

75  
2 y



# Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Química

"ASPECTOS BASICOS EN LA DETERMINACION DE  
ESPESORES MINIMOS REQUERIDOS DE RECIPIEN-  
TES A PRESION PARA MANTENER CONDICIONES  
SEGURAS EN SU OPERACION"

## Trabajo Escrito-Vía Cursos de Educación Continua

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a :

**Silverio Miguel Herrera Bonilla**



México, D. F.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1989



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

CONTENIDO	PAGINA
INTRODUCCION	1
CAPITULO I. GENERALIDADES	
Antecedentes	3
Aleaciones	3
Soldadura	6
Tratamiento térmico	10
CAPITULO II. TEORIA BASICA SOBRE EL DISEÑO DE RECIPIENTES A PRESION	
Antecedentes	13
Requisitos de diseño	15
Presión de diseño	15
Temperatura de diseño	16
Tipo de material	16
Margen por corrosión	17
Espesor mínimo de pared	18
Esfuerzos máximos permisibles	18
Eficiencia de soldadura	19
Velocidad o presión del viento	21
Coefficiente sísmico	21
Selección del tipo de recipiente	21
Diseño de recipientes sometidos a presión interna	23
Diseño de envolventes cilíndricas	23
Diseño de envolventes esféricas	24
Selección del tipo de tapas	25
Diseño de tapas por presión interna	27
Tapas heliédricas	27
Tapas torioesféricas	28
Tapas hemiesféricas	29
Tapas cónicas	30
Tapas torioónicas	31
Diseño de estabilidad por cargas muertas, vientos y sismo	34
Esfuerzos de tensión causados por presión interna	35
Esfuerzos causados por cargas muertas	35
Esfuerzos producidos por la envolvente y aislamiento	35
Esfuerzos producidos por el líquido contenido en el recipiente	38
Esfuerzos producidos por los aditamentos del recipiente	38

Esfuerzos causados por cargas del viento	39
Esfuerzos producidos por movimientos sísmicos	41
Determinación del espesor mínimo requerido en función de los esfuerzos combinados	45
Ecuaciones generales	45
Criterio del máximo esfuerzo permisible por tensión	46
Criterio del máximo esfuerzo permisible por compresión	47
<b>CAPITULO III. METODOLOGIA DE INSPECCION EN RECIPIENTES A PRESION</b>	
Antecedentes	49
Inspección y especificaciones en la construcción de recipientes a presión	50
Inspección de materiales	50
Trazo	51
Corte	51
Rollado y formado	51
Marcado	52
Armad	52
Biselas	52
Desviación del diámetro	52
Juntas longitudinales	53
Juntas circunferenciales	53
Limpieza	53
Soldadura	54
Tratamiento térmico	55
Prueba hidrostática	57
Prueba de ensayo del material	59
Prueba neumática en placas de refuerzo	60
Barreros testigo	60
Inspección de recipientes a presión en operación	62
Inspección externa	63
Inspección interna	64
Aceros de alta resistencia	65
Aceros microaleados	65
Aceros convencionales	66
Inspección de recipientes a presión que cambien de servicio	71
<b>CAPITULO IV. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACION DE ESPESORES EN RECIPIENTES A PRESION</b>	
Antecedentes	74
Monitoreo de espesores	75
Trabajo de monitoreo de espesores	77
Análisis estadístico	78
Método de análisis estadístico	78

A.Cálculo de las velocidades de corrosión por punto de medición	78
B.Cálculo del promedio de la velocidad de corrosión y su ajuste estadístico	79
C.Determinación del origen de la desviación de valores de espesores obtenidos respecto al promedio general	77
D.Determinación del mínimo espesor medido	80
E.Determinación de la vida remanente	80
F.Determinación de la fecha de próximo monitoreo	81
G.Determinación de la fecha de reemplazo tentativa	82
Comprobación de un recipiente sometido a esfuerzos combinados	82
Comprobación del espesor mínimo requerido en recipientes a presión	83
Comprobación por presión interna	84
Envoltentes cilíndricas	84
Envoltentes esféricas	85
Tapas	86
Comprobación de las condiciones de estabilidad	88
Esfuerzos debidos a cargas del viento	88
Esfuerzos debidos a movimientos sísmicos	89
Esfuerzos debidos a la presión interna	90
Esfuerzos debidos a las cargas por peso muerto	90
Esfuerzo total de tensión y compresión	94
CONCLUSIONES	96
BIBLIOGRAFIA	98

## INTRODUCCION

En todas las plantas industriales es de suma importancia realizar trabajos de inspección preventiva de riesgos a los equipos e instalaciones en general, debido a las características tan especiales de las mismas.

La inspección se puede considerar como la acción y el efecto de revisar algo en particular con la finalidad de conocer su estado en general. El tipo y magnitud de una inspección dependerá del objetivo o finalidad buscada. Realizando de esta forma inspecciones, para controlar la calidad de los materiales de construcción de los equipos e instalaciones y verificar el funcionamiento de las mismas cuando se encuentran en servicio.

Las inspecciones permiten encontrar riesgos potenciales, tanto en las áreas administrativas, como de proceso, que pudieran afectar las condiciones de seguridad de una planta industrial.

Cuando se efectúa una inspección a una instalación o equipo, se origina una fuente de información que permite valorar el estado de las mismas. La información resultante de la inspección se descarga en registros específicos, para así ir formando un archivo de experiencias. Al mismo tiempo se crean estadísticas que permitan establecer los programas de mantenimiento, para poder mejorar las medidas de seguridad y eficiencia, en la operación normal de una planta.

Con la realización de inspecciones periódicas se adquieren criterios para la aplicación de nuevos materiales o procedimientos que puedan mejorar la vida útil de los equipos e instalaciones.

Los trabajos de inspección se pueden considerar preponderantes, ya que facilitan el mejor desarrollo de actividades previas al mantenimiento.

to o reparación de los equipos e instalaciones en cualquier planta industrial.

Dentro de los trabajos de inspección una de las actividades importantes es la determinación de espesores en unidades de proceso; esto es, determinar con exactitud el espesor real del material con que está construido un equipo, o bien el espesor real de pared que mantiene un equipo teniendo en cuenta las especificaciones mínimas requeridas de diseño, para una operación segura.

En el caso de los recipientes a presión al determinar los espesores se minimizan los riesgos de falla de los materiales empleados en su construcción. Con estas determinaciones se pueden plantear los lineamientos generales de inspección o reparación de recipientes que se encuentran en servicio o fuera de éste, indicándose las medidas y períodos, para estar acorde con los lineamientos de seguridad.

En el presente trabajo se enmarcan aspectos básicos de la inspección en recipientes a presión, partiendo de conocimientos en el diseño de éstos, considerando los generales y mínimos, para el propósito mencionado.

En la inspección se aborda las actividades del monitoreo de espesores, el manejo de la información y la comprobación de condiciones mínimas requeridas de espesor, para soportar las cargas de trabajo que actúan sobre los recipientes a presión.

Cabe mencionar que para todo aquel Ingeniero o Técnico que realice los trabajos de inspección, deberá tener un amplio conocimiento de los procesos en cuestión, de sus equipos e instalaciones, de las normas, códigos y especificaciones aplicables, para realizar una buena inspección en el diseño, construcción y operación de dichos equipos y sus instalaciones.

## I. GENERALIDADES

### ANTECEDENTES

Como parte del estudio relativo a los recipientes a presión, es necesario resaltar que en la especificación de los mismos se deben considerar una serie de elementos básicos; el material a utilizar para su construcción, los procedimientos de soldadura a aplicar para conformar el equipo, y los posteriores tratamientos térmicos a efectuar, que vendrán definidos por los códigos y conocimientos de los materiales, a fin de conseguir que el material adquiera la estructura cristalina inicial que tenía el propio material y que podría haberse alterado en el curso de las operaciones mecánicas a que se ha sometido el material base para lograr la configuración del equipo. Por ello es conveniente comentar los conceptos básicos relativos a las características de los materiales metálicos, tipos de tratamientos térmicos a los que se someten dichos materiales y descripción breve de algunos factores referentes a los procedimientos de soldadura.

### ALEACIONES

El diseñador escogerá la aleación que cumple con las especificaciones para construir el recipiente, en función de la presión, temperatura, propiedades del fluido a manejar y condiciones de servicio, teniendo como posibles limitaciones en la elección, el costo y disponibilidad del material.

De entre todos los materiales utilizados para la construcción de equipos de la industria de proceso en general, los más comunes son los aceros.

Los aceros son aleaciones hierro-carbono, con adición de otros elementos para mejorar ciertas propiedades del material y sus impurezas implícitas.



El carbono se encuentra en las aleaciones combinado con hierro, formando el carburo de hierro ( $Fe_3C$ ; cementita), éste es un compuesto de propiedades bien definidas y diferentes a las del hierro o de las del carbono. Como el carburo de hierro está formado por tres partes de hierro y una de carbono, se establece que el contenido máximo de éste último, es de 6.67 % en peso en aleaciones.

Las aleaciones hierro-carbono con contenido de éste último inferior a 1.76 % en peso, son de especial interés y se les define como aceros, los cuales son los materiales utilizados en la construcción de recipientes a presión y otros equipos. Las aleaciones hierro-carbono entre 1.76 % y 6.67 % se denominan fundición, y no son utilizadas en la construcción de recipientes a presión.

Según la composición que presentan los aceros se acostumbra a clasificarlos en base al contenido de elementos adicionados. Los aceros se pueden agrupar como aceros al carbono y aceros aleados (baja, media y alta). Dentro del grupo de aceros al carbono, se tiene una variedad enorme, pero se consideran en éste grupo aquellos aceros que presentan una composición química, como se indica a continuación:

Elemento	% en peso
C	0.06 - 1.04
Mn	0.25 - 1.65
P	0.04 máx.
Si	0.35 máx.
Cu	0.20 máx.
Cr	0.12 máx.
Ni	0.10 máx.
S	0.05 máx.

En la categoría de aceros aleados, presentan la siguiente composición química:

Elemento	% en peso
C	0.03 - 0.53
Mn	1.60 - 12.00
P	0.025 - 0.04
Si	0.20 - 14.00
Cr	0.30 - 27.00
Mo	0.08 - 0.40
V	0.10 - 0.15
S	0.025 - 0.05

En los aceros aleados, además de contener hierro, carbono e impurezas, contienen los elementos añadidos voluntariamente con el fin de mejorar alguna de las propiedades del acero, tales como, resistencia a la corrosión, duraza, resistencia a la temperatura, mayor carga de rotura, etc.. Los elementos de aleación añadidos usualmente son: cromo, molibdeno, vanadio, wolframio, manganeso, níquel, titanio, vanadio, niobio, silicio, cobalto, tántalo, etc..

Entre los elementos que perjudican a los aceros se encuentran: -- azufre, fósforo, plomo, nitrógeno, arsénico, antimonio, hidrógeno, oxígeno, -- etc.; algunos de los cuales están presentes como impurezas implícitas.

Algunos de los aceros más comúnmente usados en la construcción de los recipientes a presión, conocidos bajo especificación ASME-ASTM, son los siguientes:

Material	Especificación ASME-ASTM
Aceros al carbono calidad estructural de baja y media tensión	A-283 Grados A, B, C o D
Acero estructural de alta tensión	A-441
Aceros al carbono de baja y media tensión	A-285 Grados A, B o C
Aceros al carbono para medias y altas temperaturas	A-515 Grados 55, 60, 65 ó 70
Aceros al carbono para medias y bajas temperaturas	A-516 Grados 55, 60, 65 ó 70

Aceros al carbono con <u>propiedades mejoradas</u>	A-442 Grados 55 ó 60
Aceros de baja aleación:	
1/2 Mo	A-204 Grado A
1/2 Cr-1/2 Mo	A-287 Grado 2
1 Cr-1/2 Mo	A-387 Grado 12
5 Cr-1/2 Mo	A-387 Grado 5
Aceros inoxidables(Cr-Ni)	A-240 Tipos 304,304L,316,316L, 317,321,347,309,310

### SOLDADURA

El proceso de soldar materiales metálicos no es sólo efectuar una unión entre ellos, más bien es el inicio de una unión diseñada para soportar un trabajo posterior, con características muy particulares y variadas. Por consiguiente deberá ser primordial para fijar el procedimiento correcto de soldadura: conocer el trabajo que las piezas soldadas aportarán posteriormente, las consideraciones adecuadas en el diseño por las características de operación y los tipos de materiales que se manejarán dentro del equipo.

La operación de soldar dos o más piezas metálicas de un conjunto, es mediante una fusión localizada, asegurando la continuidad metálica entre las partes que se desean unir. El medio de unión debe ser el adecuado, de manera que garantice la continuidad de las propiedades mecánicas en el conjunto.

Para soldar es necesario disponer de una fuente de calor que produzca la fusión localizada de las piezas y del metal de aportación (si se requiere), dicha fuente puede ser de origen químico o eléctrico.

En la construcción de recipientes a presión y otros equipos, para la industria de proceso en general, se deberá seleccionar los procesos más adecuados para aplicarlos en la soldadura de los metales especificados; ya sean aceros al carbono, aceros de baja, media y alta aleación u

otros metales cuyo empleo será especificado por el diseñador, según características de diseño.

La selección y aplicación correcta de los procedimientos de soldadura de acuerdo con un proceso específico recomendable en cada caso, es responsabilidad del fabricante y del diseñador. Así en las etapas de fabricación las variables de control al soldar marcan la eficiencia del trabajo, por lo que el soldador deberá estar entrenado y experimentado en el uso de materiales y procedimientos de soldar, ya que es indispensable que las variables sean conocidas y aplicadas en forma controlada.

Para conocer los procedimientos de soldar se deberá investigar - las normas y códigos ya establecidos, como los indicados en la Sección IX del Código ASME, o los procedimientos de la AWS y del API.

En cada fabricación se establecen los procedimientos más adecuados de soldadura, conforme a las necesidades del equipo. Para los recipientes existen una gran variedad de tipos para soldar juntas, la selección depende de las condiciones de servicio, el espesor del metal a soldar, procedimiento de fabricación y requerimientos de soldadura de acuerdo a la especificación en los diferentes códigos y normas.

Cuando se realice un trabajo de soldadura, básicamente se tienen tres factores a considerar: preparación de la junta, el material base y el material de aporte, cuyo significado es el siguiente:

Preparación de la junta.- A pesar de que existen especificaciones que rigen el tipo de preparación de juntas, donde se indican la forma y dimensiones de bisel, normalmente sus diseños son basados en el tipo de material, procedimiento a utilizar y espesor, aunque lo más recomendable es apearse a lo indicado en los códigos o normas pertinentes. La soldadura de dos placas de acero se hará correctamente si se preparan los bisel convenientemente. El motivo principal de la preparación de-

los biselés es el permitir que la fuente de calor y el material de aporte tengan acceso a la zona de soldar, y en especial donde se requiere una penetración total.

**Material base.**- Generalmente todos los metales y sus aleaciones son soldables si se aplican los procedimientos adecuados de soldadura, pero se debe tener en cuenta que no todas las aleaciones del hierro son de la misma soldabilidad. En función del contenido de carbono se pueden dividir los aceros y fundiciones de acuerdo a su facilidad de soldadura en los siguientes grupos:

- a) Son aceros soldables cuando su contenido de carbono es inferior a 0.30 %.
- b) Son aceros medianamente soldables cuando su contenido de carbono está comprendido entre 0.30 y 0.45 %.
- c) Son aceros poco soldables los que tienen un contenido de carbono entre 0.45 y 0.65 %.
- d) los aceros cuyo contenido de carbono es superior a 0.65 % son prácticamente insoldables.

**Material de aporte.**- Este tendrá que ser ligado directamente al tipo de acero que se va a soldar. De acuerdo con el análisis químico y las propiedades físicas del metal base, se selecciona el material de aporte y el electrodo adecuado, debiendo existir similitud en dichas propiedades. Las clasificaciones de material de aporte, y junto con éste el tipo de electrodo, están en base al tipo de material (acero al carbón o aceros aleados) y el procedimiento de soldadura.

