

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR CERRADO PARA LA
PREPARACIÓN DE ZEOLITAS EN HORNOS MICROONDAS
CONVENCIONALES.**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Morales P., Jorge.
Salazar G., Anyelo R.
Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR CERRADO PARA LA
PREPARACIÓN DE ZEOLITAS EN HORNOS MICROONDAS
CONVENCIONALES.**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Manuel Martínez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs. Morales P., Jorge.

Salazar G., Anyelo R.

Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010



Caracas, 29 de octubre de 2010

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

ANYELO SALAZAR y JORGE MORALES

Titulado:

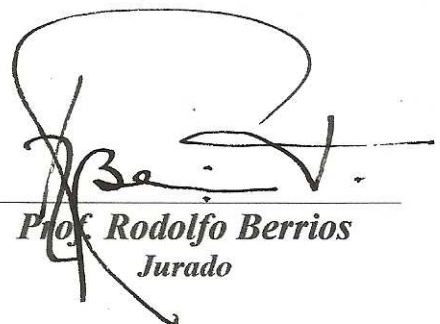
**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR CERRADO
PARA LA PREPARACIÓN DE ZEOLITAS EN HORNOS
MICROONDAS CONVENCIONALES”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.



Prof. José D. Hernández
Jurado





Prof. Rodolfo Berrios
Jurado



Prof. Manuel Martínez
Tutor

Morales P., Jorge y Salazar G., Anyelo R

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR CERRADO PARA LA
PREPARACIÓN DE ZEOLITAS EN HORNOS MICROONDAS
CONVENCIONALES.**

**Tutor Académico: Prof. Manuel Martínez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad
de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2010. 120 pág.**

Palabras Claves: Diseño Conceptual, Recipientes a presión, Cilindros de pared gruesa, zeolitas, microondas.

RESUMEN

En el presente trabajo se diseñó y construyó un recipiente cerrado para la preparación de zeolitas en un horno microondas convencional. Se aplicaron las fases del diseño conceptual; partiendo desde el planteamiento del problema, hasta la matriz de decisión, donde se obtuvo el diseño idóneo que cumple con las condiciones requeridas para la solución del problema. Posteriormente, se realizaron los cálculos con la finalidad de dimensionar el reactor aplicando la teoría de cilindros de pared gruesa, así como las teorías de fallas para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro del mismo. Por otra parte, se seleccionaron los tipos de roscas que componen el reactor y se diseñó un sistema de seguridad que permite la regulación de presión interna en el recipiente en caso que ésta sobrepase la presión máxima de diseño. Una vez concluida las fases del diseño se elaboraron los planos correspondientes para cada uno de los componentes del reactor; posteriormente se construyó el recipiente y se sometió a una serie de pruebas a través de las cuales se verificó su funcionamiento. Finalmente, se elaboró un manual de operación y mantenimiento necesario para conservar en buen estado al reactor

DEDICATORIA

El presente Trabajo Especial de Grado se lo dedico a mi mamá, papá y mis hermanos, así como al resto de mi familia y a la memoria de mi abuelo Pedro Pereira.

_____ Jorge Morales Pereira

Este trabajo va dedicado especialmente a Dios por permitirme estar en este mundo, en segundo lugar a mis padres, mis hermanos por apoyarme en todo momento y a la memoria de mi abuela María Florencia Salazar.

_____ Anyelo Salazar Gil

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Carolina Pereira y Hugo Morales, por darme todo el apoyo necesario para enfrentar los obstáculos y salir adelante en todo momento.

A mis hermanos Hugo y Roberto, por ser además de mis hermanos, también ser ante todo un amigo.

A mi tío Francisco Morales, por estar dispuesto cuando lo necesito y sobre todo por las veces que me ayudó sin importar la hora.

A mis amigos y compañeros, por su apoyo y ayuda en todo momento, así también por sus constantes estímulos.

Al Prof. Manuel Martínez y la Prof. Marta Mediavilla, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo, el cual es una base primordial para mi formación profesional como ingeniero, y por su ayuda cada vez que lo necesité.

Al Prof. Ramón Sánchez, un especial agradecimiento por brindarme su ayuda y dedicación en la realización de mi trabajo especial de grado y por tener la paciencia de atendernos cada vez que lo buscábamos.

Para todos ellos mi más sincero agradecimiento.

Jorge Morales Pereira

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme salud y bienestar tanto físico como espiritual.

A mis padres, Ramón Salazar y Emilia Gil por su esfuerzo, amor y apoyo incondicional, durante mi formación tanto personal como profesional.

A mis hermanos, Anderson y Anthony por compartir alegrías y ser parte de mi vida.

A mis abuelas, por transmitirme su sabiduría, brindarme su apoyo y darme palabras de motivación para la culminación de este proyecto.

A mi tío José David Gil, por su apoyo, sabiduría, consejos, amistad, cariño y atenciones durante mi formación personal y profesional. Gracias Chigiüre.

A la familia Ávila, Miriam, José, Joselin y Johelyn por su apoyo constante y por esa unión inmensa que existe entre ambas familias.

Al profesor Ramón Sánchez, por su dedicación, apoyo y colaboración para el cumplimiento de los objetivos trazados en este trabajo especial de grado.

A mi tutor académico, Manuel Martínez, por sus conocimientos en la realización de este proyecto.

A la profesora Martha Mediavilla por brindarme sus conocimientos y colaboración en la realización de este proyecto.

A la licenciada María Antonieta Padrón por sus consejos durante mi formación como profesional.

Al profesor Delfín Moronta por su colaboración y ayuda durante los ensayos de nuestro trabajo especial de grado.

A Veruska Contreras por su apoyo, colaboración, y cariño inseparable que siempre me ha acompañado durante mi carrera. Gracias mi princesa TE AMO!!!

A Jenny Briceño alias la Doctora por su compañerismo inseparable y apoyo que desde bachillerato me ha brindado. Gracias Doctora.

A mis compadres, Danni Gil (Evo), Johan Vargas (Gocho), José Peña (Mimosin), Edhiño Urbina, Eliexer Rojas, José Gómez (Yunque) y Jorge Morales por su amistad y apoyo durante mi carrera.

Y en general a todos aquellos que de alguna u otra forma estuvieron involucrados en la culminación de este proyecto.

Anyelo Salazar Gil

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
I.1. Descripción del Problema	4
I.2. Objetivos y Alcances.....	5
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO.....	7
II.1. Generalidades.....	7
II.2. Las Zeolitas.....	7
II.2.1. Estructura	8
II.2.2. Propiedades	9
II.2.3. Aplicaciones.....	11
II.2.4. Síntesis de zeolitas	12
II.3. Microondas	14
II.3.1. Historia del uso de las microondas	14
II.3.2. Funcionamiento de los hornos microondas.....	16
II.3.3. Calentamiento de una sustancia mediante las microondas	17
II.3.4. Mecanismos del calentamiento inducido por microondas	19
II.3.5. Tipos de microondas	21
III.3.5.1. Cavidades monomodo	21
III.3.5.2. Cavidades multimodo	22
II.4. Diseño de recipientes para la síntesis de zeolitas en hornos microondas ...	23
II.5. Análisis de esfuerzos	24
II.5.1. Esfuerzos normal y cortante.....	26
II.5.2. Esfuerzos principales	28

II.5.3. Estado de esfuerzo triaxial	30
II.5.4. Círculo de Mohr	31
II.6. Teorías de falla.....	32
II.6.1. Teoría del esfuerzo normal máximo	32
II.6.2. Teoría del esfuerzo cortante máximo.....	33
II.6.3. Teoría de Von Mises	35
II.7. Esfuerzos en recipientes a presión	36
II.7.1.Cargas.....	36
II.7.2. Esfuerzos	36
II.7.3.Presión interna.....	37
II.8. Cilindros de pared gruesa	38
II.9. Roscado.....	42
II.9.1. Definiciones de la terminología de roscas	42
II.9.2. Designaciones de roscas y área de esfuerzo.....	44
II.9.3. Designación y tipos de roscas de tubería	46
II.9.3.1. Tamaños	47
II.9.4 Resistencia al arranque de rosca	52
II.10. Ajustes de holgura	55
II.11. Teflón.....	57
II.12. Metodología del diseño.....	58
II.12.1 Identificación del problema	59
II.12.2 Tormenta de ideas	59
II.12.3 Perfeccionamiento de las ideas	61
II.12.4 Análisis.....	61
II.12.5 Decisión	61
II.12.6 Construcción	62

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DEL DISEÑO.....	63
III.1. Identificación del problema.....	63

III.2. Tormenta de ideas.....	64
III.3. Perfeccionamiento de ideas	65
III.4. Análisis de las propuestas.....	72
III.5. Matriz de decisión	73
III.6. Construcción.....	74

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DEL REACTOR CERRADO.....	75
IV.1. Vista preliminar del reactor cerrado.....	75
IV.2. Determinación de los componentes del reactor cerrado.....	79
IV.2.1. Cálculo de la presión interna de trabajo y condiciones iniciales.....	79
IV.2.2. Cálculo del espesor de las paredes del reactor	80
IV.2.3. Cálculo del espesor de la funda de la termocupla	83
IV.2.4. Diseño de la rosca para la tapa y el vaso del reactor	87
IV.2.5. Cálculo del factor de seguridad en las roscas del vaso y tapa del reactor	89
IV.2.6. Cálculo de la rosca entre la tapa del reactor y la tapa de la termocupla	91
IV.2.7. Diseño de la válvula de seguridad	94
IV.2.8. Cálculo del espesor de empotramiento para la lámina de la válvula de seguridad en la tapa del reactor	97
IV.2.9. Ajuste de holgura entre la funda de la termocupla y la tapa del reactor	100
IV.2.10. Ajuste de holgura entre el tapón de seguridad y el orificio en la tapa del reactor	101
IV.2.11. Ajuste de holgura entre la tapa del reactor y la lámina de la válvula de seguridad	102

CAPÍTULO V

PUESTA A PUNTO Y VERIFICACIÓN DEL REACTOR CERRADO.....	104
V.1. Descripción del conjunto	104

ÍNDICE, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

V.2. Ensamblaje detallado	106
V.3. Desensamblaje del reactor	108
V.4. Verificación del reactor	108
CONCLUSIONES	114
RECOMENDACIONES	116
BIBLIOGRAFÍA	117
APÉNDICE	121
ANEXOS	132

INDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1 Características generales de la zeolita.....	10
Tabla 2.2 Aplicaciones industriales de las zeolitas	12
Tabla 2.3 Dimensiones de roscas estándar americano	45
Tabla 2.4 Dimensiones de roscas métricas	46
Tabla 2.5 Tipos de roscas para tuberías	48
Tabla 2.6 Dimensiones de roscas NPT	51
Tabla 2.7 Ajustes de holgura (RC).....	57
Tabla 3.1 Criterios de selección	73
Tabla 3.2 Matriz de decisión	74

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Configuración tetraédrica de la unidad primaria de las zeolitas.....	8
Figura 2.2 Unión de tetraedros para generar las estructuras cristalinas de las zeolitas.....	9
Figura 2.3 Espectro electromagnético.....	15
Figura 2.4 Onda electromagnética	16
Figura 2.5 Componentes de un horno microondas.....	17
Figura 2.6 Transferencia de calor desde las paredes al interior del recipiente	18
Figura 2.7 Interacción dipolar con el campo.....	19
Figura 2.8 Conducción iónica	20
Figura 2.9 Cavidad monomodo.....	22
Figura 2.10 Elementos de esfuerzos para tres tipos de esfuerzos	25
Figura 2.11 Elementos del estado general de esfuerzo tridimensional	27
Figura 2.12 Elemento de esfuerzos principales.....	29
Figura 2.13 Círculo de Mohr.....	31
Figura 2.14 Diagrama de Mohr modificado para la teoría del esfuerzo normal máximo.....	33
Figura 2.15 Diagrama de Mohr para un ensayo de tracción en el momento para el cual alcanza la fluencia	34
Figura 2.16 Comparación gráfica entre las teorías de Tresca y Von Mises.....	36
Figura 2.17 Cilindro de pared gruesa sometido a presiones externas e internas....	39
Figura 2.18 Tensiones en la pared del recipiente.....	41
Figura 2.19 Nomenclatura de una rosca.....	43
Figura 2.20 Rosca NPT	49

Figura 2.21 Esfuerzos en la rosca	55
Figura 3.1 Propuesta de diseño # 1	65
Figura 3.2 Propuesta de diseño # 2	66
Figura 3.3 Propuesta de diseño # 3	67
Figura 3.4 Propuesta de diseño # 4	68
Figura 3.5 Propuesta de diseño # 5	69
Figura 3.6 Propuesta de diseño # 6	70
Figura 3.7 Propuesta de diseño # 7	71
Figura 4.1 Cuerpo del reactor.....	75
Figura 4.2 Tapa del reactor	76
Figura 4.3 Funda de la termocupla.....	76
Figura 4.4 Tapa de la termocupla.....	77
Figura 4.5 Lámina de la válvula de seguridad	77
Figura 4.6 Tapón de la válvula de seguridad	78
Figura 4.7 Ensayo de tracción.....	79
Figura 4.8 Círculo de Mohr para $r = r_i$ en la pared del recipiente.....	82
Figura 4.9 Círculo de Mohr para el estado de esfuerzos generado en las paredes de la funda de la termocupla	85
Figura 4.10 Deflexión de viga empotrada.....	95
Figura 4.11 Diagrama de cuerpo libre de la lámina de seguridad.....	98
Figura 4.12 Región de esfuerzos cortantes en la tapa del recipiente	98
Figura 4.13 Diagrama de cuerpo libre de la región en esfuerzo cortante	99
Figura 5.1 Componentes del reactor	105
Figura 5.2 Ensamble de la válvula de seguridad en la tapa del reactor	106
Figura 5.3 Ensamble de la funda sobre la tapa del recipiente.....	106

ÍNDICE, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Figura 5.4 Ensamble de la tapa de la funda de la termocupla en la tapa del reactor.....	107
Figura 5.5 Ensamble del reactor	107
Figura 5.6 Gel de síntesis	109
Figura 5.7 Reactor en la cavidad del microonda.....	110
Figura 5.8 Controlador de temperatura	111
Figura 5.9 Calentamiento de la sustancia.....	111
Figura 5.10 Sólido obtenido después del calentamiento.....	112
Figura 5.11 Espectro infrarrojo del sólido sintetizado por microondas	113

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

ASTM	American Society of Testing Materials
A_s	Área de esfuerzo cortante
A_t	Área de esfuerzo en tensión
c	Fibra más alejada al centroide de la sección transversal
D	Diámetro
D_m	Diámetro medio
E	Módulo de elasticidad
E_0	Diámetro de paso mínimo
e	Espesor
F	Fuerza
h	Altura de rosca
I	Inercia
L	Longitud
L_e	Longitud de rosca
L_2	Longitud de rosca efectiva
M	Momento
$M_{m\acute{a}x}$	Momento máximo
m_{agua}	Masa de agua
NPT	National Pipe Thread
n	Número de hilos de rosca por pulgada
p	Paso
P	Presión
$P_{m\acute{a}x}$	Presión máxima
p_i	Presión interna
p_0	Presión externa
r_i	Radio interno
r_0	Radio externo

ÍNDICE, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

r_m	Radio medio
S_{ut}	Esfuerzo último a la tracción
S_y	Esfuerzo de fluencia
σ	Esfuerzo normal
σ_l	Esfuerzo longitudinal
σ_r	Esfuerzo radial
σ_t	Esfuerzo tangencial
$\sigma_{\text{flexión}}$	Esfuerzo de flexión
τ	Esfuerzo cortante
π	Pi
ψ	Factor de seguridad
$y_{\text{máx}}$	Flexión máxima
V_{total}	Volumen total
v	Longitud de filetes de roscas incompletas
ν	Volumen específico

UNIDADES

°C	Grados Celsius
cm ³	Centímetros cúbicos
ml	Mililitros
m ³	Metros cúbicos
mm	Milímetros
mm ²	Milímetros cuadrados
Mpa	Megapascal
N	Newton
pulg	Pulgadas

INTRODUCCIÓN

Las zeolitas son aluminosilicatos, que debido a sus propiedades únicas, tales como: altas áreas superficiales, sistema de canales definidos, densidad de sitios activos controlable, poseen una gran diversidad de aplicaciones en la industria de la refinación, petroquímica y química fina.

Usualmente las zeolitas se sintetizan bajo condiciones hidrotérmicas utilizando recipientes cerrados a presión autógena, en un período de tiempo que va de varias horas a pocos días, dependiendo de la naturaleza de éstas, composición del gel y temperatura de síntesis (Olguín, 1998). Su obtención por este método convencional implica una inversión considerable de tiempo y energía en su procesamiento, por lo cual se hace importante la disminución de estos parámetros en su preparación.

Un método alternativo a esta ruta de síntesis convencional, lo constituye el calentamiento por microondas, el cual se ha venido utilizando en diferentes áreas de investigación, principalmente en el secado de productos químicos y deshidratación de materiales sólidos debido a que entre las ventajas que presenta, está la de proveer un calentamiento uniforme y rápido. Su utilización en síntesis de zeolitas se ha venido acrecentando en los últimos tiempos, ya que facilita la obtención de nanoestructuras con propiedades que en ocasiones, son muy difíciles de alcanzar por otros medios.

Los materiales de fabricación de los reactores para realizar la síntesis por microondas deben cumplir con ciertas características, dentro de las cuales están: ser transparentes a las microondas, termoestables y resistentes al ataque químico producido por la composición de la mezcla de reacción. Por su parte, se deben tomar en cuenta ciertos parámetros para el diseño del reactor cerrado tales como: la temperatura y el tiempo de operación, el tamaño de la cavidad del horno

microondas, la cantidad de mezcla reaccionante y la presión de vapor que se genera durante la síntesis.

De aquí que, la importancia de la realización de este trabajo especial de grado radica en que a través del diseño y construcción de un reactor cerrado para hornos microondas convencionales, se contribuye en el avance de las investigaciones que, en materia de síntesis de zeolita, se han venido desarrollando en los últimos años en la Facultad de Ingeniería, al tratar de disminuir considerablemente los tiempos de síntesis a través del uso de la tecnología de microondas a la vez que pueden obtenerse sólidos de alta pureza y con características muy particulares, que les permitirían mejorar sustancialmente su comportamiento como catalizadores y adsorbentes.

Este trabajo especial de grado consta de cinco (5) capítulos, distribuidos de la siguiente forma:

El Capítulo I denominado planteamiento del problema, contiene la descripción del problema donde se exponen las razones que motivan la investigación, los objetivos del proyecto tanto general como específicos, así como también el alcance.

El Capítulo II abarca las bases teóricas referente a los soportes conceptuales y enfoques teóricos prácticos de la investigación.

El Capítulo III comprende toda la metodología del diseño, donde se aplican las diferentes fases del diseño conceptual y se obtiene la solución al problema planteado.

El Capítulo IV abarca el diseño del reactor, en este capítulo se aplican las teorías de recipientes de pared gruesa, se seleccionan las roscas para las diferentes partes del reactor, se diseña la válvula de seguridad y se aplican las teorías de fallas correspondientes.

El Capítulo V contempla la puesta a punto y verificación del reactor; posteriormente se presentan las conclusiones y recomendaciones finales logradas en este trabajo de investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

I.1.- Descripción del problema.

La síntesis de zeolitas hoy en día se está incrementando ya que sus aplicaciones en la industria son muy variadas, pues son utilizadas en procesos de separación, catálisis, adsorción, intercambio iónico, entre otros, por ser un material poroso y altamente cristalino.

De manera general, las zeolitas se sintetizan por calentamiento hidrotérmico a presión. Este proceso se basa en el desarrollo de los cristales a partir de sus núcleos. Los geles que se utilizan contienen los nutrientes necesarios para la cristalización y están formados por una fuente de silicio y otra de aluminio, además de una base fuerte, y en algunas ocasiones, un agente director de estructura.

Las condiciones de síntesis dependen del tipo de zeolita que se desea obtener, y el calentamiento se produce en horno por convección con una duración aproximada de 8 a 48 horas. No obstante, en los últimos años se ha comenzado a utilizar la radiación por microondas como forma de calentamiento, porque tiene entre sus ventajas que reduce de manera sustancial los tiempos de reacción de las síntesis.

Actualmente, en el Laboratorio de Refinación y Petroquímica en el módulo II de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, se está realizando la preparación de zeolitas, en un tiempo máximo de 48 horas, por medio de métodos convencionales de calentamiento, de ahí surge la necesidad de diseñar un dispositivo (reactor) que permita realizar esta síntesis, en tiempos más cortos, sin afectar el rendimiento de la misma.

El tema de la presente investigación está referido al diseño y construcción de un reactor cerrado para sintetizar zeolita, específicamente ZMS-5, utilizando un horno de microondas convencional como fuente de calentamiento, que permite incrementar la velocidad de la síntesis.

Para la realización de este trabajo se aplican las fases del diseño conceptual, siguiendo ciertos parámetros en su desarrollo, esto fue arrojando la solución más favorable al problema planteado, la cual consiste en el diseño y construcción de un recipiente cerrado para la preparación de Zeolitas en hornos microondas convencionales.

I.2.- Objetivos

I.2.1.-Objetivo General

Diseñar y construir un reactor cerrado para la preparación de zeolitas utilizando un horno microonda convencional.

I.2.2.-Objetivos Específicos

- Aplicar las fases del diseño conceptual para obtener la mejor solución.
- Diseñar el reactor cerrado.
- Elaborar los planos correspondientes al reactor.
- Construir el reactor.
- Realizar pruebas para verificar el funcionamiento del reactor.
- Realizar un manual de operaciones y mantenimiento.

I.2.3 Alcances.

- Diseñar un reactor cerrado para realizar síntesis en microondas convencional.
- Construir el reactor, apoyándonos en los planos y especificaciones según el diseño.
- Sintetizar zeolita ZSM-5 en el reactor construido.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1.- Generalidades

La síntesis en hornos microondas ha tomado gran importancia en la química. El calentamiento convencional es conocido por ser ineficiente y consumidor de tiempo. La síntesis en hornos microondas da más tiempo a crear nuevas sustancias, así como desarrollar nuevos procesos. En lugar de gastar horas o días sintetizando un simple compuesto mediante el calentamiento convencional, la química de microondas puede ahora ejecutar la misma reacción en minutos. La síntesis en hornos microondas puede ser aplicada efectivamente a cualquier esquema de reacción, creando reacciones más rápidas, mejorando rendimientos y produciendo productos químicos más limpios.

Además, la síntesis en hornos microondas crea completamente nuevas posibilidades en la transformación de productos químicos esto debido a que las microondas pueden transferir directamente energía a las especies reactivas, conocido como “Calentamiento Molecular”, lo que puede promover transformaciones que no son correctamente posibles utilizando calentamiento convencional.

II.2.- Las zeolitas

El término zeolita proviene de las palabras griegas “zeo” que significa hervir, y “lithos” que significa piedra, ya que en el año 1757 se descubrió un mineral que perdió agua al calentarlo con una llama de soplete. Las zeolitas se consideran como uno de los grupos de minerales más abundantes sobre la tierra. Hasta ahora se han descubierto cerca de 40 especies naturales (Olguin, 1998).

El término zeolita comprende un gran número de minerales naturales y sintéticos que exhiben características estructurales comunes. Estos minerales están constituidos por un esqueleto cristalino formado por la combinación tridimensional de tetraedros TO_4 ($T=Si, Al, B, Ga, Ge, Fe, P, Co$, entre otros) unidos entre sí a través de átomos de oxígeno (Li, 2002). Esta estructura de tetraedros enlazados contiene canales y cavidades de dimensiones moleculares en los cuales se encuentran cationes de compensación, moléculas de agua y sales.

II.2.1.- Estructura

En las zeolitas la unidad estructural básica o “unidad primaria de construcción” es la configuración tetraédrica de cuatro átomos de oxígeno alrededor de un átomo central (TO_4), generalmente de silicio y aluminio (Fig. 2.1).

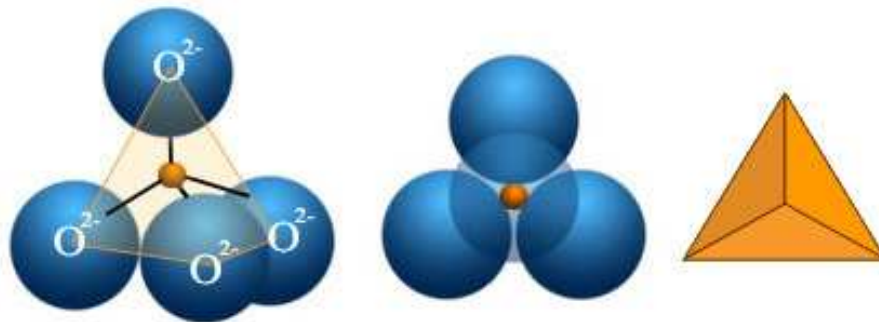


Figura 2.1. Configuración tetraédrica de la Unidad Primaria de Construcción.

Una estructura espacial continua se alcanza a través, de la existencia de unas segundas unidades estructurales, originadas por la unión de tetraedros al compartir sus átomos de oxígeno, que al combinarse conducirán a la estructura cristalina final de cada tipo de zeolita (Fig. 2.2).

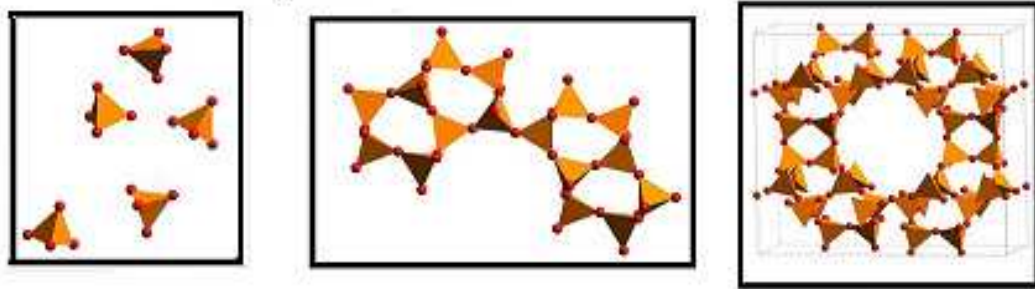
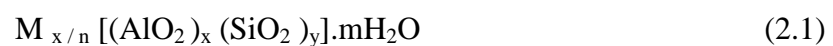


Figura 2.2. Unión de tetraedros para generar las estructuras cristalinas.

En las zeolitas más comunes, T representa los elementos silicio y aluminio. El aluminio siendo trivalente, induce cargas negativas en la estructura de los tetraedros $(AlO_4)^-$. Para compensar este exceso de cargas negativas, las zeolitas incorporan en sus estructuras cationes tipo Na^+ , K^+ y Ca^{2+} . Estos cationes son fácilmente intercambiables, lo que le confiere a estos materiales una elevada capacidad de intercambio catiónico. Estos junto con las moléculas de agua ocupan el espacio intracristalino de los aluminosilicatos, siendo la fórmula química para una celda unitaria de este tipo de zeolitas la siguiente:



Donde:

M: es un catión de valencia n,

m: es el número de moléculas de agua, y la suma de x e y indica la cantidad de tetraedros por celda unitaria.

II.2.2.- Propiedades

Las zeolitas presentan una serie de características que les provee de propiedades ideales e inmejorables en algunos casos, para su uso como adsorbentes, como intercambiadores iónicos y como catalizadores o soporte de catalizadores. En la Tabla 2.1, se presenta las características generales de las

zeolitas, éstas dependen básicamente de la estructura y de la composición de cada sólido.

Diámetro de Poro (Å)	2 a 12
Diámetro de Cavidades (Å)	6 a 12
Superficie Interna (m ² /g)	Varios de cientos
Capacidad de Intercambio catiónico (meq/100g)	0 – 650
Capacidad de Adsorción (cm ³ /g)	< 0,35
Estabilidad Térmica (°C)	Desde 200 hasta más 1000

Tabla 2.1. Características generales de las zeolitas.

De manera general, las propiedades de las zeolitas son las siguientes:

- **Capacidad de adsorción:** El uso de las zeolitas como adsorbentes selectivos dependen tanto del volumen de los poros, como de la relación carga/radio del catión de intercambio. Esta capacidad debe garantizar que entre a la estructura zeolítica un catión con carga y tamaño específico.
- **Capacidad de intercambio iónico:** Los cationes presentes en las zeolitas se pueden intercambiar por otros, modificando así sus propiedades estructurales; la capacidad de intercambio aumenta con el contenido de aluminio, ya que son los que inducen cargas negativas en la estructura que se interrelacionan con los cationes de compensación.
- **Propiedades ácidas o básicas:** El carácter ácido o básico de una zeolita está relacionado con los cationes de compensación y el grado de hidratación del material. La acidez tipo Bronsted se debe a los protones que compensan la carga negativa originada por los átomos de aluminios tetraédricos, mientras que la basicidad Bronsted se genera por los grupos básicos hidroxilos. La acidez tipo Lewis aparece cuando se produce una vacancia por un aluminio estructural tricoordinado; mientras que la

basicidad tipo Lewis es producto de la carga negativa de los átomos de oxígeno ligados a los aluminios tetraédricos.

- **Propiedades hidrofílicas:** Las zeolitas son hidrofílicas debido a la interacción del dipolo de la molécula de agua con los campos electrostáticos de la red aniónica y los cationes compensadores de cargas. El carácter hidrofílico por lo tanto disminuye al aumentar la relación Si/Al.

