el grosor de pared del contenedor basado en la norma ASME de contenedores a presión.

3.1. Diseño de contenedor

El diseño del contenedor se realizó basado en la norma ASME para el diseño de contenedores a presión [4]. El diseño del contenedor externo, está basado en requerimientos iniciales, como el diámetro, el largo, el material, entre otras cosas. A continuación se muestra un diseño general del contenedor.

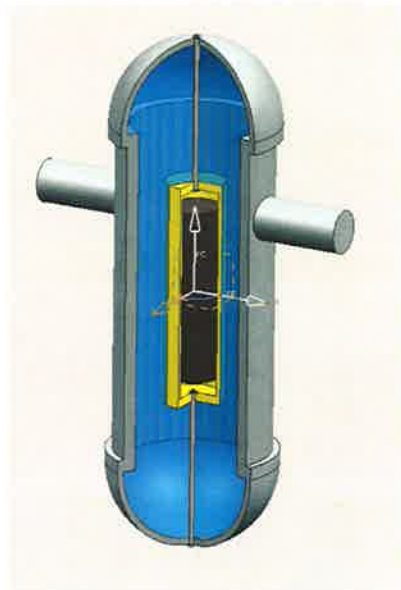


Figura 7: Permeámetro.

En la figura se muestra el diseño del contenedor, donde se ve en negro la piedra que será puesta a prueba por el perméámetro, en amarillo el encaquetado de la piedra, después se muestra el contenedor que será sometido a presión interna, en este caso representado por el líquido azul, este contenedor contará con sus tapas roscadas y soportes, además de tubería *Tubing* que puede trabajar con recipientes a presión cuando el flujo es relativamente bajo.

3.2. Diseño de contenedor bajo la norma ASME

El contenedor (la parte exterior) del permeámetro tiene que cumplir con ciertas condiciones iniciales, las características que se seleccionaron son las siguientes.

- Diámetro interno $\approx 6in$.
- Longitud de contenedor = $60cm \approx 23.62in$.
- Presión interna de trabajo $P_T = 3500psi$
- Presión hidrostática $P_H = 1.5P_T = 5250psi$.

Con la información indicada anteriormente, se comenzó a revisar la norma para encontrar las expresiones que permitieran obtener un espesor de pared para depósitos bajo presión interna. Después de la búsqueda se encontró la sección UG-27 perteneciente al tomo VIII — división 1— , en la que se explica el uso de la ecuación (8) para un esfuerzo circunferencial en un contenedor bajo presión interna.

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

donde:

t = Espesor de pared.

P = Presión hidrostática del contenedor.

R = Radio interno del contenedor.

S = Límite elástico del material.

E = Eficiencia de la junta.

Para poder usar esta ecuación hace falta el valor del esfuerzo máximo definido por el material. La norma cuenta con una sección de materiales que pueden ser usados para aplicaciones de la misma, se indica en que secciones se puede usar y en que secciones no se puede usar, además de proporcionar datos como el módulo de Young, el límite de fluencia o la presentación del material ya sea en barra, placa, tubo, etc.

Después de realizar una búsqueda dentro de la sección IID SIID subparte 1, se encontró el material con clave UNS: N06625, identificado también como SB-705, este material tiene como es conocido como B 444 dentro de la norma ASTM. El material ASTM B 444. Tiene las siguientes propiedades.

- Módulo de Young = $120kpsi \approx 8.2737 \times 10^8 Pa$.
- Límite de fluencia = $60kpsi \approx 4.1368 \times 10^8 Pa$.

De esta manera se completa la información requerida para la ecuación, entonces se procede a sustituir los valores en la formula, la aplicación de la fórmula y las operaciones numéricas se muestran en la siguiente memoria de cálculos.

MEMORIA DE CÁLCULOS		
Unidades: Sistema Inglés	Cálculo de espesor de pared por presión interna	CIDESI
Realizó: Erik Armando Prieto Serratos		Especialidad de tecnólogo en mecatrónica
Fecha: 2012/08/08		No. de Ecuación
<p>Por medio de la siguiente ecuación se obtiene el espesor del cuerpo</p> $t = \frac{PR}{SE-0.6P}$ <p>Debemos ahora incluir los datos de cálculo para este espesor.</p> <p>Datos</p> <p>$t =$ Incognita $P = 5250$ Psi. $R = 3$ in $S = 60$ kpsi para el acero ASTM B 444 $E = .5$</p> <p>Operación</p> $t = \frac{PR}{SE-0.6P} = \frac{(5250psi)(3in)}{(60000psi)(.5)-0.6(5250psi)}$		(1)
		Resultados
		<p>Esesor en pulgadas $t = 0.5865in$ Esesor en milímetros $\approx 14.89mm$ aproximando a la medida estándar siguiente $t_{min} \approx 5/8 in$</p>



Figura 8: Espesor de Pared

Teniendo el valor del espesor de la pared del contenedor $\approx 14.89mm$, se procedió a buscar los tipos de tapas adecuados según la norma ASME para contenedores con presión interna.