En todos los aceros el carbono es el elemento más común y causa una gran variedad de efectos. Uno de éstos, es el endurecimiento en forma intensa en la zona de fusión del metal base, lo que origina que en ésta zona el material sea menos elástico y se produzcan fracturas en las juntas y zonas adyacentes.

Para evitar las fracturas en muchas ocasiones se da un precalentamiento, que en algunos casos hace innecesario un relevado de esfuerzos.

Los precalentamientos dependen básicamente de la composición del acero, del espesor de pared del recipiente y del procedimiento de soldadura. Para efectuar un precalentamiento, es necesario saber a que temperatura se realizará, por lo que es necesario determinar el carbono equivalente (CE) del análisis químico del material. Este contenido de carbono equivalente considera el porcentaje de otros elementos de aleación que contiene el material base y se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cu}{13} + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%V}{5}$$

Las temperaturas de precalentamiento recomendadas para diferentes rangos de carbono equivalente, se presentan en la tabla siguiente:

Contenido de CE	Temperatura de precalentamiento
hasta 0.45 %	opcional
de 0.45 a 0.60 %	80 - 200°C (200 - 400°F)
arriba de 0.60 %	200 - 370°C (400 - 700°F)

En base al espesor de pared del recipiente y de la resistencia a la tensión del material, en la fabricación del mismo, la temperatura de precalentamiento se puede conocer de las recomendaciones siguientes:

Espesor del recipiente		Resistencia a la tensión (lb/in <sup>2</sup> )			
(mm)	(in)	50	60	70	80
19	3/4	°C (	----	----	75-125 100-150 )
25	1	°C (	50-100	50-100	100-150 125-175 )
32	1 1/4	°C (	75-125	75-125	125-175 150-200 )
38	1 1/2	°C (	100-150	100-150	150-200 150-200 )
50	2	°C (	125-175	125-175	150-200 150-200 )

Durante todo el proceso de soldadura es necesario comprobar constantemente que la temperatura no se encuentre con valores inferiores a los determinados, de acuerdo a las consideraciones anteriores. Una vez terminado todo el proceso de soldadura se emplea un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos para incrementar la tenacidad y mejorar la resistencia a la corrosión.

#### TRATAMIENTO TERMICO

En ocasiones se requerirá efectuar un tratamiento térmico posterior a la soldadura con el fin de cambiar la estructura interna del material o para aliviar los esfuerzos internos producidos.

Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento, a temperaturas adecuadas para cada caso, a que se someten los aceros con objeto de darles características mejores y más adecuadas a su utilización. Con estas operaciones no se modifica la composición química del acero, y si en cambio su estructura, su constitución y su estado mecánico. De esta forma en los tratamientos térmicos se modifica la estructura interna de los aceros y se producen transformaciones físicas que modifican, entre otras propiedades, la dureza, resistencia mecánica, tenacidad y ductibilidad.

Los tratamientos térmicos aplicados en la industria son muy numerosos, pero de todos ellos los más usuales son:

a) Recocido.- Es un tratamiento térmico que consiste en calentar el metal o aleación hasta la temperatura necesaria para alcanzar una estructura ablandada, y así poder trabajar mejor el acero; a veces el objetivo es regenerar la estructura o eliminar las tensiones internas del material. El enfriamiento es lento, natural, dejando el material en el horno donde se realizó el calentamiento.

b) Normalizado.- Es un tratamiento análogo al recocido en cuanto al calentamiento, variando el enfriamiento que tiene lugar fuera del horno

en un local donde no existan corrientes de aire. Con éste tratamiento - se consiguen estructuras más finas ; sin embargo, con él no se consiguen las mínimas durezas.

c) Temple.- Este tratamiento térmico consiste en calentar el material hasta la temperatura en que se alcanza la estructura austenítica, seguido de un enfriamiento rápido; usando agentes externos como aceite o agua para enfriar. Con éste tratamiento se consigue aumentar la dureza del acero y mejorar algunas propiedades del mismo, tales como la resistencia a la tensión, límite elástico y la resistencia eléctrica.

d) Revenido.- Es una operación inversa a la del temple, que sirve para amortiguar la dureza o fragilidad que un temple excesivamente rápido confiere a los aceros. En forma resumida, con éste tratamiento se mejoran los efectos del temple disminuyendo ligeramente la dureza y resistencia a la tensión, eliminando las tensiones creadas en el temple y mejorando su tenacidad, quedando el acero con la dureza y resistencias deseadas.

e) Relevado de esfuerzos.- Este tratamiento térmico es una operación que se sigue para eliminar esfuerzos residuales resultantes de haber sometido a un material a trabajos mecánicos o de soldadura. Las especificaciones que se dan para éste tratamiento, indican que se deberá realizar cuando el recipiente vaya a contener fluidos a bajas temperaturas, menores a  $-29^{\circ}\text{C}$ , o sustancias tóxicas. Las condiciones del tratamiento estará en función del tipo de material y del espesor del recipiente, pero la más general es la de mantener una temperatura mínima de  $600^{\circ}\text{C}$  ( $1110^{\circ}\text{F}$ ), durante una hora por cada pulgada de espesor durante el calentamiento, para el enfriamiento el horno deberá estar cerrado.

Existen otros tipos de tratamientos donde se utilizan compuestos químicos y que son aplicados para usos muy específicos de la industria.



En éste capítulo no se ha pretendido incluir el extracto de un tratado de metalurgia y de soldadura, sino solamente comentar en forma breve, una serie de conocimientos básicos que permitan al Ingeniero o técnico no especializado conocer las características básicas de los materiales con los que se construyen los recipientes a presión, y de una serie de operaciones a las que el recipiente puede verse sometido en el curso de su construcción, y aún cuando esté en operación.

## II. TEORIA BASICA SOBRE EL DISEÑO DE RECIPIENTES A PRESION

### ANTECEDENTES

En los procesos industriales se involucran conocimientos de las diferentes ramas de la Ingeniería. Uno de éstos, es el que se refiere al diseño de recipientes para procesar y almacenar cantidades enormes de materiales de diversas características.

El diseño o cálculo mecánico de un recipiente a presión consiste básicamente en la determinación de espesores de las diferentes partes o secciones que lo conforman. La elección del tipo de recipiente dependerá de varios factores, tales como, la cantidad de material a manejar, de su estado físico, de sus propiedades químicas y físicas, etc., considerando también las condiciones a las que va a operar.

Dentro del diseño se consideran factores muy importantes la selección del tipo de recipiente y del material de construcción, que deberán cubrir los requerimientos de un servicio específico, así como las condiciones mínimas de seguridad en todo el diseño, las cuales en parte son fijadas por las propiedades del material que se empleará en la construcción del recipiente.

Es importante destacar que si en el recipiente a presión, desde su diseño no se cubren las especificaciones de seguridad, éste puede fallar ya en operación y posiblemente con resultados muy catastróficos. Por lo que se deberán cubrir los factores de diseño en su totalidad, minimizando así los riesgos, sin dejar de considerar el costo de fabricación en relación al servicio que va a prestar y su vida útil.

Los procedimientos de diseño y especificaciones generales, son abarcados por los diferentes códigos existentes, entre los cuales se encuentran: Código Británico BS-5500; Código JIS de origen japonés; Código ASME

Sección VIII, Divisiones 1 y 2; y otros más de origen europeo.

Para efectos de éste trabajo se emplearán principalmente los conceptos y especificaciones establecidas en el Código ASME, por ser éste el de mayor aplicación en México.

En forma práctica, el término recipientes a presión involucra a todos los recipientes que trabajarán a presión superior a la atmosférica, soldados y que no estarán sometidos a fuego directo, construidos con materiales de acero especificados en el Código ASME u otros similares, como el ASTM, excluyendo de éste caso los recipientes nucleares.

Las reglas de diseño del Código ASME en su Sección VIII, amparan los recipientes diseñados y construidos, para soportar presiones de hasta --  $3000 \text{ lb/in}^2$  ( $210 \text{ Kg/cm}^2$ ) en la División 1; y para presiones menores de --  $3000 \text{ lb/in}^2$  ( $210 \text{ Kg/cm}^2$ ) en la División 2.

En la Sección VIII, División 1, se establece que no se aplicarán éstas reglas de diseño a los siguientes tipos de recipientes:

1. Recipientes a presión para servicio de agua con capacidad nominal menor o igual a 120 galones.
2. Tanques de almacenamiento para suministro de agua caliente, que utilicen vapor u otro medio indirecto de calentamiento, cuando no exceda lo siguiente:
  - a) ganancia de calor de  $20,000 \text{ BTU/Hr}$
  - b) temperatura del agua de  $200 \text{ }^\circ\text{F}$  ( $93 \text{ }^\circ\text{C}$ )
3. Recipientes con una presión de operación interna menor a  $15 \text{ lb/in}^2 \text{ g. (psig)}$ .
4. Recipientes con diámetro interior menor o igual a 6 pulgadas ( $150 \text{ mm}$ ).
5. Recipientes nucleares.

Ya en el diseño, se deben de cubrir ciertos requisitos generales de diseño desde que éste inicie, como se describe a continuación.

## REQUISITOS DE DISEÑO

Para el diseño de recipientes a presión se tienen establecidos requisitos generales de diseño, en éstos se involucra lo siguiente:

- a) Presión de diseño interior o exterior
- b) Cargas de impacto, incluyendo las fluctuaciones rápidas de presión.
- c) Peso del recipiente y su contenido bajo condiciones de operación o de prueba, esto incluye la presión adicional debido a la carga estática de líquidos.
- d) Cargas sobrepuestas, tales como, otros recipientes, equipos en operación, aislamiento, recubrimientos resistentes a la corrosión o erosión, tuberías y otros aditamentos.
- e) Cargas por viento o sismo, cuando se requiera.
- f) Reacciones debidas a las patas, anillos sillas y otros tipos de soportes.
- g) Los efectos por gradientes de temperatura sobre los esfuerzos máximos.

Para comenzar el cálculo de diseño de un recipiente se debe disponer de datos básicos, tales como, presión y temperatura de diseño, margen de espesor por corrosión, tipo de material, velocidad o presión del viento en el lugar de servicio, coeficiente sísmico, etc..

A continuación se expone una breve guía para definir los datos básicos de diseño de un recipiente a presión.

### PRESION DE DISEÑO

Los recipientes deberán diseñarse como mínimo a la condición más severa de presión esperada en algún momento de operación normal; para esto se puede utilizar el siguiente criterio para obtener su --

valor utilizando para el diseño la presión que resulta de mayor valor

$$P_d = 1.1 (P \text{ máx. de opn.}) : \text{ en Kg/cm}^2$$

$$P_d = P \text{ máx. de opn.} + 1 : \text{ en Kg/cm}^2$$

#### TEMPERATURA DE DISEÑO

Al igual que la presión de diseño, debe ser como mínimo la temperatura máxima que se produzca durante la operación, se utiliza el siguiente criterio:

$$T_d = T \text{ máx. de opn.} + 20 ; \text{ en } ^\circ\text{C}$$

#### TIPO DE MATERIAL

Los materiales comúnmente usados en la construcción de recipientes a presión, son de acero al carbón, acero de baja aleación, aceros --inoxidables y en menor medida otros materiales.

La elección del material se hará en función de factores fundamentales. Estos son: Temperatura de diseño, presión de diseño y las propiedades del fluido que va ser contenido en el recipiente.

Aunado al tipo de material se deben considerar las características de soldabilidad, tenacidad, etc., así como las necesidades o no de un tratamiento térmico.

El valor del esfuerzo máximo permisible de un material para la fabricación de un recipiente, es la unidad máxima de esfuerzo permitido y que se considera en el cálculo del espesor de las tapas y carcasa. Los valores de esfuerzo máximo permisible a la tensión para aceros al carbón y aceros de baja aleación, vienen dados en la tabla UCS-23 del Código ASME, Sección VIII, División 1.

También en la elección del tipo de material, se deberá considerar los aspectos económicos basándose siempre en guardar la mayor seguridad.

dad posible.

#### MARGEN POR CORROSION

Desde el punto de vista de corrosión, los recipientes se pueden clasificar en los siguientes grupos:

1. Recipientes en los que el régimen de corrosión puede establecerse definitivamente con la información disponible por el diseñador, con respecto a las características de las sustancias que contendrán. Dicha información puede encontrarse en publicaciones o en registros confiables, resultado de observaciones previas.
2. Recipientes en los que el régimen de corrosión aunque se sabe que es relativamente alto, es variable o de magnitud indeterminable.
3. Recipientes en los que el régimen de corrosión, aunque es indeterminable, se sabe que es relativamente bajo.
4. Recipientes en los que los efectos de corrosión son despreciables o no existen.

Cuando el régimen por corrosión es predecible se deberá adicionar un espesor de metal, según se requiera para las condiciones de operación y que deberá ser por lo menos igual a la pérdida por corrosión durante toda su vida útil del recipiente. En muchos casos el valor del régimen de corrosión normalmente es igual al máximo espesor corroído, previsto para 10 años y pensando que el fluido a manejar sea medianamente corrosivo.

Los recipientes de acero al carbón y de baja aleación que se utilizan para aire, agua y vapor de servicio, deberán contar con un margen de corrosión de  $1/16$ " (0.159 cm) ó de  $1/6$  del espesor determinado, utilizando el valor menor de éstas dos magnitudes.

Cuando existan razones para pensar que la rapidez de desgaste es

baja, pero no se pueda precisar, deberá dejarse un margen de corrosión mínimo de  $1/16$  " (0.159 cm).

#### ESPESOR MINIMO DE PARED

Los espesores de pared se deben fijar en un valor mínimo por código, norma, requerimientos de transporte o cualquier otro factor.

Los espesores mínimos que son aceptables en un recipiente, tanto en las partes que conforman el cuerpo, como en las tapas: una vez descontado el margen por corrosión, son los siguientes:

- a) En recipientes soldados  $3/32$  " (2.38 mm)
- b) En recipientes remachados  $3/16$  " (4.76 mm)

Como guía práctica se puede adoptar que el espesor de pared no sea menor al que marcó el Código ASME, Sección VIII, División 1, y que es:

$$t \text{ mín.} = 2.5 + C \quad ; \text{ en mm}$$

donde: C = 0, corresponde al margen por corrosión

También se puede adoptar que el espesor no sea menor que el valor que resulte mayor de:

$$t \text{ mín.} = \frac{2.5 + D_o}{1000} + C \quad ; \text{ en mm}$$

$$\text{ó } t \text{ mín.} = 3 + C \quad ; \text{ en mm}$$

donde:  $D_o$  = diámetro exterior

C = margen por corrosión

#### ESFUERZOS MAXIMOS PERMISIBLES

Los recipientes a presión se diseñan con unos espesores de pared capaces de soportar sin deformación la presión a la que serán sometidos; expresado en términos del material es que, el esfuerzo a la tensión a la que se somete el material, sea inferior al máximo esfuerzo permisible

ble del mismo. Este esfuerzo máximo permisible depende de las características del material y del coeficiente de seguridad que se adopte, - variando con la temperatura de trabajo.

El factor o coeficiente de seguridad permite calcular el esfuerzo de trabajo, de la siguiente relación:

$$FS = \frac{S_{mp}}{S_t}$$

donde: FS = factor de seguridad

S mp = Esfuerzo máximo permisible, del material en cuestión

S t = Esfuerzo de trabajo, del material en cuestión

Según el Código ASME, Sección VIII, División 1, la tensión o esfuerzo máximo permisible (S mp) a la temperatura de diseño, es el mínimo de los siguientes valores :

$$S_{mp} = \min. \left( \frac{R'}{4}, \frac{5}{8} y, f_1, \frac{2}{3} fr \right)$$

donde: R' = Carga de rotura a la temperatura ambiente (20 °C), en Kg/cm<sup>2</sup>

y = Límite elástico o carga que produce una deformación permanente del 0.2 % a la temperatura de diseño, en Kg/cm<sup>2</sup>

f<sub>1</sub> = Carga que produce un alargamiento del 1 % en 100,000 - horas por deformación viscosa a la temperatura de diseño, en Kg/cm<sup>2</sup>

fr = Carga de rotura por alargamiento en 100,000 horas a la temperatura de diseño, en Kg/cm<sup>2</sup>

Para los materiales que se utilizan, el Código ASME, Sección VIII, División 1, contiene unas tablas que muestran las tensiones máximas -- permisibles para cada material a diferentes temperaturas.