II.2.3.- Aplicaciones de las zeolitas

Las aplicaciones industriales de las zeolitas son consecuencia de sus propiedades fisicoquímicas. Muchas de estas propiedades resultan tan ventajosas que han motivado la sustitución de otros productos convencionales por zeolitas en numerosos procesos industriales. A continuación se presentan las aplicaciones más importantes (Gómez J., 2001), estos usos están basados en la acidez y la estructura cristalina de las zeolitas; que por el tamaño de sus poros ejercen una selectividad geométrica.

- **Como intercambiadores iónicos:** la capacidad de intercambio que poseen estos materiales es aprovechada en procesos diversos como el ablandamiento de agua y la recolección de desechos radioactivos.
- **Como adsorbentes:** las aplicaciones de las zeolitas como adsorbentes viene determinadas por la cantidad de poros y el diámetro de los mismos, de esta manera son utilizadas en procesos de separación y purificación.
- **Como catalizadores o soporte de catalizadores:** numerosos procesos industriales de refinación, petroquímica y química fina usan catalizadores a base de zeolitas.

- **Otros usos:** existen otras aplicaciones de las zeolitas, algunas de ellas son como complemento en alimentos para animales, tratamiento de suelos y control de malos olores.

En la Tabla 2.2, se resumen las aplicaciones de estos materiales:

ADSORCIÓN	
PURIFICACIÓN	SEPARACIÓN
Endulzamiento de gases (eliminación del azufre del gas natural)	Parafinas lineales y ramificadas Xilenos Olefinas
Purificación de gases industriales (adsorción del CO ₂ y agua)	
Anticontaminantes ambientales (adsorción de NO _x y SO _x provenientes de la combustión de la gasolina)	
INTERCAMBIO IÓNICO	
Ablandamiento de aguas industriales y domésticas (remoción de Ca ⁺² y Mg ⁺²)	
Eliminación de iones NH ₄ ⁺ de aguas servidas.	
Soporte de fertilizantes y drogas medicinales.	
Recolección de desechos radioactivos (Cs ⁺ y Sr ²⁺).	
CATALIZADORES Y SOPORTE DE CATALIZADORES	
Craqueo catalítico. Hidrocraqueo e Hidroisomerización	
Transformación de metanol en gasolina	
Alquilación. Isomerización de aromáticos C8 y Polimerización	
Síntesis orgánica y química inorgánica	

Tabla 2.2. Aplicaciones industriales de las zeolitas.

II.2.4.- Síntesis de zeolitas

Las zeolitas sintéticas son obtenidas a partir de soluciones acuosas saturadas de composición apropiada, en un dominio de temperaturas comprendidas entre 25°C y 300°C (síntesis hidrotérmica), y en un tiempo máximo de 48 horas. La naturaleza de la zeolita viene determinada básicamente por factores cinéticos. Haciendo variar la composición de las soluciones y las condiciones de operación

es posible sintetizar diferentes estructuras o la misma zeolita con diferentes composiciones químicas (Giannetto y otros, 2000).

La síntesis se realiza a partir de tres soluciones, una fuente de silicio como silicatos hidratados, polvos de sílica precipitados, soluciones de sílica coloidal, entre otras; una fuente de aluminio como sales de aluminio, óxidos de aluminio, hidróxidos de aluminio, entre otras; y la alcalinidad necesaria es proporcionada por hidróxidos alcalinos, hidróxidos alcalinotérreos, bases orgánicas o sus combinaciones.

El proceso de síntesis comienza, mezclando el álcali con la fuente de aluminio, luego se añade lentamente la solución de silicio, con lo cual se empezará a formar una solución viscosa de aspecto turbio conocida como gel.

La síntesis hidrotérmica de zeolitas se puede describir simplemente por los siguientes sucesos (Cundy, 2005):

- Los reactantes que contienen silicio y aluminio son mezclados junto con una fuente de cationes, usualmente en medio básico.
- La mezcla acuosa de reacción es calentada, a menudo en un autoclave sellado.
- Durante algún tiempo, después de ascender a la temperatura de síntesis, los reactantes permanecen amorfos.
- Después de un período de inducción, el producto zeolítico cristalino puede ser detectado.

- Gradualmente todo el material amorfo es reemplazado por una masa aproximadamente igual de cristales de zeolita, la cual se puede recuperar por filtración, lavado y secado.

II.3.- Microondas.

II.3.1.- Historia del uso de las Microondas.

El desarrollo de la tecnología de las microondas fue estimulada por la Segunda Guerra Mundial cuando se diseñó el magnetrón para generar microondas de frecuencia fijada por equipos de radar. Percy LeBaron Spencer de la Raytheon Company accidentalmente descubrió que una barra de caramelo en su bolsillo se derritió mientras él estaba experimentando con ondas de radar. Además, otras investigaciones mostraron que las microondas son capaces de incrementar la temperatura interna de los alimentos mucho más rápido que un horno convencional. Estos últimos descubrimientos, condujeron a la introducción del primer horno microonda comercial doméstico usado en el año 1954 (Hayes, 2002).

Las investigaciones dentro de las aplicaciones industriales para la energía de microondas comenzaron en los años de 1954 y han continuado hasta el presente. La energía de la microondas ha encontrado muchos usos incluyendo la irradiación del carbón para remover sulfuros y otros contaminantes, vulcanización de goma, secado de productos, análisis de grasas de productos alimenticios y extracción de solventes. Los efectos de la irradiación de microondas en síntesis orgánica no fueron explorados hasta la década de los años 80. Los primeros dos (2) documentos sobre el realce de microondas en química orgánica fueron publicados en el año 1986 y con muchos productos químicos orgánicos se ha demostrado el beneficio de usar energía de microondas para secar reacciones sintéticas (op. cit.).

Las microondas son una forma de energía de baja frecuencia dentro de la escala en el espectro electromagnético, situada en un área de transición entre la radiación infrarroja y las ondas de radiofrecuencia, su longitud de onda está comprendida entre 1cm y 1m, y es definida en los rangos de frecuencia de los 300 hasta cerca de 300.000 MHz (Figura 2.3). Dentro de esta región de energía electromagnética, únicamente la rotación molecular es afectada y no la estructura molecular de las sustancias (Hayes, 2002).

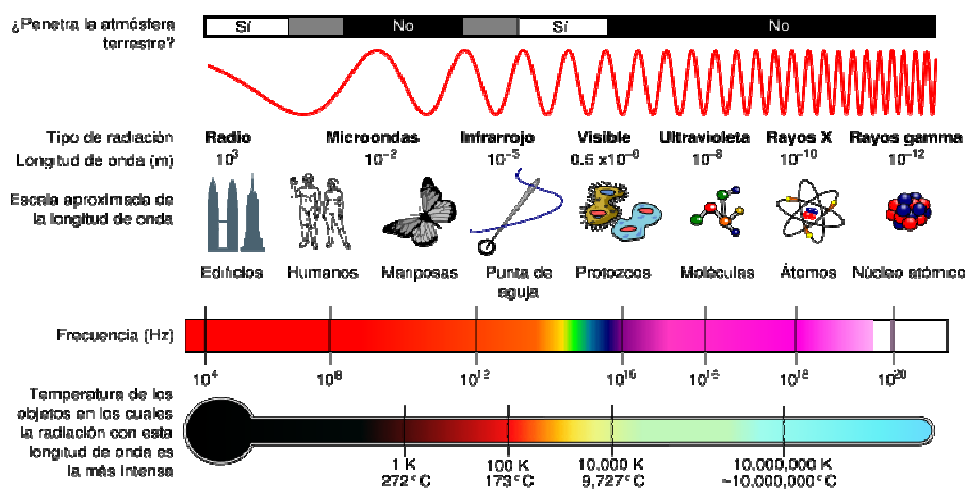


Figura 2.3. Espectro electromagnético

Para evitar interferencias con las telecomunicaciones en las aplicaciones de calentamiento se usan las bandas ISM (frecuencias industriales científicas y médicas) las cuales son de 27,12 MHz, 915 MHz y 2,45 GHz, longitud de onda (11,05 cm, 37,24 cm y 12,24 cm, respectivamente) (Carballido, 2000). Los hornos microondas y los sistemas de laboratorio generalmente trabajan a 2,45 GHz, porque esta frecuencia tiene una mejor profundidad de penetración para interactuar con las moléculas, y hay fuentes de potencia disponibles para generar microondas en estas frecuencias (Hayes, 2002).

La energía de microondas como cualquier radiación electromagnética, está constituida por un campo eléctrico y un campo magnético, aunque solo el campo

eléctrico transfiere la energía que conduce al calentamiento de las sustancias (Fig. 2.4).

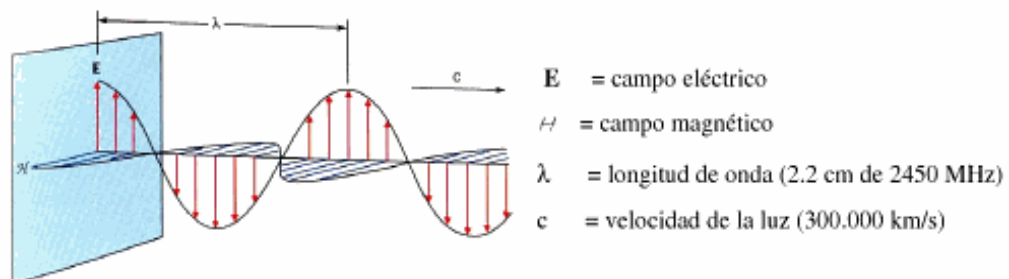


Figura 2.4. Onda electromagnética

La irradiación de microondas es más eficiente para la transferencia de energía térmica a un volumen de material que un proceso térmico convencional, en el cual se transfiere calor a través de la superficie del material por convección y radiación. Las oscilaciones del campo electromagnético generadas por la microonda, interactúan con las propiedades dieléctricas del material conduciendo a la rotación de los dipolos moleculares y subsiguiente disipación de energía como calor, por la resistencia interna de esa rotación (Bonaccorsi y Proverbio, 2002).

II.3.2.- Funcionamiento de los hornos de microondas.

Todos los dispositivos de microondas tienen dos (2) componentes principales: un generador de microondas o magnetrón y un aplicador o guía de ondas. La conexión de ambos componentes convierte la energía eléctrica en microondas. El magnetrón consiste en un cátodo calentado y un ánodo, separados por una diferencia de potencial elevada (4kV), los electrones se emiten desde el cátodo y se aceleran hasta el ánodo mediante el potencial entre ellos. El campo magnético hace que los electrones sigan trayectorias curvas espirales alejándose del cátodo. La eficacia del magnetrón es del orden del 60 %. La guía de ondas o aplicador es un canal de sección rectangular construido con metal laminado. Sus paredes reflectoras permiten la transmisión de las microondas desde el magnetrón hasta la

cavidad del horno. Las paredes reflectoras de la cavidad de microondas son necesarias para prevenir fugas de la radiación y para incrementar la eficiencia del horno (Arias, s.f.).

La potencia de microondas que sale del magnetrón es constante y la temperatura se controla encendiendo y apagando cíclicamente el magnetrón. La Figura 2.5, ilustra los componentes básicos de un horno microondas (Franco, 1993).

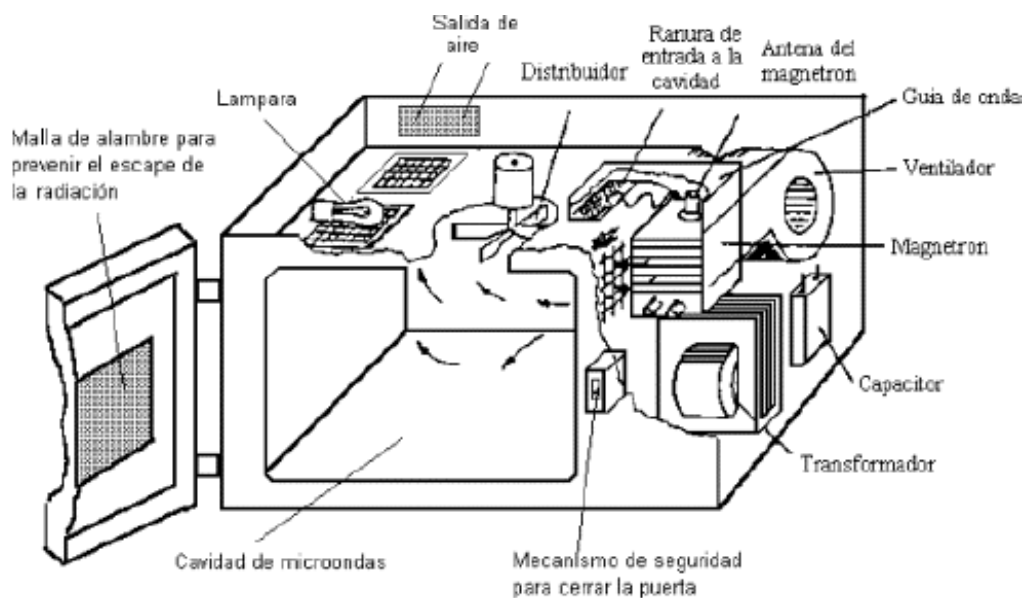


Figura 2.5. Componentes de un horno de microondas

II.3.3.- Calentamiento de una sustancia mediante las microondas

La radiación de microondas es un método alternativo para dar energía térmica a una reacción, la calefacción dieléctrica mediante microondas utiliza la posibilidad que tienen algunos sólidos o líquidos para transformar la energía electromagnética en calor. Este modo de convertir energía tiene muchos atractivos debido a que su magnitud depende de las propiedades de las moléculas (Hayes, 2002).

Tradicionalmente, la síntesis química ha sido realizada por transferencia de calor conductivo con una fuente de calor externo (método convencional). El calor pasa primero a las paredes del recipiente y estas lo transfieren al solvente y el reactante (Fig. 2.6). Este es un método lento e ineficiente de transferencia de energía porque depende de la conductividad térmica de los materiales que deben ser calentados, siendo la temperatura del recipiente más alta que la temperatura de la mezcla de la reacción, y por lo tanto el tiempo necesario para que el recipiente y la sustancia alcancen el equilibrio térmico puede ser de algunas horas.



Figura 2.6. Transferencia de calor desde las paredes al interior del recipiente

El calentamiento por microondas, por otra parte, es un proceso muy diferente. Como muestra la Figura 2.6, las microondas se acoplan directamente con las moléculas que están presentes en la mezcla de reacción, permitiendo una rápida elevación de la temperatura porque el proceso no depende de la conductividad térmica de los materiales del recipiente, y el resultado es un calentamiento instantáneo de la sustancia que interacciona con la radiación de microondas.

II.3.4.- Mecanismos del calentamiento inducido por microondas

Los dos mecanismos que describen la interacción que se produce entre los materiales y las microondas son:

- **La interacción dipolar:** se produce en presencia de moléculas polares. La rotación dipolar es una interacción que induce a las moléculas polares a alinearse con el campo eléctrico rápidamente cambiante de las microondas. El movimiento rotacional de las moléculas al intentar orientarse con el campo produce fricciones y colisiones responsables del calentamiento. La habilidad para acoplarse por este mecanismo está relacionada con la polaridad de las moléculas y su habilidad para alinearse con el campo eléctrico.



Figura 2.7. Interacción dipolar con el campo

- **La conducción iónica:** la segunda forma de transferencia de energía es la conducción iónica, que tiene lugar si hay iones libres o especies iónicas presentes en la sustancia. Según este mecanismo el calor se genera a través de pérdidas por fricción, que resultan de la migración de iones disueltos cuando sobre ellos actúa un campo electromagnético. Las pérdidas

dependen del tamaño, carga, conductividad de los iones disueltos e interacción de estos últimos con el disolvente.



Figura 2.8. Conducción iónica

Estos mecanismos están influenciados por varios factores:

1. La frecuencia de radiación.
2. Propiedades físicas de la sustancia
 - Constante dieléctrica
 - Polaridad
 - Temperatura
 - Viscosidad
 - Capacidad térmica
3. Característica del ión
 - Tamaño
 - Concentración
 - Carga
 - Movilidad

II.3.5.- Tipos de Microondas

El lugar de trabajo donde los materiales se exponen a las microondas se denomina cavidad. Las cavidades son muy variables en tamaños y forma, dependiendo del fabricante y de la aplicación.

A pesar de la variedad de cavidades disponibles, hay dos (2) tipos básicos de cavidades de microondas: monomodo y multimodo. Es importante reconocer la diferencia principal entre los dos (2) tipos, que no va depender de los procesos que se vayan a realizar en la cavidad sino de las características del diseño.

II.3.5.1.- Cavidades Monomodo

La principal característica de las cavidades monomodo es la creación de un patrón de onda estática. Para hacer esto, las dimensiones de la cavidad deben ser cuidadosamente controladas para coincidir de forma sistemática con la longitud de onda característica de las microondas. Para 2,45 GHz, la longitud de onda es de 12,2 cm. Una cavidad monomodo para 2,45GHz debería ser dimensionada tal que sea un múltiplo entero de la longitud de onda completa o de su mitad.

A la hora de realizar el diseño de la cavidad de un horno monomodo hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Los materiales dentro de la cavidad absorben microondas y se calientan. Se puede controlar la intensidad del campo eléctrico, entonces el calentamiento también puede ser controlado.
- Hay posiciones específicas dentro de la cavidad de monomodo donde se deben colocar los recipientes para su irradiación. La intensidad del campo es mayor en los picos de las ondas estáticas, y tiende a cero en los nodos

de estas ondas. Hay posiciones de la cavidad monomodo donde no se produce calentamiento (los nodos).

- La presencia de un objeto en la cavidad monomodo puede desactivar el patrón de ondas estáticas. Por esta razón, en estas cavidades no se puede colocar más de un recipiente para calentar a la vez. Además, el empleo de este sistema puede producir un calentamiento no adecuado de las muestras debido a la variación de volumen, o la forma física de las muestras.
- Y finalmente este tipo de sistemas no se emplean en el escalado de procesos.

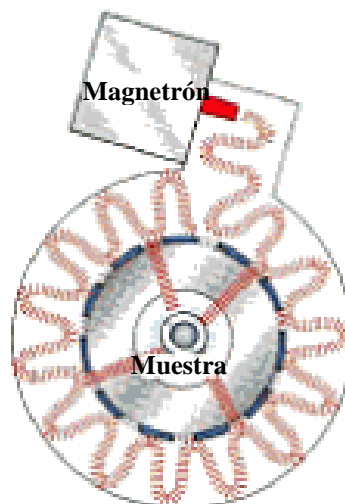


Figura 2.9. Cavidad Monomodo

II.3.6.2.- Cavidades Multimodo

La principal característica de las cavidades multimodo es la de evitar los patrones de onda estática dentro de la cavidad del microondas. En realidad se busca producir el mayor caos posible en el interior de la cavidad.

Para lograr este objetivo se debe cumplir dos (2) principios. El primero, que las dimensiones de la cavidad deben estar cuidadosamente controladas para evitar múltiplos enteros o mitades de la longitud de onda de las microondas. Y el segundo, el empleo de medios para interrumpir algunas ondas estáticas que podrían formarse en la cavidad, para ello se usan agitadores o aspas metálicas que continuamente cambian el patrón de campo dentro de la cavidad. La forma del aspa y sus movimientos es lo que hace que el campo de microondas esté continuamente desordenado, por lo que la intensidad de campo es homogénea en todas las direcciones y en todos los lugares de la cavidad.

Como consecuencia del diseño de este tipo de cavidades, se presentan una serie de características:

- Las muestras se pueden colocar en cualquier parte de la cavidad para que los reactivos absorban las microondas. No es necesario establecer una posición dentro de la cavidad para las muestras porque dentro de las mismas el campo magnético es homogéneo en todas las direcciones.
- Además al ser un campo homogéneo la radiación y el calentamiento de las muestras no estará influenciado por el tamaño o la forma de los objetos. Lo que además implica que en la cavidad se pueden colocar más de un objeto y la eficacia del proceso será la misma que si dentro de la cavidad solo hubiera uno.
- Finalmente, el trabajar con sistemas multimodo permite un fácil escalado de los procesos, para producir a niveles de planta piloto.

II.4.- Diseño de recipientes para la síntesis de zeolitas en hornos microondas.

Normalmente, los envases utilizados en los sistemas de microondas son relativamente transparentes a la radiación de microondas e inertes a los reactivos

usados. Los materiales en contacto con la muestra son usualmente de fluoropolímeros o compuestos de vidrio. Los envases cerrados presurizados son frecuentemente cubiertos con una envoltura exterior de un polímero transparente a las microondas, tal como la polieterimida. Este polímero es comúnmente utilizado para resistencia a la tracción, rigidez y contener presiones acumuladas. El Teflón es un material casi idóneo porque es transparente a las microondas, tiene punto de fusión cercano a 300°C y no lo ataca ninguno de los ácidos comunes (Kingston y Haswell, 1997).

Las síntesis en hornos microondas pueden llevarse a cabo en vasos de reacción cerrados o abiertos, siendo los vasos cerrados los más utilizados, pues permiten lograr temperaturas y presiones más altas.

Existen dos tipos de recipientes cerrados. Un tipo de envase es caracterizado por no estar aislado, ser relativamente delgado y tener una sola pared de fluoropolímero o un envase de fluoropolímero con un revestimiento exterior delgado hecho de polieterimida o un compuesto plástico rígido. Este recipiente tiene un aislamiento mínimo y permite grandes cantidades de escape de calor. El otro tipo puede ser descrito como un envase bien aislado, usualmente de paredes muy gruesas de fluoropolímeros, o un envase con un revestimiento exterior muy grueso o una camisa, o ambos. Este envase retiene calor de una manera muy eficiente y por lo tanto no permite un enfriamiento rápido por el aire del ambiente forzado sobre el envase dentro de la cavidad del microondas (op. cit.).

II.5.- Análisis de esfuerzos.

El análisis de esfuerzos tiene como objetivo fundamental la determinación de las dimensiones que debe tener un elemento mecánico o estructural a fin de que no falle durante su funcionamiento. En el cálculo de estas dimensiones intervienen, como es de suponer, la forma del elemento y las propiedades mecánicas del material. (Goncalves, 2002).

En un sentido amplio, se considera que un elemento mecánico o estructural ha fallado cuando se vuelve incapaz de desempeñar con seguridad la función para la cual fue diseñado.

La figura 2.10 muestra tres ejemplos de elementos de esfuerzos con tres tipos fundamentales de esfuerzos: tensión, compresión y cortante. Se muestran el cubo tridimensional completo y el cuadrado bidimensional simplificado, formas de los elementos de esfuerzos. El cuadrado es una cara del cubo en un plano seleccionado. Los lados del cuadrado representan las proyecciones de las caras del cubo perpendiculares al plano seleccionado.

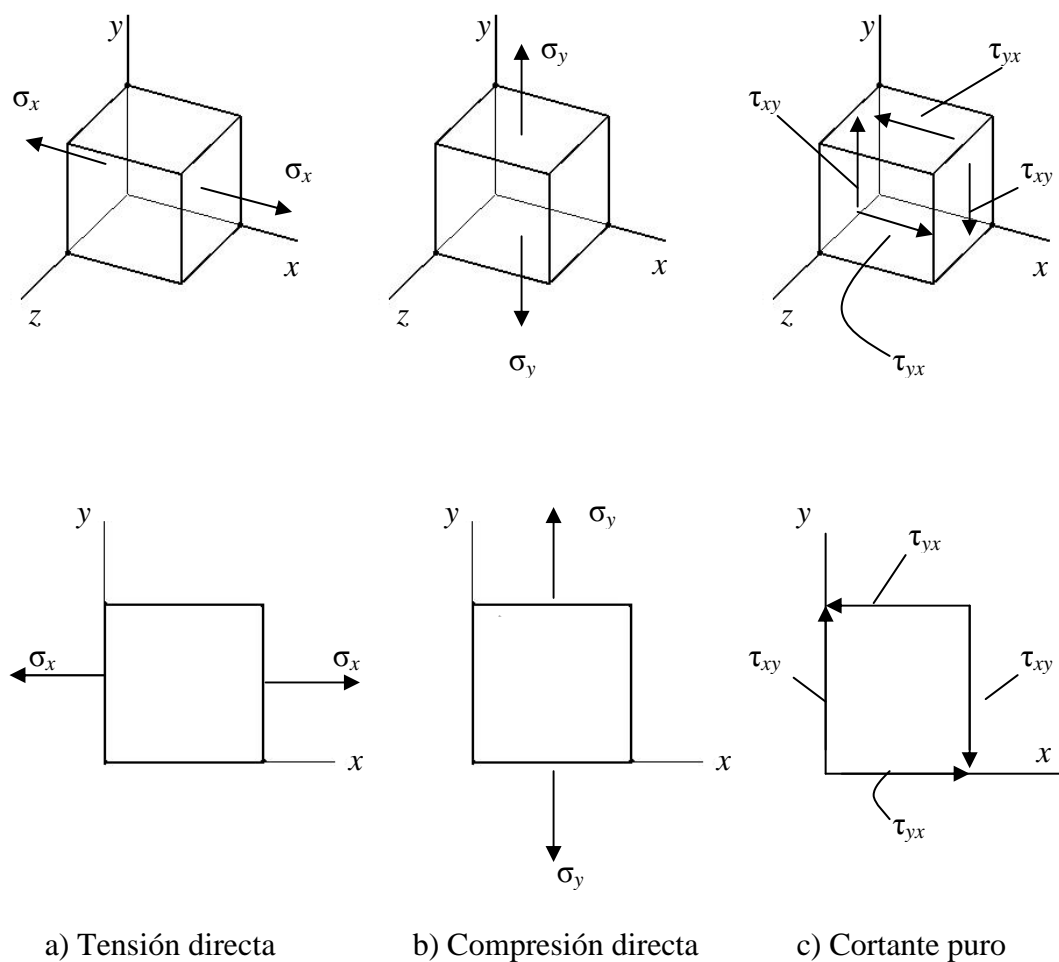


Figura 2.10 Elemento de esfuerzos para tres tipos de esfuerzos

A los esfuerzos de tensión y de compresión se les conoce como esfuerzos normales, y se muestran actuando perpendicularmente sobre caras opuestas del elemento de esfuerzos. Los esfuerzos de tensión tienden a estirar el elemento, mientras que los esfuerzos de compresión tienden a aplastarlo.

Los esfuerzos cortantes se deben al cortante directo, al cortante vertical en las vigas o a la torsión. La acción de un elemento sujeto al corte es una tendencia a cortar al elemento, al ejercer un esfuerzo hacia abajo sobre una cara, y al mismo tiempo se ejerce un esfuerzo hacia arriba sobre la cara paralela opuesta. En resumen, los esfuerzos cortantes sobre un elemento siempre se indicarán como dos pares de esfuerzos iguales que actúan sobre (paralelas a) los cuatro lados del elemento como se muestra en la figura 2.10 (c).

II.5.1- Esfuerzos Normal y Cortante

Se puede definir el esfuerzo como la resistencia interna que ofrece una unidad de área de un material contra una carga externa aplicada.

Los esfuerzos normales (σ) son de tensión (positivos) o de compresión (negativos). Para un elemento en el que la carga externa (F) esta uniformemente distribuida a través de su área de sección transversal (A), se calcula la magnitud del esfuerzo con la fórmula de esfuerzo directo

$$\sigma = \text{fuerza} / \text{área} = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

El esfuerzo cortante directo se produce cuando la fuerza (F) aplicada tiende a cortar el elemento. El método para calcular el esfuerzo cortante directo es parecido al cálculo del esfuerzo directo de tensión, porque se supone que la fuerza aplicada está uniformemente distribuida a través de la sección transversal de la

pieza que resiste la fuerza. El símbolo con que se representa es la letra griega tau (τ). La fórmula del esfuerzo cortante directo puede escribirse entonces como:

$$\tau = \text{fuerza de corte} / \text{área al corte} = \frac{F}{A_s} \quad (2.4)$$

En la figura 2.11 se ilustra un elemento del estado general de esfuerzo tridimensional, donde se muestran tres esfuerzos normales σ_x , σ_y , σ_z , todos positivos y seis esfuerzos cortantes τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zy} , τ_{zx} , τ_{xz} , también positivos. El elemento esta en equilibrio estático y, por lo tanto:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}$$

Los esfuerzos normales dirigidos hacia fuera del elemento se consideran positivos y son de tensión. Los cortantes son positivos si actúan en la dirección positiva de un eje de referencia. El primer subíndice de una componente de esfuerzo cortante indica el eje coordenado, que es perpendicular a la cara del elemento, el segundo indica el eje de coordenadas paralelo a dicha componente. Las caras negativas del elemento tendrán esfuerzos cortantes que actúan en dirección opuesta, pero también se les considera positivos.

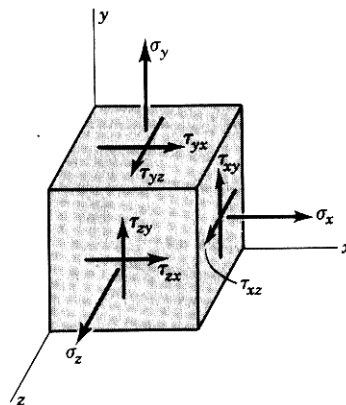


Figura 2.11 Elemento del estado general de esfuerzo tridimensional

Por comodidad, estas componentes suelen escribirse en forma matricial como:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Donde σ es la llamada matriz de esfuerzos.

II.5.2.- Esfuerzos Principales.