3.3. Diseño de tapas bajo la norma ASME

Antes de poder hacer algún cálculo acerca de las tapas es necesario conocer que tipos de tapas existen. Para “cerrar” recipientes cilíndricos, existen varios tipos de tapas, entre otras tenemos las siguientes: Tapas planas, plana con ceja, únicamente abombadas, abombadas con ceja invertida, torisférica, semielíptica, semiesférica, tapas 80-10, tapas cónicas, toricónicas, etc. Las características principales y usos de estas tapas son:

3.3.1. Tapas planas

Se utilizan para “cerrar” recipientes sujetos a presión atmosférica generalmente, aunque en algunos casos se usan también en recipientes sujetos a presión. Su costo entre las tapas es el más bajo, se utilizan también como fondos de tanques de almacenamiento de grandes dimensiones

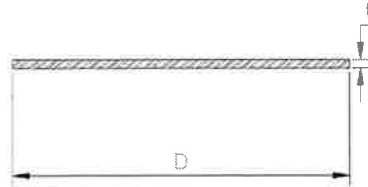


Figura 9: Tapa plana

3.3.2. Tapa plana con ceja

Al igual que las anteriores, se utilizan generalmente para presiones atmosféricas, su costo también es relativamente bajo, y tiene un límite dimensional de 6 metros de diámetro máximo.

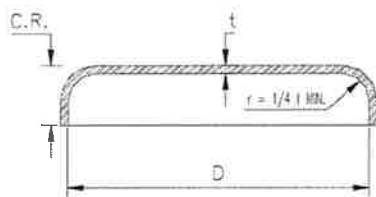


Figura 10: Tapa plana con ceja

3.3.3. Tapas únicamente abombadas

Son empleadas en recipientes a presión manométrica relativamente baja, su costo puede considerarse bajo, sin embargo, si se usan para soportar presiones relativamente altas, será necesario analizar la concentración de esfuerzos generada al efectuar un cambio brusco de dirección.

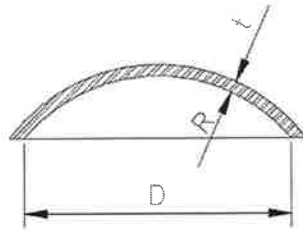


Figura 11: Tapa únicamente abombada

3.3.4. Tapas abombadas con ceja invertida

Su uso es limitado debido a su difícil fabricación, por lo que su costo es alto, siendo empleadas solamente en casos especiales.

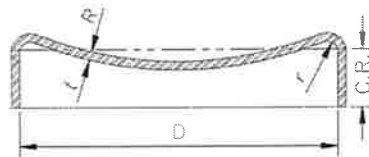


Figura 12: Tapa abombada con ceja invertida

3.3.5. Tapas toriesféricas

Son las que mayor aceptación tienen en la industria, debido a su bajo costo y a que soportan altas presiones manométricas, su característica principal es que el radio de abombado es aproximadamente igual al diámetro. Se pueden fabricar en diámetros desde 0.3 hasta 6 metros.

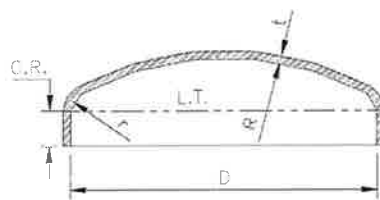


Figura 13: Tapa toriesférica

3.3.6. Tapas semielípticas

Son empleadas cuando el espesor calculado de una tapa toriesférica es relativamente alto, ya que las tapas semielípticas soportan mayores presiones que las toriesféricas. El proceso de fabricación de

estas tapas es el troquelado, su silueta describe una elipse en relación 2:1, su costo es alto y en México se fabrican hasta un diámetro máximo de 3 metros.

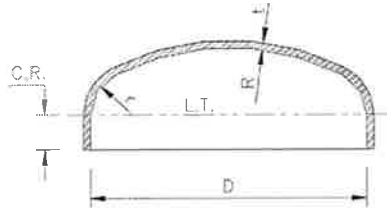


Figura 14: Tapa semielíptica

3.3.7. Tapas semiesféricas

Utilizadas exclusivamente para soportar presiones críticas. Como su nombre lo indica, su silueta describe una media circunferencia perfecta, su costo es alto y no hay límite dimensional para su fabricación.

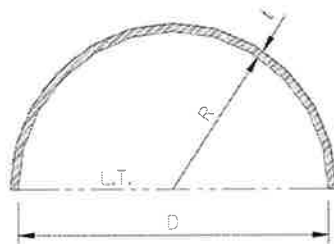


Figura 15: Tapa semiesférica

3.3.8. Tapas 80:10

Ya que en México no se cuenta con prensas lo suficientemente grandes para troquelar tapas semielípticas 2:1 de dimensiones relativamente grandes, en México se ha optado por fabricar este tipo de tapas, cuyas características principales son: El radio de abombado es de 80% del diámetro; y el radio de la esquina o radio de nudillos es igual al 10% del diámetro. Estas tapas las usamos como equivalentes a la semielíptica relación 2:1.

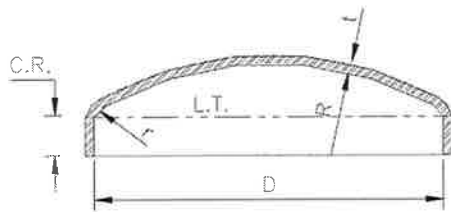


Figura 16: Tapa 80:10

3.3.9. Tapas cónicas

Se utilizan generalmente en fondos donde pudiese haber acumulación de sólidos y como transiciones en cambios de diámetro de recipientes cilíndricos. Su uso es muy común en torres fraccionadoras o de destilación, no hay límite en cuanto a dimensiones para su fabricación y su única limitación consiste en que el ángulo del vértice no deberá ser mayor de 60° . Las tapas cónicas con ángulos mayores a este, deberán ser calculadas como tapas planas. Deberá tenerse la precaución de reforzar las uniones cono-cilindro de acuerdo al procedimiento.