#### EFICIENCIA DE SOLDADURA

La unión de juntas, se realiza normalmente por soldadura y ésta representa la posible producción e intensificación local de las tensiones a que se ha sometido el material, además existe la posibilidad



de producirse defectos en la realización de la soldadura, o en el calentamiento y enfriamiento a que se someten los materiales, pudiendo resultar la zona de soldadura como debilitada.

Teniendo en cuenta éste hecho, en el cálculo de diseño de los recipientes se introduce una reducción al esfuerzo máximo permisible, al multiplicarlo por un coeficiente denominado eficiencia de la soldadura (E); cuyo valor depende del tipo de procedimiento de soldadura y de los controles efectuados sobre ella. En seguida se indican valores de eficiencia de la soldadura, según el tipo de juntas.

#### EFICIENCIA DE JUNTAS SOLDADAS

Tipo de junta	Inspección radiográfica		
	total	intermitente	sin
1. Juntas a tope con doble soldadura	1.00	0.85	0.70
2. Juntas a tope con soldadura sencilla y con tiras de respaldo	0.90	0.80	0.65
3. Juntas a tope con soldadura sencilla y sin tiras de respaldo	----	----	0.60
4. Junta traslapada con doble filete completo de soldadura	----	----	0.55
5. Juntas traslapadas con filete sencillo completo de soldadura y con soldadura de tapón	----	----	0.50
6. Juntas traslapadas sin soldadura de tapón y con filete completo de soldadura	----	----	0.45

En el Código ASME, Sección VIII, División 1 párrafos UW, se indican las especificaciones referentes al tipo de juntas y la soldadura, indi-

cando también sus limitaciones.

#### VELOCIDAD O PRESION DEL VIENTO

Las cargas debidas al viento están en función de la presión unitaria del viento, que a su vez está en función de la velocidad del viento en ese momento.

Según sea el caso, se cuenta con información donde indique las velocidades y/o presiones del viento en cada zona, altitud, etc..

Para el diseño en función de las cargas debidas al viento, se utilizarán los datos de la zona, debiendo ser los más altos para efectuar un cálculo de diseño debidamente.

#### COEFICIENTE SISMICO

La acción sísmica no es uniforme, en algunas zonas existe mayor -- probabilidad de producirse un movimiento sísmico con una intensidad de movimiento variable, en el caso de que se produzcan; por lo que se deberá considerar un coeficiente sísmico en el diseño cuando sea necesario.

#### SELECCION DEL TIPO DE RECIPIENTE

Usualmente el primer paso en el diseño de algún recipiente a presión es seleccionar el tipo más adecuado para el servicio particular -- que prestará. Los factores primarios que influyen para ésta decisión -- son: la función y localización del recipiente; la naturaleza del material a manejar; la temperatura y presión de operación; y el volumen necesario para almacenar o capacidad para procesar el fluido en cuestión. De ésta manera se puede establecer una clasificación de los recipientes a presión en función del servicio que prestan, sus condiciones de -- operación, sus materiales de construcción o por la geometría que presentan. Así se tiene que los recipientes cilíndricos son de uso más general como equipos de proceso o de almacenamiento, y los recipientes esf

ricos son empleados como tanques de almacenamiento.

De experiencias se ha demostrado que los recipientes cilíndricos son más fáciles de fabricar e instalar por lo que se usan más ampliamente en los procesos industriales. Estos son diseñados en diferentes tipos de tapas, usadas en aplicaciones muy diversas. Por ejemplo; los equipos de proceso, tales como, columnas de destilación, unidades de absorción o desorción, torres empacadas, evaporadores, cristalizadores e intercambiadores de calor son esencialmente cilíndricos, variando el tipo de tapas.

También de acuerdo a los requerimientos de funcionalidad se indicará si el recipiente debe ser horizontal o vertical; las columnas de destilación y las torres empacadas utilizan la fuerza de gravedad para separar las fases y componentes de una mezcla, por lo que requieren instalaciones verticales; para cambiadores de calor y tanques de almacenamiento se encuentran instalaciones verticales y horizontales.

Los recipientes cilíndricos sencillos presentan una relación óptima de longitud-diámetro ( $L/D$ ), como una función del costo la que se considera también en el proyecto.

Los tanques de almacenamiento que son esféricos se utilizan para fluidos volátiles, productos con presión de vapor alta, y tienen la capacidad de soportar grandes presiones evitando en forma efectiva las pérdidas por evaporación, mientras la presión de vapor a la máxima temperatura en la superficie del fluido no sea mayor a la de apertura de la válvula de alivio.

En los recipientes esféricos se presenta menor área de superficie de contacto con la atmósfera en comparación con otro tipo de recipientes, teniendo una relación menor de área de superficie por unidad de volumen; de ésta forma se obtienen condiciones graduales de temperatura

más lentas dentro del fluido, por lo que resulta menos probable que lleguen a operar las válvulas de alivio.

Al utilizar recipientes esféricos la inversión se ve reducida por el ahorro que representa el almacenamiento del material, la reducción del costo por unidad de volumen almacenado a través del tiempo.

#### DISEÑO DE ENVOLVENTES SOMETIDAS A PRESION INTERNA

##### DISEÑO DE ENVOLVENTES CILINDRICAS

La presión interna en un recipiente cilíndrico produce dos tipos de tensiones o esfuerzos, los de tipo circunferenciales o transversales y axiales o longitudinales. Para el diseño las fórmulas que definen el espesor exigido, están basadas en las tensiones o esfuerzos circunferenciales, por ser superiores los valores obtenidos por éstas

Las fórmulas de diseño para envolventes cilíndricas, estableciendo que el espesor de las envolventes no deberá ser menor al determinado y previendo que puedan existir cualquiera de las cargas ya indicadas, son las siguientes:

$$t = \frac{Pd R}{SE - 0.6 Pd} = \frac{Pd R_o}{SE + 0.4 Pd}$$

La condición para aplicar éstas fórmulas es que:

$$t < (1/2) R \quad \text{ó} \quad Pd < 0.385 SE$$

Si la condición no se cumple y se tiene que:

$$t > (1/2) R \quad \text{ó} \quad Pd > 0.385 SE$$

entonces, se aplicarán las siguientes fórmulas:

$$t = R_o \frac{(Z^{1/2} - 1)}{Z^{1/2}} = R(Z^{1/2} - 1)$$

$$\text{donde: } Z = \frac{SE + Pd}{SE - Pd}$$

## DISEÑO DE ENVOLVENTES ESFERICAS

Para el diseño de envolventes cilíndricas la condición que se establece es:

$$t < 0.356 R \quad \text{ó} \quad Pd < 0.665 SE$$

si esto se cumple, se aplicarán las siguientes fórmulas:

$$t = \frac{Pd R}{2SE - 0.2Pd} = \frac{Pd Ro}{2SE + 0.8Pd}$$

En envolventes esféricas gruesas, es decir, que la condición es:

$$t > 0.356 R \quad \text{ó} \quad Pd > 0.665 SE$$

se aplicarán las siguientes fórmulas:

$$t = R \left( Y^{1/3} - 1 \right) = Ro \left( \frac{Y^{1/3} - 1}{Y} \right)$$

donde;  $Y = \frac{2(SE + Pd)}{2SE - Pd}$

En las fórmulas descritas anteriormente, para el diseño de envolventes por presión interna, el significado de las variables involucradas es el siguiente:

t = Espesor mínimo requerido de las placas de la envolvente, sin incluir tolerancia por corrosión, en pulg. (in).

Pd = Presión de diseño, en lb/in<sup>2</sup>.

R = Radio interior de la envolvente en consideración, sin considerar la tolerancia por corrosión, en pulg. (in).

Ro = Radio exterior de la esfera o de la envolvente cilíndrica considerada, en pulg. (in).

S = Valor del esfuerzo máximo permisible en función de la temperatura de diseño, valor de tablas UCS-23 del Código ASME, Sección VIII División 1, en lb/in<sup>2</sup>.

E = Eficiencia de la junta de unión para recipientes soldados, valor de tabla UW-12 del Código ASME, Sección VIII, División 1.

#### SELECCION DEL TIPO DE TAPAS

La forma de la tapa debe ser el indicado para que sea funcional, segura y económica, es decir, que cubra las necesidades de las condiciones de servicio en que va a operar e inversión.

Dependiendo principalmente del servicio que va a prestar el recipiente a presión, será el tipo de tapas; en equipos de proceso se sabe -- que debido a las condiciones extremas de operación, en muchos casos, ~~+++~~ crean esfuerzos locales en las esquinas internas de las tapas, por lo que se deben utilizar tapas que aseguren la confiabilidad cuando se encuentren en operación los equipos.

Las esquinas internas de las tapas es una zona de transición de -- una figura bombeada a una cilíndrica, esta línea o zona de transición, -- se encuentra sometida a grandes tensiones axiales que se traducen en -- fuertes tensiones locales, y éste resulta ser el punto más débil del recipiente por lo que no es aconsejable realizar la soldadura de unión -- tapa-corona a lo largo de esta línea.

Para evitar esta coincidencia las tapas se construyen con una parte cilíndrica, denominada pestaña o faldón ( $r$ ), cuya altura mínima varía -- según la norma o código utilizado. En los códigos y normas se especifica la altura que debe tener el faldón en función del espesor, diámetro y -- tipo de tapa; de igual manera existen tablas que indican el tamaño que -- debe tener el radio interno de la esquina, dependiendo también de las va riables indicadas para el faldón.

Cuando no se tiene información del tamaño del faldón, se puede utilizar como criterio general lo siguiente:

La magnitud del faldón, deberá ser no menor que el mayor de los siguientes valores:

$$f \geq 0.3(D_o \cdot t_c)$$

$$f \geq 3.0 t_c$$

$$f \geq 25 \text{ mm (1" )}$$

el valor mínimo de altura para el faldón, será de 100 mm (4"); las variables involucradas representan lo siguiente:

$D_o$  = diámetro exterior de la carcasa o envolvente

$t_c$  = espesor de la tapa

Existen muchos tipos de tapas, así como variedad de usos en equipos de proceso o tanques de almacenamiento. De manera que el diseño óptimo estará basado por los costos que represente, variando con la presión, el espesor y material de construcción, el diámetro, etc.; pero siempre para mantener condiciones seguras en la operación.

Algunos tipos de tapas, se pueden emplear bajo ciertas condiciones de presión y diámetro, como se indica a continuación:

Rango de presión (psig)	Diámetro (ft)	Tipo de tapa
15 - 200	$\leq 15$	torisférica
100 - 450	$\leq 15$	elipsoidal
mayor de 450	$\geq 15$	semiesférica

Las tapas cónicas o toricónicas, se usan ampliamente en equipos de proceso, tales como; secadores, cristalizadores y tanques de sedimentación, por la ventaja que presentan de poder remover sólidos o sedimentos de algún equipo.

## DISEÑO DE TAPAS POR PRESION INTERNA

Los tipos de tapas más comunes para recipientes a presión de forma cilíndrica son:

- a) Tapas elípticas
- b) Tapas toriesféricas
- c) Tapas hemiesféricas
- d) Tapas cónicas
- e) Tapas toricónicas

En la figura II.1, se representan los tipos de tapas más comunes.

En el diseño de tapas, las reglas para determinar el espesor requerido varían según el tipo de tapa, en éste trabajo se consideran las más comunes.

## Tapas Elípticas

El espesor requerido para una tapa de forma elipsoidal en la cual se tiene una relación 2:1, del radio mayor respecto al radio menor, se determina con la siguiente fórmula:

$$t_c = \frac{Pd D}{2SE - 0.2 Pd}$$

Si la tapa elipsoidal presenta una relación diferente de 2:1 (semi elipsoidal), se pueden utilizar las fórmulas y datos de la tabla II.1, - que se indican a continuación:

$$t_c = \frac{Pd D K}{2SE - 0.2 Pd}$$

$$K = 1/6(2 + m^2)$$

Donde: K = factor de intensificación de esfuerzos

$$m = \text{relación de ejes} = \frac{\text{eje mayor}}{\text{eje menor}} = \frac{a}{b}$$



TABLA II.1  
Valores del factor K

a/b	K	a/b	K
3.0	1.83	2.0	1.00
2.9	1.73	1.9	0.93
2.8	1.64	1.8	0.87
2.7	1.55	1.7	0.81
2.6	1.46	1.6	0.76
2.5	1.37	1.5	0.71
2.4	1.29	1.4	0.66
2.3	1.21	1.3	0.61
2.2	1.14	1.2	0.57
2.1	1.07	1.1	0.53
		1.0	0.50

#### Tapas toriesféricas

El espesor requerido para una tapa toriesférica, en la cual el radio de transición es igual al 6 % del radio de la corona, se determina con la siguiente fórmula:

$$t_o = \frac{0.885 Pd L}{SE - 0.1 Pd}$$

donde: L = radio interior de la parte esférica o corona, en pulg. (in)

Si la tapa toriesférica presenta un radio de transición mayor de 6 % del radio de la corona, entonces se utilizarán las fórmulas y datos de la tabla II.2, que a continuación se indican:

$$t_o = \frac{Pd L M}{2SE - 0.2 Pd}$$

$$M = 0.25 \left[ 3 + (L/r_t)^{1/2} \right]$$

donde: M = factor de intensificación de esfuerzos

L = radio de la corona, en pulg. (in)

r<sub>t</sub> = radio de transición, en pulgadas (in)

TABLA II.2

Valores del factor M

$L/r_t$	M	$L/r_t$	M	$L/r_t$	M	$L/r_t$	M
1.00	1.00	3.25	1.20	7.50	1.44	12.00	1.62
1.25	1.03	3.50	1.22	8.00	1.46	12.50	1.64
1.50	1.06	4.00	1.25	8.50	1.48	13.00	1.65
1.75	1.08	4.50	1.28	9.00	1.50	14.00	1.69
2.00	1.10	5.00	1.31	9.50	1.52	15.00	1.72
2.25	1.13	5.50	1.34	10.00	1.54	16.00	1.75
2.50	1.15	6.00	1.36	10.50	1.56	16 2/3	1.77
2.75	1.17	6.50	1.39	11.00	1.58		
3.00	1.18	7.00	1.41	11.50	1.60		

## Taps hemisféricas

Para determinar el espesor requerido en una tapa de forma hemisférica, se hará bajo las siguientes restricciones:

Si el espesor de la tapa ( $t_o$ ), no excede de  $0.356 R$  o la presión de diseño no excede de  $0.665 SE$ , se utilizarán cualquiera de las siguientes fórmulas:

$$t_o = \frac{Pd R}{2SE - 0.2 Pd}$$

$$o \quad t_c = \frac{Pd D}{4(SE - 0.1 Pd)}$$

Si se excedieran los límites indicados, es decir, que el espesor de la tapa sea mayor de  $0.356 R$  o la presión de diseño sea mayor de  $0.665 SE$ , entonces el espesor requerido se determinará con cualquiera de las siguientes fórmulas:

$$t_c = R(Y^{1/3} - 1)$$

$$o \quad t_c = Ro\left(\frac{Y^{1/3} - 1}{Y}\right)$$

$$\text{donde: } Y = \frac{2(SE + Pd)}{2SE - Pd}$$

### Tapas cónicas

El espesor requerido para una tapa cónica sin radio de transición o de secciones cilíndricas que presentan un ángulo  $\alpha$  de  $30^\circ$  o menor, se determinará con la fórmula siguiente:

$$t_c = \frac{Pd \ D}{2 \cos \alpha (SE - 0.6Pd)} = \frac{Pd \ D_o}{2 \cos \alpha (SE - 0.4Pd)}$$

En este caso, la discontinuidad de los esfuerzos en la junta de la tapa cónica a la carcasa cilíndrica, puede causar una deformación excesiva. Para prevenir esto, se deberá reforzar con un anillo de compresión en la junta.