La combinación de esfuerzos normales y cortantes aplicados que produce el esfuerzo normal máximo se le llama esfuerzo principal máximo σ_1 . Por otra parte la combinación de esfuerzos normales y cortantes aplicados que produce el esfuerzo normal mínimo se llama esfuerzo principal mínimo σ_2 (Mott, 2006). Sus magnitudes se calculan de la forma

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.5)$$

En el análisis experimental de esfuerzos, es importante conocer la orientación de los esfuerzos principales. El ángulo de inclinación de los planos, llamados planos principales, sobre los que actúan los esfuerzos principales se calcula con:

$$\phi_\sigma = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)} \right] \quad (2.6)$$

El ángulo ϕ_σ se mide desde el eje x positivo del elemento original de esfuerzos, hacia el esfuerzo principal máximo σ_1 . Entonces, el esfuerzo principal mínimo σ_2 , está en el plano xy y a 90° de σ_1 .

Cuando el elemento de esfuerzos se orienta como se ha descrito, para que los esfuerzos principales actúen sobre él, el esfuerzo cortante es cero. El elemento de esfuerzos resultante se muestra en la figura 2.12

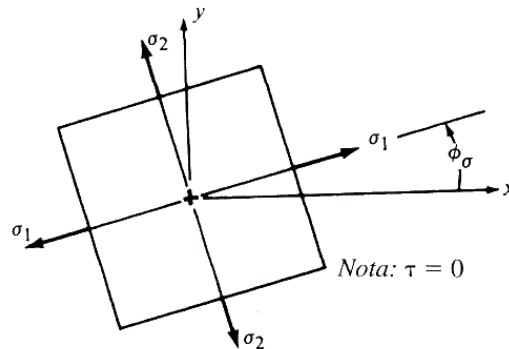


Figura 2.12 Elemento de esfuerzos principales

Por otra parte en una orientación distinta del elemento de esfuerzos principales, se presentaran los esfuerzos cortantes máximos. Su magnitud se calcula con:

$$\tau_1, \tau_2 = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.7)$$

El ángulo de inclinación del elemento donde se presenta el esfuerzo cortante máximo se calcula como sigue:

$$\phi_\tau = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{-(\sigma_x - \sigma_y)}{2\tau_{xy}} \right] \quad (2.8)$$

Por otra parte los esfuerzos octaedrales son aquellos que ocurren en el plano cuya normal forma ángulos iguales con los ejes principales donde:

$$\sigma_{oct} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.9)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2} \quad (2.10)$$

II.5.3. Estado de esfuerzo triaxial

Al igual que en el caso del esfuerzo plano o biaxial, existe una orientación particular del elemento en el espacio, en las que todas las componentes del esfuerzo cortante son iguales a cero. Cuando un elemento tiene dicha orientación, las normales a las caras corresponden a las direcciones principales y los esfuerzos normales ejercidos sobre esas caras son los esfuerzos principales. Puesto que hay seis caras, habrá tres direcciones principales y también tres esfuerzos principales σ_1, σ_2 y σ_3 .

Para especificar un estado general de esfuerzos en tres dimensiones se requiere seis componentes de esfuerzos, y el problema de determinar los esfuerzos y las direcciones principales se vuelve mucho más difícil. El proceso comprende el cálculo de las tres raíces de la ecuación cúbica.

$$\begin{aligned} & \sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \sigma^2 + (\sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2) \sigma \\ & - (\sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2) = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Una vez resuelta esta ecuación para un estado de esfuerzos determinado se podría obtener un elemento para esfuerzos principales. Al trazar los círculos de Mohr para esfuerzo triaxial, los esfuerzos principales se ordenan de manera que $\sigma_3 \rangle \sigma_2 \rangle \sigma_1$. Para obtener el esfuerzo cortante máximo siempre que se disponen los esfuerzos principales de la forma $\sigma_3 \rangle \sigma_2 \rangle \sigma_1$ se tiene:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \quad (2.12)$$

II.5.4.- Círculo de Mohr.

Es un método gráfico muy eficaz que permite visualizar el estado de esfuerzo en un punto y tener en cuenta la dirección de los diversos componentes asociados al esfuerzo plano. En la figura 2.13 se establece un sistema de coordenadas, en el que los esfuerzos normales se presentan como las abscisas y las cortantes, como ordenadas. En el eje de las abscisas, los esfuerzos normales de tensión (positivos) se marcan a la derecha del origen O, y los esfuerzos normales de compresión (negativos), a la izquierda. En el eje de las ordenadas los esfuerzos cortantes en el sentido de las agujas del reloj se trazan hacia arriba, y los esfuerzos cortantes contrarios al sentido de las agujas del reloj se trazan hacia abajo.

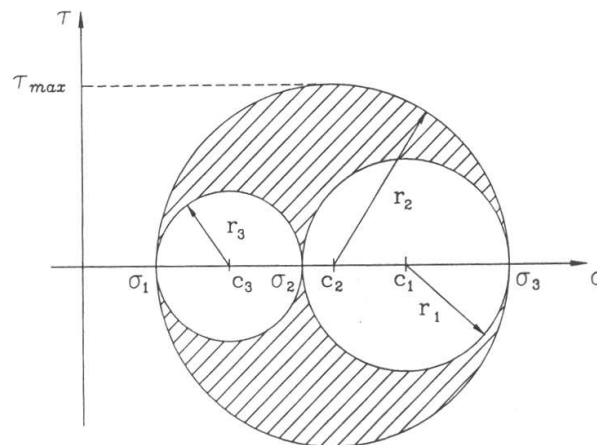


Figura 2.13 Círculos de Mohr.

II.6.- Teorías de fallas

En un sentido amplio, se considera que un elemento mecánico o estructural ha fallado cuando se vuelve incapaz de desempeñar con seguridad la función para la cual fue diseñado. Las diferentes fallas que presentan los materiales, pueden agruparse en cuatro categorías: fractura, deformación, corrosión y desgaste.

Se dice que un material ha fallado por fluencia cuando la deformación plástica en algún punto es superior a un cierto valor límite, normalmente convenido en 0.002 la deformación. Este tipo de falla se asocia generalmente con esfuerzos tangenciales y ocurre como consecuencia del deslizamiento de planos de átomos sin que se modifique la continuidad en la estructura del material. Las distancias interatómicas no varían en el proceso de deformación plástica, el cual es irreversible.

Se dice que un material ha fallado por fractura cuando se separa en dos o más partes. La fractura de un material puede ser dúctil o frágil. Una fractura se considera dúctil cuando presenta una deformación plástica apreciable antes de que se produzca la falla. En caso contrario se dice que es frágil. Aunque en algunos casos puede ocurrir que una fractura frágil sea parcialmente dúctil y viceversa. La fractura frágil se asocia normalmente con la presencia de esfuerzos normales de tracción y ocurre como consecuencia de que las fuerzas cohesivas entre los átomos son superadas por las sollicitaciones externas.

Lo deseable, normalmente, es que la fractura, si se presenta, sea dúctil, pues la fractura frágil ocurre repentinamente y sin advertencia alguna.

II.6.1.- Teoría del esfuerzo normal máximo.

Esta teoría, fue propuesta aparentemente por el célebre ingeniero inglés William J. M. Rankine (1820-1872) a mediados del siglo XIX, y se utiliza para

predecir la falla de aquellos materiales que presentan una fractura de naturaleza frágil. Esta teoría establece que un material fallará por fractura cuando el mayor esfuerzo principal positivo sea superior a la resistencia a la tracción S_{ut} del material, o bien cuando el menor esfuerzo principal negativo supere la resistencia a la compresión S_{uc} (Goncalves, 2002).

Una representación bastante cómoda para utilizar esta teoría se muestra en la figura 2.14 en un sistema de coordenadas (σ_1, σ_3) . Este diagrama se construye con los valores de la resistencia a la tracción S_{ut} y a la compresión S_{uc} del material. Para que el material no falle, el par de valores (σ_1, σ_2) debe estar dentro del rectángulo (op. cit.).

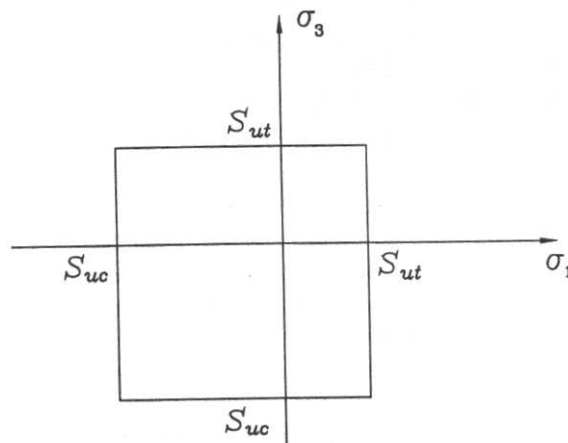


Figura 2.14 Diagrama de Mohr modificado para la teoría del esfuerzo normal máximo

II.6.2.- Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo.

Esta teoría, fue propuesta inicialmente por el científico francés H. Tresca en un artículo presentado en la Academia de Ciencias de Paris en 1868 y comprobada posteriormente de manera experimental por el investigador inglés J. J. Guest en el año 1900 (Goncalves, 2002).

Esta teoría establece que un material sometido a un estado general de esfuerzos fallará por fluencia cuando el esfuerzo de corte máximo alcance un determinado

valor, el cual corresponde al esfuerzo cortante máximo que se genera en el ensayo de tracción cuando se llega al límite de fluencia (op.cit.).

El esfuerzo de corte máximo viene dado por

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}$$

Dado que en un ensayo de tracción, el estado de esfuerzos es uniaxial, los esfuerzos principales son $\sigma_3 = S_y$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, cuando se alcanza el límite de fluencia, tal como se muestra en el diagrama de Mohr en la figura 2.15. Luego, el esfuerzo de corte máximo de fluencia es $(\tau_{\max})_y = S_y/2$. Entonces, para que el material no falle por fluencia se debe cumplir que:

$$\tau_{\max} \leq S_y/2 \cdot \psi \quad (2.13)$$

Donde ψ es el factor de seguridad

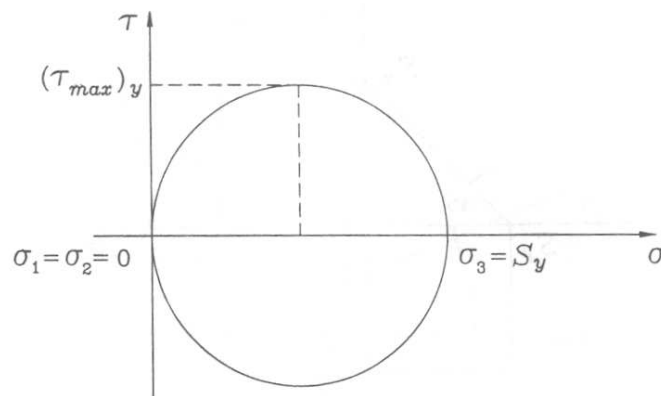


Figura 2.15 Diagrama de Mohr para un ensayo de tracción en el momento para el cual se alcanza la fluencia.

II.6.3.-Teoría de Von Mises

Esta teoría fue desarrollada inicialmente en forma independiente por M. T. Huber en Polonia en 1904 y por R. Von Mises en Alemania en 1913, basándose ambos en el concepto de la energía de distorsión. Idénticos resultados fueron obtenidos posteriormente por A. Nadai en Alemania, en 1937, utilizando el esfuerzo cortante en un plano octaedral. Es por ello que esta teoría de Von Mises se le conoce como la teoría de la energía de distorsión o también como la teoría del esfuerzo cortante octaedral (Goncalves, 2002).

La teoría de Von Mises se utiliza para predecir fallas por fluencia en materiales con comportamiento dúctil, y arroja resultados que guardan una correlación mucho más estrecha con los valores obtenidos experimentalmente (op.cit.).

Como se dijo anteriormente un plano octaedral es aquel que forma ángulos iguales con los tres ejes principales. Aplicando entonces la fórmula de Cauchy, el esfuerzo de corte en un plano octaedral puede expresarse como:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2}$$

Entonces, para que el material no falle por fluencia se debe cumplir que:

$$\tau_{oct} \leq \frac{\sqrt{2}}{3\psi} \cdot S_y \quad (2.14)$$

En la figura 2.16 se muestra superpuesta, en coordenadas (σ_1, σ_2) , las teorías de fallas de Tresca y Von Mises. Nótese que la teoría de Tresca es ligeramente más conservadora que la de Von Mises. En efecto, si los esfuerzos principales en el punto más crítico de un sólido tienen valores de tal magnitud que el punto (σ_1, σ_2) se ubica en la zona rayada de esta figura, según la teoría de Tresca se

habría superado ya la fluencia mientras que según la teoría de Von Mises la misma estaría aun por alcanzarse (op.cit.).

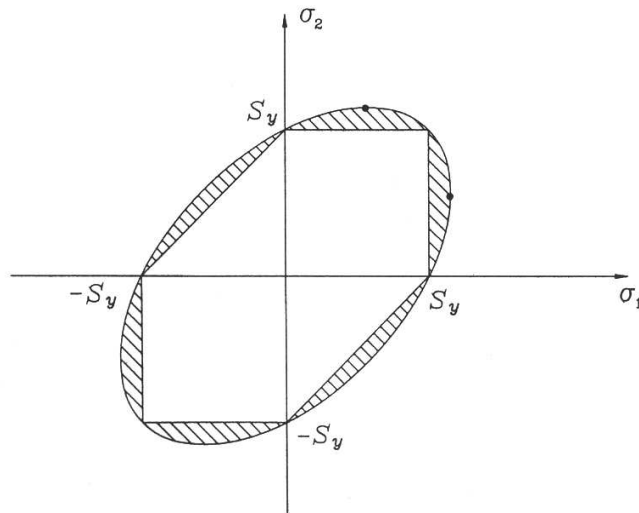


Figura 2.16 Comparación gráfica entre las teorías de Tresca y von Mises

II.7.- Esfuerzos en recipientes a presión.

Los recipientes a presión están sujetos a diversas cargas, que causan esfuerzos de diferentes intensidades en los componentes del recipiente. El tipo e intensidad de los esfuerzos es una función de la naturaleza de las cargas, de la geometría del recipiente y de su construcción (Megyesy, 1992).

II.7.1.- Cargas

- a) Presión interna o externa
- b) Peso del recipiente y su contenido
- c) Gradientes de temperatura y expansión térmica diferencial

II.7.2.- Esfuerzos

- a) Esfuerzo a la tensión

- b) Esfuerzo tangencial y esfuerzo radial a la compresión.

II.7.3.- Presión Interna

1. Presión de operación: La presión que se requiere en el proceso del que forma parte el recipiente, a la cual trabaja normalmente éste.
2. Presión de diseño: La presión que se emplea para diseñar el recipiente. Se recomienda diseñar un recipiente y sus componentes para una presión mayor que la presión de operación. Este requisito se satisface utilizando una presión de diseño de 10% más que la presión de trabajo. También debe tomarse en consideración la presión del fluido y de cualquier otra sustancia contenida en el recipiente.
3. Máxima presión permitida de operación: La presión interna a la que está sujeto el elemento más débil del recipiente correspondiente al esfuerzo máximo admisible, cuando se supone que el recipiente está:
 - a. En estado de desgaste por corrosión
 - b. A una temperatura determinada
 - c. En posición normal de trabajo
 - d. Bajo el efecto de otras cargas (carga de viento, presión externa, presión hidrostática, entre otras) que son aditivas a la presión interna.

Una práctica común que siguen muchos usuarios y fabricantes de recipientes sujetos a presión es considerar la presión máxima de trabajo permitida de la cabeza o del casco, y no la de elementos pequeños como bridas, aberturas, etc.

II.8.- Cilindros de pared gruesa

Con frecuencia se utilizan cilindros como recipientes a presión o tubos que pueden ser sujetos a presiones internas y/o externas, según se muestra en la figura 2.20. Algunos de estos dispositivos tienen un extremo abierto y algunos están cerrados. Si tienen un extremo abierto, aparecerá un estado de esfuerzos en dos dimensiones en las paredes del cilindro, con componentes de esfuerzos radiales y tangenciales (de anillo). Si están cerrados, también estará presente un esfuerzo en tres dimensiones llamado longitudinal o axial. Estos tres esfuerzos aplicados son mutuamente ortogonales y son principales, ya que no hay cortante aplicado debido a la presión uniformemente distribuida (Norton, 1999).

En la figura 2.17 se muestra un elemento diferencial anular en el radio r . los esfuerzos radiales y tangenciales de este elemento para un cilindro abierto están dados por la ecuación de Lamé:

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 p_i - r_0^2 p_0}{r_0^2 - r_i^2} - \frac{r_i^2 r_0^2 (p_i - p_0)}{(r_0^2 - r_i^2) r^2} \quad (2.15)$$

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 p_i - r_0^2 p_0}{r_0^2 - r_i^2} + \frac{r_i^2 r_0^2 (p_i - p_0)}{(r_0^2 - r_i^2) r^2} \quad (2.16)$$

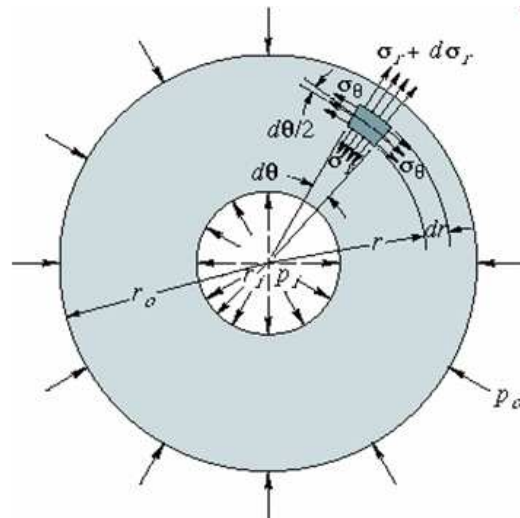


Figura 2.17 Cilindro de pared gruesa sometido a presiones externas e internas

Donde r_i y r_o son los radios interior y exterior, y p_i y p_o son las presiones internas y externas, respectivamente en ambos casos, y r es el radio del punto de interés. Estos varían de manera no lineal a todo el ancho de la pared.

Si los extremos del cilindro están cerrados, el esfuerzo axial sobre las paredes es:

$$\sigma_a = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2.17)$$

El esfuerzo axial es uniforme en todo el espesor de la pared.

Si la presión externa $p_o = 0$, entonces las ecuaciones se reducen a

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (2.18)$$

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 p_i}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (2.19)$$

si está cerrado en sus extremos:

$$\sigma_l = \frac{p_i r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (2.20)$$

Obsérvese que σ_r es siempre negativo (compresión) y que σ_t es siempre positiva (tracción) y mayor que σ_r . Su valor máximo aparece en la superficie interior del cilindro:

$$(\sigma_t)_{\max} = \left(\frac{r_0^2 + r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \right) p_i \quad (2.21)$$

Llamando K a la relación r_0/r_i se puede escribir en la forma:

$$(\sigma_t)_{\max} = \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \right) p_i \quad (2.22)$$

El valor medio de la tensión tangencial, obtenida es:

$$(\sigma_t)_{\text{medio}} = \frac{r_i p_i}{r_0 - r_i} = \frac{p_i}{K - 1} \quad (2.23)$$

Y la relación del valor máximo al valor medio de esta tensión tangencial es:

$$\frac{(\sigma_t)_{\max}}{(\sigma_t)_{\text{med}}} = \frac{K^2 + 1}{K + 1} \quad (2.24)$$

Como la tensión cortante máxima es igual a la semidiferencia de las tensiones principales, como se deduce del círculo de Mohr, y como la rotura de un material

dúctil, debida a la presión cortante como se establece en teoría de la tensión cortante máxima, este valor es muy importante para el diseño de este tipo de recipientes.

El valor máximo tiene lugar en la superficie interior del cilindro, en donde σ_r y σ_t son máximos y de signos contrarios, lo que da para τ_{\max} el valor:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{t \max} - \sigma_{r \max}}{2} = \frac{r_0^2}{r_0^2 - r_i^2} p_i \quad (2.25)$$

En la figura 2.18 aparece la distribución de estos esfuerzos en el espesor de pared, para $p_0 = 0$. Bajo presión interna, ambos son máximos en la superficie interior. El esfuerzo tangencial (de anillo) es a tensión y esfuerzo radial a compresión.

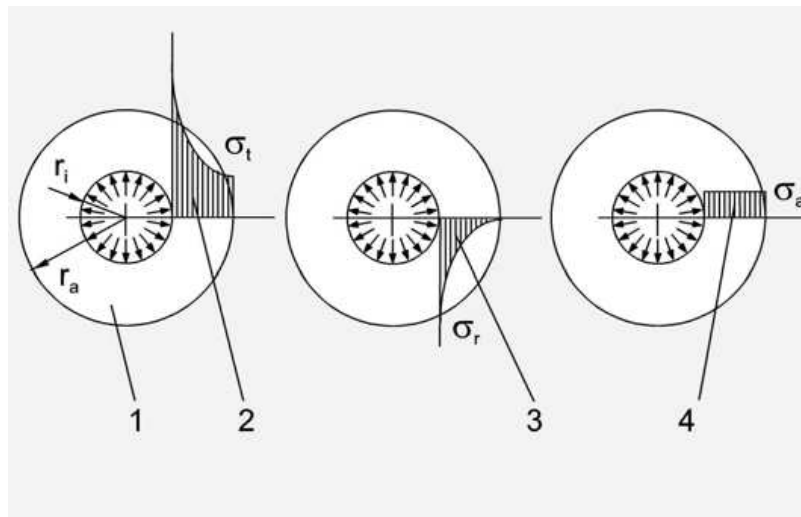


Figura 2.18 Tensiones en la pared del recipiente: 1.- recipiente, r_i radio interior, r_a radio exterior, 2.- distribución de tensiones en dirección tangencial σ_t , 3.- distribución de tensiones en dirección radial σ_r , 4.- distribución de tensiones en dirección axial σ_a

II.9.- Roscado

El roscado consiste en la mecanización helicoidal interior y exterior sobre una superficie cilíndrica, y es utilizado para conectar o juntar dos o más componentes.

El roscado se puede efectuar con herramientas manuales o se puede efectuar en máquinas como taladradoras, fresadoras y tornos. Para el roscado manual se utilizan machos y terrajas. Un macho se utiliza para roscar la parte hembra del acoplamiento (por ejemplo una tuerca). Una terraja se utiliza para roscar la porción macho del par de acoplamiento (por ejemplo un perno).

II.9.1.- Definiciones de la terminología de roscas.

La terminología para las roscas, ilustrada en la figura 2.19, se explica de la siguiente forma:

- **Rosca:** es un filete continuo de sección uniforme y arrollada como una elipse sobre la superficie exterior e interior de un cilindro.
- **Rosca externa:** es una rosca en la superficie externa de un cilindro.
- **Rosca interna:** es una rosca tallada en el interior de una pieza, tal como en una tuerca.
- **Diámetro interior:** es el mayor diámetro de una rosca interna o externa.
- **Diámetro del núcleo:** es el menor diámetro de una rosca interna o externa.

- **Diámetro medio:** es el diámetro de un cilindro imaginario que pasa por los filetes en el punto en el cual el ancho de estos es igual al espacio entre los mismos.
- **Paso:** es la distancia entre las crestas de dos filetes sucesivos. Es la distancia desde un punto sobre un filete hasta el punto correspondiente sobre el filete adyacente, medida paralelamente al eje.
- **Avance:** es la distancia que avanzaría el tornillo relativo a la tuerca en una rotación. Para un tornillo de rosca sencilla el avance es igual al paso, para uno de rosca doble, el avance es el doble del paso, y así sucesivamente.
- **Ángulo de la hélice o rosca (α):** Esta relacionado en el avance y el radio medio (r_m) por la ecuación:

$$\tan \alpha = \frac{\text{avance}}{2 * \pi * r_m}$$

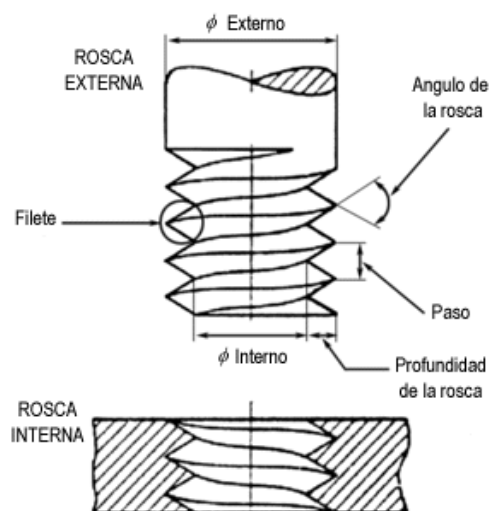


Figura 2.19 Nomenclatura de una rosca.

II.9.2.- Designaciones de roscas y área de esfuerzo

La tabla 2.3 muestra las dimensiones de las roscas de los estilos estándar americano y la tabla 2.4 contiene los estilos métricos SI. Para considerar la resistencia y el tamaño, se debe conocer el diámetro mayor básico, el paso de las roscas y el área disponible para resistir las cargas de tensión. El paso es igual a $1/n$, donde n es el número de roscas por pulgada en el sistema estándar americano. En el SI, el paso se indica directamente en milímetros. El área de resistencia a la tensión que contienen las tablas 2.3 y 2.4 ya considera el área real cortada por un plano transversal. Debido a la trayectoria helicoidal de la rosca sobre el tornillo, ese plano pasará cerca de la raíz en un lado, pero pasará cerca del diámetro mayor en el otro. La ecuación para el área de esfuerzo de tensión en las roscas estándar americana es

$$A_t = (0,7854) \cdot [D - (0,9743)p]^2 \quad (2.26)$$

Para roscas métricas, el área de esfuerzo de tensión es

$$A_t = (0,7854) \cdot [D - (0,9382)p]^2 \quad (2.27)$$

Donde D = diámetro mayor

P = paso de la rosca

A. Tamaños numerados					
Tamaño	Diámetro mayor básico (pulg)	Roscas gruesas: UNC		Roscas finas: UNF	
		Roscas por pulg	Área de esfuerzo de tensión (pulg ²)	Roscas por pulg	Área de esfuerzo de tensión (pulg ²)
0	0,0600			80	0,00180
1	0,0730	64	0,00263	72	0,00278
2	0,0860	56	0,00370	64	0,00394
3	0,0990	48	0,00487	56	0,00523
4	0,1120	40	0,00604	48	0,00661
5	0,1250	40	0,00796	44	0,00830
6	0,1380	32	0,00909	40	0,01015
8	0,1640	32	0,0140	36	0,01474
10	0,1900	24	0,0175	32	0,0200
12	0,2160	24	0,0242	28	0,0258
B. Tamaños Fraccionados					
1/4	0,2500	20	0,0318	28	0,0364
5/16	0,3125	18	0,0524	24	0,0580
3/8	0,3750	16	0,0775	24	0,0878
7/16	0,4375	14	0,1063	20	0,1187
1/2	0,5000	13	0,1419	20	0,1599
9/16	0,5625	12	0,182	18	0,203
5/8	0,6250	11	0,226	18	0,256
3/4	0,7500	10	0,334	16	0,373
7/8	0,8750	9	0,462	14	0,509
1	1,000	8	0,606	12	0,663
1 1/8	1,125	7	0,769	12	0,856
1 1/4	1,250	7	0,969	12	1,073
1 3/8	1,375	6	1,155	12	1,315
1 1/2	1,500	6	1,405	12	1,581
1 3/4	1,750	5	1,90		
2	2,000	4 ½	2,50		

Tabla 2.3 Dimensiones de roscas estándar americano

Diámetro mayor básico (mm)	Roscas gruesas		Roscas finas	
	Paso (mm)	Área de esfuerzo de tensión (mm ²)	Paso (mm)	Área de esfuerzo de tensión (mm ²)
1	0,25	0,46		
1,6	0,35	1,27	0,2	1,57
2	0,4	2,07	0,25	2,45
2,5	0,45	3,39	0,35	3,70
3	0,5	5,03	0,35	5,61
4	0,7	8,78	0,5	9,79
5	0,8	14,2	0,5	13,1
6	1	20,1	0,75	22
8	1,25	36,6	1	39,2
10	1,5	58	1,25	61,2
12	1,75	84,3	1,25	92,1
16	2	157	1,5	167
20	2,5	245	1,5	272
24	3	353	2	384
30	3,5	561	2	621
36	4	817	3	865
42	4,5	1121		
48	5	1473		

Tabla 2.4 Dimensiones de roscas métricas

II.9.3.-Designación y tipo de roscas de tubería.

Diferentes tipos de roscas han evolucionado para sistemas hidráulicos y para uniones. Las de mayor interés son las roscas para juntas cónica/paralela, plástico-a-metal en los circuitos hidráulicos.

A través del tiempo muchos tipos de roscas han sido desarrollados. Entre las aplicaciones se incluyen componentes de fijación, y circuitos hidráulicos y neumáticos. En el siglo IX, los fabricantes que necesitaban uniones ideaban sus propios sistemas. Esto dio como resultado problemas de compatibilidad. En 1841, el inventor e ingeniero mecánico Sir Joseph Whitworth, ideó un sistema uniforme de roscas para enfrentar estas dificultades. La forma de la rosca Whitworth se basa en una rosca con un ángulo de 55 grados con crestas y raíces redondas.