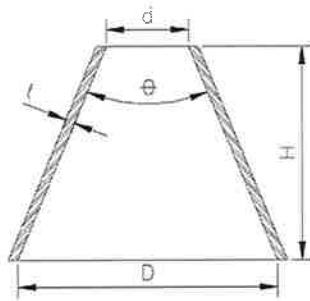


Figura 17: Tapa cónica

3.3.10. Tapas toricónicas

A diferencia de las tapas cónicas, este tipo de tapas tienen en su diámetro mayor un radio de transición que no deberá ser menor al 6% del diámetro mayor o 3 veces el espesor. Tiene las mismas restricciones que la tapa cónica a excepción de que en México no se pueden fabricar con un diámetro mayor a 6 metros.

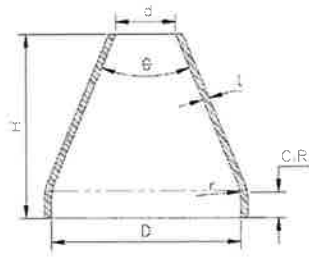


Figura 18: Tapa toricónica

3.4. Cálculo de tapas

3.4.1. Cálculos para tapa semiesférica

Para el cálculo de las tapas se recurrió a la sección UG-32 perteneciente al tomo VIII — división 1— donde se dan las ecuaciones y condiciones para el cálculo de tapas (o cabezas⁶) que cubrirán el recipiente a presión. En el apéndice “Mandatory appendix 1 supplementary Design formulas” se encuentra la siguiente figura.

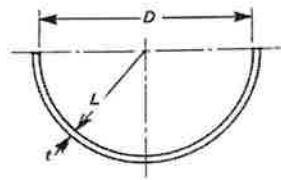


Figura 19: Tapa semiesférica

Que ejemplifica de manera muy sencilla cómo es el diseño de la tapa y que valores son los que se deben tomar para la fórmula. En esta sección se especifica que el valor de L corresponde al radio interno de la esfera, D corresponde al diámetro de la “falda de la tapa” y t es el espesor de la tapa. La ecuación (2) sirve para el cálculo de espesor.

$$t_{Tapa} = \frac{PL}{2SE - 0.2P} \quad (2)$$

donde:

t_{Tapa} = Espesor de pared de la tapa.

P = Presión hidrostática interna del contenedor.

L = Radio interno de la esfera.

S = Límite elástico del material.

E = Eficiencia de la junta.

⁶De heads under internal pressure

Con las datos anteriores se puede obtener el espesor de la pared de las tapas.

MEMORIA DE CÁLCULOS		
Unidades: Sistema Inglés	Cálculo de espesor de pared para tapa semiesférica por presión interna	CIDESI
Realizó: Erik Armando Prieto Serratos		Especialidad de tecnólogo en mecatrónica
Fecha: 2012/08/08		No. de Ecuación
<p>Por medio de la siguiente ecuación se obtiene el espesor del cuerpo</p> $t_{Tapa} = \frac{PL}{2SE-0.2P}$ <p>Debemos ahora incluir los datos de cálculo para este espesor.</p> <p>Datos</p> <p>$t_{Tapa} =$ Incognita $P = 5250psi.$ $L = 3in$ $S = 60000psi$ para el acero ASTM B 444 $E = .5$</p> <p>Operación</p> $t_{Tapa} = \frac{PL}{2SE-0.2P} = \frac{(5250psi)(3in)}{(2)(60000psi)(.5)-0.2(5250psi)}$		(2)
		Resultados
		<p>Espesor en pulgadas $t = 0.2671in$ Espesor en milímetros $\approx 6.78mm$ aproximando a la medida estándar siguiente $t_{min} \approx 5/16 in$</p>

3.4.2. Cálculos para tapa toriesférica

También se realizó un cálculo de una tapa toriesférica, encontrando las ecuaciones en la sección UG-32 perteneciente al tomo VIII — división 1— y en el apéndice “Mandatory appendix 1 supplementary Design formulas”.

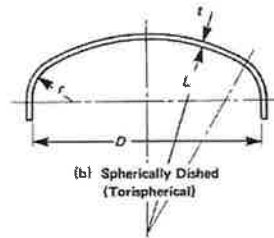


Figura 20: Tapa semiesférica

La figura anterior muestra los valores más importantes para el cálculo de tapas toriesféricas, estos valores se deben tomar en cuenta para el cálculo del espesor de la tapa según los datos con los que se disponga se utilizará una de las siguientes ecuaciones.

$$t_{Tapa} = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} \quad (3)$$

donde:

- t_{Tapa} = Espesor de pared de la tapa.
- P = Presión hidrostática interna del contenedor.
- L = Diámetro externo del contenedor.
- S = Límite elástico del material.
- E = eficiencia de la junta.

$$t_{Tapa} = \frac{PLM}{2SE - 0.2P} \quad (4)$$

donde:

- t_{Tapa} = Espesor de pared de la tapa.
- P = Presión hidrostática interna del contenedor.
- L = Diámetro externo del contenedor.
- M = Factor de corrección para el calculo según relaciones entre r y L .
- S = Límite elástico del material.
- E = eficiencia de la junta.

El resultado que se obtiene es el mismo en ambos casos. tomaremos el primero por ser más sencillo.