Cuando el ángulo  $\alpha$  exceda un valor de  $\theta$ , en función del valor de la relación  $(P/SE)$  que se determine, se reforzará la junta de la parte cónica a la carcasa conforme a los datos de la tabla siguiente:

#### Valores para tapas cónicas

(P/SE)	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006
$\theta$ ( $^\circ$ )	13	18	22	25	28	30

( $^\circ$ ) = grados

para valores mayores de la relación  $(P/SE)$ ,  $\theta = 30^\circ$

$\theta$  = valor crítico

El área transversal del anillo de refuerzo, debe ser por lo menos igual a la que se determine con la siguiente fórmula, determinación del área transversal(A):

$$A = \frac{Pd}{SE} \left( \frac{D^2 \tan \alpha}{8} \right) \left( 1 - \frac{\theta}{\alpha} \right)$$

### Tapas toricónicas

Para determinar el espesor requerido de una tapa toricónica, en la cual el radio de transición es menor de 6% del diámetro externo de la ojea recta de la tapa, y no menor de 3 veces el espesor de pared de la transición, se utilizarán las siguientes fórmulas, siempre y cuando el ángulo  $\alpha$  exceda de  $30^\circ$ .

El espesor requerido para la transición, se determina de la forma siguiente:

$$t_{c1} = \frac{Pd \cdot L \cdot M}{25S - 0.2 Pd}$$

$$M = 0.25 \left[ 3 + (L/r_t)^{1/2} \right]$$

M = factor de intensificación de esfuerzos, se pueden utilizar los datos de la tabla II.2.

El espesor del cono se determina de la forma siguiente:

$$t_{o2} = \frac{Pd \cdot Dx}{2 \cos \alpha (SE - 0.6Pd)}$$

donde: Dx = diámetro interno de la porción cónica de la tapa en el punto de tangencia a la transición, medido perpendicularmente al eje del cono, en pulgadas (in).

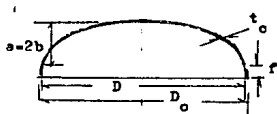
Para determinar Dx, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Dx = D - 2 r_t (1 - \cos \alpha)$$

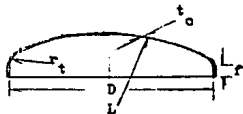
El valor del radio interior de corona (L), se determina con la fórmula siguiente:

$$L = (Dx/2 \cos \alpha)$$

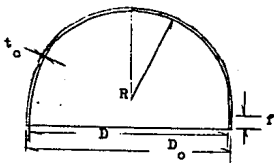
De igual forma que para las tapas cónicas, si el ángulo  $\alpha$  es menor de  $30^\circ$ , se requiere de un anillo de refuerzo en la junta de unión.



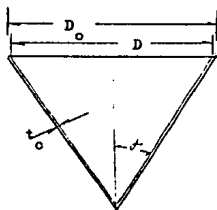
tapa elíptica



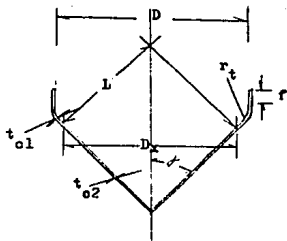
tapa toriosférica



tapa hemiosférica



tapa cónica



tapa toricónica

Figura No. II.1

tipos de tapas

aceptadas por el Código ASME, Sección VIII, Div.1

El significado de las variables que se utilizan en forma más común en las fórmulas para el diseño de tapas por presión interna, es el siguiente:

$t_c$  = espesor mínimo requerido para la tapa después de conformada, sin incluir la tolerancia por corrosión, en pulgadas(in).

$P_d$  = presión de diseño, en  $\text{lb/in}^2$ .

$D$  = diámetro interior de la ceja recta de la tapa; o longitud interior del eje mayor de una tapa elíptica; o diámetro interior de una cabeza cónica, en el punto considerado, medido perpendicularmente al eje longitudinal; en pulgadas(in). En todos los casos no se debe incluir el margen por corrosión.

$D_o$  = diámetro exterior de la ceja recta de la tapa; longitud exterior del eje mayor de una cabeza elíptica; o diámetro exterior de una tapa cónica, en el punto considerado, medido perpendicularmente al eje longitudinal, en pulgadas(in).

$R$  = radio interior de una tapa, sin considerar marges por corrosión, en pulgadas(in).

$R_o$  = radio exterior de una tapa, sin considerar margen por corrosión, en pulgadas(in).

$S$  = esfuerzo máximo permisible para el material correspondiente, en  $\text{lb/in}^2$ .

$E$  = eficiencia de la junta.

$L$  = radio interior de la corona, en pulgadas(in).

$r_t$  = radio interior de transición, en pulgadas(in).

$\alpha$  = un medio del ángulo en el vértice del cono de la cabeza, sobre la línea de centros de la tapa, en grados.

## DISEÑO DE ESTABILIDAD POR CARGAS MUERTAS, VIENTOS Y SISMO

Generalmente el diseño de estabilidad para recipientes a presión, se enfoca a los que son de tipo vertical, pues en la actualidad se tienen muchos equipos que se autoportan, es decir, que no utilizan cables o tirantes de estabilización, resultando con esto, un ahorro del espacio disponible, con diseños económicos y seguros.

Los equipos de proceso, tales como, las torres de destilación, de absorción, columnas rectificadoras, etc.; se consideran recipientes verticales. Para éstos, las condiciones de operación son a menudo muy severas, de tal manera, que si se tuviera una falla estructural los efectos serían muy desastrosos, por lo que se debe realizar un diseño de estabilidad muy seguro, más aún en zonas con vientos fuertes y/o índices altos de un fenómeno sísmico.

Para el diseño de estabilidad, se considera que los esfuerzos en los recipientes verticales son esencialmente:

1. Los esfuerzos axial y circunferencial resultantes de la presión-interna o vacío en el recipiente.
2. Los esfuerzos de compresión resultantes de las cargas muertas, incluyendo el peso del recipiente con sus accesorios, su contenido, aislamiento y equipo adicional.
3. Los esfuerzos resultantes de momentos flexionantes causados por la acción del viento sobre el recipiente y sus aditamentos.
4. Los esfuerzos causados por alguna excentricidad resultante de una distribución irregular de la carga.
5. Los esfuerzos resultantes de las fuerzas sísmicas.

Adicionalmente, los esfuerzos resultantes del proceso de fabricación como la formación en frío, rolado, soldadura, etc..

### ESFUERZOS DE TENSION CAUSADOS POR PRESION INTERNA

Los esfuerzos de tensión resultantes por la presión interna, se de terminan por las siguientes ecuaciones:

Esfuerzo de tensión axial ( $F_{ap}$ )

$$F_{ap} = \frac{P_d D}{4 t}$$

Esfuerzo de tensión circunferencial ( $F_{cp}$ )

$$F_{cp} = \frac{P_d D}{2 t}$$

En el caso por presión externa, se tienen esfuerzos de compresión, también en los que son causados por cargas muertas.

### ESFUERZOS CAUSADOS POR CARGAS MUERTAS

La acción de las cargas muertas sobre un recipiente, se determina por el peso y localización de todos los aditamentos internos y externos. Estas cargas actúan excéntricamente, y pueden reducirse a fuerzas verticales y momentos actuando al eje axial del recipiente.

Los esfuerzos causados por las cargas muertas se pueden agrupar, por conveniencia, de la forma siguiente:

1. Esfuerzos inducidos por la envolvente y su aislamiento.
2. Esfuerzos inducidos por el fluido contenido en el recipiente.
3. Esfuerzos inducidos por los aditamentos al equipo.

### ESFUERZOS PRODUCIDOS POR LA ENVOLVENTE Y SU AISLAMIENTO

A cualquier distancia  $X$ , tangente al domo del recipiente, se tiene un volumen conocido, de tal forma que el peso de la envolvente y su aislamiento, se pueden calcular de la forma siguiente:

$$W_o = V_o \cdot \rho_{mat.e}$$

$$V_o = 0.785 (D_o^2 - D^2) \cdot X = 2 \pi \cdot D_o \cdot t_s \cdot X$$



donde:  $W_e$  = peso de la envolvente, en lb.

$V_e$  = volumen de la envolvente, en  $ft^3$ .

$\rho_{mat.e}$  = densidad del material de la envolvente, en  $lb/ft^3$  (para el acero  $\rho = 490 \text{ lb/ft}^3$ ).

$D_e$  = diámetro externo de la envolvente, en ft.

$D$  = diámetro interno de la envolvente, en ft.

$X$  = distancia de la línea tangente del domo al punto considerado, en ft.

$t_s$  = espesor de pared del recipiente considerando el margen por corrosión ( $t_s = t + C$ ), en ft.

Junto con la envolvente, se debe considerar también el peso correspondiente a las taps, como se indica a continuación:

$$W_t = V_t \cdot \rho_{mat.t}$$

$$V_t = A_{t.t} \cdot t_c$$

donde:  $W_t$  = peso de la tapa, en lb.

$V_t$  = volumen total de la tapa, en  $ft^3$ .

$A_{t.t}$  = área total de la tapa, en  $ft^2$ .

$t_c$  = espesor de pared de la tapa considerando el margen por corrosión, en ft.

El volumen de la tapa ( $V_t$ ), es función del área total de la tapa, la cual se determinará de acuerdo al tipo de tapa considerada tomando en cuenta la parte cilíndrica (faldón). El valor de densidad del material es el que corresponde al acero.

El peso del sislamiento se determina como sigue:

$$W_s = V_s \cdot \rho_{mat.s}$$

$$V_s = \pi \cdot D_s \cdot t_s \cdot X$$

- donde:  $W_a$  = peso del aislamiento, en lb.  
 $V_a$  = volumen del aislamiento, en  $ft^3$ .  
 $D_g$  = diámetro real del recipiente considerando el aislamiento, en ft.  
 $t_a$  = espesor de aislamiento, en ft.  
 $X$  = distancia de la línea tangente, del domo al punto considerado, en ft.  
 $\rho_{mat.a}$  = densidad del material de aislamiento utilizado, en  $lb/ft^3$   
 (para el asbesto  $\rho = 156 \text{ lb}/ft^3$ ).

Para determinar el esfuerzo debido al peso muerto de la envolvente y su aislamiento, se establece que el esfuerzo de compresión es la unidad de fuerza o carga por unidad de área de la sección transversal. La unidad de fuerza o de carga es el peso de cada elemento del recipiente, entonces el esfuerzo de compresión será:

$$F_{pmr} = \frac{W_e + W_a + W_t}{\text{área de la sección transversal}}$$

$$\text{área de la sección transversal} = A_{st} = \pi \cdot D_{ro} \cdot t_e$$

- donde:  $W_e$  = peso de la envolvente, en lb.  
 $W_a$  = peso del aislamiento, en lb.  
 $W_t$  = peso de las tapas, en lb.  
 $D_{ro}$  = diámetro real externo del recipiente, sin considerar el espesor de aislamiento, en pulgadas (in).  
 $t_e$  = espesor de pared de la envolvente considerando margen -- por corrosión, en pulgadas (in).  
 $F_{pmr}$  = esfuerzo de compresión debido al peso muerto de la envolvente y su aislamiento, en  $lb/in^2$ .

### ESFUERZO PRODUCIDO POR EL LIQUIDO CONTENIDO EN EL RECIPIENTE

El esfuerzo producido por el líquido contenido, se determina de la forma siguiente:

$$F_{pmL} = \frac{V_L \cdot \rho_L}{A_{st}} = \frac{W_L}{A_{st}}$$

donde:  $V_L$  = volumen de líquido contenido, en  $ft^3$ .

$\rho_L$  = densidad del líquido contenido, en  $lb/ft^3$ .

$A_{st}$  = área de la sección transversal, igual que en el caso anterior ( $\pi D_{ro} \cdot t$ ), en  $in^2$ .

$F_{pmL}$  = esfuerzo producido por el peso muerto del líquido contenido, en  $lb/in^2$ .

### ESFUERZOS PRODUCIDOS POR LOS ADITAMENTOS DEL RECIPIENTE

Los esfuerzos de compresión que se producen debido al peso muerto de los aditamentos, se determinan de la forma siguiente:

$$F_{pmad.} = \frac{\text{peso de todos los aditamentos}}{A_{st}}$$

donde:  $A_{st}$  = área de la sección transversal, como ya se indicó, en  $in^2$ .

$F_{pmad.}$  = esfuerzos de compresión producidos por el peso muerto de todos los aditamentos, en  $lb/in^2$ .

Para determinar el peso muerto de aditamentos, se tiene la siguiente información: El peso muerto de plataformas de acero puede estimarse de --  $35 \text{ lb/ft}^2$ ; para escaleras de acero que tengan protección tipo jaula, de --  $25 \text{ lb/ft}^2$ ; para escaleras sencillas de  $10 \text{ lb/ft}^2$ ; para las charolas o platos en columnas de destilación, de  $25 \text{ lb/ft}^2$  de área de plato.

Según el caso, se determinará el área y se medirá en forma lineal para las escaleras; si el equipo contiene empaque, se determinará su peso en

función de su densidad y volumen.

Teniendo determinados los esfuerzos individuales, el total de esfuerzos producidos por carga muerta actuando a lo largo del eje axial del recipiente vertical, es la suma de los esfuerzos individuales.

$$P_{dx} = P_{pmr} + P_{pmL} + P_{pmad}. \quad ; \text{ en lb/in}^2$$

#### ESFUERZOS CAUSADOS POR CARGAS DEL VIENTO

Los esfuerzos producidos en un recipiente vertical autosoportado por la acción del viento, se determinan considerando que el recipiente es una viga en cantiliver cargada uniformemente a todo lo largo y empotrada al piso.

La carga producida por el viento es función de la velocidad del mismo, de la densidad del aire y de la forma del recipiente. Estos tres factores se correlacionan en la siguiente ecuación:

$$P_v = 0.004 \frac{B}{30} \cdot V_v^2 \cdot F_f$$

donde:  $P_v$  = presión del viento sobre una superficie plana, en lb/ft<sup>2</sup>.

$B$  = presión barométrica del lugar, en pulgadas de mercurio.

$V_v$  = velocidad del viento del lugar, en millas/hr.

$F_f$  = factor de forma para el recipiente.

El factor de forma ( $F_f$ ) para un cilindro liso, ha sido calculado como de 0.60; que es 60 % del valor que presentan las superficies planas a 90° con respecto a la dirección del viento. En los recipientes las proyecciones de los aditamentos cargados sobre ellos causarían turbulencias, por lo que el valor del  $F_f$  que se debe usar varía de 0.60 a 0.85, dependiendo de la cantidad y forma de las proyecciones sobre el recipiente.

Para determinar los esfuerzos producidos por el viento sobre los -

extremos de un recipiente, se tiene establecida la siguiente ecuación:

$$F_{wx} = \frac{M_{wx} \cdot c}{I} + \frac{M_{wx} \cdot R_o}{I}$$

donde:  $M_{wx}$  = momento flexionante causado por el viento a una distancia  $X$  del punto más alto, en pulg.-lb.

$c$  = distancia de la fibra superficial al eje neutro, en este caso es igual a  $R_o$ , en pulgadas(in).

$R_o$  = radio externo del recipiente, en pulgadas(in).

$I$  = momento rectangular de inercia, perpendicular y a través del eje axial, en pulg.<sup>4</sup>(in<sup>4</sup>).