En 1864 en Norteamérica, William Sellers estableció el estándar para tuercas, pernos y tornillos que se convirtió en la Rosca de Tubería Cónica Nacional (NPT por sus siglas en inglés). Su ángulo de rosca de 60 grados, usada comúnmente por los primeros fabricantes de relojes, permitió el inicio de la Revolución Industrial Americana. Las formas de estas roscas luego se convirtieron en el American National Standard (Estándar Nacional Americano).

La conexión más conocida y ampliamente utilizada donde la rosca de tubería provee tanto unión mecánica como sello hidráulico es la Rosca de Tubería Cónica Nacional Americana, o NPT. La rosca NPT tiene una rosca cónica macho y hembra que sella con cinta de Teflón o un compuesto para unir. Las roscas de tubería usadas en los circuitos hidráulicos pueden ser divididas en dos tipos:

- **Roscas de unión** – Son roscas de tubería que mantienen la presión de las uniones por medio del sello de los hilos y son cónicas externas y paralelas o cónicas internas. El efecto de sellado es mejorado usando un compuesto para unir.
- **Roscas de ajuste** – Son roscas de tubería que no mantienen la presión de la unión por medio de los hilos. Ambas roscas son paralelas y el sellado se afecta por la compresión de un material suave en la rosca externa, o una empaquetadura plana.

II.9.3.1.- Tamaños

Los tamaños de las roscas se basan en el diámetro interno (ID) o en el tamaño del flujo. Por ejemplo, “1/2–14 NPT” determina una rosca de tubería con un diámetro interno nominal de 1/2 pulgada y 14 hilos en una pulgada, hecha de acuerdo al estándar de la norma NPT. Si las letras “LH” se añaden, la tubería tiene una rosca izquierda (por sus siglas en inglés). Las formas de roscas de tubería más conocidas a nivel mundial son:

NPT	American Standard Pipe Taper Thread
NPSC	American Standard Straight Coupling Pipe Thread
NPTR	American Standard Taper Railing Pipe Thread
NPSM	American Standard Straight Mechanical Pipe Thread
NPSL	American Standard Straight Locknut Pipe Thread
NPTF	American Standard Pipe Thread Tapered (Dryseal)
BSPP	British Standard Pipe Thread Parallel
BSPT	British Standard Pipe Thread Tapered

Tabla 2.5 Tipos de roscas de tuberías

Muchas roscas de tubería no solo deben hacer un sello mecánico sino también un sello hidráulico a prueba de fugas. Esto es obtenido mediante la forma cónica de la rosca del macho que encaja con la forma de la rosca de la hembra y el uso de un sellante de tubería para llenar cualquier vacío que haya quedado entre las dos roscas y que puede causar una fuga en espiral. Las terminales de las roscas no están sobre un cilindro, pero si sobre un cono. El cono es de 1/16 de pulgada, que es lo mismo que 3/4 de pulgada en un pie. Debido a la conicidad, una rosca de tubería puede solamente roscar en una conexión cierta distancia antes de que se trabé. El estándar especifica esa distancia como la longitud de ajuste con la mano, es decir, la rosca de tubería que puede roscarse con la mano. Además especifica otra distancia – la rosca efectiva, que es la longitud de la rosca que hace sello en una rosca convencional de tubería maquinada.

Los estándares dimensionales están establecidos en la Estándar ASA B2.1 para las roscas NPT, especifica dimensiones, tolerancias y mordaza para conectar y para tuberías rectas roscadas, incluyendo aplicaciones especiales exactas. El tipo normal de unión de tubería utiliza conexión externa y conexión interna de roscado.

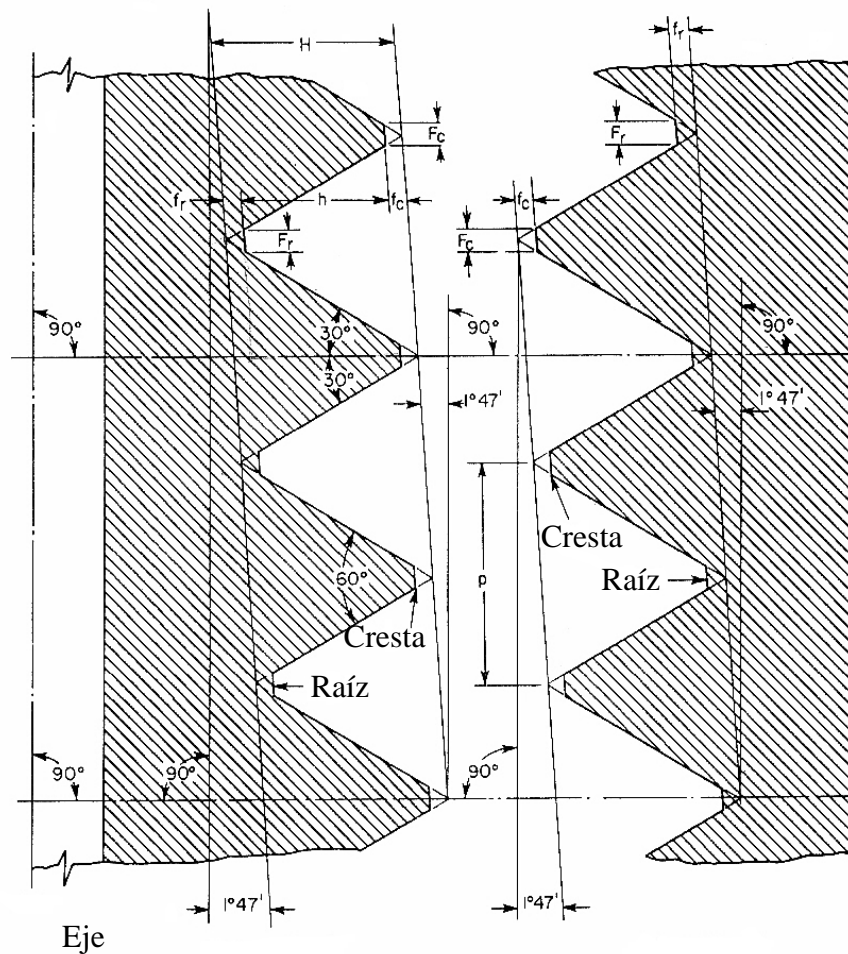


Figura 2.20 Rosca NPT

El ángulo entre los lados de la rosca es de 60 grados cuando se mide en un plano axial, y la línea bisectriz de este ángulo es perpendicular al eje para ambos, tanto conectar como roscar tuberías (figura 2.20). La profundidad máxima de base del hilo truncado, "h", es basado en factores introducidos en la fabricación de herramientas de corte y haciendo uniones herméticas.

$$\text{Paso en pulgadas } (p) = \frac{1}{\text{numero de hilos por pulgada } (n)}$$

Los diámetros de paso de base de la conexión roscada son determinados por las siguientes formulas basadas en el diámetro externo de la tubería y el paso de la rosca:

$$E_0 = D - (0,050 \cdot D + 1,1) \cdot \frac{1}{n} = D - (0,050 D + 1,1) \cdot p \quad (2.28)$$

$$E_1 = E_0 + 0,0625 \cdot L_1 \quad (2.29)$$

Donde:

D = diámetro externo de la tubería

E_0 = diámetro de paso de la rosca al final de tubería

E_1 = diámetro de paso de la rosca en la muesca de la mordaza o extremo grande del roscado interno

L_1 = paso normal por mano entre roscados internos y externos

n = número de hilos por pulgada

p = paso de la rosca, en pulgadas

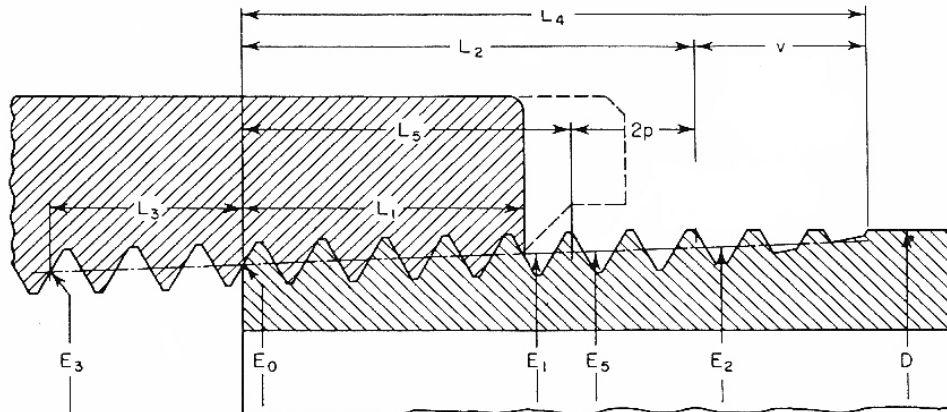
El incremento en el diámetro por roscado es $\frac{0,0625}{n}$

La longitud de base, L_2 , de conexión roscada externa efectiva es determinada por la siguiente fórmula basada en la parte de afuera de la tubería y el paso de la rosca:

$$L_2 = (0,80 \cdot D + 6,8) \cdot \frac{1}{n} = (0,80 \cdot D + 6,8) \cdot p \quad (2.30)$$

Esta fórmula determina directamente la longitud de roscado efectiva el cual incluye aproximadamente 2 hilos utilizables que son ligeramente imperfectos en la cresta.

En la tabla 2.6 se muestra las especificaciones para las roscas NPT según el diámetro nominal de la tubería.



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tamaño nominal de la tubería pulg	Diámetro externo del tubo D	Hilos por pulgada n	Paso de la rosca p	Diámetro de paso al inicio de la rosca externa E_0	Paso normal manual entre roscado interno y externo			Hilo efectivo externo		
					Longitud L_1		Diámetro E_1	Longitud L_2		Diámetro E_2
					Pulg	Hilos		Pulg	Hilos	
1/16	0,3125	27	0,03704	0,27118	0,160	4,32	0,28118	0,2611	7,05	0,28750
1/8	0,405	27	0,03704	0,36351	0,1615	4,36	0,37360	0,2639	7,12	0,38000
1/4	0,540	18	0,05556	0,47739	0,2278	4,10	0,49163	0,4018	7,23	0,50250
3/8	0,675	18	0,05556	0,61201	0,240	4,32	0,62701	0,4078	7,34	0,63750
1/2	0,840	14	0,07143	0,75843	0,320	4,48	0,77843	0,5337	7,47	0,79179
3/4	1,050	14	0,07143	0,96768	0,339	4,75	0,98887	0,5457	7,64	1,00179
1	1,315	11 ½	0,08696	1,21363	0,400	4,60	1,23863	0,6828	7,85	1,25630
1 ¼	1,660	11 ½	0,08696	1,55713	0,420	4,83	1,58338	0,7068	8,13	1,60130
1 ½	1,900	11 ½	0,08696	1,79609	0,420	4,83	1,82234	0,7235	8,32	1,84130
2	2,375	11 ½	0,08696	2,26902	0,436	5,01	2,29627	0,7565	8,70	2,31630
2 ½	2,875	8	0,12500	2,71953	0,682	5,46	2,76216	1,1375	9,10	2,79062
3	3,500	8	0,12500	3,34062	0,766	6,13	3,38850	1,2000	9,60	3,41562
3 ½	4,000	8	0,12500	3,83750	0,821	6,57	3,88881	1,2500	10,00	3,91562
4	4,500	8	0,12500	4,33438	0,844	6,75	4,38712	1,3000	10,40	4,41562
5	5,563	8	0,12500	5,39073	0,937	7,50	5,44929	1,4063	11,25	5,47892
6	6,625	8	0,12500	6,44609	0,958	7,66	6,50597	1,5125	12,10	6,54062
8	8,625	8	0,12500	8,43359	1,063	8,50	8,50003	1,7125	13,70	8,54062
10	10,750	8	0,12500	10,54531	1,210	9,68	10,62094	1,9250	15,40	10,66562

1	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Tamaño nominal de la tubería pulg	Longitud de apriete con llave			Hilos de rosca imperfectos V		Longitud total de rosca exterior	Valores nominales de rosca externa perfecta		Altura del hilo de rosca	Incremento del diámetro por hilo de rosca 0,0625/n
	Longitud L ₃		Diámetro E ₃	Pulg	Hilos		Longitud L ₅	Diámetro E ₅		
	Pulg	Hilos								
1/16	0,1111	3	0,26424	0,1285	3,47	0,3896	0,1870	0,28287	0,02963	0,00231
1/8	0,1111	3	0,35656	0,1285	3,47	0,3924	0,1898	0,37537	0,02963	0,00231
1/4	0,1667	3	0,46697	0,1928	3,47	0,5946	0,2907	0,49556	0,04444	0,00347
3/8	0,1667	3	0,60160	0,1928	3,47	0,6006	0,2967	0,63056	0,04444	0,00347
1/2	0,2143	3	0,74504	0,2478	3,47	0,7815	0,3909	0,78286	0,05714	0,00446
3/4	0,2143	3	0,95429	0,2478	3,47	0,7935	0,4029	0,99286	0,05714	0,00446
1	0,2609	3	1,19733	0,3017	3,47	0,9845	0,5089	1,24543	0,06957	0,00543
1 ¼	0,2609	3	1,54083	0,3017	3,47	1,0085	0,5329	1,59043	0,06957	0,00543
1 ½	0,2609	3	1,77978	0,3017	3,47	1,0252	0,5496	1,83043	0,06957	0,00543
2	0,2609	3	2,25272	0,3017	3,47	1,0582	0,5826	2,30543	0,06957	0,00543
2 ½	0,2500	2	2,70397	0,4337	3,47	1,5712	0,8875	2,77500	0,10000	0,00781
3	0,2500	2	3,32500	0,4337	3,47	1,6337	0,9500	3,40000	0,10000	0,00781
3 ½	0,2500	2	3,82188	0,4337	3,47	1,6837	1,0000	3,90000	0,10000	0,00781
4	0,2500	2	4,31875	0,4337	3,47	1,7337	1,0500	4,40000	0,10000	0,00781
5	0,2500	2	5,37511	0,4337	3,47	1,8400	1,1563	5,46300	0,10000	0,00781
6	0,2500	2	6,4307	0,4337	3,47	1,9462	1,2625	6,52500	0,10000	0,00781
8	0,2500	2	8,41797	0,4337	3,47	2,1462	1,4625	8,52500	0,10000	0,00781
10	0,2500	2	10,52969	0,4337	3,47	2,3587	1,6750	10,65000	0,10000	0,00781

Tabla 2.6 Dimensiones de roscas NPT

II.9.4.- Resistencia al arranque de rosca.

Los esfuerzos producidos en las roscas debido a las fuerzas de sujeción entre dos elementos, deben ser revisados para asegurar que no sean arrancadas por la fuerza cortante. Las variables que intervienen en la resistencia de las roscas al cortante son los materiales del perno, de la tuerca, o de las roscas internas de un orificio machuelazo, la longitud de atornillado L_e y el tamaño de las roscas. Los detalles del análisis dependen de la resistencia relativa de los materiales

- **Material de la rosca interna, más resistente que el del perno.** Para este caso, la resistencia de las roscas del perno controlará el diseño. Se presenta aquí una ecuación para calcular la longitud necesaria de

atornillado, L_e , de las roscas del tornillo, que tendrá cuando menos la misma resistencia en cortante que el tornillo mismo a la tensión.

$$L_e = \frac{2 \cdot A_{tB}}{\pi \cdot (ID_{N\text{máx}}) \cdot [0,5 + 0,57735 \cdot n \cdot (PD_{B\text{mín}} - ID_{N\text{máx}})]} \quad (2.31)$$

Donde

A_{tB} = área del perno para esfuerzo de tensión

$ID_{N\text{máx}}$ = diámetro interior (de raíz) máximo de las roscas de la tuerca

n = número de roscas por pulgada

$PD_{B\text{mín}}$ = diámetro de paso mínimo de las roscas del perno

Los subíndices B y N representan al perno y la tuerca, respectivamente. Los subíndices mín y máx indican los valores mínimo y máximo, considerando las tolerancias en las dimensiones de las roscas.

Para determinada longitud de atornillado, el área de las roscas del perno al esfuerzo cortante es

$$A_{sB} = \pi \cdot L_e \cdot ID_{N\text{máx}} \cdot [0,5 + 0,57735 \cdot n \cdot (PD_{B\text{mín}} - ID_{N\text{máx}})] \quad (2.32)$$

- **Material de la tuerca más débil que el material del perno.** Esto se aplica en especial cuando el perno se introduce en un orificio roscado en hierro colado, aluminio o algún otro material con resistencia relativamente baja. La longitud necesaria de atornillado, para desarrollar cuando menos la resistencia total del perno es

$$L_e = \frac{S_{utB} \cdot (2 \cdot A_{tB})}{S_{utN} \cdot \pi \cdot (OD_{B\text{mín}}) \cdot [0,5 + 0,57735 \cdot n \cdot (OD_{B\text{mín}} - PD_{N\text{máx}})]} \quad (2.33)$$

Donde

S_{utB} = resistencia última de tensión, del material del perno

S_{utN} = resistencia última de tensión, del material de la tuerca

$OD_{Bmín}$ = diámetro exterior mínimo de las roscas del perno

$PD_{Nmáx}$ = diámetro de paso máximo de las roscas de la tuerca

El área de la raíz de las roscas de la tuerca, sometida al cortante, es

$$A_{sN} = \pi \cdot L_e \cdot OD_{Bmín} \cdot [0,5 + 0,57735 \cdot n \cdot (OD_{Bmín} - PD_{Nmáx})] \quad (2.34)$$

- **Resistencia igual de los materiales de perno y tuerca.** Para este caso, la falla sucede por cortante de cualquiera de las partes en el diámetro de paso nominal, PD_{nom} . La longitud necesaria de atornillado, para desarrollar al menos toda la resistencia del perno, es

$$L_e = \frac{4 \cdot A_{tB}}{\pi \cdot P \cdot D_{nom}} \quad (2.35)$$

El área de esfuerzo cortante, para las roscas de la tuerca o del perno, es

$$A_s = \pi \cdot P \cdot D \cdot \frac{L_e}{2} \quad (2.36)$$

Por otra parte los esfuerzos en la rosca se calculan considerando que la rosca es una viga corta en voladizo proyectada desde el núcleo. (Figura 2.21) la carga sobre la viga se toma como la carga axial del tornillo F , concentrada en el radio medio (r_m), esto es la mitad de la altura h de la rosca. El ancho de la viga es la longitud de la rosca (medida en el radio medio) sometida a la carga. Con esta hipótesis el esfuerzo cortante transversal medio es

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_m \cdot b} \quad (2.37)$$

Donde n es el número de vueltas de rosca sometidas a la carga y b es el ancho de la sección de la rosca en el núcleo.

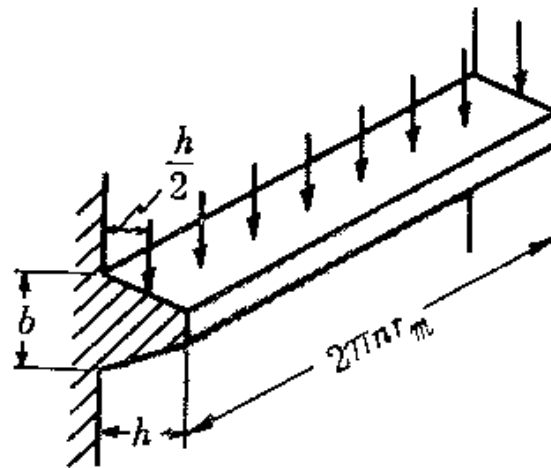


Figura 2.21 Esfuerzos en la rosca

En especial, debe notarse que éstos son esfuerzos medios porque se han supuesto que las roscas comparten la carga equitativamente. Para el diseño de estas roscas es recomendable utilizarse factores grandes de seguridad, $\psi \geq 2$ (Shigley, 1989).

II.10.- Ajustes de holgura

Siempre que deba haber una holgura entre las piezas acopladas, se especifica un ajuste de holgura entre las piezas acopladas, se especifica un ajuste de holgura. La designación de ajustes estándar de holgura de la norma ANSI B4.1, para miembros que deban moverse entre sí, es el ajuste de holgura (RC, de runnig fit). Dentro de esta norma existen nueve clases, de RC1 a RC9, donde RC1 da la holgura mínima y RC9 la máxima. Las siguientes descripciones de los miembros

individuales de esta clase ayudan a decidir lo que es más adecuado para determinada aplicación (Mott, 2006)

RC1 (ajuste de deslizamiento estrecho): Ubicación exacta de las piezas que se deben ensamblar sin que exista un juego perceptible.

RC2 (ajuste de deslizamiento): Piezas que se moverán y girarán con facilidad, pero que no deben deslizarse libremente. Las piezas se pueden agarrotar debido a pequeños cambios de temperatura, en especial en los tamaños más grandes.

RC3 (ajuste de deslizamiento medio): Piezas de precisión que funcionan a bajas velocidades con cargas ligeras, que deben funcionar libremente. Los cambios de temperaturas pueden causar dificultades.

RC4 (ajuste estrecho de deslizamiento): ubicación exacta con juego mínimo, para usar bajo cargas y velocidades moderadas. Una buena opción para la maquinaria exacta.

RC5 (ajuste de deslizamiento medio): Piezas maquinadas exactas para mayores velocidades y cargas que el RC4.

RC6 (ajuste de deslizamiento medio): Parecido al RC5, para aplicaciones donde se desea mayor holgura.

RC7 (ajuste de deslizamiento libre): Movimiento relativo confiable con amplias variaciones de temperatura, en aplicaciones donde no sea crítica la exactitud.

RC8 (ajuste de deslizamiento flojo): Permite grandes holguras y el uso de piezas con tolerancias comerciales.

RC9 (ajuste de deslizamiento flojo): Parecido al RC8, con holguras 50% mayores, aproximadamente.

La tabla 2.7 estos tipos de ajustes, los números están en milésima de pulgadas.

Intervalo de tamaños nominales (pulg)	Clase RC2			Clase RC5			Clase RC8		
	Límites de holgura	Límites normales		Límites de holgura	Límites normales		Límites de holgura	Límites normales	
		Orificio	Eje		Orificio	Eje		Orificio	Eje
0 – 0,12	0,1	+0,25	-0,1	0,6	+0,6	-0,6	2,5	+1,6	-2,5
	0,55	0	-0,3	1,6	0	-1,0	5,1	0	-3,5
0,12 – 0,24	0,15	+0,3	-0,15	0,8	+0,7	-0,8	2,8	+1,8	-2,8
	0,65	0	-0,35	2,0	0	-1,3	5,8	0	-4,0
0,24 – 0,40	0,2	+0,4	-0,2	1,0	+0,9	-1,0	3,0	+2,2	-3,0
	0,85	0	-0,45	2,5	0	-1,6	6,6	0	-4,4
0,40 – 0,71	0,25	+0,4	-0,25	1,2	+1,0	-1,2	3,5	+2,8	-3,5
	0,95	0	-0,55	2,9	0	-1,9	7,9	0	-5,1
0,71 – 1,19	0,3	+0,5	-0,3	1,6	+1,2	-1,6	4,5	+3,5	-4,5
	1,2	0	-0,7	3,6	0	-2,4	10,0	0	-6,5
1,19 – 1,97	0,4	+0,6	-0,4	2,0	+1,6	-2,0	5,0	+4,0	-5,0
	1,4	0	-0,8	4,6	0	-3,0	11,5	0	-7,5
1,97 – 3,15	0,4	+0,7	-0,4	2,5	+1,8	-2,5	6,0	+4,5	-6,0
	1,6	0	-0,9	5,5	0	-3,7	13,5	0	-9,0
3,15 – 4,73	0,5	+0,9	-0,5	3,0	+2,2	-3,0	7,0	+5,0	-7,0
	2,0	0	-1,1	6,6	0	-4,4	15,5	0	-10,5
4,73 – 7,09	0,6	+1,0	-0,6	3,5	+2,5	-3,5	8,0	+6,0	-8,0
	2,3	0	-1,3	7,6	0	-5,1	18,0	0	-12,0
7,09 – 9,85	0,6	+1,2	-0,6	4,0	+2,8	-4,0	10,0	+7,0	-10,0
	2,6	0	-1,4	8,6	0	-5,8	21,5	0	-14,5
9,85 – 12,41	0,7	+1,2	-0,7	5,0	+3,0	-5,0	12,0	+8,0	-12,0
	2,8	0	-1,6	10,0	0	-7,0	25,0	0	-17,0

Tabla 2.7 Ajuste de holgura (RC)

II.11.- Teflón (PTFE)

El politetrafluoretileno (PTFE) es un polímero similar al polietileno, en el que los átomos de hidrógeno han sido sustituidos por átomos flúor. La fórmula química del monómero, tetrafluoretileno, es $CF_2=CF_2$.

El PTFE es un material tenaz, flexible y no resilente, de esfuerzos de tensión moderada pero con excelente resistencia al calor, a productos químicos y al paso de la corriente eléctrica. Este permanece dúctil en compresión a temperaturas tan bajas como 4K (-269°C). Como con otros materiales plásticos, la temperatura tiene un efecto considerable sobre las propiedades mecánicas.

El coeficiente de fricción es usualmente bajo y declarado a ser más bajo que cualquier otro sólido. Un número de valores diferente han sido citados en las literaturas pero están usualmente en el rango de 0,032 – 0,10 de polímero a polímero.

La resistencia de productos químicos del PTFE es excepcional. No hay solventes y este es atacado únicamente por la temperatura de cuarto únicamente por metales alcalinos fundidos y en algunos casos por flúor. Tratamientos con solución de metal sódica en amoníaco líquido suficientemente alterara la superficie de un ejemplo de PTFE para habilitar este para ser sementado a otros materiales usando adhesivos de resina epóxica. Además este tiene buena resistencia al tiempo, el PTFE es degradado por radiación de alta energía.

II.12.- Metodología del diseño

En líneas generales podemos distinguir tres categorías de diseños: diseños originales, diseños revolucionarios y diseños evolutivos. Los diseños originales son aquellos que resuelven un problema totalmente nuevo y que nunca se había resuelto anteriormente; los diseños revolucionarios son aquellos que logran una solución totalmente nueva a un problema ya resuelto con anterioridad. El diseño evolutivo consiste en mejorar diseños previos.

El diseño en Ingeniería consta en elaborar un plan para satisfacer una necesidad o un problema. Todo diseño tiene un propósito bien definido, la obtención de una respuesta final a la que se llega mediante una acción determinada o por la creación de algo que tiene una realidad física. Si este plan propicia la creación de un objeto

que lleva a una solución física, entonces este producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, de fácil fabricación.

La metodología del diseño, proporciona un esquema de análisis para la solución del problema encontrado. Al momento de realizar cualquier estudio de diseño, se sigue una serie de pasos para obtener respuesta a la necesidad planteada. Los pasos a seguir son los siguientes:

II.12.1.- Identificación del problema

Definir, es establecer los límites hacia donde va dirigido el estudio, es saber hasta donde se quiere llegar con el problema y el alcance final de la solución, para conocer claramente el camino a seguir. En este paso, no se puede relacionar la necesidad con un aparato en específico, pues esto limitaría las posibles soluciones al problema.

Definir un problema es la parte más complicada del diseño, en esta parte no se detalla acerca de cómo llegar al diseño final, será breve, concisa y concreta; y solamente se sabrá que es lo que se quiere obtener.

De esta primera fase del proceso de diseño deberá existir un enunciado que establezca, vagamente y en términos muy generales, cual es la necesidad a resolver.

II.12.2.- Tormenta de ideas

Esta es una de las partes creativa del proceso de diseño, es una técnica donde se logran obtener todas las ideas posibles para solucionar el problema, sin restricciones ni limitaciones.

Este método fue ideado por Alex Osborn y consiste en reunir un grupo (de 6 a 15 personas) para generar todas las ideas posibles y solventar el problema inicial sin discriminar ninguna idea por parte del diseñador. El grupo debe trabajar sobre las siguientes reglas:

- No se permite ninguna evaluación o juicio sobre las ideas.
- Tratar de que los participantes generen ideas y las expongan en la forma más espontánea posible.
- Debe buscarse cantidad de ideas porque esto ayudara a evitar evaluarla internamente y porque cantidad, en este caso, genera calidad.
- Debe promoverse entre los miembros del grupo que construyan sobre las ideas de otros, porque esto generalmente desemboca en ideas superiores a las iniciales.
- Es recomendable que las ideas propuestas sean apuntadas en forma perfectamente visible a todos los participantes, como por ejemplo en un pizarrón.

La duración de las sesiones es variable pero oscila sobre la media hora. Esto se debe, que al principio tenemos la fase de calentamiento con baja producción, de allí pasamos a la fase productora donde en poco tiempo se generan muchas ideas; a partir de un máximo la rata de producción comienza a disminuir y esto es debido a que ya se dijo todo lo obvio, sin embargo, es en este período cuando comienza a generarse las mejores ideas, por lo que no hay que suspender la sesión rápidamente. Cuando se observa que transcurre mucho tiempo para que aparezca una nueva idea, se suspende la sesión.

II.12.3.- Perfeccionamiento de las ideas

En esta etapa, se comienzan a evaluar todas las ideas propuestas en el proceso anterior, se caracterizan los criterios de descartes para lograr llegar a un número menor de ideas y el diseñador se concentra en el análisis de las limitaciones. Se estudian y analizan todos los bosquejos realizados para obtener respuestas reales y concretas al problema planteado.

En esta etapa, el diseñador tiene la potestad de rechazar los diseños a simple vista o de aplicarle los criterios planteados por el para así tener una gama de ideas sobre las cuales enfocarse para la siguiente parte del proceso.