MEMORIA DE CÁLCULOS		
Unidades: Sistema Inglés	<i>Cálculo de espesor de pared para tapa toriesférica por presión interna</i>	CIDESI
Realizó: Erik Armando Prieto Serratos		Especialidad de tecnólogo en mecatrónica
Fecha: 2012/08/08		No. de Ecuación
<p>Por medio de la siguiente ecuación se obtiene el espesor del cuerpo</p> $t_{Tapa} = \frac{0.885PL}{SE-0.1P}$ <p>Debemos ahora incluir los datos de cálculo para este espesor.</p> <p>Datos</p> <p>t_{Tapa} = Incognita $P = 5250psi.$ $L = 3in$ $S = 60000psi$ para el acero ASTM B 444 $E = .5$</p> <p>Operación</p> $t_{Tapa} = \frac{0.885PL}{SE-0.1P} = \frac{(0.885)(5250Psi)(6in)}{(60000psi)(.5)-0.1(5250psi)}$		(3)
		Resultados
		<p>Espesor en pulgadas $t = 0.94in$ Espesor en milímetros $\approx 24.03mm$ aproximando a la medida estándar siguiente $t_{min} \approx 15/16 in$</p>

3.4.3. Selección de tapa.

Teniendo todos los cálculos anteriores se procedió a seleccionar los más aptos para el diseño del contenedor. Se descartó los cálculos obtenidos para la tapa toriesférica, primero por que el espesor de pared obtenido, resulta demasiado grande, al rededor de una pulgada. Otra limitante es la de fabricación, ya que según las indicaciones estas tapas se pueden realizar desde $0.3m$ hasta $6m$ y el diámetro que se estableció para el contenedor es de $6in \approx 15.24cm$ lo cual es más pequeño que el valor mínimo de fabricación de estas tapas.

Así la conclusión inmediata fue seleccionar la tapa semiesférica, la cual como lo indica su descripción se utiliza para presiones críticas. Es por eso que se seleccionó este tipo de tapa.

3.4.4. Programa en LabView

Se realizó un sencillo programa en LabView, el cual permitió ingresar diversos valores para cada una de las variables y observar el cambio que sufría el espesor del contenedor.

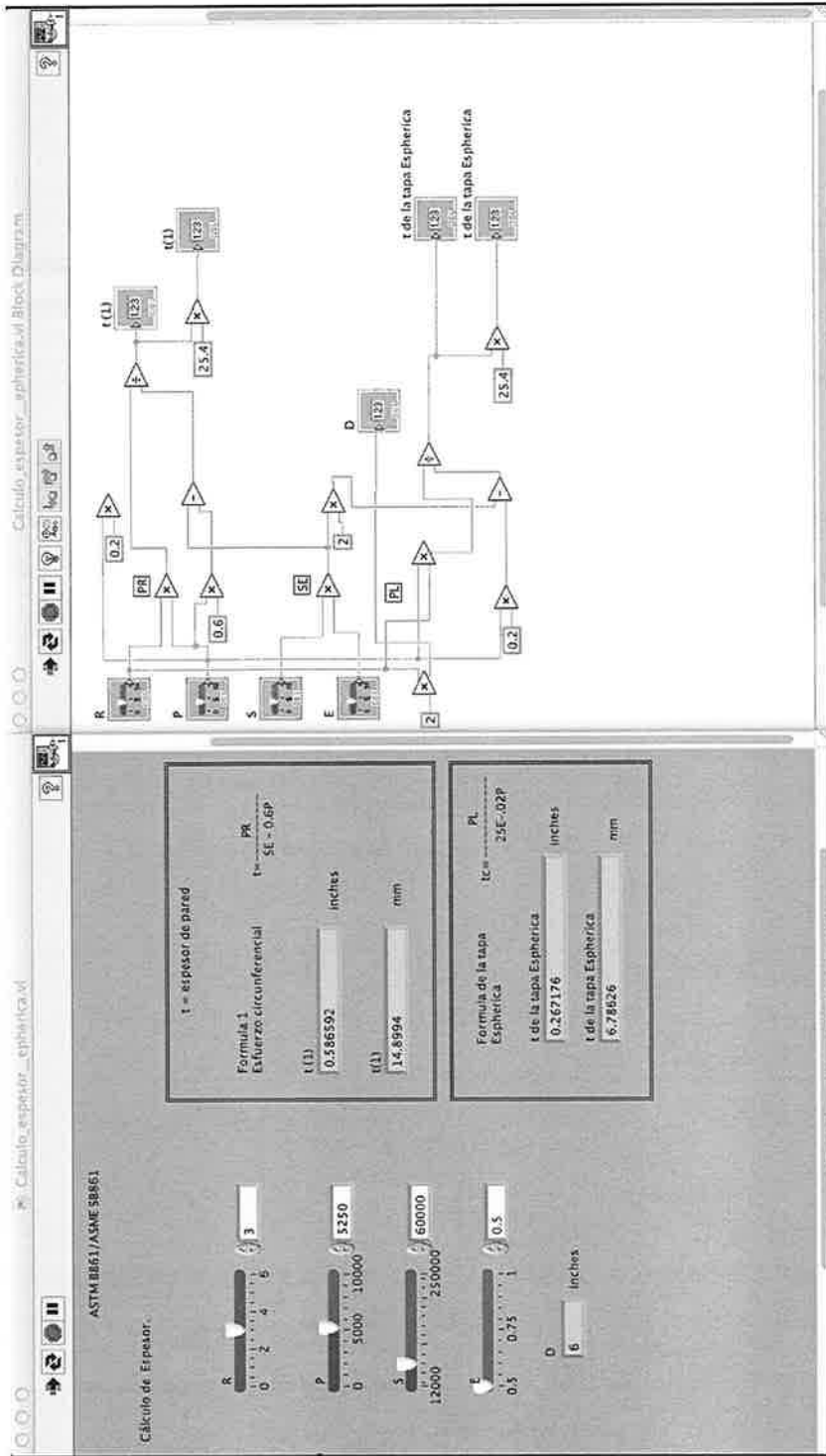


Figura 21: Programa en labview para el cálculo de espesores. tapa y contenedor.