$F_{wx}$  = esfuerzos producidos en el extremo de la fibra debido a las cargas del viento, en lb/in<sup>2</sup>. Esfuerzo de compresión en la parte de abajo del recipiente, esfuerzo de tensión en la parte superior del recipiente.

El momento flexionante a cualquier distancia  $X$  del punto más alto del recipiente, se determina de la forma siguiente:

$$M_{wx} = (\text{carga del viento}) \cdot (\text{distancia a la sección referida})$$

$$\text{entonces: } M_{wx} = P_v \cdot X \left( \frac{D_{ef.}}{12} \right) \left( \frac{12 X}{2} \right)$$

$$M_{wx} = 0.5 P_v D_{ef.} X^2$$

donde:  $P_v$  = presión del viento, en lb/ft<sup>2</sup>.

$D_{ef.}$  = diámetro efectivo del recipiente, en pulgadas(in).

$X$  = distancia del punto más alto al punto considerado, en ft.

$M_{wx}$  = momento flexionante, en pulg.-lb.

La fuerza ( $P_v$ ) actúa sobre el área del recipiente, para compensar los efectos de turbulencia que se puedan ocasionar, en las proyecciones de hi seño del recipiente, se utiliza un diámetro efectivo ( $D_{ef.}$ ). Este es el diá metro del recipiente, considerando el aislante y una compensación por la -

proyección de la tubería y aditamentos.

Para estructuras que se encuentren expuestas al aire, el área efectiva se considera como un valor de dos veces el área proyectada.

El momento rectangular de inercia, perpendicular y a través del eje longitudinal, se determina de la forma siguiente:

$$I = \pi R_m^3 \cdot t_s$$

$$\text{si } R_m = R_o \quad \text{y} \quad R_o = 0.5 D_o$$

$$I = \pi R_o^3 \cdot t_s$$

de esta forma se tiene:

$$M_{wx} = 0.5 P_v \cdot \text{Def.} \cdot X^2$$

$$F_{wx} = \frac{M_{wx} \cdot R_o}{I} = \frac{0.5 P_v \cdot \text{Def.} \cdot X^2 \cdot R_o}{\pi R_o^3 \cdot t_s}$$

$$F_{wx} = \frac{2 P_v \cdot \text{Def.} \cdot X^2}{\pi D_o^2 \cdot t_s} = 0.637 \frac{P_v \cdot \text{Def.} \cdot X^2}{D_o^2 \cdot t_s}$$

La expresión del esfuerzo debido a las cargas del viento, está limitada por lo siguiente:

1. El viento actúa en su intensidad arriba, sobre la longitud total del recipiente.
2. No hay aditamentos externos sobre el recipiente.
3. El momento de inercia del cuerpo del recipiente con respecto a su eje transversal, es el indicado.
4. El radio del recipiente, es el radio exterior.

#### ESFUERZOS CAUSADOS POR MOVIMIENTOS SISMICOS

Un desplazamiento en la tierra produce movimientos variables como resultado de las fuerzas sísmicas; en el caso de una torre se considera que lo sufre en su centro de gravedad, de tal forma, que la inercia del recipiente se ve afectada provocándole una deflexión elástica.

El diseño por cargas debidas a movimientos sísmicos, se basa en un análisis empírico de estructuras en forma muy sencilla, en sí los movimientos sísmicos son muy complejos de analizar.

#### MOMENTO FLEXIONANTE Y DE CORTE

Las fuerzas sísmicas actúan produciendo una fuerza cortante horizontal en los recipientes verticales (torres). Esta fuerza cortante produce un momento flexionante con respecto a la base del recipiente.

La carga cortante formará un triángulo con la cumbre y la base de la torre, como se indica en la figura II.2. El centro de acción de la carga en forma triangular está localizado a  $2/3$  de la altura (H) de la torre.

La fuerza cortante en la base es el resultado de las fuerzas sísmicas de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F = C \cdot W_r$$

donde: C = coeficiente sísmico.

$W_r$  = peso del recipiente.

La fuerza cortante ( $V_{sx}$ ), en cualquier plano horizontal en la torre a X metros de la cumbre, está dada por la siguiente ecuación:

$$V_{sx} = \frac{C \cdot W_r \cdot X(2H - X)}{H^2}$$

donde: C = coeficiente sísmico.

$W_r$  = peso del recipiente.

H = altura del recipiente.

El momento flexionante ( $M_{sx}$ ) resultante de las fuerzas cortantes sobre el plano X, está dado por:

$$M_{sx} = \frac{4C \cdot W_r \cdot X^2(3H - X)}{H^2}$$

El esfuerzo correspondiente, entonces se determina de la forma siguiente:

$$F_{sx} = \frac{M_{sx}}{\pi \cdot R_o^2 \cdot t_g}$$

El cortante máximo y momento flexionante están localizados en la base de la torre, y se encuentran al sustituir  $X = H$ , teniendo:

$$V_{sb} = \frac{C \cdot W_r \cdot H(2H - H)}{H^2} = \frac{C \cdot W_r \cdot H^2}{H^2} = C \cdot W_r$$

$$y \quad M_{sb} = \frac{4C \cdot W_r \cdot H^2(3H - H)}{H^2} = 8C \cdot W_r \cdot H$$

Para obtener el esfuerzo flexionante sísmico en la base del recipiente, tomando la expresión del momento flexionante, se tiene la siguiente ecuación:

$$F_{sb} = \frac{8C \cdot W_r \cdot H}{\pi R_o^2 t_g}$$

donde:  $R_o$  = radio exterior del recipiente vertical, en pulgadas (in).

$t_g$  = espesor de pared del recipiente, en ft.

$H$  = distancia de la tangente de la tapa superior al piso, en ft.

$W_r$  = peso del recipiente, en lb.

$C$  = coeficiente sísmico, adimensional.

$F_{sb}$  = esfuerzo flexionante debido a movimientos sísmicos, en  $\text{lb/in}^2$ .

#### COEFICIENTE SISMICO

El coeficiente sísmico ( $C$ ), se determina en función de la zona sísmica y el período de vibración ( $T$ ). Los recipientes que presentan períodos cortos de vibración, menores o iguales a 0.4 segundos, se consideran como estructuras rígidas y se les asigna un coeficiente sísmico acorde a la -



zona sísmica; para aquellos que presentan un período de vibración de 1.0 segundo o más, se considera que son flexibles y por lo mismo más capaces de soportar las fuerzas sísmicas.

Los coeficientes sísmicos en función de la zona sísmica y el período de vibración, se presentan en la siguiente tabla:

ZONA SISMICA	COEFICIENTE SISMICO(C)		
	PERIODO		
	0.4 seg	0.4 a 1.0 seg	1.0 seg
daño menor 1	0.05	0.02/T	0.02
daño moderado 2	0.10	0.04/T	0.04
daño mayor 3	0.20	0.08/T	0.08

El período de vibración(T) se determina con la siguiente fórmula:

$$T = 2.65 \times 10^{-5} (H/D_o)^2 (W_r \cdot D_o / t_w)^{1/2}$$

donde: H = altura total del recipiente vertical, en ft.

$D_o$  = diámetro exterior del recipiente, en ft.

$W_r$  = peso del recipiente, en lb por pie (ft) de altura.

$t_w$  = espesor de pared del recipiente, en ft.

T = período de vibración, en segundos.

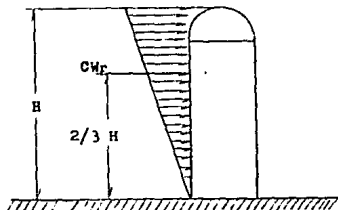


Figura II.2 Fuerzas sísmicas sobre un recipiente vertical

## DETERMINACION DEL ESPESOR MINIMO REQUERIDO

### EN FUNCION DE LOS ESFUERZOS COMBINADOS

Para determinar el espesor mínimo requerido de un recipiente a presión vertical, se deben considerar los esfuerzos de tensión y compresión actuando al mismo tiempo. Esta combinación de esfuerzos al ser analizada permite establecer cual es la condición que gobierna, es decir, determinar que tipo de esfuerzos son los que controlan, para el diseño.

Por lo tanto, se debe evaluar el efecto de los esfuerzos totales combinados que actúan sobre el recipiente, y obtener la magnitud de los esfuerzos totales de compresión y tensión.

Las ecuaciones que se establecen para evaluar los esfuerzos totales, engloban los esfuerzos debidos a cargas del viento, el esfuerzo debido a la presión interna, el esfuerzo debido al peso muerto del recipiente y el esfuerzo debido a los movimientos sísmicos.

#### Ecuaciones generales

Los esfuerzos en combinación que actúan en la parte superior del recipiente son de tensión, de tal manera que el esfuerzo total de tensión es:

$$F_{TT} = (F_{wx} \text{ ó } P_{sx}) + F_{ap} - F_{dx}$$

Los esfuerzos en combinación que actúan en la parte inferior del recipiente son de compresión, de tal manera que el esfuerzo total de compresión es:

$$F_{TC} = (F_{wx} \text{ ó } P_{sx}) + F_{dx} - F_{ap}$$

en donde:  $F_{wx}$  = esfuerzo debido a las cargas del viento.

$P_{sx}$  = esfuerzo debido a movimientos sísmicos.

$F_{dx}$  = esfuerzo debido al peso muerto del recipiente.

$F_{ap}$  = esfuerzo axial debido a la presión interna.

$F_{TT}$  = esfuerzo total de tensión.

$F_{CT}$  = esfuerzo total de compresión.

Cada uno de los esfuerzos indicados se determina de la forma siguiente:

te:

$$F_{wx} = 0.637 \frac{P_v \cdot \text{Def.} \cdot X^2}{D_o^2 \cdot t_s}$$

$$F_{ap} = \frac{P_d \cdot D}{4 t}$$

$$F_{dx} = F_{pmr} + F_{pml} + F_{pmsd}$$

$$F_{sx} = \frac{M_{sx}}{\pi R_o^2 \cdot t_s}$$

$$M_{sx} = \frac{4C \cdot W_r \cdot (3H - X) X^2}{H^2}$$

El significado y unidades de las variables indicadas corresponde a las mencionadas con anterioridad.

Se deben determinar los esfuerzos individuales para cada caso, de esta forma se obtendrán los esfuerzos totales de tensión y compresión. El espesor de estabilidad mínimo requerido para un recipiente, se obtendrá de la comparación o igualación de los esfuerzos conforme a los siguientes criterios:

#### A. Criterio del máximo esfuerzo permisible por tensión ( $F_{mpT}$ )

El esfuerzo máximo permisible a la tensión de un material viene indicado su valor en tablas. Con éste valor de ( $F_{mpT}$ ) y el determinado como esfuerzo total de tensión, se obtiene el valor del espesor.

El valor de esfuerzo total de tensión que se utiliza en la comparación, es el que resulte mayor de cualquiera de las siguientes expresiones:

$$F_{TT} = F_{wx} + F_{sp} - F_{dx}$$

$$F_{TT} = F_{sx} + F_{sp} - F_{dx}$$

Al comparar  $F_{sPT}$  contra  $F_{TT}$ , éste último deberá ser menor para estar dentro del límite de espesor de estabilidad mínimo requerido.

#### B. Criterio del máximo esfuerzo permisible por compresión ( $F_{mpC}$ )

El esfuerzo máximo permisible por compresión se obtiene de la forma siguiente:

$$F_{mpC} = 3 \times 10^6 \frac{t_s^2}{D_o} \leq y.p./3$$

donde:  $t_s$  = espesor de pared del recipiente, en pulgadas (in).

$D_o$  = diámetro exterior del recipiente, en pulgadas (in).

y.p. = valor del esfuerzo máximo de compresión permisible o punto de cedencia (valor de tablas), en  $lb/in^2$ .

El valor de esfuerzo total de compresión que se utiliza en la comparación, es el que resulte mayor de cualquiera de las siguientes expresiones:

$$F_{TC} = F_{wx} + F_{dx} - F_{sp}$$

$$F_{TC} = F_{sx} + F_{dx} - F_{sp}$$

Al comparar  $F_{mpC}$  contra  $F_{TC}$ , éste último deberá ser menor para estar dentro del límite de espesor de estabilidad mínimo requerido.

El procedimiento resulta iterativo, partiendo del espesor determinado por presión interna y el margen de corrosión, debiendo obtenerse el adecuado por la comparación de esfuerzos.

El espesor de estabilidad mínimo requerido para un recipiente a — presión vertical, será aquel que resulte mayor de los dos criterios de — esfuerzo máximo permisible.

### III. METODOLOGIA DE INSPECCION EN RECIPIENTES A PRESION

#### ANTECEDENTES

Existen numerosas condiciones que pueden provocar fallas al estar operando un equipo y en forma general éstas pueden deberse a uno de los siguientes puntos:

1. Proyecto (consideraciones erróneas)
2. Materiales de construcción (defectos en su procesamiento, selección o manejo incorrecto)
3. Construcción y montaje (defectos introducidos en el proceso de fabricación, mal procedimiento o realización de soldadura, tratamiento térmico inadecuado, realización incorrecta de acabado del material, etc.)
4. Servicio (condiciones de servicio u operación, extremadamente severas)

Los recipientes a presión se construyen e inspeccionan de acuerdo a las normas o códigos establecidos, pero a pesar de esto se pueden producir fallos que resultan muy costosas, incluso más en plantas químicas y refinerías, por el tipo y condiciones de trabajo de sus equipos, servicios e instalaciones.

Por lo tanto, debido al riesgo de falla de un recipiente a presión en servicio, se justifica lo importante que es efectuar las inspecciones ya que éstas permitirán mantener un mejor desarrollo en el mantenimiento o reparación de todas las unidades de una planta industrial.

Como sistemas de inspección se utilizan las pruebas destructivas y no destructivas. Estas pruebas sirven de herramientas de control en la adquisición de materiales y durante el proceso de fabricación, ya que permiten verificar oportunamente las propiedades de los materiales que se emplearán, calificar los procedimientos de soldadura y de soldadores, comprobar que las uniones hechas cumplan los requerimientos estableci-

des, etc..

Al efectuar la inspección con pruebas destructivas y no destructivas en recipientes a presión que se encuentran en servicio, se pueden detectar condiciones imperantes para reducir a un mínimo los riesgos que pudieran ocasionar problemas de operabilidad y/o seguridad.

#### INSPECCION Y ESPECIFICACIONES EN LA CONSTRUCCION DE RECIPIENTES A PRESION

Para realizar la inspección en la construcción de un recipiente a presión, es necesario conocer las especificaciones de diseño y de la misma inspección. Estas especificaciones vienen indicadas en las normas o códigos y se deben cumplir al pie de la letra.

Las especificaciones de construcción deben venir indicadas en los dibujos de diseño, de fabricación y en las memorias de cálculo, además de todas las consideraciones relacionadas con la fabricación. De esta forma la inspección cubrirá los siguientes aspectos:

#### INSPECCION DE MATERIALES

En la inspección de las placas se deben comprobar las especificaciones de las mismas, por lo que el fabricante deberá presentar los certificados de calidad de las placas, así como los de tuberías, conexiones, válvulas, etc.. También se deberá solicitar los análisis químicos y físicos, para revisarlos y cotejarlos con lo indicado en el Código ASME ó ASTM.

Se deberá apuntar el número de colada, verificando la especificación del acero y comprobación de las dimensiones de los materiales. En el caso de las placas revisar que el espesor nominal no sea menor en 0.25 mm ( 0.01 " ) ó al 6 % del espesor ordenado para el diseño.

Efectuar una inspección visual chequeando que el material no presente hojeaduras, laminaciones, faltantes u otro defecto. Se eliminarán las placas que presenten laminaciones, para detectar esto se podrán hacer pruebas con ultrasonido o equivalentes.

#### TRAZO Y CORTE

El material deberá estar lo suficientemente derecho, para realizar el trazo y el rolado. El trazo deberá estar perfectamente encuadrado; para realizar el corte, pueden utilizarse medios mecánicos, tales como, maquinado, cizallamiento, esmerilado o con equipo de soldar tipo oxi-acetileno, removiendo toda la escoria por medios mecánicos.