II.12.4.- Análisis

El análisis implica el repaso y evaluación de un diseño, en cuanto se refiere a factores humanos, resistencia, operación y economía, dirigidas a satisfacer los requisitos del diseño. Gran parte del entrenamiento formal del ingeniero se concentra en estas áreas de estudio.

A cada una de las soluciones perfeccionadas, se le aplican diversos factores para confirmar si cumplen las restricciones impuestas a la solución, así como otros criterios de solución. Aquellas que no pasan estos controles son rechazadas y solamente se dejan las que de alguna manera podrían llegar a ser soluciones viables al problema planteado.

II.12.5- Decisión

En esta parte del proceso es donde se aceptan o rechazan las posibles soluciones planteadas en la tormenta de ideas. Es posible desarrollar, perfeccionar y analizar varias ideas, y cada una puede ofrecer ventajas sobre las otras, pero ninguna idea es ampliamente superior a las demás.

La decisión acerca de cual diseño será el óptimo para una necesidad específica debe determinarse mediante una matriz de decisión, experiencia técnica e información real. Siempre existe el riesgo de error en cualquier decisión, pero un diseño bien elaborado estudia el problema a tal profundidad que minimiza la posibilidad de pasar por alto una consideración importante, como ocurriría en una solución improvisada.

II.12.6.- Construcción.

El último paso del diseñador es preparar y supervisar los planos, las especificaciones finales con los cuales se va a construir el diseño seleccionado. En algunos casos, el diseñador supervisa e inspecciona la realización de su diseño. Al presentar un diseño para la realización, se debe tener en cuenta los detalles de fabricación, métodos de ensamblaje, materiales a utilizar y otras especificaciones, las cuales harán que se realice el trabajo de manera rápida, fácil y eficiente.

Durante esta etapa, el diseñador puede realizar modificaciones a poca escala que logren mejorar el diseño, sin embargo, estos cambios deben ser insignificantes para la idea global, al menos que surja un concepto enteramente nuevo e innovador, por lo cual, se tendrá que realizar una devolución a las etapas iniciales del proceso de diseño, para que el nuevo concepto sea desarrollado, aprobado y presentado.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DEL DISEÑO

La metodología del diseño consiste en seguir una serie de pasos y llegar así a una solución satisfactoria. En dichos pasos, el diseñador se basa en los conocimientos adquiridos a lo largo de su vida, de su experiencia y de lo aprendido a lo largo de su carrera, lo cual lo ayuda a transformar materiales en producto, usando todas las herramientas posibles a su disposición tales como el tiempo, recursos monetarios, tecnología, entre otros. El producto final debe ser funcional, práctico, manejable, seguro, eficiente, competitivo y de fácil producción.

El diseño aplicado en la ingeniería mecánica consiste en crear y construir una serie de componentes, la mayoría de naturaleza mecánica, haciendo uso de las ciencias y del estudio aplicado de los materiales en paralelo con un conocimiento profundo de las implicaciones, limitaciones y creatividad por parte del diseñador.

III.1. – Identificación del Problema

Desde hace ya algún tiempo, en el Laboratorio de Refinación y Petroquímica en el modulo II ubicado en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, y como parte de diversos proyectos de investigación enmarcados dentro del campo de la catálisis heterogénea; se ha venido realizando la preparación de zeolitas, por medio de métodos convencionales de calentamiento (síntesis hidrotérmica en recipiente cerrado) y en tiempos de reacción relativamente largos, en el mejor de los casos 48 horas. Este hecho, junto con el conocimiento de que este tipo de sólidos se pueden sintetizar utilizando la radiación de microondas (Mehdipourghazi, Moheb y Kazemian, 2010), generó la necesidad de diseñar un recipiente cerrado (reactor) que permitiera realizar, bajo las condiciones de reacción apropiadas, dicha síntesis, utilizando un horno de

microondas convencional, lo cual permitiría la disminución significativa de los tiempos de reacción, manteniendo los altos rendimientos en la síntesis de las zeolitas.

III.2. – Tormenta de Ideas.

Para generar una gran cantidad de ideas preliminares, se reunió un grupo de estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica, se les explicó brevemente la necesidad de realizar la síntesis de manera segura y eficiente, así como reducir los tiempos actuales. Durante este paso de la metodología, no existen limitaciones y todas las ideas son tomadas en cuenta, anotadas y analizadas.

Después de la tormenta de ideas, y para limitar las soluciones, se deben tomar una serie de consideraciones a los diseños preliminares generados en este paso, para solventar la necesidad planteada inicialmente con ideas viables. Para delimitar las ideas, se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- El material a utilizar debe ser transparente a las microondas, por lo tanto no puede haber metales ni soldaduras.
- El material no debe reaccionar durante la síntesis.
- El material a utilizar debe ser capaz de soportar las temperaturas y presiones establecidas, sin deformarse plásticamente.
- El recipiente debe tener dimensiones adecuadas a un horno de microondas convencional.
- La forma del recipiente no debe ser muy compleja, para una fácil construcción.
- El recipiente debe poder abrirse y cerrarse fácilmente, garantizando la hermeticidad, así como de fácil limpieza y mantenimiento.

III.3. – Perfeccionamiento de las Ideas

En esta etapa, se comenzó a evaluar todas las ideas propuestas en el proceso anterior, se estudio y analizó cada una de las ideas, propuestas y bosquejos con el fin de mejorarlas para obtener respuestas reales y concretas al problema planteado, de esta forma se obtuvo una serie de propuestas que se dan a continuación:

Propuesta # 1

Esta propuesta consiste en un recipiente cilíndrico herméticamente cerrado mediante una rosca interna en la tapa del cilindro, y una rosca externa en el cuerpo del recipiente. Este diseño nos permite un diámetro de boca en el recipiente lo suficientemente grande para un cómodo y rápido ingreso de material a sintetizar y/o extracción del producto. Además es de fácil construcción y limpieza una vez culminado su uso.

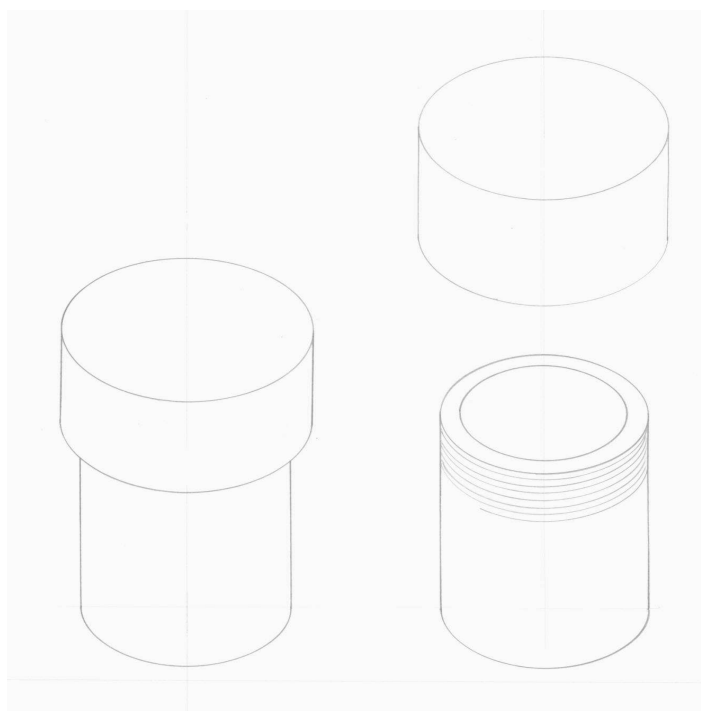


Figura 3.1 Propuesta número 1

Propuesta # 2

Dicha propuesta es similar a la anterior (propuesta #1), variando que la tapa y el cuerpo del recipiente se unen por medio de un anillo de roscado, sellando herméticamente ambas partes del recipiente. Esto se lograría debido a una rosca externa en el cuerpo del recipiente, y una rosca interna en el anillo permitiendo la unión a presión de la tapa con el cuerpo del recipiente, además, este anillo posee un moleteado en su superficie externa para un mejor agarre por parte del operador al momento de unir las piezas.

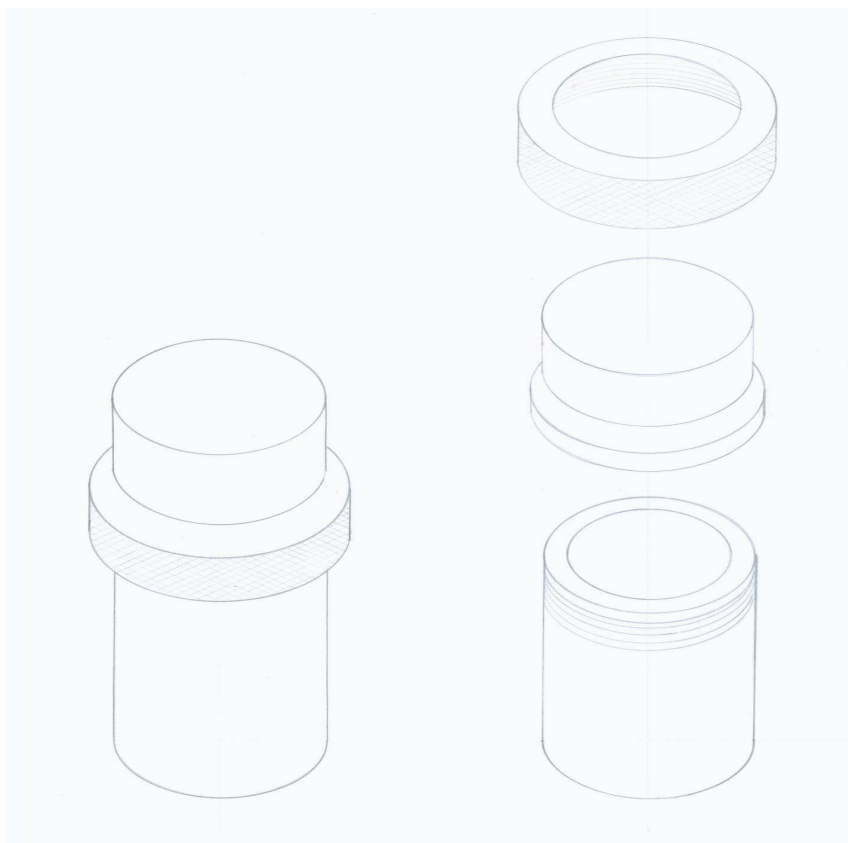


Figura 3.2 Propuesta número 2

Propuesta # 3

Está compuesto básicamente de cuatro partes, tal como se muestra en la figura. La primera de ellas cumple la función de una camisa de protección al recipiente donde se realiza la preparación de la muestra, está en cierta forma evita que el recipiente se deteriore y actúa como protección en el caso de que este falle. Por lo tanto esta será de un material más resistente y transparente a las ondas del microondas. Esta camisa posee una rosca externa, la cual permite cerrar herméticamente el conjunto con la tapa, que es del mismo material de la camisa.

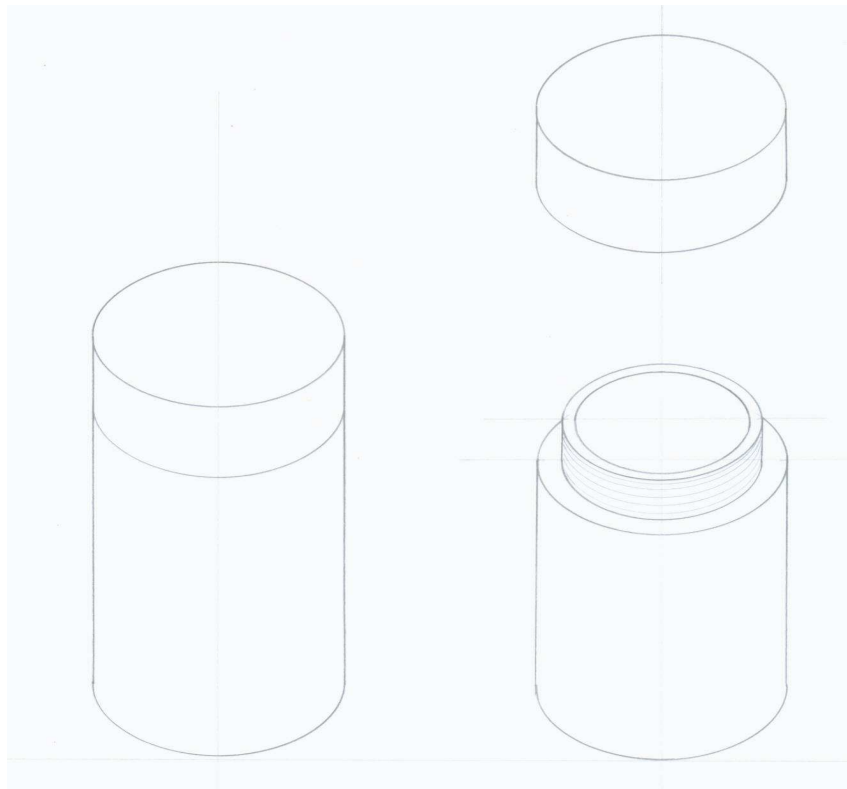


Figura 3.3 Propuesta número 3

Propuesta # 4

Consiste en un recipiente esférico cerrado herméticamente por una rosca, y la tapa actúa como un tapón roscado internamente al cuerpo del recipiente esférico. Este posee un fondo plano para evitar que el mismo se voltee y se pueda derramar la muestra a sintetizar, además el de evitar que choque con las paredes del microondas. Una ventaja de este recipiente es que acepta un mayor volumen de muestra.

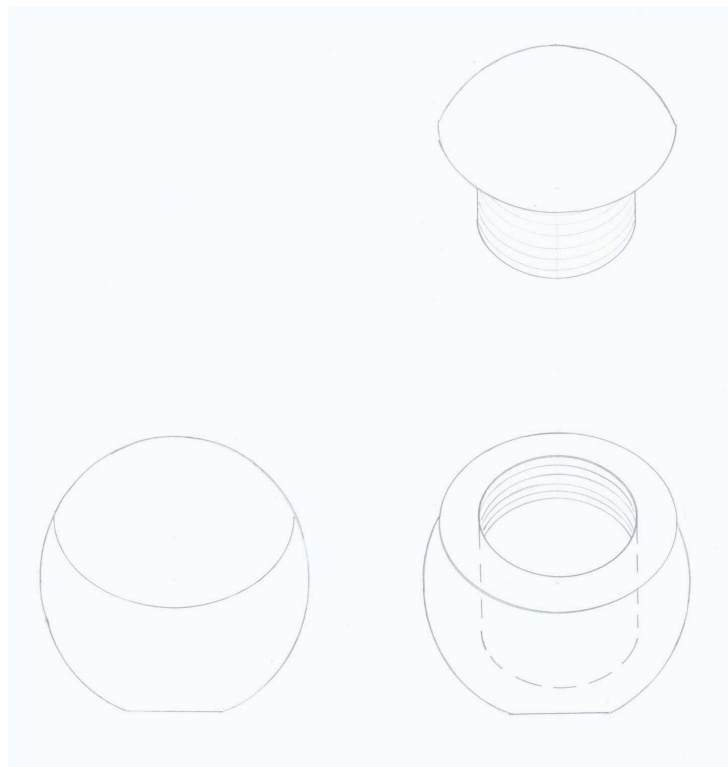


Figura 3.4 Propuesta número 4

Propuesta # 5

Esta propuesta consta en un recipiente cilíndrico de dos partes, en la cual, el cuerpo posee unas aletas que encajan con las ranuras de la tapa del recipiente, hasta que las aletas del cuerpo y las ranuras de la tapa coincidan, sellando herméticamente el sistema. Este diseño permite un rápido acceso a la parte interna del recipiente, debido a la rápida apertura o cierre del mismo, ya sea para ingresar la muestra como para extraer el producto.

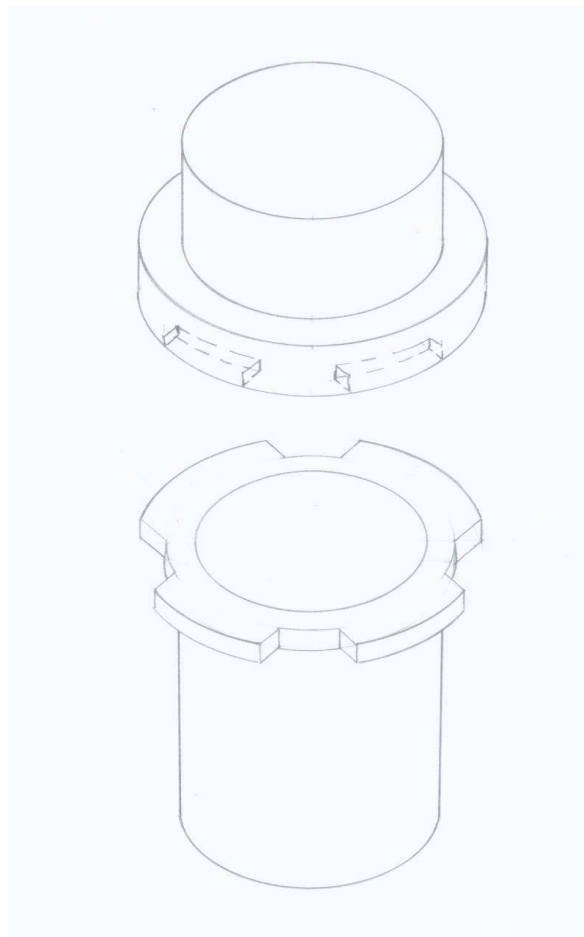


Figura 3.5 Propuesta número 5

Propuesta # 6

Este recipiente cilíndrico se cierra herméticamente al hacer girar un tornillo fijo a la tapa y roscado a una lámina. Al hacer girar este, la tapa es impulsada hacia el cuerpo del recipiente y la lámina se hace llegar a unos topes fijos al cuerpo del recipiente, cerrando de una manera más segura el conjunto. Este diseño permite mayor seguridad a altas presiones evitando así que la tapa sea expulsada por la presión generada internamente durante la preparación del producto.



Figura 3.6 Propuesta número 6

Propuesta # 7

Consiste en un recipiente cilíndrico que posee un cuerpo con rosca interna, y una tapa que actúa como un tapón con rosca externa, la cual se une internamente dentro del cuerpo sellándolo herméticamente.

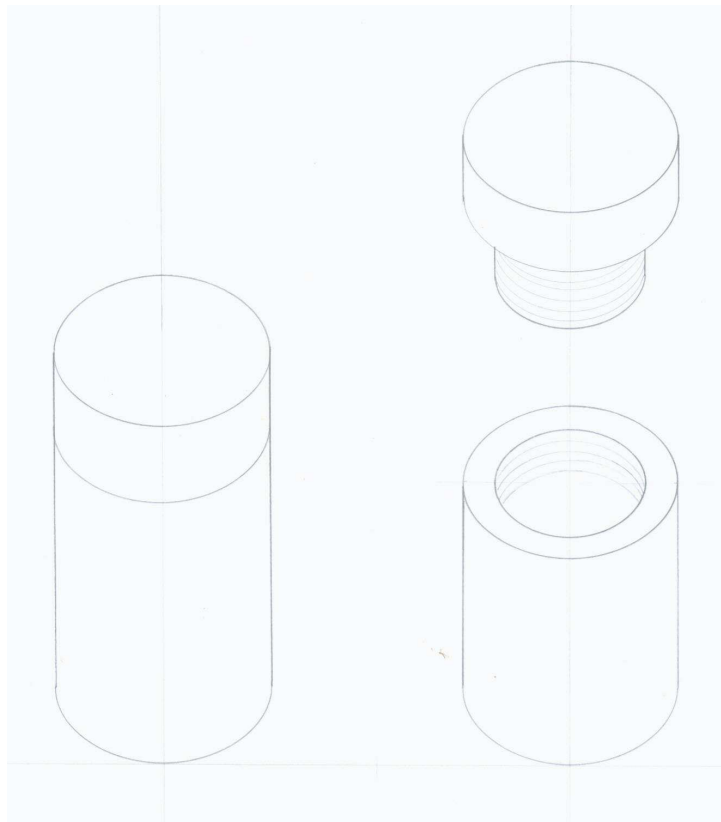


Figura 3.7 Propuesta numero 7

Todos estos elementos cuentan con un sistema o una válvula de seguridad ensamblado en la tapa del recipiente que permite liberar gas en caso que esta sobrepase la presión máxima de trabajo, garantizando seguridad para el operador, así como el de evitar que el recipiente falle producto de la sobrepresión.

III.4. – Análisis de las Propuestas

A cada una de las propuestas se le aplican diversos criterios para confirmar si cumplen con las restricciones impuestas a la solución. Todo esto, para comparar las propuestas entre sí, con el fin de seleccionar la más acertada, para luego comparar y evaluar las alternativas mediante la elaboración de una matriz de decisiones, la cual indicará la propuesta que más se adapta a la solución del problema. Los criterios que se evaluaron en la matriz de decisiones fueron los siguientes:

- **Confiability:** es la probabilidad de que el sistema en cuestión no falle durante el período específico de trabajo.
- **Fabricación:** se refiere a la facilidad de elaboración y ensamblaje de cada uno de los componentes del recipiente.
- **Hermeticidad:** evalúa la propuesta que permite un sellado más hermético del recipiente, evitando fugas de vapor.
- **Mantenimiento:** es la facilidad de limpieza para conservar el recipiente en óptimas condiciones y listo para su próximo uso.
- **Operabilidad:** este se refiere a la forma más rápida y sencilla en que el operador pueda manipular el dispositivo.
- **Seguridad:** permite evaluar el diseño más seguro para el operador, además de evitar que este produzca daños que puedan lesionar al operador.
- **Tiempo de construcción:** es el tiempo necesario para la construcción del recipiente.

- **Vida útil:** consiste en el tiempo de duración del recipiente, sin tener que reemplazarlo por desgaste del mismo o de alguna de sus piezas.

III.5. – Matriz de Decisión.

Esta consiste en comparar las soluciones propuestas y obtener de allí la solución óptima al problema, asignándole valores a cada uno de los criterios de diseño y evaluándola en cada propuesta.

El valor porcentual asignado a cada criterio, dependiendo de su nivel de importancia a la hora de seleccionar la propuesta óptima, se presenta a continuación:

CRITERIOS	VALOR (%)
Confiabilidad	13
Fabricación	10
Hermeticidad	18
Mantenimiento	10
Operabilidad	13
Seguridad	18
Tiempo de construcción	8
Vida útil	10

Tabla 3.1 Criterios de selección.

Para la evaluación de las propuestas en cada uno de los criterios, se utilizará la siguiente escala numérica:

Muy deficiente (1)

Deficiente (2)

Bueno (3)

Muy bueno (4)

Excelente (5)

Se procede a elaborar la matriz de decisión:

PROPUESTAS															
CRITERIOS	(%)	1		2		3		4		5		6		7	
		Eval.	Total	Eval.	Total	Eval.	Total	Eval.	Total	Eval.	Total	Eval.	Total	Eval.	Total
Confiabilidad	13	4	0,52	4	0,52	4	0,52	3	0,39	5	0,65	5	0,65	3	0,39
Fabricación	10	5	0,5	4	0,4	4	0,4	2	0,2	2	0,2	1	0,1	5	0,5
Hermeticidad	18	4	0,72	4	0,72	5	0,9	3	0,54	4	0,72	5	0,9	4	0,72
Mantenimiento	10	4	0,4	5	0,5	3	0,3	2	0,2	5	0,5	5	0,5	4	0,4
Operabilidad	13	5	0,65	4	0,52	3	0,39	4	0,52	4	0,52	2	0,26	5	0,65
Seguridad	18	3	0,54	4	0,72	5	0,9	3	0,54	4	0,72	4	0,72	3	0,54
Tiempo de construcción	8	5	0,4	3	0,24	3	0,24	3	0,24	3	0,24	2	0,16	5	0,4
Vida útil	10	4	0,4	3	0,3	2	0,2	4	0,4	3	0,3	2	0,2	4	0,4
TOTAL	100	4,13		3,92		3,85		3,03		3,85		3,49		4	

Tabla 3.2 Matriz de decisión

Los valores totales de cada propuesta se obtienen multiplicando el porcentaje de cada criterio con la evaluación numérica asignada a dicho criterio, luego al sumar cada uno de estos resultados se toma como propuesta ganadora aquella que posee un puntaje mayor.

III.6.- Construcción.

Una vez obtenida la propuesta ganadora, aquella con mayor puntaje en la matriz de decisión (propuesta # 1) se prepararon los planos de todos los componentes con el fin de presentarlos y discutirlos con el personal capacitado con el fin de establecer las características de diseño y construcción para obtener de esta forma un producto que satisfaga las condiciones requeridas para cumplir con la solución del problema.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DEL REACTOR CERRADO

Obtenido el diseño preliminar a desarrollar de la matriz de decisiones, se realizaron una serie de cálculos con la finalidad de dimensionar cada elemento que conforma el reactor, los cuales darán como resultados de los esfuerzos aplicados a cada uno de los componentes necesarios para el sistema. Las propiedades mecánicas del material juegan un papel importante, pues deben soportar los esfuerzos para que dicho elemento no corra el riesgo de una posible falla.

IV.1.- Vista preliminar del reactor cerrado

Este recipiente consta básicamente de cinco (5) piezas, las cuales están acopladas entre sí.

- **Cuerpo o vaso del reactor:** es el que contiene la mezcla o solución a sintetizar (ver Figura 4.1). Éste posee rosca externa que permite fijarse con la tapa del mismo, para garantizar la hermeticidad del sistema.

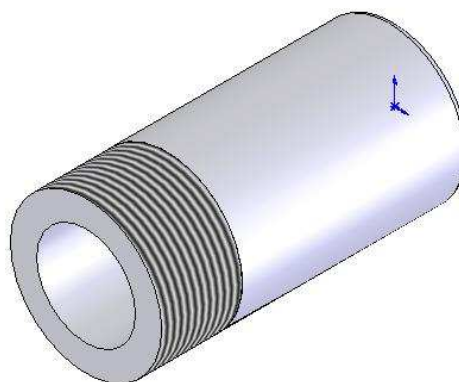


Figura 4.1 Cuerpo del reactor

- **Tapa del reactor:** permite cerrar el reactor fijándose al cuerpo del mismo, evitando el escape de los gases de la solución producto del calentamiento. Además, tendrá una serie de dispositivos ensamblados a él, que permiten medir la temperatura interna y garantizar la seguridad del operador (ver Figura 4.2).

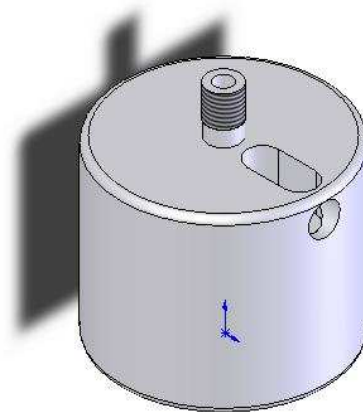


Figura 4.2 Tapa del reactor

- **Funda de la termocupla:** sirve de recubrimiento de la termocupla, midiendo la temperatura de la mezcla sin que ésta entre en contacto directo con la misma (ver Figura 4.3).

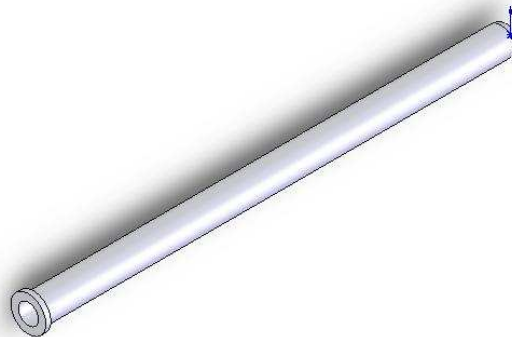


Figura 4.3 Funda de la termocupla

- **Tapa de la termocupla:** permite mantener fija la funda de la termocupla a la tapa del recipiente (ver Figura 4.4).

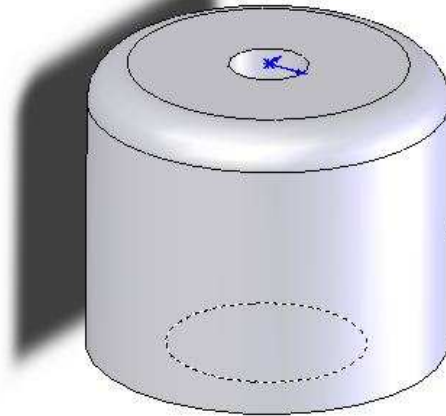


Figura 4.4 Tapa de la termocupla

- **Válvula de seguridad:** consta de dos (2) elementos (lámina y tapón) que se encuentran empotrados en la tapa del recipiente, como se muestra en la Figura 4.5, la lámina de teflón, es flectada por el tapón (figura 4.6) cuando la presión interna es superior a la presión de trabajo.

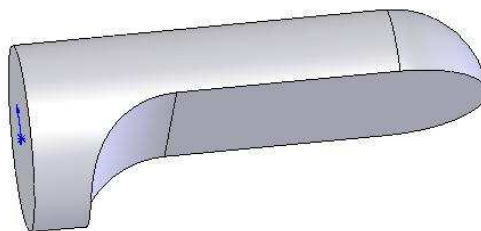


Figura 4.5 Lámina de la válvula de seguridad.