4. Diseño en NX y análisis en ANSYS

Teniendo los cálculos de los espesores tanto de la parte cilíndrica como de la tapa, se procedió a realizar los diseños en el software NX, realizando, primero de manera independiente el diseño del cilindro y el diseño de la tapa y después realizando el diseño del prototipo completo. A continuación se muestran los diseños, del cilindro, la tapa y la unión de estos. También se detalla la configuración de parámetros necesarios para la simulación del contenedor, incluyendo el tipo de análisis, la manera en que se realizó el mallado en ANSYS, entre otros factores.

4.1. Diseños en NX

4.1.1. Cilindro

Este cilindro tiene el espesor de pared calculado mediante la fórmula 8, en la Figura 22 se muestra el diseño final, se le colocaron unos soportes a los lados para colocar las restricciones de movimiento dentro de ANSYS.

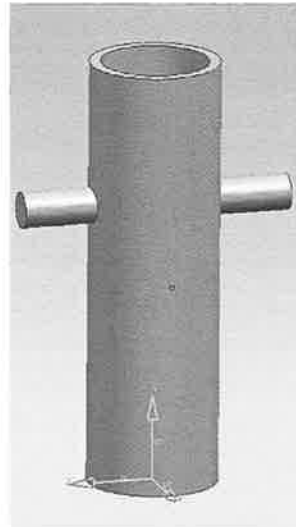


Figura 22: Cilindro con soportes

4.1.2. Tapa

Este tapa tiene el espesor de pared calculado mediante la fórmula 2, en la Figura 23 se muestra el diseño de la tapa a la cual se le realizó un barreno en la parte central del la semiesféra, esa pequeña estrucción se colocó ya que por ahí se conectará la manguera de *Tubing* para inyectar el químico a la muestra y obtener la permeabilidad de la misma.

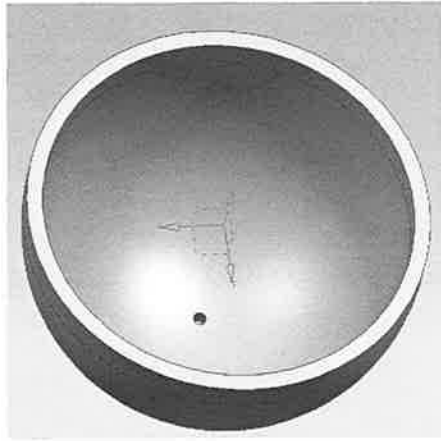


Figura 23: Tapa semiesférica NX

4.1.3. Permeámetro

A continuación se presenta el permeámetro completo, cual ya tiene las dos tapas, la superior e inferior, los soportes para poder colocar las restricciones, y un barreno en el centro (sobre el eje ZC) por el cual se pretende inyectar la presión positiva.

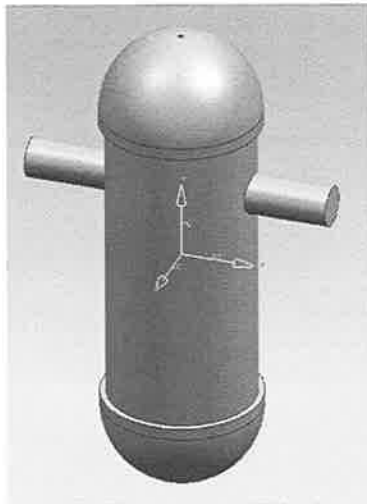


Figura 24: Permeámetro NX

Todas estas figuras se exportaron como “*Parasolid*” versión 18.0, de esta manera se podría importar a ANSYS.

4.2. Pre-Proceso en ANSYS

El software ANSYS requiere de ciertos valores preliminares para poder obtener las soluciones que se le solicitan. Para los tres casos (tapa, cilindro y permeámetro) se utilizaron las siguientes condiciones antes del procesamiento.

- Tipo de elemento: Solido con Brick8node45, 8node185.
- Propiedades del material: Estructural, lineal, elástico, isotrópico, con los siguientes valores.
 - Módulo de Young = $120kpsi \approx 8.2737 \times 10^8 Pa$.
 - Módulo de Poisson = .3
- Mallado con las siguientes características.
 - Tamaño (longitud de borde de elemento) = 0.
 - Número de elementos por división = 20.
- Restricciones
 - Cilindro.
 - Cero desplazamiento de tapa izquierda de soporte izquierdo, en el plano YZ ⁷.
 - Cero desplazamiento de tapa derecha de soporte derecho, en el eje X .
 - Presiones internas de $P_T = 3500psi$ y $P_H = 5250$ (dos casos).
 - Tapa.
 - Cero desplazamiento de parte plana inferior en el eje X .
 - Cero desplazamiento del barreno inferior en el plano YZ .
 - Presiones interiores de $P_T = 3500psi$ y $P_H = 5250$ (dos casos).
 - Permeámetro.
 - Cero desplazamiento de tapa izquierda de soporte, en el plano XY .
 - Cero desplazamiento de tapa derecha de soporte, en el eje Z .
 - Presiones interiores de $P_T = 3500psi$ y $P_H = 5250$ (dos casos).