#### ROLADO Y FORMADO

En cuerpos cilíndricos, se permitirá hasta 1 % del diámetro nominal de diferencia, entre el diámetro mayor y el diámetro menor de cualquier sección recta.

El rolado y formado estará dentro de lo especificado en el párrafo UG-80 de la Sección VIII, División 1 del Código ASME. Para las tapas se deberá cumplir con lo indicado en el párrafo UG-81.

En el formado de tapas se permitirá hasta 1.25 % del diámetro nominal de deformación contra la forma especificada.

Las tapas en sus orillas no deberán ser suficientemente redondas, de tal modo, que la diferencia entre el diámetro máximo y mínimo no exceda del 1 % del diámetro nominal. Cuando las orillas de cualquier sección sean defectuosas al formado de las mismas, deberán ser maquinadas para efectuar el cierre correcto en el cuerpo no debiéndose reducir en más del 10 % del espesor.

En caso de maquinarse la tapa, la transición del espesor maquinado no deberá ser repentino, debiéndose dar forma cómica en no menos de 4 -



veces la diferencia del espesor mínimo.

#### MARCADO

Todas las placas o tramos empleados en la construcción deberán -- estar marcadas con golpe no profundo, donde indique por lo menos el número de colada a la que pertenecen y la especificación del acero, lbs - sobrantes también deberán ser marcados.

En caso de que la especificación de la placa requiera prueba de - impacto, éste deberá realizarse para testificar el procedimiento.

#### ARMADO

El fabricante deberá presentar al inspector, el recipiente armado - antes de efectuar la soldadura, con el objeto de comprobar las dimensio nes generales del recipiente, la preparación de biseles y de boquillas.

#### BISELES

Deberán ser revisados visualmente, chequeando sus dimensiones con el objeto de ver que el corte sea uniforme, que las placas estén enquadra - das y observar si existen laminaciones o deformaciones, si se encuen -- tran se retirarán los materiales afectados.

#### DESVIACION DEL DIAMETRO

La tolerancia máxima permitida en promedio del diámetro interior - con respecto al diámetro interior nominal en cualquier sección, estará - bajo los siguientes límites:

Diámetro nominal del recipiente	Tolerancia promedio medida en diámetro interior
hasta 4'	+/- 1/8"
de 4' a 7'	+/- 3/16"
de 7' a 16'	+/- 1/4"
arriba de 16'	+/- 5/16"

Se puede recurrir al párrafo UG-80 del Código ASME, Sección VIII, - División 1, con la gráfica UG-80 I correspondiente.

#### JUNTAS LONGITUDINALES

Las juntas longitudinales a tope en recipientes cilíndricos, deberán estar con los bordes coincidiendo en una misma superficie. Cuando - por defecto de construcción sobresalga una lámina con respecto a la -- otra, la tolerancia permisible es de  $1/4$  del espesor de la lámina y --- como máximo  $3.2 \text{ mm}(1/8 \text{ "})$ . Esta regla también se aplica a recipientes - esféricos.

#### JUNTAS CIRCUNFERENCIALES

Se tendrá especial cuidado, de que los ensambles entre las secciones cilíndricas y las tapas, se verifiquen con el alineamiento apropiado, si sobresale una lámina con respecto a la otra, las tolerancias serán las siguientes:

Espesor de la placa	Tolerancia
Para placas hasta $19 \text{ mm}(3/4 \text{ "})$	25 % del espesor
Para placas de más de $19 \text{ mm}(3/4 \text{ "})$ y hasta $38 \text{ mm}(1 \ 1/2 \text{ "})$	$4.8 \text{ mm}(3/16 \text{ "})$
Para placas de más de $38 \text{ mm}(1 \ 1/2 \text{ "})$	12.5 % del espesor máx., pero nunca mayor de $6.3 \text{ mm}(1/4 \text{ "})$

#### LIMPIEZA

Las superficies por soldar deberán estar limpias y libres de materias extrañas, tales como, grasa, aceite, lubricante o pintura, a una distancia cuando menos de  $12.7 \text{ mm}(1/2 \text{ "})$  del borde.

Si hay óxido formado, deberá removerse del área de contacto cuando se vaya a depositar soldadura sobre un cordón previo; también deberá --

removerse toda la escoria usando herramientas de raspar, cincel, pistola de aire u otro medio para evitar la inclusión de impurezas.

#### SOLDADURA

Se podrá utilizar cualquiera de los procedimientos, tales como, --- arco de metal protegido, arco sumergido, arco de metal en gas inerte y oxí-acetileno; dichos procedimientos están indicados en el Código ASME u otros similares.

Las juntas entre láminas deberán ser soldadas a tope, a menos que se indique lo contrario en los planos o las especificaciones. Estas juntas deberá llevar una preparación o bisel, como se indique en planos y que deberán cumplir con las dimensiones especificadas en el código o ---norma.

Las láminas que van a ser soldadas deberán ajustarse, alinearse y retenerse en posición durante la operación de soldadura. Se podrán usar barras, "gatos", puntos de soldadura o cualquier otro medio apropiado pa ---ra retener en línea los bordes por soldarse.

Para evitar los esfuerzos debidos a contracción, se deberán seguir las siguientes recomendaciones:

- a) El trabajo se hará en posición plana siempre que sea posible.
- b) Se proporcionará a los operarios un programa de soldadura que ---fije la secuencia del proceso, de manera que se equilibre el calor apli---cado.
- c) La dirección de avance de la soldadura deberá ser a partir de ---los puntos que se encuentran más fijos y hacia aquellos que están rela---tivamente libres; primero se soldará en aquellas direcciones en que ---se prevean más contracciones.

La soldadura en las juntas deberá tener una penetración completa

y deberá quedar libre de defectos, tales como, traslapes, valles y lomas; para asegurar que el espacio entre biseles quede completamente lleno, habrá que depositar metal como refuerzo y que sobressalga de la superficie de la placa, de manera que la superficie del metal soldado en ningún punto quede abajo de la placa adyacente.

El grueso no excederá de los siguientes valores:

Espesor de la placa	Espesor máximo de refuerzo
hasta 12.7 mm (1/2 ")	2.5 mm (3/32 ")
de 12.7 mm (1/2 ") a 25.4 mm (1 ")	3.0 mm (1/8 ")
arriba de 25.4 mm (1 ")	5.0 mm (3/16 ")

Los defectos visibles detectados por cualquier inspección, tales como, grietas, pequeños agujeros, fusión incompleta, y los defectos que se muestren en la prueba hidrostática, que sobrepasen los límites admisibles; se repararán eliminando la parte defectuosa de soldadura y resolviéndola posteriormente mediante el procedimiento adecuado.

El fabricante será responsable de la calidad de la soldadura efectuada por su personal, y deberá verificar mediante pruebas para determinar que el procedimiento sea el adecuado, y que los operarios sean calificados, conforme se establece en el Código ASME, Sección IX; o por otro código o norma similar.

#### TRATAMIENTO TERMICO

El tratamiento térmico de relevado de esfuerzos se realizará en todos los recipientes que se construyan para contener fluidos a bajas temperaturas, inferiores a  $-29^{\circ}\text{C}$  ( $-20^{\circ}\text{F}$ ); para recipientes que tengan más de 32 mm (1/4 ") de espesor, así como los de espesor inferior que sean de aleaciones especiales y los recipientes destinados a contener sustancias tóxicas, también se relevarán de esfuerzos.

La tabla UCS-56 del Código ASME, Sección VIII, División 1, indica los requisitos para poner en práctica el relevado de esfuerzos.

El tratamiento térmico de relevado de esfuerzos se hará de acuerdo al tipo de material utilizado en la construcción del recipiente; se hará manteniendo una temperatura mínima de  $600^{\circ}\text{C}$  ( $1110^{\circ}\text{F}$ ) durante una hora por cada pulgada de espesor, a menos que se indique otra cosa.

En caso de que fuere impráctico sostener estas temperaturas, se podrá aceptar un decremento dando un mayor tiempo de duración en el tratamiento, como se indica a continuación:

Decremento de temperatura		Tiempo mínimo de calentamiento, en HR por pulgada de espesor
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	
10	50	2
38	100	3
65	150	5
93	200	10

La operación del tratamiento térmico, se hará en la forma siguiente: - Se deberán revisar las temperaturas en el horno, cuidando de no rebasar los  $315^{\circ}\text{C}$  ( $600^{\circ}\text{F}$ ) en el momento que se coloque el recipiente en el horno.

- Arriba de  $315^{\circ}\text{C}$  ( $600^{\circ}\text{F}$ ) la rapidez de calentamiento deberá ser menor de  $205^{\circ}\text{C}$  ( $400^{\circ}\text{F}$ ) por hora, con excepción de recipientes mayores a 1 pulgada de espesor, en tal caso, la rapidez máxima deberá ser de  $205^{\circ}\text{C}$  ( $400^{\circ}\text{F}$ ) por hora, dividida entre el espesor de la placa en pulgadas.

- La variación de la temperatura a lo largo del recipiente deberá ser mínima, de tal manera, que en dos puntos del recipiente que disten entre sí 4.5 m (15') no tengan una diferencia mayor de  $120^{\circ}\text{C}$  ( $250^{\circ}\text{F}$ ) entre ellos; durante el período de calentamiento no deberá haber una

diferencia mayor de  $65^{\circ}\text{C}$  ( $150^{\circ}\text{F}$ ) entre la temperatura mayor y menor - de la porción considerada. Durante el calentamiento la temperatura debe rá ser controlada para evitar oxidación excesiva en la superficie del recipiente.

El horno deberá ser del tipo para evitar el choque directo de las flamas contra el recipiente; el enfriamiento se hará con el horno cerrado, de un grado tal, que la rapidez de enfriamiento no sea mayor de  $260^{\circ}\text{C}$  ( $500^{\circ}\text{F}$ ) por hora, dividido entre el máximo espesor en pulgadas, pero en ningún caso mayor de  $260^{\circ}\text{C}$  ( $500^{\circ}\text{F}$ ) por hora.

#### PRUEBA HIDROSTATICA

Todos los recipientes se someterán a una prueba hidrostática a -- menos que se indique otra cosa.

La presión de prueba será cuando menos una vez y media la presión máxima de trabajo, entendiéndose por ésta, la presión máxima permisible en la parte superior del recipiente en su posición normal de operación a la temperatura especificada para dicha presión. Este valor, es el mínimo de los valores encontrados para la presión máxima de trabajo permisible, para cualquier parte del recipiente; en recipientes cuya temperatura de trabajo sea superior a  $340^{\circ}\text{C}$  ( $650^{\circ}\text{F}$ ), la presión de prueba -- será una vez y media la presión máxima de trabajo multiplicada por el cociente del esfuerzo permisible del material a la temperatura de prueba, entre el esfuerzo permisible del material a la temperatura de ---- trabajo (factor de seguridad).

En el Código ASME párrafo UC-98 de la Sección VIII, División 1, se mencionan los requisitos para ésta prueba.

En el momento que se realizó la prueba, antes, se deberá asegurar - que todas las conexiones sea las correctas, que el manómetro sea el --

siacudado y que éste calibrado; todos los tapones de las placas de refuerzo deberán estar quitados, el recipiente deberá estar completamente seco y que todas las partes soldadas estén visibles.

Durante la prueba hidrostática, se efectuará una inspección de todas las juntas soldadas y conexiones; se verificará que no hayan sufrido daño las partes internas.

Si durante la prueba o a consecuencia de ella, aparecen deformaciones visibles y permanentes, el recipiente será rechazado.

En la prueba se utilizará agua, pero podrán usarse destilados del petróleo o cualquier líquido que no sea peligroso, aún cuando tenga un punto de inflamación inferior a  $43^{\circ}\text{C}$  ( $110^{\circ}\text{F}$ ), con tal de que se usen a una temperatura cercana a la atmosférica. La prueba no se aplicará hasta que el recipiente y su contenido tengan la misma temperatura. En caso de que la temperatura pudiera subir por el calor del sol, deberán conectarse válvulas de alivio al sistema, ajustadas a  $1\frac{1}{3}$  de la presión de prueba.

Como parte de la prueba hidrostática, y sólo cuando se indique por especificaciones particulares, se efectuará la prueba de martillo, la cual se lleva a cabo como sigue: Se reducirá la presión de prueba del recipiente a 1.25 veces el valor de la presión máxima de trabajo permisible, se golpeará con un martillo por la parte exterior del recipiente, todas y cada una de las juntas soldadas, a ambos lados de ellas y en toda su longitud; los golpes se darán a una distancia de 15 cm.

El peso del martillo deberá ser aproximadamente igual al espesor de la placa en mm, dividido entre 5, pero nunca deberá exceder de 5 Kg, además debe de ser de un material más suave que la placa que va a ser golpeada y estar ligeramente redondeada en sus extremos. Los golpes deben ser dados con una fuerza normal.

## PRUEBA DE ENSAYE DEL MATERIAL

Esta prueba se efectuará sólo en los casos de recipientes o partes del recipiente que por su forma complicada, no permitan calcular con precisión la resistencia del mismo. Se podrá hacer pruebas destructivas y no destructivas.

La prueba de ensaye se podrá realizar de dos formas:

1) Pintar con lechada de cal u otra sustancia quebradiza las superficies donde se esperan contracciones o concentraciones mayores de esfuerzos. La presión se aumentará poco a poco, hasta observar algunos signos de deformación mostrados por el descostre o líneas de deformación que aparecen en la lechada. El aumento paulatino de la presión se hará continuo hasta un valor igual a la mitad de la presión de trabajo -- supuesta, después de este valor, el aumento se hará por incrementos de 0.1 en 0.1 de la presión máxima de trabajo permisible, bajando cada vez a cero, para detectar cualquier deformación.

2) Las deformaciones se mediran con un aparato que permita obtener lecturas con una precisión de 0.00005 pulg./pulg., o bien se harán mediciones al desplazamiento de un punto con respecto a otro, con aparatos capaces de obtener lecturas de 0.025 mm (0.001"), incrementando la presión como se indicó en el inciso anterior.

La prueba destructiva se hará solamente cuando se solicite, en cuyo caso se fabricará un recipiente idéntico al que va a usarse y se le hará la prueba hidrostática hasta reventarlo. En este caso, la presión mínima de prueba a la ruptura para que el recipiente se acepte, será igual a 5 veces la presión máxima de trabajo permisible, multiplicada por el cociente de la resistencia mínima a la tensión del mismo y dividida entre la eficiencia de la junta soldada.



### PRUEBA NEUMÁTICA EN PLACAS DE REFUERZO

La prueba neumática, consistirá en inyectar aire comprimido a una presión máxima de  $0.3 \text{ Kg/cm}^2$  ( $5 \text{ lb/in}^2$ ), poniendo jabonadura en las soldaduras tanto interior como exteriormente, detectándose así la calidad de las soldaduras; se aceptarán siempre y cuando no haya fugas de ninguna clase.

### BARRENOS TESTIGO

Cuando se indique en los planos y/o especificaciones particulares, las placas de refuerzo y los asientos de las boquillas fijadas en la parte exterior del recipiente, llevarán cuando menos un barreno testigo.

Todos los recipientes sujetos a corrosión, deberán tener barrenos testigo, por medio de los cuales se verificará el estado de corrosión de las soldaduras.