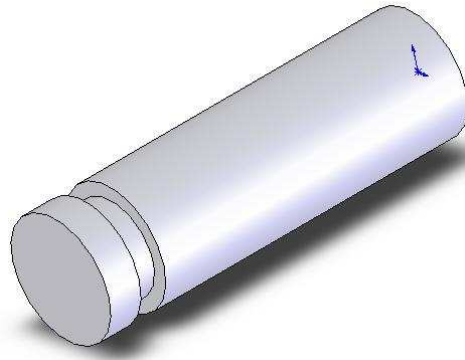


Figura 4.6 Tapón de la válvula de seguridad

Para la construcción del recipiente, se realizaron ensayos de tracción al material con el cual se construyó el mismo, siendo en este caso Politetrafluoroetileno de nombre comercial Teflón (PTFE), adquirido en la empresa LAUKO C.A, ubicado en el sector El Llanito (Edo. Miranda), esto con el fin de validar las propiedades mecánicas del mismo descritas en la literatura.

Los ensayos a tracción fueron realizados en la Universidad Simón Bolívar en el Laboratorio E – Sección Polímeros. El procedimiento para la realización del ensayo fue el descrito en la norma ASTM D 638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Se utilizaron tres (3) probetas del tipo II que se especifica en la norma antes mencionada en la figura 4.7 se muestra la probeta siendo traccionada.

Las condiciones del laboratorio de ensayos, así como los resultados, son mostrados en el informe técnico suministrados por dicha universidad en el Anexo 1.



Figura 4.7 Ensayo a Tracción

IV.2.- Determinación de los componentes del reactor cerrado

Para determinar las dimensiones de cada uno de los componentes del diseño, se estudiaron por separado, ya que el estado de esfuerzo no es el mismo para cada componente.

IV.2.1.- Cálculo de la presión interna de trabajo y condiciones iniciales

El reactor constará de un volumen total de $73,2 \text{ cm}^3$ donde $\frac{3}{4}$ de ese volumen será de la solución máxima a sintetizar cuyo valor es de 55 cm^3 . Esta solución se calentará por medio del microondas convencional en el recipiente cerrado a una temperatura máxima de 140°C

Cálculo de la masa de agua

$$55\text{cm}^3 \cdot \frac{1\text{m}^3}{1000000\text{cm}^3} \cdot \frac{1000\text{Kg}}{1\text{m}^3} = 0,055\text{Kg}$$

Volumen específico de la solución

$$v = \frac{V_{total}}{m_{agua}} = \frac{73,5cm^3}{0,055Kg} = 1336,36 cm^3/Kg = 1,339 \times 10^{-3} m^3/Kg$$

Utilizando el Apéndice 1 a temperatura de 140°C y el volumen específico obtenido anteriormente se obtiene la presión de trabajo para el recipiente cuyo valor es de 0,3613 Mpa, encontrándose la mezcla como líquido – vapor.

Por otra parte, el factor de diseño o factor de seguridad seleccionado para la realización de los cálculos es de dos ($\psi = 2$), la cual es para el diseño de estructuras de materiales dúctiles bajo cargas estáticas y donde se tiene alto grado de confianza en todos los datos de diseño.

El esfuerzo de fluencia del teflón a la temperatura de trabajo del recipiente cerrado (140°C) fue extraído de la curva esfuerzo de fluencia vs. temperatura mostrada en el Apéndice 2.

$$S_y = 2,185 \text{ Mpa}$$

IV.2.2.- Cálculo del espesor de las paredes del reactor.

Se determina el espesor del reactor utilizando la teoría de cilindros de pared gruesa para una presión interna de trabajo, generándose esfuerzos tangenciales (σ_t) y radiales (σ_r) en las paredes del recipiente. Como el cilindro se encuentra sellado en sus extremos, también se produce en el recipiente esfuerzos longitudinales (σ_l). Sustituyendo en las ecuaciones 2.16 y 2.17 para $P_0 = 0$

Se obtiene las siguientes expresiones:

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 \cdot p_i}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \quad (4.1)$$

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 \cdot p_i}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \quad (4.2)$$

$$\sigma_l = \frac{p_i \cdot r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (4.3)$$

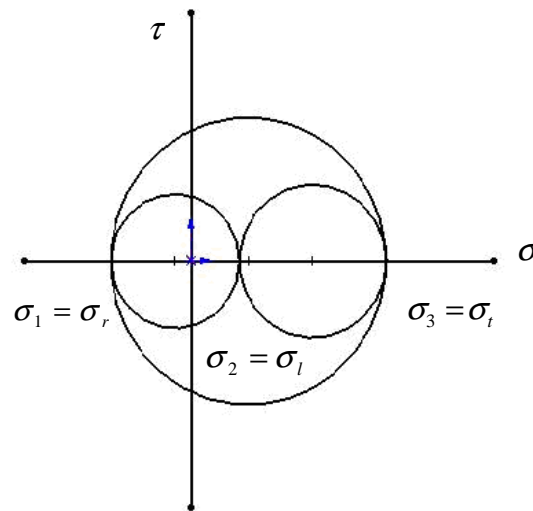
En los esfuerzos radiales y tangenciales “r” representa el valor del radio a lo largo del espesor del cilindro donde se desea obtener el valor del esfuerzo para dicho radio “r”. Mientras que en el esfuerzo longitudinal, éste se comporta constante en todo el espesor del cilindro.

Se diseña para el radio más crítico, es decir, donde se generan los máximos esfuerzos tangenciales y radiales, esto ocurre en la superficie interna del cilindro donde $r = r_i$ de allí se obtienen las siguientes expresiones para σ_r y σ_t ,

$$\sigma_t = \left(\frac{r_0^2 + r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \right) \cdot p_i \quad (4.4)$$

$$\sigma_r = - p_i \quad (4.5)$$

En este punto de estudio se genera un estado triaxial de esfuerzos donde σ_t , σ_r y σ_l , son esfuerzos principales debido a que no existen esfuerzos cortantes, tal como se muestra en el círculo de Mohr de la figura 4.8 para el radio interno del recipiente

Figura 4.8 Círculo de Mohr para $r=r_i$ en la pared del recipiente

Se tiene que:

$$\sigma_t = \sigma_3$$

$$\sigma_l = \sigma_2$$

$$\sigma_r = \sigma_1$$

Utilizando la teoría de Von Mises se calcula cualquiera de los radios (interno o externo) de las paredes del recipiente, para ello, se debe comenzar con un valor inicial; es decir, con un valor cualquiera de los radios antes mencionados, para ello se tomó como valor inicial un radio interno (r_i) de 16mm

$$\frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3 \cdot \psi} \cdot S_y \quad (4.6)$$

Sustituyendo (4.3), (4.4) y (4.5) en la ecuación (4.6) y despejando r_0 se tiene:

$$\sqrt{3} \cdot \left(\frac{P_i \cdot r_0^2}{r_0^2 - r_i^2} \right) = \frac{S_y}{\psi} \quad (4.7)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{S_y \cdot r_i^2}{S_y - \sqrt{3} \cdot \psi \cdot P_i}} \quad (4.8)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{2,185 \text{ Mpa} \cdot (16 \text{ mm})^2}{2,185 \text{ Mpa} - (2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,3613 \text{ Mpa})}}$$

Se obtiene el siguiente valor de r_0

$$r_0 = 24,5 \text{ mm}$$

Con el valor de estos resultados se obtiene el espesor de las paredes del reactor para que éste no falle debido a las presiones internas

$$e = r_0 - r_i$$

$$e = 24,5 \text{ mm} - 16 \text{ mm} = 8,5 \text{ mm}$$

IV.2.3.- Cálculo del espesor de la funda de la termocupla

Al igual que el vaso del reactor, la funda de la termocupla se encuentra sometida a presiones externas, siendo ésta igual a la presión interna en el recipiente. El cálculo del espesor se realiza mediante la teoría de cilindros de pared gruesa y se aplica la teoría de fallas para obtener el espesor de pared correcto y evitar que este falle.

Como en el vaso del reactor, en el espesor de la funda de la termocupla se producen esfuerzos radiales (σ_r) y tangenciales (σ_t) que dependen del radio "r" a lo largo del espesor de las paredes. Sustituyendo en las ecuaciones 2.21 y 2.22 para $P_i = 0$. Se tiene las siguientes expresiones:

$$\sigma_t = -\frac{P_0 \cdot r_0}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right) \quad (4.9)$$

$$\sigma_r = -\frac{P_0 \cdot r_0^2}{r_0^2 - r_i^2} \cdot \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) \quad (4.10)$$

En este caso σ_r y σ_t , son siempre negativos (compresión), siendo σ_t siempre mayor a σ_r . Por otra parte σ_l (compresión) se mantiene constante, siendo igual a la presión interna en el reactor.

Evaluando $r = r_0$ en las ecuaciones 4.9 y 4.10, se obtiene:

$$\sigma_t = -P_0 \cdot \frac{r_0^2 + r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \quad (4.11)$$

$$\sigma_r = -P_0 \quad (4.12)$$

Para el esfuerzo longitudinal

$$\sigma_l = -P_0 \quad (4.13)$$

En el radio externo de la funda de la termocupla se genera un estado triaxial de esfuerzos tal como se observa en el círculo de Mohr en la figura 4.9. Los esfuerzos tangenciales (σ_t), esfuerzos radiales (σ_r) y esfuerzos longitudinales (σ_l) son principales ya que no existen esfuerzos cortantes en el elemento

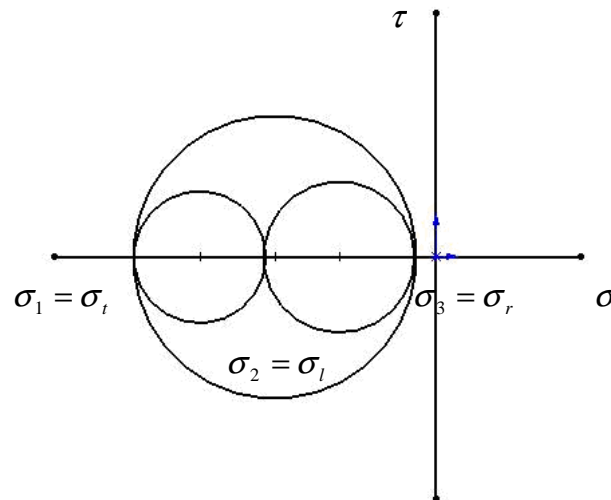


Figura 4.9 Círculo de Mohr para el estado de esfuerzos generado en las paredes de la funda de la termocupla

Se tiene que:

$$\sigma_t = \sigma_1$$

$$\sigma_l = \sigma_2$$

$$\sigma_r = \sigma_3$$

Sustituyendo 4.11, 4.12 y 4.13 en la ecuación 4.6 se obtiene:

$$r_0 = r_i \cdot \sqrt{\frac{S_y + 2 \cdot \psi \cdot P_0}{S_y}} \quad (4.14)$$

El valor del radio interno $r_i = 2mm$, es el radio necesario para que la termocupla entre con facilidad en la funda. Sustituyendo los valores en la ecuación (4.14) se obtiene el radio externo de la funda de la termocupla.

$$r_0 = 2mm \cdot \sqrt{\frac{2,185Mpa + 2 \cdot 2 \cdot 0,3613Mpa}{2,185Mpa}} = 2,578mm$$

Se presenta otro caso en el que la máxima tensión de compresión σ_t tiene lugar en la superficie interior de la pared de la funda de la termocupla, donde σ_r es nula y viene dada por:

$$(\sigma_t)_{\max} = -\frac{2 \cdot r_0^2 \cdot P_0}{r_0^2 - r_i^2} \quad (4.15)$$

De igual forma se producen esfuerzos longitudinales de compresión la cual viene dada por la presión interna del recipiente.

Se produce un estado de esfuerzos donde:

$$\sigma_t = \sigma_1$$

$$\sigma_l = \sigma_2$$

$$\sigma_r = \sigma_3 = 0$$

Con el valor obtenido en el caso anterior donde $r_0 = 2,578\text{mm}$, se verifica que cumpla con la teoría de fallas de Von Mises.

Sustituyendo 4.13 y 4.15 en 4.6 se tiene:

$$P_0 \cdot \sqrt{2 + \frac{(r_0^2 + r_i^2)^2}{(r_0^2 - r_i^2)^2}} \leq \frac{\sqrt{2} \cdot S_y}{\psi} \quad (4.16)$$

Al sustituir el valor de r_0 obtenido del caso anterior en la ecuación (4.16) se verifica que se cumpla la desigualdad, si esto se cumple se puede concluir que r_0 puede ser utilizado sin que éste falle.

$$0,3613\text{Mpa} \cdot \sqrt{2 + \frac{[(2,578\text{mm})^2 + (2\text{mm})^2]^2}{[(2,578\text{mm})^2 - (2\text{mm})^2]^2}} \leq \frac{\sqrt{2} \cdot 2,185\text{Mpa}}{2}$$

$$1,5408\text{Mpa} \leq 1,545\text{Mpa}$$

Como se puede apreciar se cumple la desigualdad, por ende se puede utilizar este radio externo para la funda de la termocupla, sin que éste falle.

IV.2.4.- Diseño de rosca para la tapa y vaso del reactor.

El tipo de rosca utilizada para estos dos (2) elementos del reactor es del tipo NPT (por sus siglas en inglés National Pipe Thread), la cual garantiza una mayor hermeticidad entre ambos elementos.

Utilizando la tabla 2.7, se procedió a seleccionar el paso, número de hilos por pulgada y longitud de la rosca, para el diámetro exterior en el vaso del reactor cuyo valor nominal es $D = 49\text{mm}$ y el diámetro interior en la tapa del mismo, obteniendo lo siguiente:

Paso de la rosca (p) = 0,08696 pulg

Número de hilos por pulgada (n) = 11,5 hilos

La longitud de rosca (L) se calculó utilizando las siguientes ecuaciones para roscas NPT:

$$L = L_2 + v \tag{4.17}$$

Donde:

L_2 = longitud base de la rosca efectiva

v = longitud de filetes incompletos

De la ecuación (2.31), se tiene:

$$L_2 = (0,80 D + 6,8) \frac{1}{n} = (0,80 D + 6,8) p$$

Diámetro externo del vaso del reactor (D) = 49mm = 1,929pulg

$$L_2 = (0,80 \cdot 1,9291 \text{ pulg} + 6,8)0,08696 \text{ pulg}$$

$$L_2 = 0,72503 \text{ pulg}$$

De la tabla 2.7, se obtiene:

$$v = 0,3017 \text{ pulg}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (4.17):

$$L = 0,72503 \text{ pulg} + 0,3017 \text{ pulg}$$

$$L = 1,02673 \text{ pulg} = 26,08 \text{ mm}$$

Este valor da la longitud de rosca a lo largo del vaso del reactor, así como para la tapa del mismo.

Por otra parte, el diámetro de paso mínimo (E_0) se calcula como:

$$E_0 = D - (0,050 \cdot D + 1,1) \cdot \frac{1}{n} = D - (0,050 \cdot D + 1,1) \cdot p$$

Para el reactor:

$$E_0 = 1,9291 - (0,050 \cdot 1,9291 + 1,1) \cdot 0,0869$$

$$E_0 = 1,825 \text{ pulg} = 46,355 \text{ mm}$$

Por lo tanto el radio de paso mínimo (r_m) es:

$$r_m = \frac{E_0}{2}$$

$$r_m = \frac{1,825 \text{ pulg}}{2}$$

$$r_m = 0,9125 \text{ pulg}$$

IV.2.5.- Cálculo del factor de seguridad en las roscas del vaso y tapa del reactor

Para verificar que los hilos de rosca no fallen debido al esfuerzo cortante producido por la presión generada en el interior recipiente, se calculará el factor de seguridad para los valores expresados anteriormente, según la bibliografía consultada, este valor debe ser mayor a dos (2) para garantizar que las roscas no fallarán por esfuerzos cortantes.

Los esfuerzos en las roscas se calculan considerando que la rosca es una viga corta en voladizo, proyectada desde su núcleo. La carga sobre la viga se toma como la carga axial (F) interna en el recipiente, concentrada en el radio medio, siendo este radio la mitad de la altura h de la rosca, como se muestra en la figura 2.21.

La carga axial se obtiene como:

F = Presión interna x Área interna del vaso

$$F = 0,3613 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{\pi (32 mm)^2}{4}$$

$$F = 290,6 N$$

El ancho de la sección de la rosca (b) en el núcleo del vaso del reactor, tal como se muestra en la figura (2.23), se calcula como:

$$b = 2 \cdot h \cdot (\operatorname{tg} 30^\circ) \quad (4.18)$$

Siendo “h” la altura de la rosca:

$$h = 0,80000 \cdot p$$

$$h = 0,06957 \text{ pu lg}$$

Sustituyendo en la ecuación (4.18):

$$b = 2 \cdot 0,06957 \cdot (\text{tg } 30^\circ)$$

$$b = 0,08033 \text{ pu lg}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (2.38)

$$\tau = \frac{290,6 \text{ N}}{2 \cdot \pi \cdot 11,5 \text{ hilos} \cdot 0,9125 \text{ pu lg} \cdot 0,08033 \text{ pu lg}}$$

$$\tau = 54,866 \frac{\text{N}}{\text{pu lg}^2} = 0,085 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Obtenido estos esfuerzos cortante presente en las roscas, se calculan los esfuerzos principales, para luego ser sustituido en la teoría de fallas de Von Mises.

De la ecuación (2.5) los esfuerzos principales son:

$$\sigma_I = -\tau$$

$$\sigma_{II} = 0$$

$$\sigma_{III} = \tau$$

Sustituyendo los esfuerzos principales en la ecuación (2.15), se tiene

$$\sqrt{3} \tau \leq \frac{S_y}{\psi} \tag{4.19}$$

$$\psi = \frac{S_y}{\sqrt{3} \tau} \tag{4.20}$$

Introduciendo estos valores en (4.20) se obtiene el factor de seguridad:

$$\psi = \frac{2,185 \frac{N}{mm^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,085 \frac{N}{mm^2}}$$

$$\psi = 14,84$$

Con dicho factor de seguridad se garantiza que las roscas no fallan por los esfuerzos cortantes presentes.

IV.2.6.- Cálculo de la rosca entre la tapa del reactor y la tapa de la termocupla

La rosca seleccionada para sujetar la funda de la termocupla con la tapa del reactor es del tipo métrica. En este caso, no se utiliza rosca del tipo NPT porque no es necesario hermeticidad entre ellas, solamente la sujeción de la funda mediante estas dos (2) piezas.

Utilizando la tabla (2.6) para roscas gruesas, obtenemos el paso de la rosca para un diámetro mayor nominal de 10 mm:

Paso de la rosca (p) = 1,5 mm

Fuerza ejercida sobre los hilos de rosca:

F = Presión interna en el recipiente * Área interna del orificio de la funda de la termocupla

$$F = 0,3613 \frac{N}{mm^2} \cdot \frac{\pi (5,5 mm)^2}{4}$$

$$F = 8,58 N$$

Al igual que en los cálculos de la rosca NPT, y al sustituir los valores de los esfuerzos principales en la ecuación (2.5), se calcula el factor de seguridad de los hilos de rosca para verificar que no fallen:

$$\sqrt{3} \tau \leq \frac{S_y}{\psi}$$

Sabiendo que:

$$\tau = \frac{F}{A_s}$$

Donde:

F = Fuerza aplicada sobre la rosca

A_s = Área de esfuerzo cortante

Sustituyendo:

$$\frac{\sqrt{3} \cdot F}{A_s} = \frac{S_y}{\psi} \quad (4.21)$$

Despejando el factor de seguridad:

$$\psi = \frac{S_y \cdot A_s}{\sqrt{3} F} \quad (4.22)$$

$$\psi = \frac{2,185 \frac{N}{mm^2} \cdot 2 \cdot \left[0,7854 \cdot (D - (0,9382) \cdot p)^2 - \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \right]}{\sqrt{3} \cdot 8,58 N}$$

Sustituyendo los valores:

$$\psi = \frac{2,185 \frac{N}{mm^2} \cdot 2 \cdot \left[0,7854 \cdot (10 mm - (0,9382) \cdot 1,5 mm)^2 - \frac{\pi \cdot (5,5 mm)^2}{4} \right]}{\sqrt{3} \cdot 8,58 N}$$

$$\psi = \frac{2,185 \frac{N}{mm^2} \cdot 2 \cdot [57,9896 - 23,7583] mm^2}{14,86 N}$$

$$\psi = 10,066$$

Como la rosca de la tapa del reactor y la rosca de tapa de la funda de la termocupla son del mismo material se procede a calcular la longitud de roscado (L_e) necesaria para que resista los esfuerzos producido por las fuerzas en la misma, por medio de la ecuación (2.36)

$$L_e = \frac{4 \cdot A_t}{\pi \cdot D_m}$$

$$A_t = 0,7854 \cdot [D - (0,9382) \cdot p]^2 - \frac{\pi \cdot D_i^2}{4}$$

$$A_t = 0,7854 \cdot [10 mm - (0,9382) \cdot 1,5 mm]^2 - \frac{\pi \cdot (5,5 mm)^2}{4}$$

$$A_t = 34,23 mm^2$$

$$D_m = D - 0,649519 \cdot p$$

$$D_m = 10 mm - 0,649519 \cdot (1,5 mm)$$

$$D_m = 9,026 mm$$

Sustituyendo en la ecuación (2.36):

$$L_e = 4,828 mm$$

Se colocará una longitud de roscado de 10mm con la finalidad de fabricar la tapa de la funda con una mayor dimensión y así facilitar el manejo por parte del operador.

IV.2.7.- Diseño de la válvula de seguridad

La válvula de seguridad consiste en una lámina de sección semicircular (viga) de teflón empotrada a la tapa del recipiente, al aumentar la presión interna en el recipiente más allá de la presión de diseño, ésta flectará mediante la fuerza producida por el tapón y permitirá aliviar la presión interna hasta equilibrar nuevamente la presión y evitar que el reactor falle.

Longitud de lámina:

$$L = 20\text{mm}$$

Presión de trabajo del reactor:

$$P = 0,3613 \text{ MPa}$$

Módulo de Elasticidad del teflón a 140°C, tomado de la gráfica del Apéndice 3

$$E = 108,95 \text{ MPa}$$

Presión a la cual actuará la válvula:

$$P_{\text{máx}} = 1,25 P$$

$$P_{\text{máx}} = 1,25 * 0,3613 \text{ MPa}$$

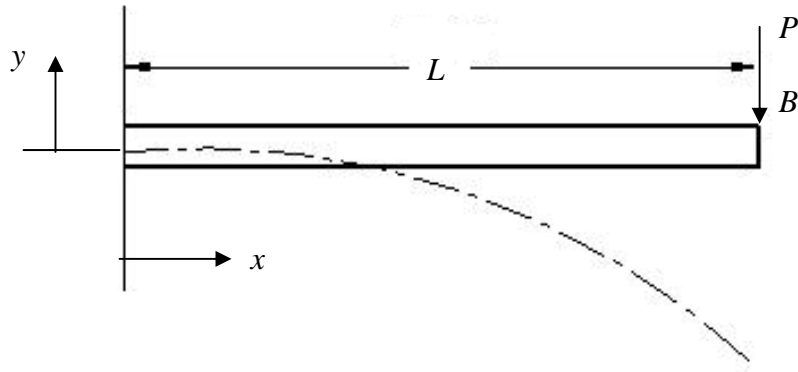
$$P_{\text{máx}} = 0,4516 \text{ MPa}$$

Como se observa en la figura 4.10 la deflexión de una viga empotrada en su extremo es:

$$y_{\text{máx}} = \frac{-PL^3}{3EI} \quad (4.23)$$

Su momento máximo viene dado por

$$M_{m\acute{a}x} = -FL \text{ (en la pared)} \quad (4.24)$$



4.10 Deflexión de viga empotrada

El diámetro del tapón introducido en la tapa del recipiente será de 4mm, calculando la fuerza que el mismo ejercerá cuando la presión interna sea 1,25 veces la presión de trabajo será:

$$P = \frac{F}{A}$$

Despejando:

$$F = P \cdot A$$

$$F = 451600 \text{ Pa} \cdot \frac{\pi \cdot (0,004)^2}{4}$$

$$F = 5,675 \text{ N}$$

De la ecuación (4.19) se calcula la inercia para una deflexión máxima de 1mm:

$$I = \frac{5,675 \text{ N} \cdot (20\text{mm})^3}{6 \cdot 108,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1\text{mm}}$$

$$I = 138,9\text{mm}^4$$

El diámetro de la viga de sección semicircular se calcula mediante (ver Apéndice 4):

$$I = 0,007 D^4 \quad (4.25)$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{138,9}{0,007}} = 11,87 \text{ mm}$$

Se tomó un diámetro de 12mm para facilitar la construcción de la misma.

Por otra parte se verifica si la lamina de sección semicircular no falla por flexión utilizando teorías de fallas.

El estado de esfuerzos producido en la lámina es:

$$\sigma_3 = \sigma_{\text{flexión}}$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_1 = 0$$

Aplicando teoría de corte máximo tenemos que:

$$\sigma_3 \leq \frac{S_y}{\psi}$$

El esfuerzo de flexión se determina como:

$$\sigma_{\text{flexión}} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (4.22)$$

Donde

M = momento en la viga ($F \times L$)

c = fibra más alejada al centroide de la sección transversal

I = Momento de Inercia

El momento producido en la lámina es

$$M = 5,675N \cdot 20mm = 113,5N \cdot mm$$

La fibra más alejada tal como se muestra en el Apéndice 4 es:

$$c = 0,212 \cdot D = 0,212 \cdot 12mm = 2,544mm$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (4,21) se tiene el esfuerzo de flexión:

$$\sigma_{flexión} = \frac{113,5N \cdot mm \cdot 0,212 \cdot 12mm}{0,007 \cdot (12mm)^4} = 1,989Mpa$$

Su factor de seguridad es:

$$\psi = \frac{S_y}{\sigma_{flexión}} = \frac{2,185Mpa}{1,989Mpa} = 1,098$$

IV.2.8.- Cálculo del espesor de empotramiento para la lámina de la válvula de seguridad en la tapa del reactor

Esta sección en la tapa del reactor se encuentra en cortante puro debido a la fuerza que ejerce esta sección sobre la lámina para contrarrestar la fuerza ejercida por el tapón, tal como se muestra en el diagrama de cuerpo libre de la lámina en la figura (4.11).

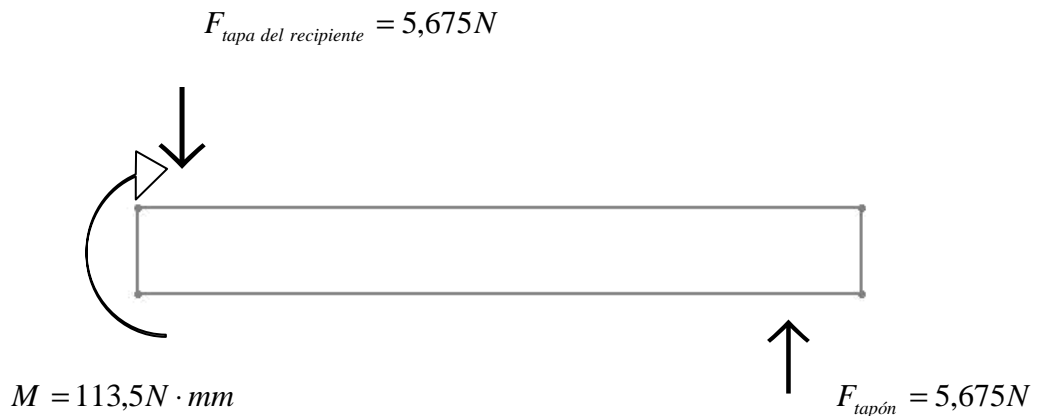


Figura 4.11 Diagrama de cuerpo libre de la lámina de seguridad

En la figura 4.12 se muestra la región de la tapa del recipiente donde se presentan los esfuerzos cortantes debido a la reacción de esta en contra de la fuerza ejercida por el tapón empotrado en la tapa

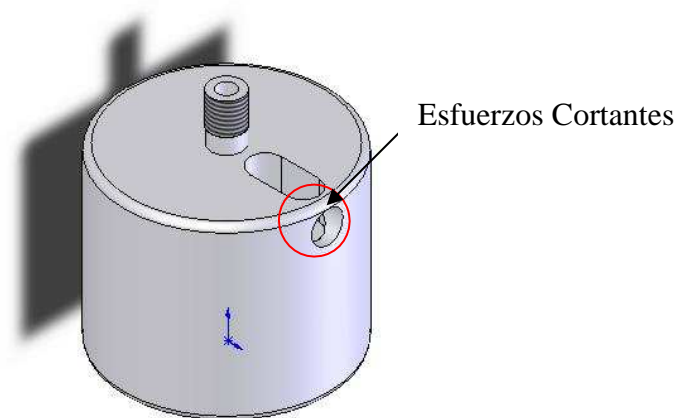


Figura 4.12 Región de esfuerzos de corte en la tapa del reactor

Realizando un corte en la región donde se producen los esfuerzos cortantes y realizando su respectivo diagrama de cuerpo libre (Fig. 4.13) se puede observar como actúan las fuerzas en dicho elemento y aplicando las teorías de fallas se puede hallar sus dimensiones de espesor y longitud

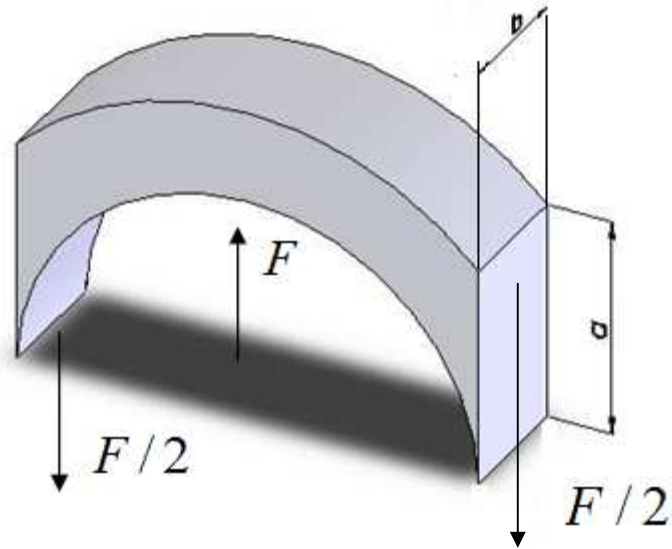


Figura 4.13 Diagrama de cuerpo libre de la región en esfuerzo cortante

De la ecuación (2.5) se obtienen los esfuerzos principales

$$\sigma_2^1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}}$$

En este caso los esfuerzos normales σ_x y σ_y son iguales a cero es decir que solo existen esfuerzos cortantes en la sección que soporta la viga, de tal manera se obtiene el siguiente estado de esfuerzos:

$$\sigma_1 = -\tau_{xy}$$

$$\sigma_2 = \tau_{xy}$$

$$\sigma_3 = 0$$

Utilizando la ecuación de Von Mises (2.15) se obtiene la siguiente expresión:

$$\sqrt{3} \cdot \tau \leq \frac{S_y}{\psi}$$

Con esta expresión se procede a calcular el espesor de la sección

Para $b = 3\text{mm}$ se calcula el valor de a

$$\sqrt{3} \cdot \frac{5,675\text{N}}{2 \cdot (a \cdot 3\text{mm})} \leq \frac{2,185\text{N}/\text{mm}^2}{2}$$

$$a = 1,5\text{mm}$$

Se utilizará un espesor de 3mm para facilitar el proceso de fabricación de la misma.