Ya que los planos varían según la orientación que tenía el sistema referencia en el diseño original (el CAD, en este caso de NX), es importante seleccionar correctamente los planos para poder obtener los resultados correctos.

4.3. Solución

El programa *corre* la solución en función de los valores elegidos para cada sólido y las restricciones colocadas a cada uno de ellos, se debe hacer notar que esta solución puede no obtenerse si no se limita la figura en los tres ejes, ya que las puede irse a infinito sobre alguno de los ejes y de esa manera no encontrar la solución.

Restringir la figura en todos los ejes no significa restringir todas las partes de la figura, ya que lo que queremos es hacer que nuestro sólido se comporte lo más parecido a la realidad, para poder obtener resultados más cercanos a lo que sucederá.

⁷Esta visualización se realizó según la vista de la figura y la orientación del sistema de referencia como se muestra en las Figuras 22, 23 y 24

4.4. Resultados Pos-Proceso

Para cada pieza (cilindro, tapa y permeámetro) se realizaron dos corridas, una con la presión de trabajo y otra con la presión hidrostática, esto para verificar que soportara ambas. Los resultados mostrados a continuación corresponden a los esfuerzos que sufre el contenedor al aplicarle una presión positiva.

4.4.1. Resultados Tapa

En la Figura 25 se puede observar los esfuerzos que sufre la tapa al aplicarle una presión de 3500psi.

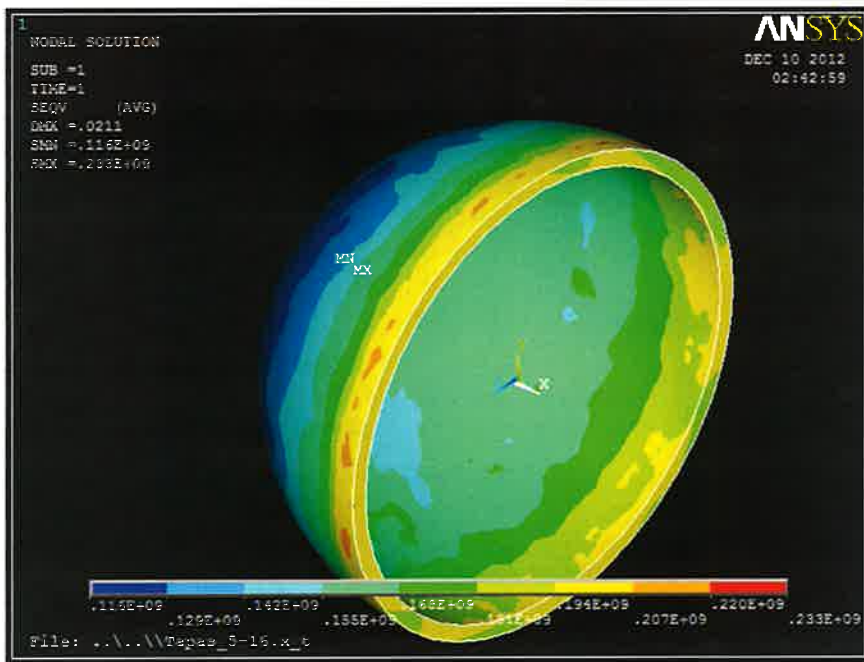


Figura 25: Resultados de tapa con $P_T = 3500psi$.

Donde el valor máximo de esfuerzo se compara contra el límite de fluencia del material, para obtener un factor de seguridad, esto es:

$$F_{Seguridad_{P_T}} = \frac{4.1368 \times 10^8}{.233 \times 10^9} = 1.775 \quad (5)$$

factor de seguridad que entra dentro de un rango aceptable, aunado a esto, los valores máximos se encuentran en la extrucción, lo cual es bastante lógico ya que al ser un punto donde se modifica radicalmente la geometría se convierte en un concentrador de esfuerzos.

En la Figura 26 se puede observar los esfuerzos que sufre la tapa al aplicarle una presión de 5250psi.

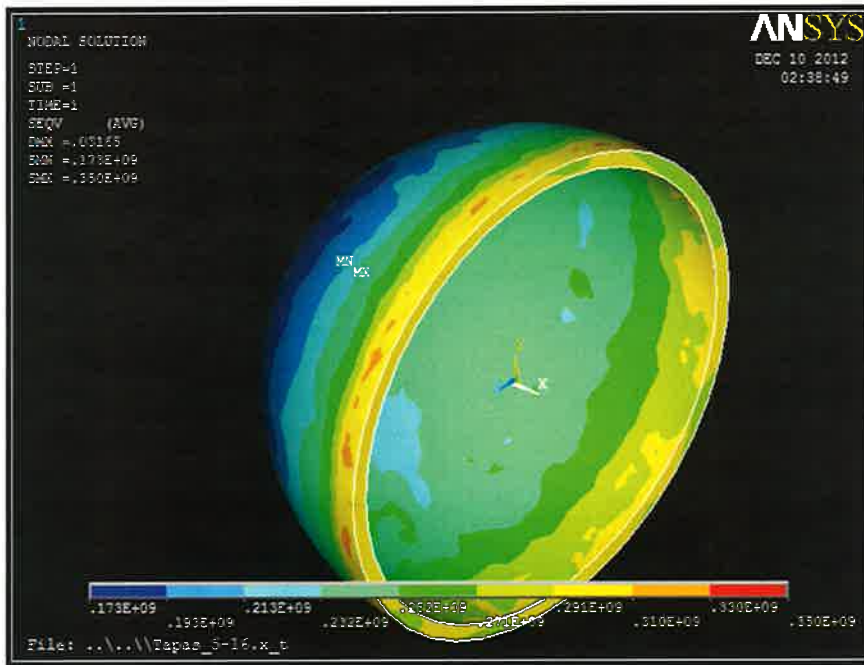


Figura 26: Resultados de tapa con $P_H = 5250\text{psi}$

Donde el valor máximo de esfuerzo se compara contra el límite de fluencia del material, para obtener un factor de seguridad, esto es.

$$F_{Seguridad_{P_H}} = \frac{4.1368 \times 10^8}{.350 \times 10^9} = 1.18 \quad (6)$$

factor de seguridad que entra dentro de un rango aceptable, nuevamente los valores máximos se encuentran en la extrucción, así que la pieza se puede considerar como segura.