En resumen la verificación o inspección durante la fabricación de un recipiente a presión, abarcará lo siguiente:

- a) El espesor de cada placa del cuerpo y de cada tapa, registrando las lecturas en los dibujos de fabricación.
- b) Las preparaciones o biselés en las placas del cuerpo y en las tapas.
- c) Que en el corte de las placas no haya laminaciones. Si se tiene duda en la determinación de éstas, utilizar la prueba de ultrasonido u otra similar para auxiliarse.
- d) Los procedimientos de soldadura, así como la calificación de los soldadores.
- e) El rolado y conformado de la envoltura y las tapas.
- f) Los ajustes de juntas longitudinales y circunferenciales en el caso de recipientes cilíndricos.

g) El número de costuras e inspección visual (interior y exterior) - en toda su longitud.

h) Las radiografías, registrando el número de exposiciones en los - dibujos de fabricación.

i) En el subensamble de boquillas, la penetración de soldadura, el - rango correcto de la brida, y el ajuste de la brida al cuello, en éste - último; diámetro, cédula y tipo. En los cuellos de los registros de hombre que se cumplan los requerimientos especificados.

j) En los cortes para boquillas y registros de hombre, hechos en la envolvente y en las tapas, las dimensiones, distancia, espaciado y - dirección.

k) La longitud y alineamiento del faldón, y el ajuste del faldón con el fondo.

l) Las pruebas hidrostática y neumática; las presiones, la calibra- ción y colocación del manómetro, etc..

m) El tratamiento térmico conforme a lo especificado, la instala- ción de termopares para el control correcto de la temperatura, rango - de calentamiento, tiempo de tratamiento y rango de enfriamiento.

Después de soldar, se verificará:

n) Las dimensiones del recipiente en los tres planos.

o) La colocación de la base o los soportes y sus barras.

p) La colocación de las conexiones, elevación y cota que deben se- bresalir de la pared.

q) La orientación, elevación y uniformidad de accesorios internos, - como los platos y campanas de burbujeo.

r) La elevación y proyección de los soportes, grapas, etc..

## INSPECCION DE RECIPIENTES A PRESION EN OPERACION

El propósito de efectuar la inspección de los recipientes a presión que se encuentran en servicio, es el de minimizar los riesgos de falla de sus materiales de construcción y accesorios .

El procedimiento de inspección deberá cubrir los requerimientos mínimos, realizando inspecciones oculares, pruebas destructivas y no destructivas en los recipientes a presión, tanto cuando estén en operación, como cuando estén fuera de servicio, para su inspección general y mantenimiento o reparación, de ésta forma se observa una eficiente línea dentro de las normas de seguridad.

La inspección periódica de éstos equipos es necesaria para determinar sus condiciones físicas externas e internas, su grado de deterioro y las causas que lo originaron; con el conocimiento de éstas causas se determinarán las medidas más adecuadas para reducir y prevenir riesgos o daños posteriores, manteniendo así, condiciones seguras en su operación, pues se determina cuando deben cambiarse o repararse.

Con la realización de inspecciones programadas, se va formando un archivo completo donde se deberán tener registrados los datos de nomenclatura, planos y especificaciones de los materiales de construcción; monitoreo de espesores, radiografías, inspecciones ultrasónicas, por partículas magnéticas, por líquidos penetrantes, por replicas metalográficas, perfiles de dureza, pruebas destructivas y reportes de inspecciones visuales, que se han ido acumulando durante la vida útil del recipiente a presión.

Las inspecciones se harán con una periodicidad establecida en un programa general, y el tipo de inspección será de acuerdo a las necesidades conocidas, establecidas en el programa general.

Las inspecciones que se realizan en los recipientes a presión--  
son las siguientes:

#### INSPECCION EXTERNA

Todos los recipientes a presión serán inspeccionados mediante--  
un programa elaborado con una periodicidad mínima de un año.

Para efectuar la inspección externa del recipiente, se deberá --  
hacer un examen visual cuidadoso de todas las partes y accesorios, co  
mo se indica a continuación:

a) Cimentación; para determinar si no hay agrietamientos o roturas  
en el concreto, hundimiento de la estructura o asentamientos, estado -  
general de la tornillería y anclaje de las patas soporte .

b) Soporterías; se deberá revisar el estado de las patas soporte, en  
caso de tener recubrimientos de concreto, revisar si está completo y  
en buen estado, sino tiene desprendimientos o abombamientos, y es reco-  
mendable verificar su correcta adherencia. En caso de encontrarse --  
agrietamientos significativos es necesario desforrar la zona fractura  
da para buscar posible corrosión en las columnas metálicas.

c) Contraventeos; se determinará su estado general, corrosión, la sol-  
dadura de los extremos de los tirantes a las placas de conexión y el  
estado general de los tensores.

d) Escaleras, barandales y plataformas; se verificará que los escalo  
nes y su unión soldada con las placas estén en buen estado y comple-  
tos, al igual que los barandales. Las plataformas se inspeccionarán --  
también en sus soldaduras de soporte, por posible corrosión.

e) Boquillas y accesorios; se deberán revisar todas las boquillas, co  
nexiones, accesorios, válvulas de bloqueo y seguridad, determinando la -  
evidencia de fugas, golpes, corrosión, juntas en mal estado, espárragos -  
faltantes o corroidos, tuercas faltantes o sin ajuste adecuado, libraj  
fuera de norma, etc.. También inspeccionar soldaduras y solapas de re--

fuerzo.

f) Aislamiento exterior; cuando el recipiente tenga aislamiento exterior, inspeccionarlo a fin de determinar posibles grietas o roturas -- donde penetre humedad dañando a la envolvente, si existieran, se debe -- desforrar la zona e inspeccionarla evaluando el grado de afectación.

g) Envolvente y tapas; se deberá inspeccionar a detalle el estado -- general del cuerpo en busca de corrosión tanto en las placas de refuerzo, las placas sencillas, como en las soldaduras, si existe corrosión exterior o desprendimiento de recubrimiento interno, determinar la profundidad de las picaduras.

h) Líneas; se revisará su estado general y soportería, buscando posibles fugas o vibración.

i) Instrumentación; se deberán revisar las conexiones para la instrumentación, si presentan fugas o corrosión, y que estén funcionando correctamente.

La inspección externa incluye la determinación de los espesores -- en el recipiente a presión por técnica ultrasónica, y la periodicidad -- se hará en función del análisis estadístico de las mismas.

Cada anomalía encontrada durante la inspección externa, deberá reportarse, para darle mantenimiento y corregirla a la brevedad posible. En caso de no poderse corregir en operación normal del recipiente a -- presión, se requerirá que el equipo éste fuera de servicio, para lo cual se incluirá en un programa general de reparación.

#### INSPECCION INTERNA

Debido a que los recipientes a presión son construídos con materiales diferentes y de diversas procedencias, los criterios para determinar la periodicidad de las inspecciones variarán dependiendo del -- tipo de material.

En términos generales para definir los periodos de inspección in-

terior, se puede dividir los aceros de construcción en los siguientes grupos:

1. Aceros de alta resistencia. Estos son aceros al carbono con un proceso de fabricación especial y con tratamiento térmico de templado y revenido que les imparte una alta resistencia mecánica.

Para éstos casos la primera inspección interior de un recipiente esférico o cilíndrico, será de 1 año y nunca deberá exceder de 2 años - contados a partir de la última prueba hidrostática de recepción, sin importar el tiempo en que el recipiente esté fuera o dentro de operación.

La segunda inspección se efectuará de los 5 a los 10 años después de la primera inspección, siempre y cuando no haya sido necesario -- efectuar alguna reparación.

La tercera inspección se efectuará de los 5 a los 10 años después de la segunda inspección, siempre y cuando no se haya efectuado alguna reparación.

Si en alguna inspección se efectúan reparaciones con soldadura, - la siguiente revisión se ejecutará al año.

2. Aceros microaleados. Estos son aceros que se fabrican adicionándoles uno o varios elementos aleantes que le impartirán una mayor resistencia mecánica, en comparación con los aceros convencionales, pero menor que la de los aceros de alta resistencia.

Debido a su alta resistencia mecánica y su dureza, que en un momento dado pueden estar sujetos a corrosión bajo esfuerzos, se establece un período de 3 años para la primera inspección, contados a partir de la última prueba hidrostática de recepción, sin tomar en cuenta el tiempo en que el recipiente esté fuera o dentro de servicio.

La segunda inspección se llevará a cabo, 5 años después de la primera siempre y cuando no haya sido necesario efectuar alguna reparación con soldadura. Las inspecciones posteriores se harán como máximo cada 10 años después de la inspección anterior.

Si hubo necesidad de efectuar alguna reparación con soldadura, la siguiente inspección se efectuará a los 3 años después de la última prueba hidrostática, antes de entrar en servicio.

3. Aceros convencionales. Estos son aceros al carbono tradicionalmente empleados en los diseños y construcción de los recipientes; y a los cuales pertenecen la mayoría de los recipientes a presión construidos.

La primera inspección se realiza 5 años después de la última prueba hidrostática de recepción, sin tomar en cuenta el tiempo en que el recipiente está fuera de servicio.

Las inspecciones posteriores se efectuarán como máximo cada 10 años después de la inspección anterior, siempre y cuando no haya sido necesario efectuar alguna reparación con soldadura.

Si se realizó alguna reparación con soldadura, la siguiente inspección se efectuará a los 5 años después de la última prueba hidrostática, antes de entrar a servicio.

La periodicidad de la revisión interna, se modificará si se detectan velocidades altas de desgaste o corrosión que disminuyan la vida útil del equipo; o si se presentan fallas que ameriten efectuar la inspección interior antes del plazo fijado. Asimismo se indica que la periodicidad indicada no es estrictamente de aplicación general, pero se han obtenido buenos resultados de experiencias pasadas.

Para realizar la inspección interna a un recipiente a presión, antes se debe consultar la información registrada en su archivo, para

conocer su historia y elaborar debidamente el programa de inspección.

También se deberá verificar que el recipiente haya sido vaciado, purgado, aislado, lavado, neutralizado y vaporizado, según se requiera, -- confirmando en campo en la forma debida. Hacer las pruebas necesarias de explosividad, determinación de gases tóxicos, sustancias ácidas, etc., cuando se requiera, y se deberá tener un buen alumbrado para realizar la inspección correctamente.

De acuerdo a las características del recipiente a presión y de las sustancias que se manejen; así como de su información estadística, lo que indicará que debe revisarse con más detalle por posibles defectos localizados.

La inspección se enfocará de la forma siguiente:

a) Revisar visualmente el estado físico de las láminas buscando -- posibles deformaciones, fracturas, zonas de corrosión y se debe registrar el tipo, localización y magnitud del daño observado.

b) Soldaduras; después de una inspección visual para observar el estado físico en uniones de láminas, boquillas, uniones de fondo y cuerpo, uniones de cuerpo y techo, buscando defectos, tales como, zonas con fuga, zonas de desgaste o corrosión, poros, fisuras, etc.. Se realizarán pruebas no destructivas, tales como, radiografías, ultrasonido, partículas magnéticas y líquidos penetrantes, para obtener más datos sobre las posibles fallas.

c) Boquillas y conexiones; se revisarán visualmente todas las boquillas y conexiones, con el fin de localizar zonas con defectos, tales como, corrosión, picaduras, erosión; debiendo de verificar que estén libres de obstrucciones. También se deben hacer pruebas ultrasónicas si se -- requieren.

d) Niplería; se deben revisar también exteriormente, verificando que



se encuentran dentro de las especificaciones de norma o código, midiendo su espesor y comparándolo.

e) Estructuras internas; revisar su estado físico en busca de deformaciones o zonas corroídas.

f) Dispositivos de calentamiento; revisar visualmente y con golpes de martillo el estado físico de la tubería y conexiones de los sistemas de calentamiento, buscando zonas de corrosión, deformadas, soldaduras afectadas, u otras causas que afecten su funcionamiento.

g) Accesorios; revisar visualmente los accesorios, tales como, agitadores, flotadores, platos, oscuchas, protección con ánodos, árenas, tomas de presión, etc., buscando defectos que pudieran ocasionar un mal funcionamiento en el equipo.

h) Recubrimientos; revisar el estado físico del recubrimiento exterior e interior, buscando posibles defectos, tales como, fisuras, poros, zonas de desprendimiento; se deben revisar con más detalle las zonas donde se localicen defectos.

Lo anterior es una descripción escueta de una inspección interna, y que resulta ser una inspección general cuando el recipiente está fuera de servicio. La inspección también se apoya en las pruebas no destructivas que a continuación se señalan.

**Inspección ocular o visual:** Esta consiste en una inspección visual del estado general del recipiente, tratando de localizar la existencia de zonas corroídas, picaduras, exceso de cascarilla, desalineamiento de soldaduras, corrosión, socavados, etc..

**Inspección ultrasónica:** Se emplea en primer lugar para determinar los espesores de cada una de las placas de la envolvente y de las tapas, si existiera discontinuidad interna del material, se deberá intensificar la inspección ultrasónica para evaluar su magnitud y proceder de acuerdo para su reparación.

**Inspección con partículas magnéticas:** En el caso de los aceros de alta resistencia y microaleados con propiedades magnéticas, se empleará esta técnica. Esta inspección es necesaria en todas las soldaduras internas, para detectar cualquier grieta o fractura ocasionadas principalmente por los efectos de la corrosión.

Si se determina presencia de discontinuidades, para corroborar la magnitud de la falla se utilizará la inspección ultrasónica, y si es necesario se inspeccionarán con radiografías para determinar las reparaciones requeridas.

**Inspección por líquidos penetrantes:** Esta técnica, sólo cuando el inspector la considera necesaria se aplica.

**Inspección radiográfica:** En todos los casos se muestrearán radiográficamente los cruces de soldadura, debido a que en éstas zonas se presenta el más alto potencial para contener defectos de soldadura.

Las radiografías se toman colocando la fuente de radiación fuera del recipiente y la película sobre la superficie interior de la soldadura, si el equipo tiene aislante térmico exterior, se debe desforrar el área de interés para evitar reducir la sensibilidad radiográfica.

En los recipientes cilíndricos es recomendable tomar un mínimo de 6 exposiciones sobre las soldaduras tapa-envolvente y sobre los cruces de las soldaduras.

En tanques o recipientes esféricos es recomendable un muestreo de un cruce por cada dos placas.

La inspección radiográfica, se hará con una periodicidad e intensidad marcadas por los resultados obtenidos anteriormente. En caso de que una discontinuidad detectada se deba corroborar por inspección radiográfica, se hará siempre y cuando el tamaño de la falla sea mayor

al 2 % del espesor de la placa o accesorio, si es menor, no lo detectará la radiografía.

Esta inspección se deberá seguir a lo establecido en el Código - ASME, Sección V.

Inspección por replicas metalográficas y perfiles de dureza: Este método es muy útil para determinar el estado estructural del material que ha estado expuesto a un medio agresivo, y califica el grado de -- afectación del material, así como la localización y magnitud de segregaciones, grietas superficiales, uniformidad de la estructura, etc..

Se deberá realizar ésta inspección, cuando se tengan zonas de corrosión o ataque del material; si no se observan, entonces se muestreará el cuerpo de los recipientes principalmente en las placas del fondo y zonas afectadas por el calor, resultado de soldaduras originales o de reparación. Para recipiente esféricos el muestreo se efectuará en los trópicos ecuador y parte superior; en recipientes horizontales en su parte media y ososquetos.

La prueba de dureza, se relaciona directamente con la resistencia a la tracción del material, al comparar los valores obtenidos con los especificados para el material, y detectar de éste modo si existe fragilización o pérdida de sus propiedades mecánicas que pudieran ocasionar fallas en operación.

La inspección por pruebas destructivas, se realizará cuando los resultados de las pruebas no destructivas indiquen la necesidad de -- realizar algunas de ellas, para conocer alguna característica específica del material o soldadura.

La obtención de muestras para éstas pruebas, se realizará de -- acuerdo a lo que establece el Código ASME, Sección VIII, División 2.

Los ensayos que se pueden efectuar conforme a lo establecido en el Código ASTM, son los siguientes:

- a) Resistencia a la tracción
- b) Resistencia a la compresión
- c) Prueba de impacto
- d) Prueba de dobléz
- e) Prueba de fatiga

Cuando se realicen trabajos de soldadura en un recipiente, ya sea por alguna reparación o debido a alguna modificación, se deberá realizar la prueba hidrostática.

La presión de prueba será 1.5 veces como mínimo la presión máxima permisible de trabajo de acuerdo al código de diseño.