IV.2.9.- Ajuste de holgura entre la funda de la termocupla y la tapa del reactor.

Se utilizará un ajuste de holgura de clase RC2

Diámetro del orificio (tapa del recipiente) = 5,5mm = 0,2165 pulg

Diámetro eje (funda de la termocupla) = 5,5 mm = 0,2165 pulg

De acuerdo con la tabla 2.7 los límites de tolerancia para el orificio son +0,0003 pulg y - 0 pulg.

Así se tiene que para el orificio de la tapa

$$0,2165 + 0,0003 = 0,2168 \text{ pulg (máximo)}$$

$$0,2165 - 0 = 0,2165 \text{ pulg (mínimo)}$$

Los límites de tolerancia para el eje son -0,00015 pulg y -0,00035 pulg

Se tiene que para el diámetro del eje:

$$0,2165 - 0,00015 = 0,21635\text{pulg (máximo)}$$

$$0,2165 - 0,00035 = 0,21615\text{pulg (mínimo)}$$

La holgura máxima se obtiene al combinar el eje mínimo con el orificio máximo. Por el contrario, al combinar el eje máximo con el orificio mínimo, se obtiene la holgura mínima.

Holguras:

$$0,2168 - 0,21615 = 0,00065\text{pulg (máxima)}$$

$$0,2165 - 0,21635 = 0,00015\text{pulg (mínima)}$$

Se utilizará una holgura mínima entre estos dos elementos, y así garantizar mayor hermeticidad entre estos dos elementos.

$$\text{Diámetro del orificio de la tapa} = 0,2165\text{pulg} = 5,5 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro de la funda de la termocupla} = 0,21635\text{pulg} = 5,495 \text{ mm}$$

IV.2.10.- Ajuste de holgura entre el tapón de seguridad y el orificio en la tapa del reactor

Tipo de holgura Clase RC2

$$\text{Diámetro del orificio} = 4\text{mm} = 0,15748 \text{ pulg}$$

$$\text{Diámetro del tapón} = 4\text{mm} = 0,15748 \text{ pulg}$$

De la tabla 2.7 los límites de tolerancia para el orificio son + 0,0003pulg y -0pulg

$$0,15748 + 0,0003 = 0,15778\text{pulg (máximo)}$$

$$0,15748 - 0 = 0,15748\text{pulg (mínimo)}$$

Para el tapón los límites de tolerancia son -0,00015pulg y -0,00035pulg

$$0,15748 - 0,00015 = 0,15733\text{pulg (máxima)}$$

$$0,15748 - 0,00035 = 0,15713\text{pulg (mínimo)}$$

Al igual que en el caso anterior, la holgura máxima se obtiene al combinar el eje mínimo con el orificio máximo. Por el contrario, al combinar el eje máximo con el orificio mínimo, se obtiene la holgura mínima.

Holguras:

$$0,15778 - 0,15713 = 0,00065\text{pulg (máxima)}$$

$$0,15748 - 0,15733 = 0,00015\text{pulg (mínima)}$$

Se tomara una holgura mínima entre estos dos elemento para evitar la fuga de vapor

Dimensiones:

$$\text{Orificio} = 0,15748\text{pulg} = 4\text{mm}$$

$$\text{Tapón} = 0,15733\text{pulg} = 3,99\text{mm}$$

IV.2.11.- Ajuste de holgura entre la tapa del reactor y la lámina de la válvula de seguridad

Tipo de holgura RC2

$$\text{Diámetro del orificio} = 12\text{mm} = 0,4724 \text{ pulg}$$

$$\text{Diámetro del eje (lámina de la válvula de seguridad)} = 12\text{mm} = 0,4724 \text{ pulg}$$

De la tabla 2.7 los limites de tolerancia para el orificio son + 0,0004pulg y -0pulg

$$0,4724 + 0,0004 = 0,4728\text{pulg (máximo)}$$

$$0,4724 - 0 = 0,4724\text{pulg (mínimo)}$$

Para la lámina los limites de tolerancia con -0,00025pulg y -0,00055pulg

$$0,4724 - 0,00025 = 0,47215\text{pulg (máximo)}$$

$$0,4724 - 0,00055 = 0,47185\text{pulg (mínimo)}$$

Como en los casos anteriores, la holgura máxima se obtiene al combinar el eje mínimo con el orificio máximo. Por el contrario, al combinar el eje máximo con el orificio mínimo, se obtiene la holgura mínima.

Holguras:

$$0,4728 - 0,47185 = 0,00095\text{pulg (máxima)}$$

$$0,4724 - 0,47215 = 0,00025\text{pulg (mínima)}$$

Se tomara una holgura mínima entre estos dos elemento.

Dimensiones:

$$\text{Orificio} = 0,4724\text{pulg} = 12\text{mm}$$

$$\text{Lámina} = 0,47215\text{pulg} = 11,99\text{mm}$$

CAPÍTULO V

PUESTA A PUNTO Y VERIFICACIÓN DEL REACTOR CERRADO

Para lograr el buen funcionamiento del sistema luego de la construcción, se debe conocer información de cómo operar el equipo para su óptimo desempeño, desde el ensamblaje hasta el mantenimiento del conjunto para una duración prolongada del mismo.

V.1.- Descripción general del conjunto.

El reactor cerrado construido posee un volumen total de 73,2 cm³ y fue diseñado para soportar temperaturas menores o iguales a 140°C y presiones máximas de 0,4516 Mpa, además cuenta con un dispositivo de seguridad que permite regular la presión en caso que se generen presiones internas en el reactor mayores a la presión máxima de diseño, evitando de esta forma que el reactor falle. Este recipiente a presión está conformado por cinco (5) partes básicas acopladas entre sí, la cuales consisten en: vaso o cuerpo del reactor, tapa del reactor, funda de la termocupla, tapa de la termocupla y válvula de seguridad.

En la figura 5.1 se muestra el despiece del reactor; el vaso del reactor el cual contiene la solución a preparar, posee una rosca del tipo NPT seleccionada con el fin de garantizar la hermeticidad del sistema durante su funcionamiento, éste es roscado a la tapa del reactor cerrando el sistema.

La tapa del reactor posee una serie de elementos acoplados a él, que permiten medir la temperatura interna del reactor y regular la presión interna manteniéndola por debajo de la presión máxima de diseño, posee dos (2) orificios pasantes y una ranura donde se empotra la lámina de la válvula de seguridad, en uno de los orificios se introduce la funda de la termocupla al interior del recipiente la cual es sujeta a la tapa del reactor mediante la tapa de la termocupla; para evitar fugas

entre estos dos (2) elementos se colocó un sello de viton de 5mm de diámetro externo por 1,5 mm de espesor, en el segundo agujero se empotró el tapón de la válvula de seguridad que permite la regulación de la presión en conjunto con la lámina de la válvula.

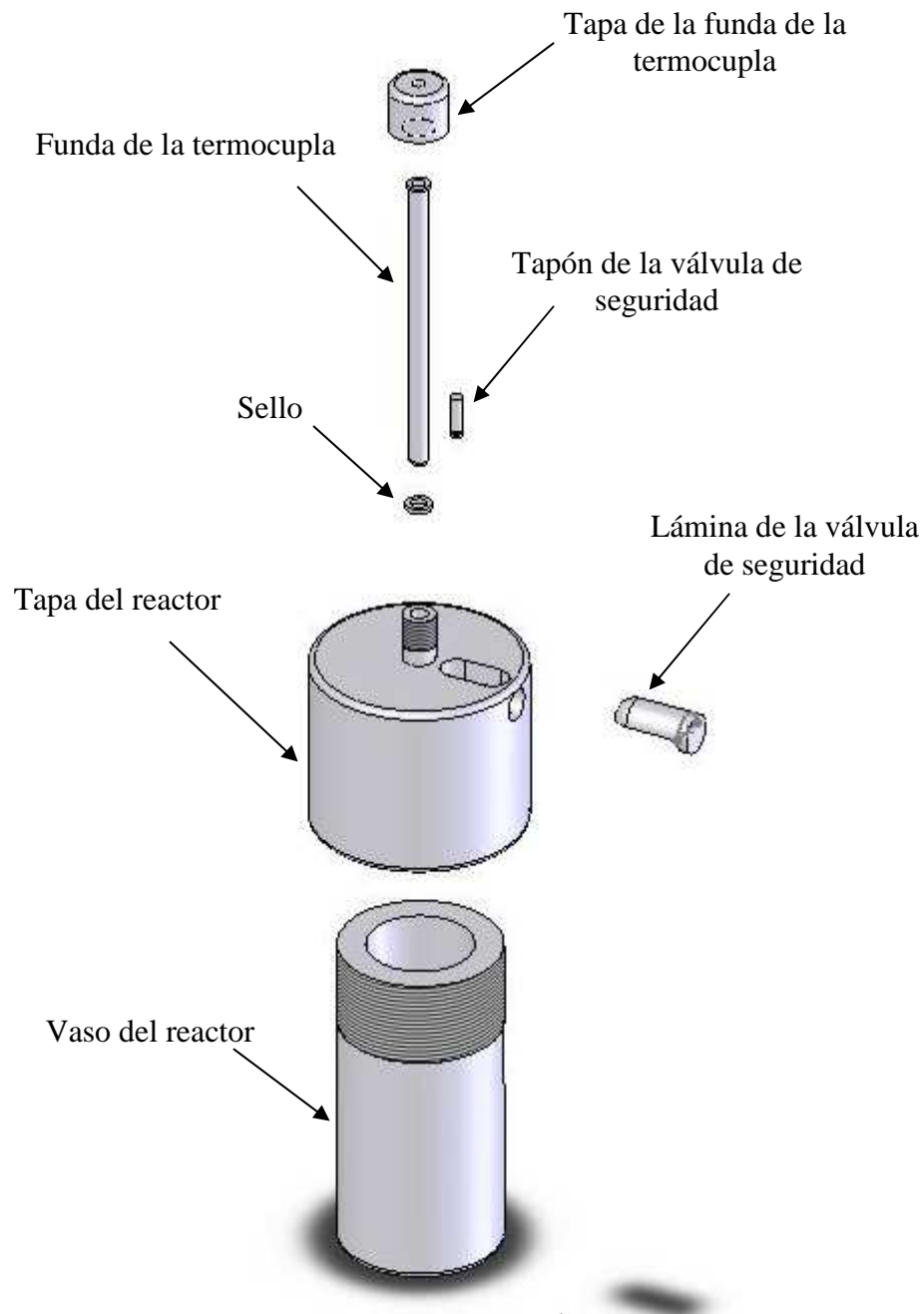


Figura 5.1 Componentes del reactor.

V.2.- Ensamblaje detallado

Para lograr un acople óptimo del conjunto, se deben seguir una serie de pasos descritos a continuación.

1. Introduzca el tapón de la válvula de seguridad en su respectivo orificio en la tapa del reactor y luego empote la lámina de la válvula en la ranura del mismo, verifique que estén bien acopladas (ver figura 5.2).

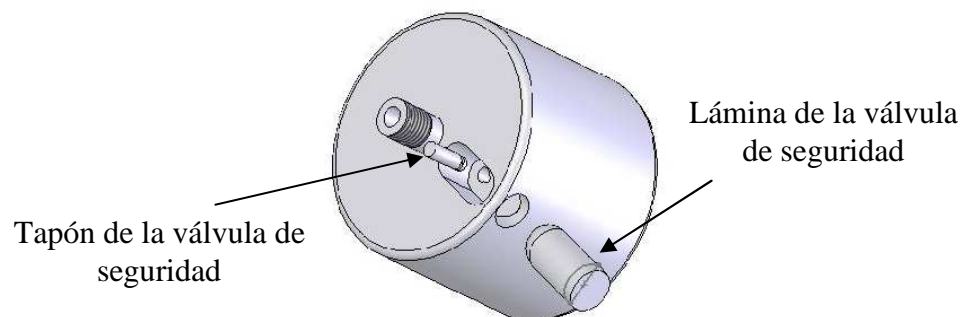


Figura 5.2 Ensamble de la válvula de seguridad en la tapa del reactor

2. Coloque el sello en la funda de la termocupla e introdúzcala en la tapa del reactor

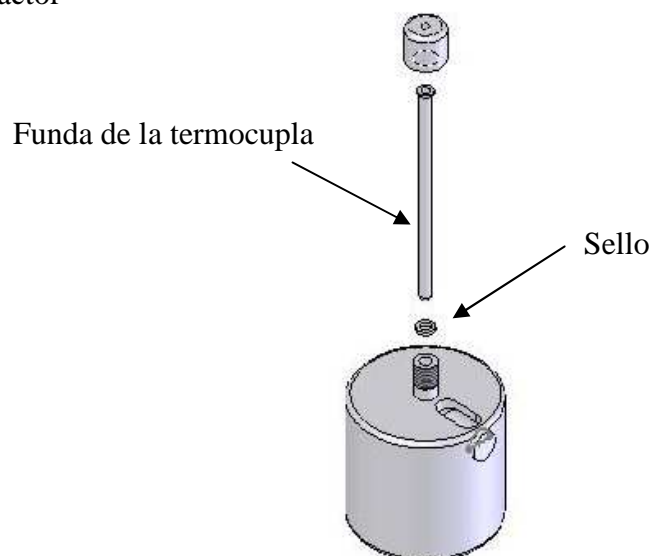


Figura 5.3 Ensamble de la funda sobre la tapa del recipiente

3. Rosque la tapa de la funda de la termocupla en la parte superior de la tapa del reactor sin ejercer mucha fuerza al roscar para evitar daños en la misma

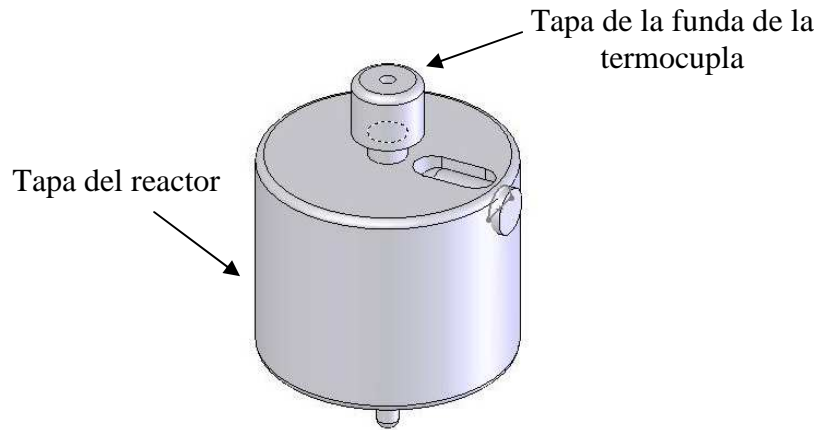


Figura 5.4 Ensamble de la tapa de la funda de la termocupla en la tapa del reactor

4. Vierta en el vaso del reactor la solución a calentar
5. Rosque la tapa del reactor con el vaso del mismo de manera vertical para evitar que se derrame la solución

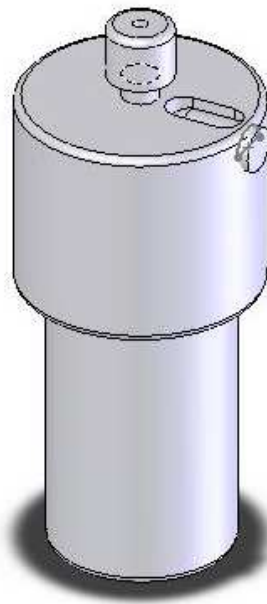


Figura 5.5 Ensamble del reactor

6. Coloque el reactor en el microondas de forma vertical y caliente por el tiempo requerido, sin sobrepasar la temperatura máxima de diseño 140°C.

V.3.- Desensamblaje del reactor

Una vez concluido el calentamiento, se procede a desacoplar el reactor de la siguiente manera:

1. Sacar el reactor del microondas y dejar enfriar al ambiente por unos 20min
2. Separar la tapa del recipiente del cuerpo del reactor de forma vertical para evitar el derrame de la muestra.
3. Extraer la mezcla del reactor
4. Separar la tapa de la funda del reactor y luego extraer la funda de la termocupla y el sello
5. Sacar la lámina y tapón de la válvula de seguridad de la tapa del reactor

V.4.- Verificación del funcionamiento del reactor

Una vez construido el reactor; se verificó su funcionamiento realizando dos (2) ensayos en el Laboratorio de Paramagnetismo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela.

La mezcla o solución para sintetizar la zeolita del tipo Na-ZSM5 fue preparada en el Laboratorio de Refinación y Petroquímica de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela de la siguiente manera:

Para una relación Si/Al estimada de 20.

1. Se prepararon tres soluciones:

Solución S₁:

Se diluyó una cantidad determinada (gramos) de solución coloidal al 40% de sílice en un volumen dado de agua.

Solución S₂:

Se mezcló una cantidad determinada (gramos) de aluminato de sodio en polvo (cuya composición es Al = 25,7% y Na = 21,6%) con una cantidad determinada de NaOH disuelto en agua.

Solución S₃:

Se disolvió una cantidad determinada de bromuro de tetrapropilamonio en agua que contiene ácido sulfúrico al 98%.

2. Se procedió a agregar simultáneamente las soluciones S₂ y S₃ en la solución S₁, agitando de manera continúa hasta obtener una mezcla homogénea denominada gel de síntesis y se dejó envejecer por un tiempo de doce (12) horas (ver figura 5.6).

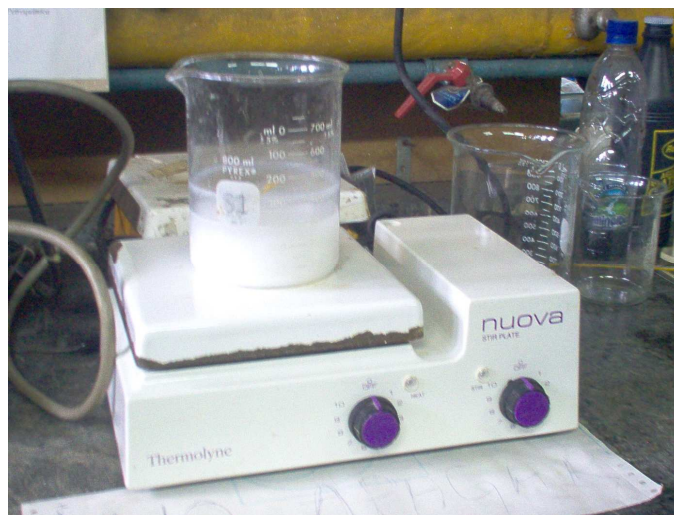


Figura5.6 Gel de síntesis.

Una vez obtenido el gel de síntesis se realizaron dos (2) ensayos, vertiendo en cada uno la cantidad de 50 ml (50cm³) del gel en el reactor para microondas,

posteriormente fue introducido en la cavidad de un microondas y calentado. El calentamiento para ambos ensayos se realizó en dos (2) fases, para el primer ensayo se calentó a 80°C por un tiempo de 90 min completando así la primera fase, para luego comenzar la segunda fase aumentando la temperatura a 120°C, donde se mantuvo dicha temperatura por 30min. Para el segundo ensayo se aplicó las mismas condiciones de calentamiento del primer ensayo en su primera fase, variando sólo la segunda fase donde se calentó a 120°C por un tiempo de 60 min.

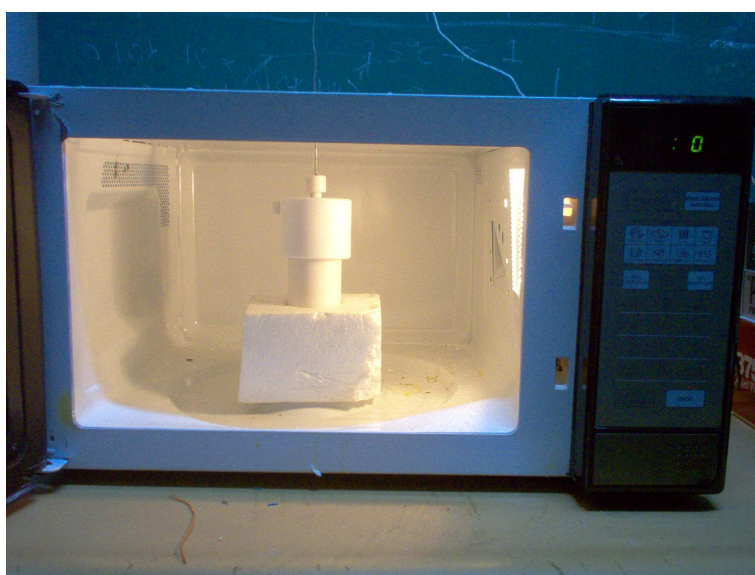


Figura 5.7 Reactor en la cavidad del microondas

Para el control de temperatura se utilizó un dispositivo electrónico diseñado en el Laboratorio de Paramagnetismo de la Facultad de Ciencias que permitió medir la temperatura a través de una termocupla introducida en la funda del recipiente, fijando en dicho dispositivo una temperatura de control (Set Point), se mantuvo la temperatura constante en el sistema, encendiendo o apagando el generador de ondas de microondas (magnetron). (Ver figura 5.8 y 5.9)

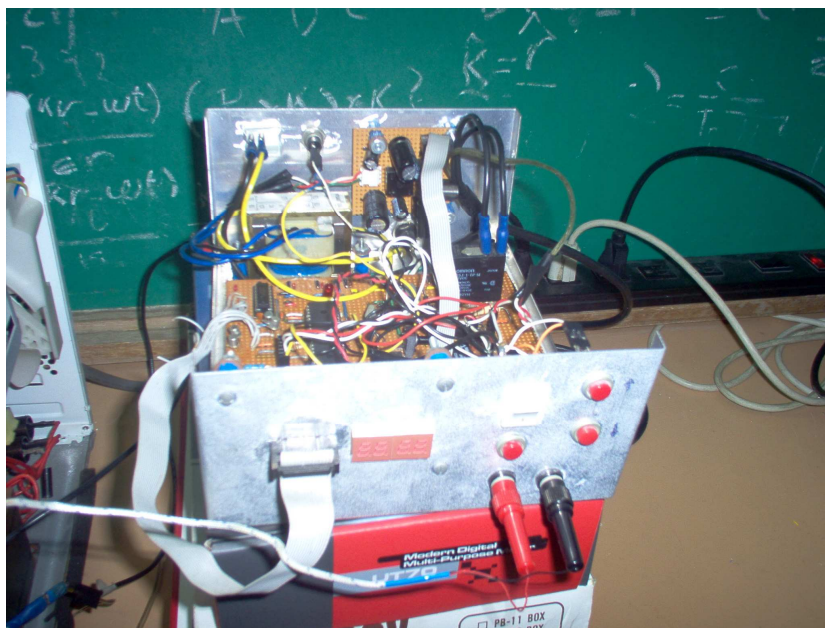


Figura 5.8 Controlador de temperatura

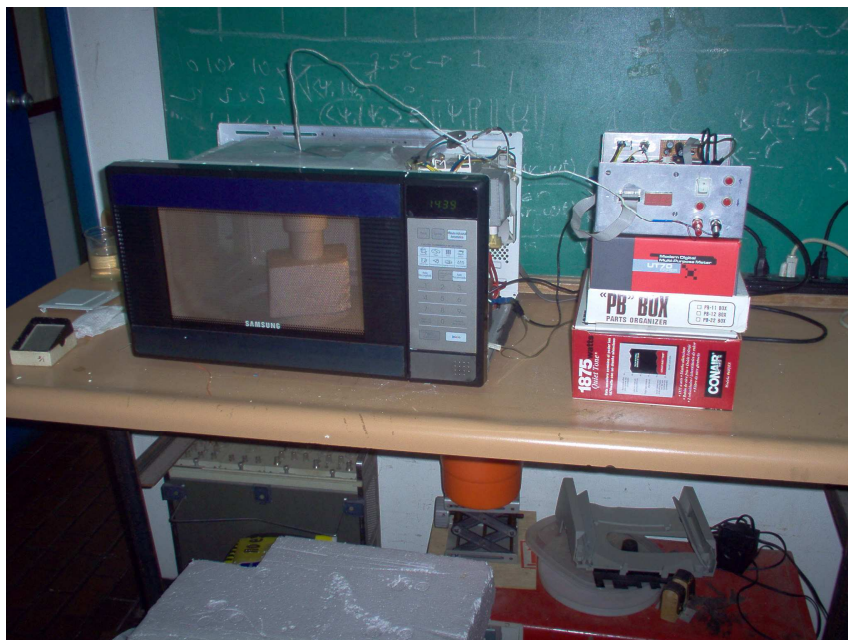


Figura 5.9 Calentamiento del gel de síntesis

Luego de realizar los calentamientos, el sólido obtenido se separó del gel mediante un filtrado y se lavó con agua destilada hasta un pH neutro. Luego, se sometió a un proceso de secado en una estufa a una temperatura de 100°C por 24 horas (Figura 5.10).



Figura 5.10 Sólido obtenido después del calentamiento

Finalmente, los sólidos fueron caracterizados por espectroscopía infrarroja y difracción de rayos X, ambos ensayos fueron realizados en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). En la figura 5.11 se presenta a manera de ejemplo, los resultados correspondientes al espectro infrarrojo del sólido calentado con microondas a 80 °C por 90 minutos, seguido por un calentamiento a 120 °C por 60 minutos.

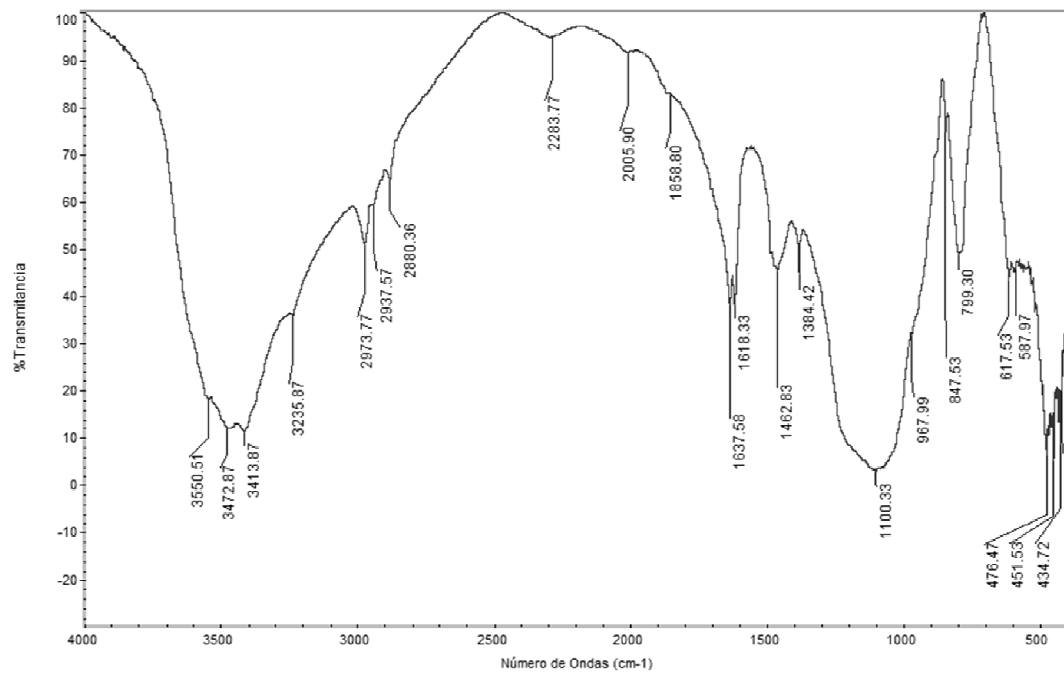


Figura 5.11 Espectro infrarrojo del sólido sintetizado por microondas

De acuerdo a la literatura (Mehdipourghazi, Moheb y Kazemian, 2010), para los análisis de infrarrojo en una zeolita del tipo ZSM-5, se deben obtener bandas de número de ondas (cm-1) a 450, 550, 800, 1096 y 1228, las cuales pueden ser asignadas a deformación fuera del plano tetraédrico T-O-T (Si-O-Si, Si-O-Al), presencia de estructuras condensadas de cinco eslabones, alargamiento simétrico externo, estiramiento asimétrico interno del tetraedro T-O-T, y alargamiento asimétrico externo T-O-T, respectivamente.