4.4.2. Resultados Cilindro

En la Figura 27 se puede observar los esfuerzos que sufre el cilindro al aplicarle una presión de 3500psi.

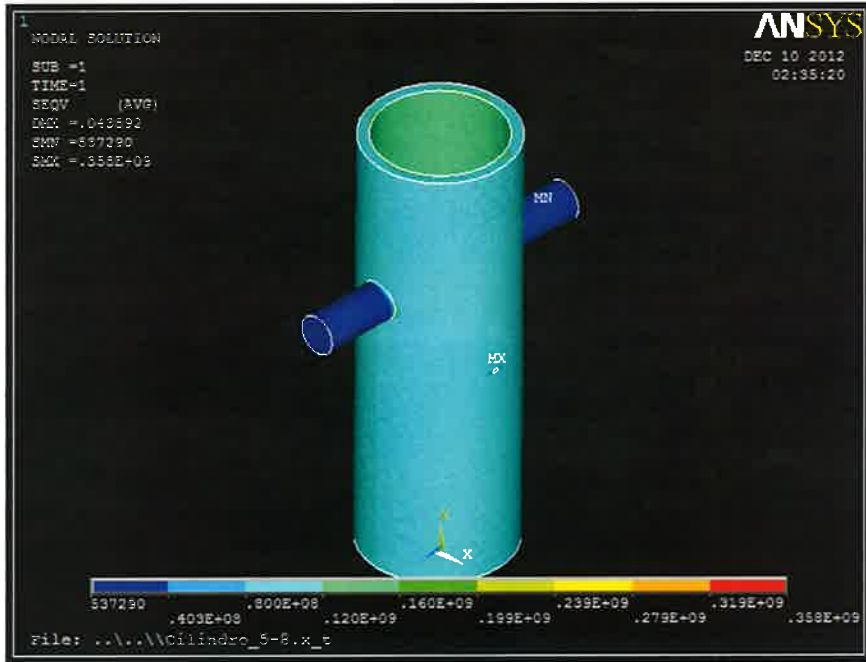


Figura 27: Resultados de cilindro con $P_T = 3500psi$.

Donde se puede observar que el máximo esfuerzo se encuentra en la extrucción central, mientras que en promedio el contenedor se mantiene por debajo de $.199 \times 10^9 Pa$, con lo que obtenemos el factor de seguridad siguiente.

$$F_{Seguridad_{P_T}} = \frac{4.1368 \times 10^8}{.199 \times 10^9} = 2.07 \quad (7)$$

En la Figura 28 se puede observar los esfuerzos que sufre el cilindro al aplicarle una presión de 5250psi.

4.4.3. Resultados Permeámetro completo

En la Figura 29 se puede observar los esfuerzos que sufre el permeámetro completo al aplicarle una presión de 3500psi.

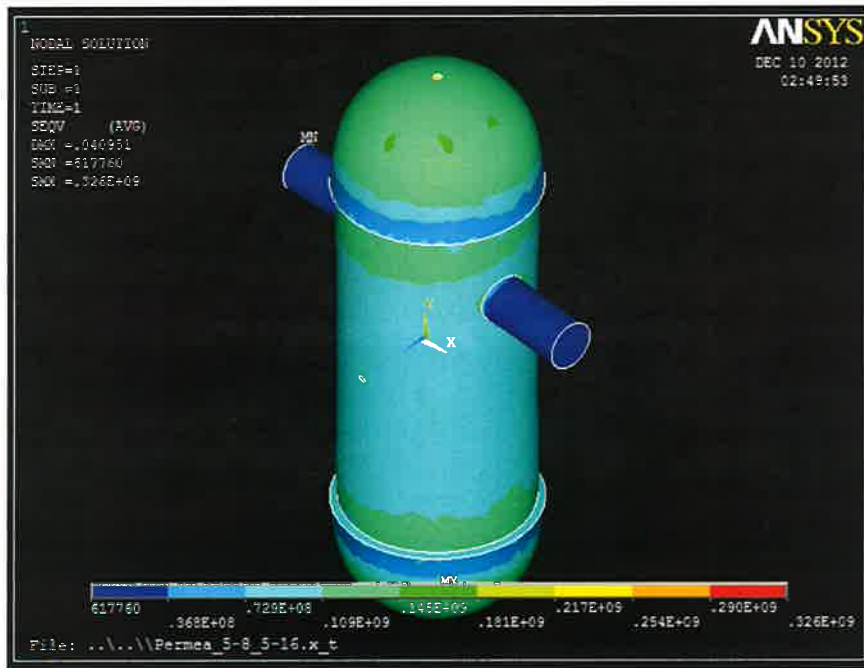


Figura 29: Resultados de permeámetro completo con $P_T = 3500psi$

Donde el valor máximo de esfuerzo se puede observar que el máximo esfuerzo se encuentra en la extrucción inferior, mientras que en promedio el contenedor se mantiene por debajo de $.217 \times 10^9 Pa$, con lo que obtenemos el factor de seguridad siguiente:

$$F_{Seguridad_{P_T}} = \frac{4.1368 \times 10^8}{.217 \times 10^9} = 1.90 \quad (9)$$

Ahora en la Figura 30 se puede observar los esfuerzos que sufre el permeámetro completo al aplicarle una presión de 5250psi.