En la Figura 5.11, se observa el espectro infrarrojo del sólido calentado mediante las microondas el cual que posee tres (3) bandas características que corresponden a 450, 800 y 1096 (descritas anteriormente), lo cual queda demostrado que el sólido objeto de estudio posee un comportamiento de estructura zeolítica.

CONCLUSIONES

- Se aplicaron las fases del diseño conceptual propuestas en el libro Diseño para nuestra realidad por el Prof. Rodolfo Milani, demostrándose que la utilización de sus postulados son capaces de producir una convergencia hacia una solución viable.
- Realizando un estudio de las propiedades mecánicas del material (Teflón), se obtuvo el esfuerzo de fluencia (S_y), Módulo de Young (E), entre otros; siendo estos valores 11,5 MPa y 0,37 GPa respectivamente, para una temperatura de 21 °C.
- Aplicando cálculos y teorías convenientes se realizó el diseño del reactor cerrado.
- Se elaboraron los planos del reactor, específicamente los correspondientes a los siguientes elementos: vaso o cuerpo del reactor, tapa del reactor, funda de la termocupla, tapa de la funda de la termocupla, tapón y lámina de la válvula de seguridad.
- Se construyó el reactor cerrado basándonos en las especificaciones mostradas en los planos elaborados anteriormente.
- Se realizaron dos (2) pruebas en el Laboratorio de Paramagnetismo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela; las cuales permitieron verificar el funcionamiento del reactor.
- Se realizó un manual de operaciones y mantenimiento necesario para conservar en buen estado del reactor.

- Se contribuyó a la solución de la problemática suscitada en el Laboratorio de Refinación y Petroquímica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela para sintetizar zeolita en un tiempo menor al método convencional.
- Con el diseño y construcción de este reactor se demuestra la capacidad de generar ideas y equipos de manera concreta que aporten soluciones a los problemas existentes en la Universidad Central de Venezuela; al igual que permite a futuros estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química seguir realizando estudios y ensayos de zeolitas en un tiempo mínimo.

RECOMENDACIONES

- Incorporar al recipiente un dispositivo que permita medir la presión interna.
- En caso de requerir la construcción de otro reactor se recomienda revisar los planos obtenidos en este trabajo de investigación.
- En caso de requerir la construcción de otro reactor de mayor volumen se recomienda aplicar los cálculos y teorías para redimensionar sus componentes.
- En caso de utilizarse el reactor con otras soluciones o para realizar otro tipo de pruebas nunca debe sobrepasarse la temperatura de 140 °C.
- Se recomienda aplicar el manual de operaciones cada vez que se utilice el reactor y el manual de mantenimiento una vez utilizado.
- Se recomienda seguir con las investigaciones por parte de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela de manera que aporten soluciones a las diferentes problemáticas presentes en la Universidad Central de Venezuela

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, A, Métodos de Síntesis Orgánica. Universidad de la Habana. Disponible:
http://www.fq.uh.cu/dpto/qj/Aimee/sintesis_inor_web/conf_9.htm.
[consultado 2010/01/30].
- Askeland, Donald R., (1987). La Ciencia e Ingeniería de los materiales. Grupo Editorial Iberoamérica. México D.F.
- Balestrini A., Mirian. (1997). Como se Elabora el Proyecto de Investigación. Servicio Editorial Consultores Asociados. Caracas – Venezuela.
- Barrios Y., Maritza (2006). Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría Y Tesis Doctorales. 4^{ed}. UPEL Fondo Editorial. Caracas – Venezuela.
- Brydson, John. (1999). Plastics Materials. 7^{ed}. Editorial Butterwoth Heineman Oxford – Inglaterra.
- Bonaccorsi, Lucio y Proverbio, Eduardo, (2002). Microwave assisted crystallization of zeolite A from dense gels. Department of Industrial Chemistry and Materials Engineering, University ". A. di Messina, Salita Sperone 31, 98166 S. Agata di Messina, Messina, Italy.
- Carballido R., M^a Raquel, (2000). Síntesis asistida por microondas de compuestos de interés biológico e industrial: haloarenos, fulvenos, tricloropirrolidonas, azoles y flavonoides, modelado de espectros de absorción, electrónica de flavonoides. Universidad Santiago de Compostela, Facultad de Química, España. Disponible:

http://books.google.co.ve/books?id=9_NAdE-XCwC&pg=PT46&dq=sintesis+asistida+por+microondas#PPT396,M1,
[consultado 2009/05/31]

- Cundy, Colin. (2005). The hydrothermal synthesis of zeolites: Precursors, intermediates and reaction mechanism. Microporous and Mesoporous Materials.
- Decareau, Robert V. y Peterson, Robert A., 1986. Microwave processing and engineering. Editorial VCH, USA.
- Franco, M. (1993). Síntesis de Tamices Moleculares de Poro Grande: Zeolitas y Zeotipos. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.
- Gere, James M., (2006). Mecánica de materiales. 6^{ed}. Editorial Thomson.
- Giannetto G., Montes A., y Rodríguez G. (2000). Zeolitas: Características, Propiedades y Aplicaciones Industriales, Editorial Facultad de Ingeniería, UCV. Caracas. 350 p.
- Gómez, J. (2001). Síntesis, Caracterización y Aplicaciones Catalíticas de Zeolitas Básicas. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.
- Goncalves, Raúl. (2002). Introducción al Análisis de Esfuerzos. 2^{ed}. Universidad Simón Bolívar. Editorial Equinoccio.
- Hayes, Brittany L., (2002). Microwave synthesis chemistry at the speed of light. CEM Publishing, USA.

- Kingston, Howard M. y Haswell, Stephen J. (1997). Microwave – enhanced chemistry: fundamentals, sample preparation, and applications. American Chemical Society, Universidad de Michigan.
- Li, Qinghua. (2002). Colloidal Zeolites. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology. Sweden.
- Megyesy, Eugene F. (1992). Manual de Recipientes a Presión. Diseño y cálculo. Editorial Limusa.
- Mehdipourghazi, Mohsen; Moheb, Ahmad y Kazemian, Hossein (2010). Microporous and mesoporous materials. Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan. Iran.
- Milani, Rodolfo (1989). Diseño para nuestra realidad. Editorial Universidad Simón Bolívar, Caracas - Venezuela
- Morales, Husley y Rueda, Elda, (2007). Síntesis de catalizadores bifuncionales BM/HZSM5 y M/H-Y utilizando radiación por microondas. Trabajo especial de grado, No publicado. Facultad de ingeniería. Escuela de Química. UCV.
- Mott, Robert L. (2006) Diseño de elementos de máquinas. 4^{ed} .Editorial Pearson Educación. Edo. de México. MEXICO.
- Olguin, María. (1.998). Zeolitas: Características y Propiedades, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Departamento de Química, México D.F.
- Shigley, Joseph E. y Mitchell, Larry D. (1989). Diseño en Ingeniería Mecánica. 4^{ed}. Editorial McGraw-Hill México.

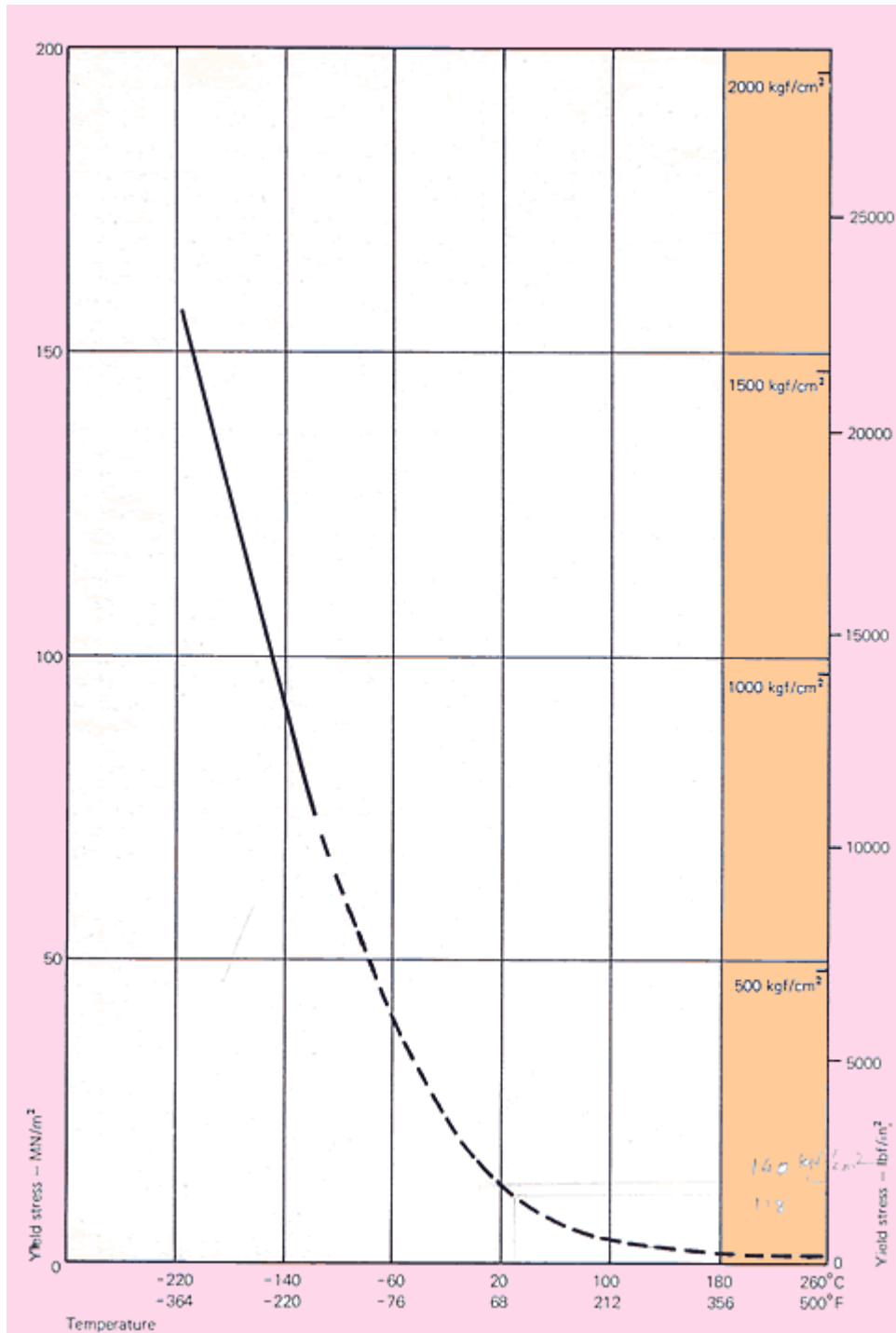
- Singer, Ferdinand L. (1971). Resistencia de Materiales. Editorial Harper y Row Publishers Inc.
- Skoog, Douglas A. y West, Donald, 2005. Fundamentos de Química Analítica. Cengage Learning Editores, Caracas.

APÉNDICE

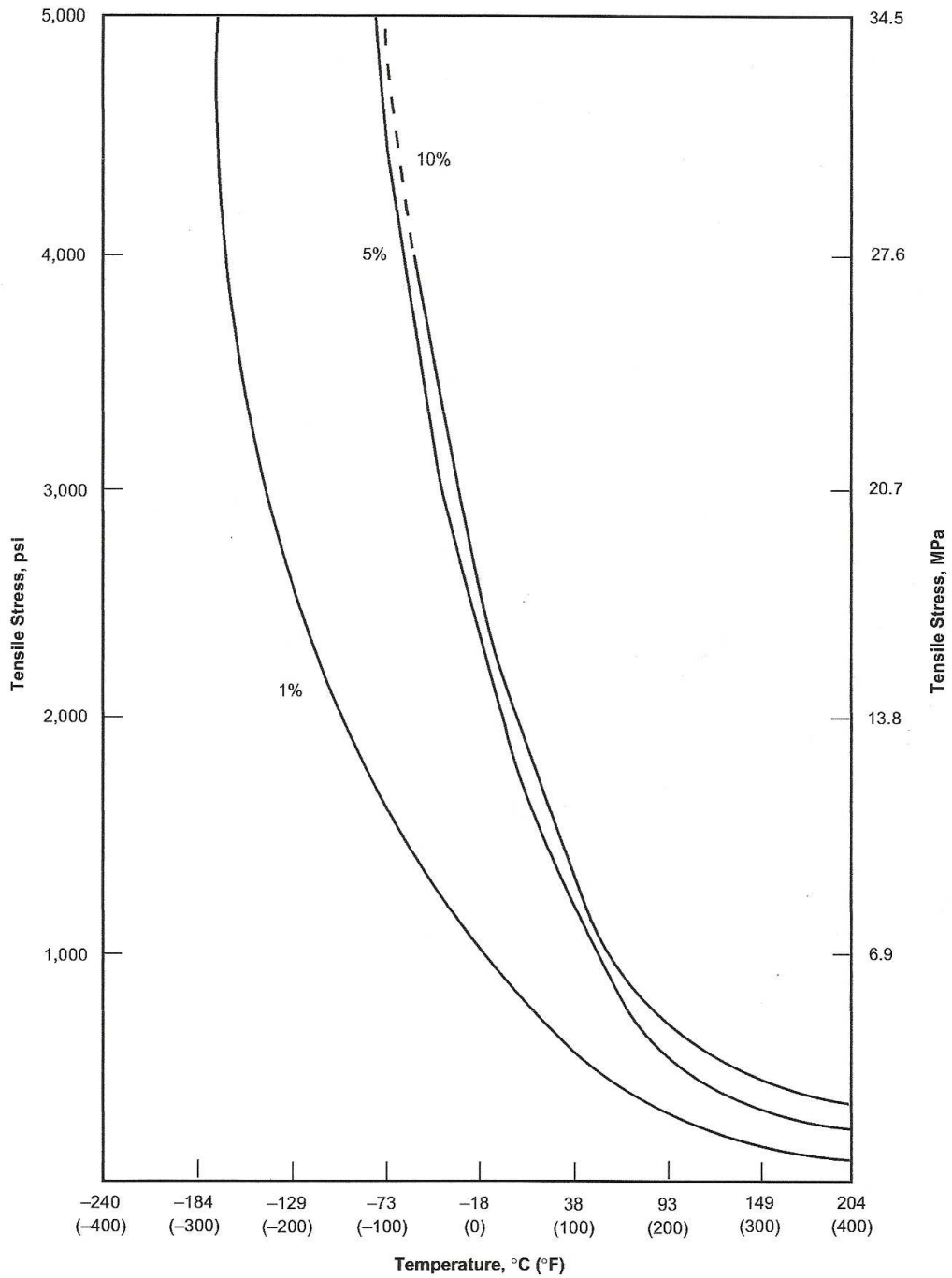
Apéndice I. Tabla Propiedades termodinámicas del agua.
Agua Saturada. Tabla de Temperatura

Temp. T °C	Press. sat. p _s kPa	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg			Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/(kg · K)		
		Líquido sat. u _f	Vapores sat. u _g	Líquido sat. u _f	Evap. u _{fg}	Vapores sat. u _g	Líquido sat. h _f	Evap. h _{fg}	Vapores sat. h _g	Líquido sat. s _f	Evap. s _{fg}	Vapores sat. s _g
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.8	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.6	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5560
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
Press. sat. MPa												
100	0.10133	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001065	0.7708	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.8	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0928	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.99	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698

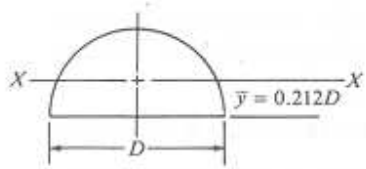
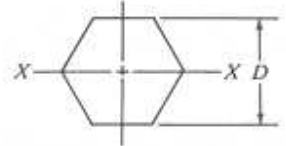
Apéndice 2. Gráfica Esfuerzo de Fluencia vs. Temperatura del Teflón



Apéndice 3. Gráfica. Esfuerzo de Tensión vs. Temperatura



Apéndice 4. Propiedades geométricas

<p>Semicírculo</p> 	$A = \pi D^2/8$ $I = 0.007D^4$ $S = 0.024D^3$ $r = 0.132D$
<p>Hexágono regular</p> 	$A = 0.866D^2$ $I = 0.06D^4$ $S = 0.12D^3$ $r = 0.264D$

- A = área
- I = momento de inercia
- S = módulo de sección
- r = radio de giro = $\sqrt{I/A}$
- J = momento polar de inercia
- Z_p = módulo polar de sección

MANUAL DE OPERACIONES Y MANTENIMIENTO.

Lea cuidadosa y completamente el manual de operaciones y mantenimiento antes de utilizar el reactor. Asegúrese de guardar el manual de operaciones para utilizarlo como referencia en el futuro. Todas las advertencias y precauciones del manual de operaciones deberán cumplirse estrictamente.

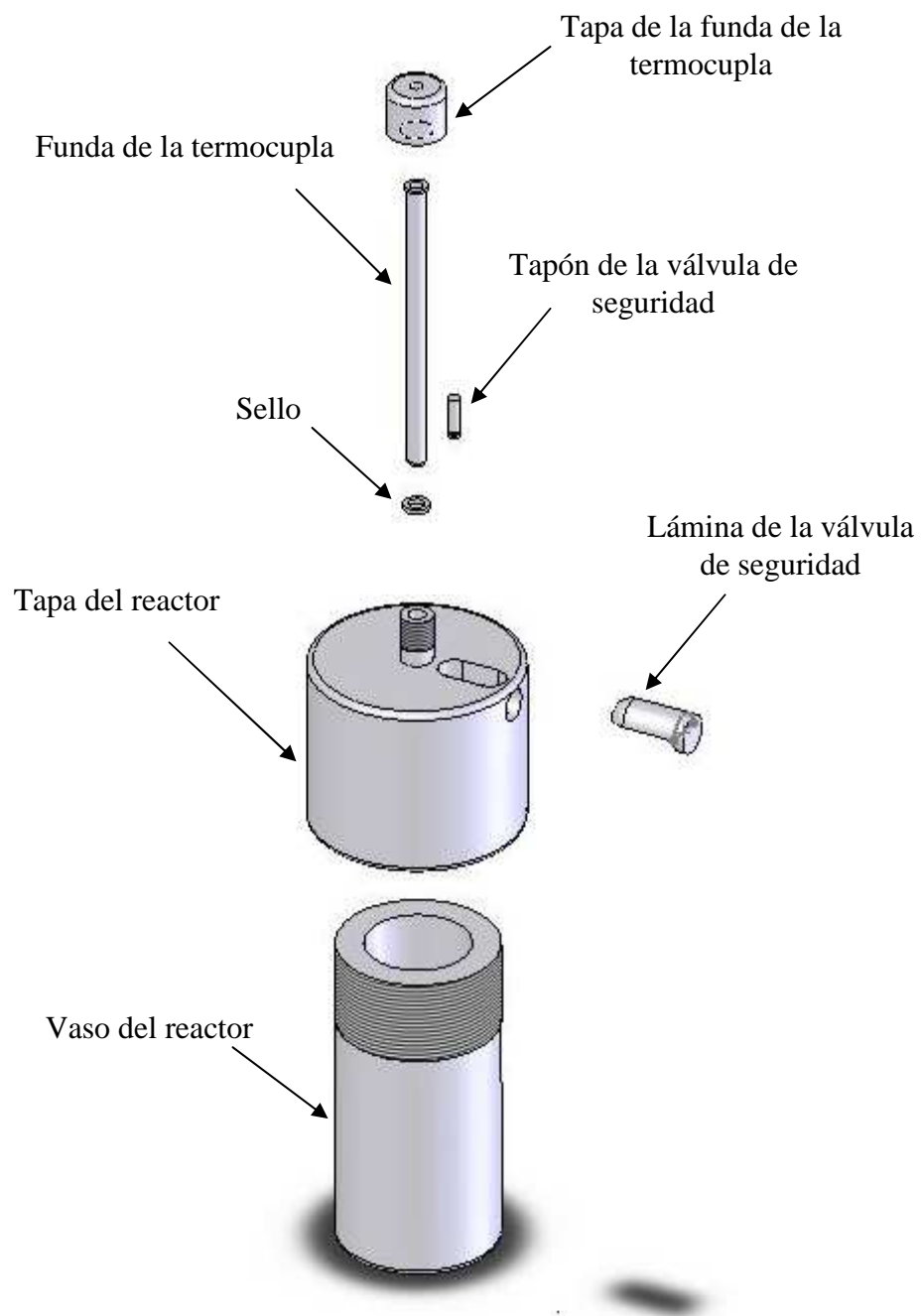
- **Precauciones y recomendaciones**

1. No utilice el reactor a temperaturas mayores de 140 °C
2. Una vez utilizado el reactor deje enfriar a temperatura ambiente.
3. Evite destapar el reactor cuando se encuentre a elevadas temperaturas.
4. Cuando utilice el reactor ponga el mismo sobre una superficie plana y nivelada.
5. Antes de cada ensayo verifique que el reactor este bien ensamblado.
6. Mantener el reactor en forma vertical una vez contenga la solución a ensayar
7. Revise el reactor después de cada ensayo
8. Limpie cuidadosamente los componentes del reactor después de cada ensayo
9. En períodos de no utilización coloque el reactor en un lugar fresco y seguro
10. Evite golpear el reactor
11. Evite caídas del reactor
12. No coloque el reactor a fuego directo.

- **Descripción del equipo**

Este recipiente consta básicamente de cinco (5) piezas las cuales están acopladas entre sí.

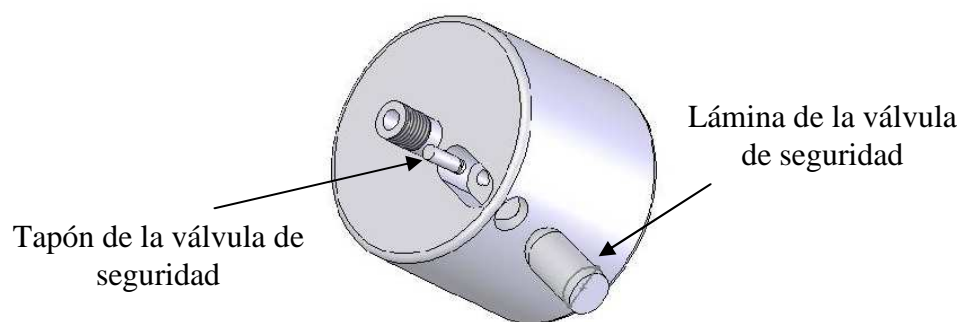
1. **Cuerpo o vaso del reactor:** contiene la mezcla o solución a sintetizar. Este posee rosca externa que permite fijarse con la tapa del mismo, para garantizar la hermeticidad del sistema.
2. **Tapa del reactor:** permite cerrar el reactor fijándose al cuerpo del mismo, evitando el escape de los gases de la solución producto del calentamiento. Además, tendrá una serie de dispositivos ensamblados a él, que permiten medir la temperatura interna y garantizar la seguridad del operador
3. **Funda de la termocupla:** sirve de recubrimiento de la termocupla, midiendo la temperatura de la mezcla sin que ésta entre en contacto directo con la misma
4. **Tapa de la termocupla:** permite mantener fija la funda de la termocupla a la tapa del recipiente
5. **Válvula de seguridad:** consta de dos (2) elementos (lámina y tapón) que se encuentran empotrados en la tapa del recipiente, la lámina de teflón, es flectada por el tapón cuando la presión interna es superior a la presión de trabajo.



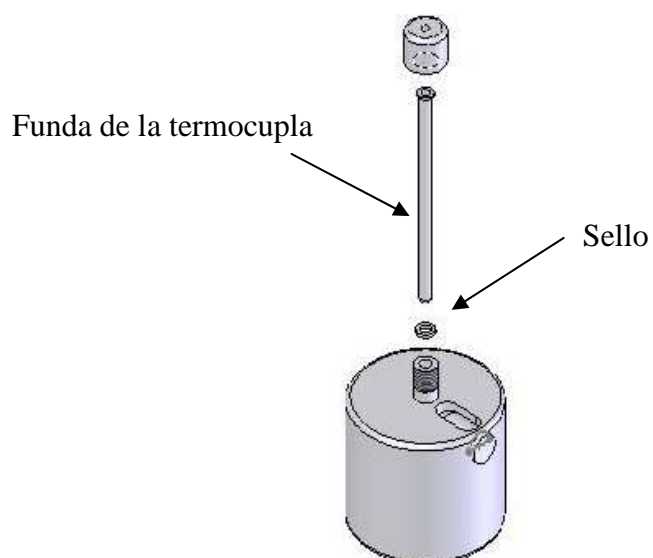
- **Ensamblaje detallado**

Para lograr un acople óptimo del conjunto, se deben seguir una serie de pasos descritos a continuación.

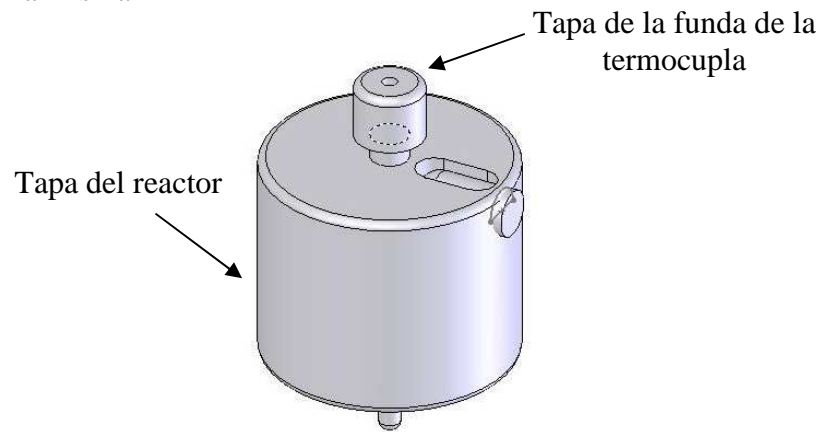
1. Introduzca el tapón de la válvula de seguridad en su respectivo orificio en la tapa del reactor y luego empotre la lámina de la válvula en la ranura del mismo, verifique que estén bien acopladas.



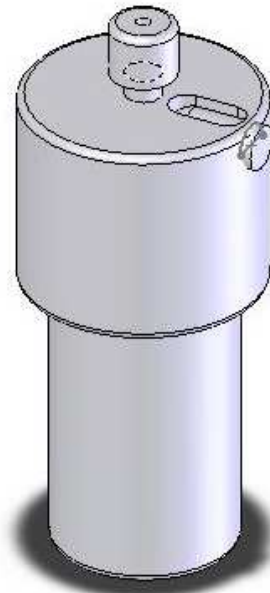
2. Coloque el sello en la funda de la termocupla e introdúzcala en la tapa del reactor



3. Rosque la tapa de la funda de la termocupla en la parte superior de la tapa del reactor sin ejercer mucha fuerza al roscar para evitar daños en la misma



4. Vierta en el vaso del reactor la solución a calentar
5. Rosque la tapa del reactor con el vaso del mismo de manera vertical para evitar que se derrame la solución



6. Coloque el reactor en el microondas de forma vertical y caliente por el tiempo requerido, sin sobrepasar la temperatura máxima de diseño 140°C.

- **Desensamblaje del reactor**

Una vez concluido el calentamiento, se procede a desacoplar el reactor de la siguiente manera:

1. Sacar el reactor del microondas y dejar enfriar al ambiente por unos 20min.
2. Separar la tapa del recipiente del cuerpo del reactor de forma vertical para evitar el derrame de la muestra.
3. Extraer la mezcla del reactor.
4. Separar la tapa de la funda del reactor y luego extraer la funda de la termocupla y el sello.
5. Sacar la lámina y tapón de la válvula de seguridad de la tapa del reactor.

- **Cuidados y mantenimiento**

El mantenimiento y el cuidado del reactor, resultan necesarios para optimizar las prestaciones del recipiente

1. Después de cada ensayo lavar el recipiente con suficiente agua y solución de detergentes suaves.
2. No utilice disolventes fuertes tales como bencina o diluyente porque estos podrían estropear el reactor.
3. Evite utilizar cepillos de cerdas duras.
4. Lavar y verificar después de cada ensayo las roscas del recipiente.
5. Lavar cada componente del reactor por separado.

6. Secar con un paño blando y seco.
7. Colocar en un lugar seco y fresco

- **Especificaciones del reactor.**

1. Material de construcción del reactor: Politetrafluor-etileno (Teflón)
2. Volumen total del Reactor: $73,2 \text{ ml} = 73,2 \text{ cm}^3$
3. Temperatura máxima de operación: $140 \text{ }^\circ\text{C}$
4. Presión máxima de