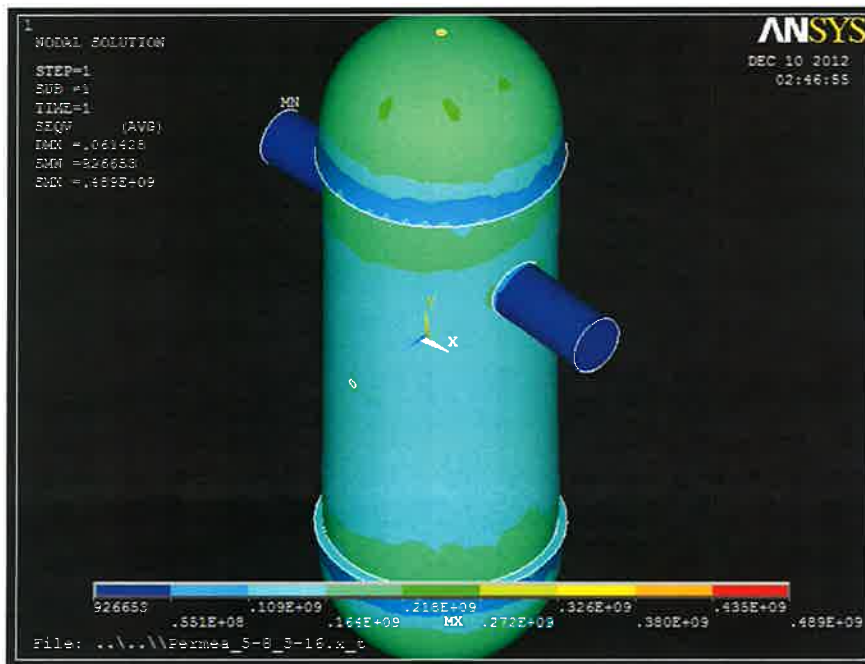


Figura 30: Resultados de permeámetro completo con $P_H = 5250\text{psi}$

Donde el máximo esfuerzo se encuentra en la extrucción inferior, mientras que en promedio el contenedor se mantiene por debajo de $.326 \times 10^9\text{Pa}$, con lo que obtenemos el factor de seguridad siguiente.

$$F_{Seguridad_{P_H}} = \frac{4.1368 \times 10^8}{.326 \times 10^9} = 1.26 \quad (10)$$

Los resultados anteriores muestran un correcto funcionamiento del cilindro con presiones más altas de las que fue diseñado, los puntos máximos corresponden a puntos singulares dentro del diseño.

5. Análisis de resultados

De los factores obtenidos se generó la tabla 1.

Tabla 1: Factor de seguridad en diseños

Diseño	$F_{Seguridad_{P_r}}$	$F_{Seguridad_{P_H}}$
Tapas	1.77	1.18
Cilindro	2.07	1.38
Permeámetro	1.9	1.26

Esta tabla muestra que los factores de seguridad, tanto para las piezas individuales como para el permeámetro completo se encuentran por encima de 1, llegando en el caso del cilindro a presión de trabajo superar el valor de 2. Esto nos habla de la seguridad que nos proporciona el haber usado el código ASME para el cálculo del espesor de pared del contenedor.

6. Conclusiones

Usando la norma ASME, se realizó el cálculo del espesor de pared de un cilindro y una tapa semiesférica que constituyen las partes fundamentales de un contenedor a presión. Para poder hacer estos cálculos de manera más eficiente se realizó un programa en LabView que permitía modificar las variables y observar al instante la variación del espesor de la pared.

Se realizaron los diseños en CAD (software NX) del cilindro, de la tapa y del contenedor como un solo cuerpo, para posteriormente exportarlos y realizar simulaciones de presión interna en ANSYS.

Se realizaron pruebas de presión positiva para el contenedor mediante el software ANSYS, el cual hace uso de elemento finito para obtener las soluciones, colocando valores y condiciones que permitieron realizar el cálculo de los esfuerzos en el contenedor.

Se obtuvieron factores de seguridad, que permiten tener certeza de que el diseño funcionará bien al aplicar la presión de trabajo necesaria.

Y finalmente el aprendizaje obtenido para el manejo de un software tan efectivo y útil que se convertirá en una herramienta en el futuro.

7. Agradecimientos.

Al Dr. José Alfredo Manzo Preciado por el apoyo para la realización de este proyecto.

Al M en I. Carlos Tovar, por los consejos y conceptos corregidos para este proyecto.

Referencias

- [1] Reyes Ochoa, Leonel “*Análisis y evaluación de parámetros característicos en la alineación de helióstatos planos para hornos solares de alto flujo radiativo*”, Tesis para obtener el grado Licenciado en Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2012.
- [2] PEMEX “*Reservas de hidrocarburos al 1 de enero de 2012, estimación*”, 2012.
- [3] INEGI, “*<http://cuentame.inegi.org.mx/economia/petroleo/>*”, 2012.
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code AN INTERNATIONAL CODE “*Rules for Construction of Pressure Vessels*”, 2010