Para la prueba se empleará agua limpia a temperatura ambiente, -- pero nunca menor a  $16^{\circ}\text{C}$ , para evitar fallas por fragilización del material; antes de presionar el recipiente checar que la temperatura del agua en el interior del recipiente sea más o menos homogénea.

#### INSPECCION EN RECIPIENTES A PRESION QUE CAMBIEN DE SERVICIO

En las plantas industriales es necesario en ocasiones substituir equipos o recipientes desgastados, o dañados, empleando otros recipientes que se tienen disponibles, algunas veces por haber sido dados de baja a causa de modificaciones de las instalaciones, otras por ser recipientes nuevos que eran destinados para otro servicio. También ocurre que en ocasiones es necesario modificar o ampliar los procesos existentes, utilizando el material disponible que en general fue diseñado para otros fines.

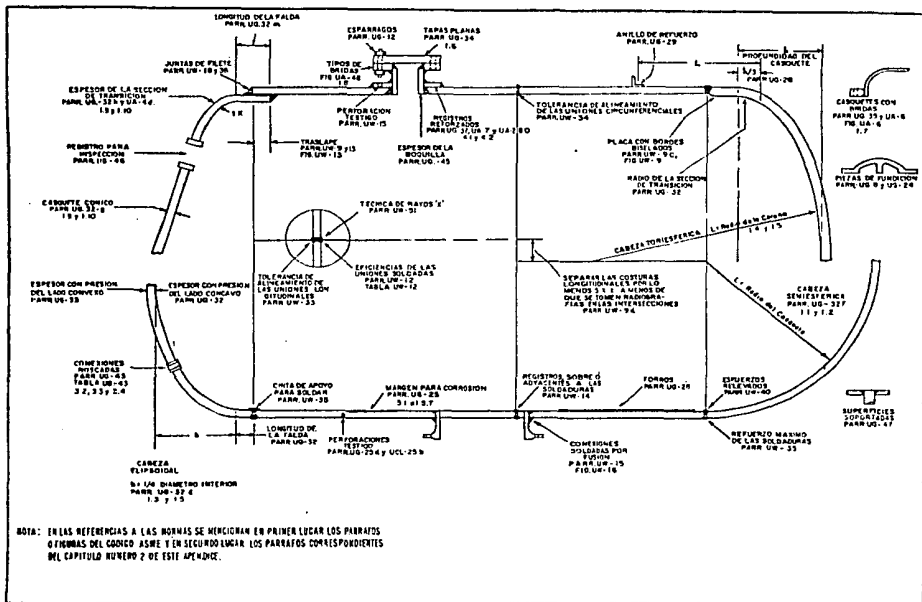
En éstos casos, antes de que se instalen los recipientes, se deberá realizar una inspección y revisión con el fin de encontrarlos funcionales para el proceso o servicio en que se van a utilizar.

Los resultados básicos y los cálculos efectuados, harán constar que el recipiente puede operar en las condiciones deseadas, sin que represente riesgo alguno para la seguridad de las instalaciones.

En aquellos casos en que un recipiente a presión vaya a ser utilizado en un servicio distinto para el que fue diseñado, se deberá recabar toda la información disponible sobre las condiciones en que va a operar, tales como, la corrosión que se espera en las distintas partes del recipiente, espesores de pared mínimos para soportar la presión de trabajo, etc..

Considerando el margen por corrosión para las distintas partes del recipiente, y el utilizado para otros fines como la estabilidad, se determinará si el espesor remanente soportará la presión interior de las nuevas condiciones de trabajo. Conforme a los cálculos pertinentes, se hará constar la presión máxima permisible en las nuevas condiciones de trabajo, señalando las partes en que se limita esa presión. El recipiente sólo podrá ser utilizado para el nuevo servicio cuando la presión máxima permisible sea superior o igual a la presión determinada para las nuevas condiciones de operación.

La inspección y cálculos correspondientes, se deberán realizar conforme a los puntos que se abarcan en una inspección interior o inspección general. En la figura III.1 se indican los puntos mínimos a cubrir en la inspección de un recipiente horizontal conforme a especificaciones del Código ASME, Sección VIII.



#### IV. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACION DE ESPESORES EN RECIPIENTES A PRESION

##### ANTECEDENTES

Las técnicas y pruebas de inspección desarrolladas con el fin de evaluar la perfección de una estructura prefabricada, han contribuido de manera eficaz a la comprobación satisfactoria de los materiales empleados en su construcción, bajo condiciones de servicio muy severas.

Los equipos de comprobación e inspección brindan una mayor confianza al emplearse, pues ayudan a mantener en condiciones seguras los equipos e instalaciones de una planta industrial. Sin embargo, la inspección resultará eficiente si los métodos y equipos que se utilizan son seleccionados correctamente y se realizan por personal calificado.

Una de las técnicas de inspección, de una importancia relevante, es la determinación de espesores de pared con equipo de ultrasonido u otros que sean apropiados.

Esta técnica comprende la determinación de espesores reales de pared en unidades de proceso, y el análisis de los resultados obtenidos.

La información que se obtiene de estas determinaciones permite planear los lineamientos generales de inspección y mantenimiento, y con esto establecer medidas eficientes y seguras cuando se encuentren operando normalmente los equipos e instalaciones.

La periodicidad de la determinación de espesores o del monitoreo de éstos es función del análisis de los resultados, ya que toma en cuenta los datos de las condiciones de trabajo y de diseño, así como los de inspecciones anteriormente realizadas.

## MONITOREO DE ESPESORES

Los trabajos que se realizan en la determinación de espesores en recipientes a presión, forma parte de los trabajos de inspección preventiva de riesgos en las plantas de proceso y se deben incluir en un procedimiento de monitoreo periódico de espesores.

Este monitoreo es el trabajo de realizar la medición sistemática de espesores de pared en los equipos, mediante técnicas ultrasónicas — principalmente, estableciendo las actividades necesarias para llevar a cabo el análisis y control en forma bien programada.

De los resultados obtenidos se determina la magnitud de corrosión permitiendo controlar el espesor remanente mínimo para que un equipo pueda operar en condiciones seguras. Al efectuar una serie de mediciones y determinar los espesores de pared, se obtiene la información del comportamiento de la sección o pieza en consideración en el medio y condiciones en que presta servicio; de ésta forma se tiene el historial de un equipo, sabiendo además, en que momento requiere de mantenimiento, reparación o que definitivamente deba salir de servicio.

El monitoreo de espesores es aplicable en casi todos los recipientes a presión. Sin embargo, aunque su aplicación es muy amplia, no es común, ya que las características de éstos y de los materiales que manejan, establecen diferencias en su comportamiento.

Para aplicar el método se debe considerar que los equipos sean seccionados en partes con velocidades de corrosión homogéneas, por lo tanto para definirlo con claridad, se menciona lo siguiente: Los equipos se consideran dispositivos que en conjunto con las líneas integran un sistema. Estos dispositivos por lo general se encuentran sujetos a corrosión variable, por lo que se consideran como elementos de —



verificación al equipo entero o partes del mismo que presenten condiciones similares de corrosión o desgaste.

Para seccionar un equipo en elementos de verificación, se tienen las siguientes reglas generales:

A. Cuando un recipiente presente velocidades de corrosión que se puedan considerar homogéneas, o bien, éstas sean menores de 0.020 pulgadas por año (PA), se tomará como elemento de verificación al recipiente entero, éstos equipos no se consideran críticos.

B. En torres de destilación que presentan velocidades de corrosión mayores a 0.020 PA, equipos críticos, seccionarlos en tantos tramos como sea necesario para tener elementos de verificación con velocidad de corrosión homogénea.

C. Los recipientes y torres con ferrocemento anticorrosivo, considerarlos como un elemento de verificación. Cuando el recubrimiento sea parcial, tomar dos elementos de verificación, zona protegida y zona sin protección.

D. En recipientes verticales y horizontales, con zonas donde se concentre la corrosión, dividir en varios elementos de verificación.

Cabe mencionar que los conceptos de elemento de verificación y sistema, se utilizan para uniformar el lenguaje empleado, sus definiciones son las siguientes:

**Elemento de verificación.** - Se lo considera a la sección de un sistema que tenga la misma velocidad de corrosión o desgaste, es decir, que sea más o menos homogénea.

**Sistema.** - Se lo considera al conjunto de líneas y equipos que manejan un fluido de la misma composición, pudiendo variar en sus diferentes partes las condiciones de operación.

## TRABAJO DE MONITOREO DE ESPESORES

Las actividades del monitoreo de espesores se realizan en base a un programa general de monitoreo, éste se origina al efectuar una medición inicial, que es un monitoreo al 100 % con la técnica de ultrasonido y otras técnicas apropiadas que sirven de apoyo.

Para efectuar el monitoreo inicial se debe tener dividida en sistemas la unidad de proceso, a su vez cada sistema deberá ser dividido en elementos de verificación. Esto se hace con la ayuda de un isométrico - y/o dibujo de los equipos, en donde se indique claramente soldaduras y puntos de medición que se van a monitorear; el punto de medición es el lugar donde se coloca el "transducer" para efectuar la medición.

En cada isométrico o dibujo se deberán tener indicados los datos de condiciones de operación, especificación de materiales, cédula en su caso, diámetro, espesor original y espesor mínimo requerido correspondiente; también una hoja de registro para cada isométrico o dibujo, donde se descargará los datos de los espesores obtenidos del monitoreo.

El monitoreo se efectuará en todos los puntos de medición y soldaduras indicados.

Del monitoreo efectuado se obtiene información del comportamiento del recipiente a presión; se establece la velocidad de corrosión de los elementos de verificación, debiéndose elaborar los programas de monitoreo con el objeto de prevenir y controlar el estado del recipiente, en base a las estimaciones de vida remanente, fecha de reemplazo tentativa y fecha de próximo monitoreo.

## ANALISIS ESTADISTICO

El análisis estadístico es la actividad que se realiza mediante - modelos matemáticos, para obtener los datos de vida remanente, velocidad de corrosión, fecha de reemplazo tentativa, fecha de próximo monitoreo y corrosión máxima promedio de un elemento de verificación. De esta forma conocer también el comportamiento del recipiente a presión.

El método de análisis estadístico se hará de acuerdo al siguiente orden:

- a) Cálculo de las velocidades de corrosión por punto de medición(C)
- b) Cálculo del promedio de velocidad de corrosión del elemento de - verificación considerado, efectuando el ajuste estadístico ( $\bar{C}$  y  $C'$ ).
- c) Determinación del origen de la desviación de los valores de espesores obtenidos respecto al promedio general.
- d) Selección del mínimo espesor medido.
- e) Obtención de la vida remanente(VR).
- f) Obtención de la fecha de próximo monitoreo(PPM).
- g) Obtención de la fecha de reemplazo tentativa(PRT).

## METODO DE ANALISIS ESTADISTICO

## A. Cálculo de las velocidades de corrosión por punto de medición(C)

La velocidad de corrosión es considerada como la rapidez con la - cual disminuye el espesor de una pared metálica. Se calcula comparando los espesores obtenidos de mediciones efectuadas en dos fechas consecutivas.

La velocidad de corrosión se calculará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$C = \frac{t_1 - t_2}{f_2 - f_1} \quad ; \text{ en milésimas de pulgada por año(MPA)}$$

donde:  $t_1$  = espesor obtenido en la fecha,  $f_1$   
 $t_2$  = espesor obtenido en la fecha,  $f_2$   
 $f_1$  = fecha de monitoreo anterior  
 $f_2$  = fecha de monitoreo reciente

B. Cálculo del promedio de velocidad de corrosión y su ajuste estadístico ( $\bar{C}$  y  $C'$ )

Para efectuar el cálculo del promedio de velocidad de corrosión - del elemento de verificación, se aplican las siguientes fórmulas:

$$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

donde:  $C_i = C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ; son las velocidades de corrosión -- correspondientes a cada punto de medición considerado en el elemento de verificación.

$n$  = número de valores o datos de velocidad de corrosión que intervienen en el cálculo;  $n$  debe ser mayor o igual a 8 para considerar representativo el cálculo de  $\bar{C}$ .

$\bar{C}$  = Promedio aritmético de las velocidades de corrosión.

Para efectuar el ajuste estadístico, se utiliza la siguiente fórmula:

$$C' = \bar{C} + 1.28 \frac{\bar{C}}{n^{1/2}}$$

C. Determinación del origen de la desviación de valores de espesores obtenidos respecto al promedio general

Si análisis hechos anteriormente indican variación en la velocidad de corrosión, se considerará el siguiente criterio:

a) Si la variación es en el sentido de aumentar la velocidad de co-

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

rosión, se tomará en cuenta el valor obtenido en el último análisis.

b) Si la variación es en el sentido de disminuir la velocidad de -- corrosión, se tomará en cuenta el valor obtenido en el análisis ante-- rior, hasta no obtener cuando menos dos análisis consecutivos que con-- firmen el cambio observado.

c) En el caso de tener altas velocidades de corrosión, y que los monitoreos efectuados ya hayan sido ratificados en campo, se procederá a lo siguiente:

1) Si la vida remanente que se obtenga es menor o igual a 1.5 --- años proceder a solicitar el cambio de la pieza en el equipo, según el caso, y continuar vigilando la pieza o elemento de verificación.

ii) Si la vida remanente resulta mayor de 1.5 años, entonces proceda de la forma siguiente:

- Si se trata de un desgaste localizado, se deberán sacar éstos va-- lores del análisis general del elemento de verificación. Los puntos nor-- males se deberán vigilar por separado, agrupándolos como elementos de -- verificación independientes.

- Si se trata de puntos diseminados en diversas partes del elemen-- to de verificación, hacer el análisis y de acuerdo con el resultado pro-- gramar el siguiente monitoreo.

#### D. Determinación del mínimo espesor medido ( $t_k$ )

La determinación del mínimo espesor medido, se hace seleccionando-- el punto que cuente con el menor espesor de cada uno de las diferentes secciones que compongan al elemento de verificación. Dichos espesores se denominarán  $t_k$  y la fecha correspondiente  $f_k$ .

#### E. Determinación de la Vida Remanente (VR)

La vida remanente, es el tiempo que deberá transcurrir antes de -- que un equipo llegue a su límite de operabilidad; el límite de operabi--

lidad se refiere al espesor remanente en el cual debí retirarse de servicio a un equipo, asegurando así un mínimo de seguridad para las condiciones de operación.

La determinación de la Vida Remanente, se hará aplicando la siguiente fórmula:

$$VR = \frac{t_k - LO}{C'}$$

donde:  $t_k$  = espesor mínimo medido.

LO = límite de operabilidad, espesor mínimo requerido para --  
que opere el equipo en condiciones seguras.

C' = promedio ajustado de la velocidad de corrosión.

El resultado obtenido de VR, indicará cuando será necesario solicitar materiales para efectuar un cambio del elemento de verificación en un equipo; así como para programar la revisión de reparación de una unidad de proceso. Cuando el valor de VR sea igual o inferior a 1.5 años solicitar el cambio inmediatamente.

#### F. Determinación de la Fecha de Próximo Monitoreo (PPM)

La Fecha de Próximo Monitoreo, es la fecha en la cual deberá efectuarse el siguiente monitoreo del elemento de verificación, de acuerdo al análisis realizado

La determinación de la Fecha de Próximo Monitoreo se hará mediante la siguiente fórmula:

$$PPM = f_k + \frac{VR}{3}$$

donde:  $f_k$  = fecha correspondiente al mínimo espesor medido ( $t_k$ ).

VR = Vida Remanente

El resultado de ésta fecha servirá para programar el monitoreo de un elemento de verificación, y crear el programa general. La fecha del --

Próximo Monitoreo, no deberá exceder de 5 años.

#### G. Determinación de la Fecha de Reemplazo Tentativa (PRT)

La Fecha de Reemplazo Tentativa, es la fecha en la cual se estima -- que deberá reemplazarse el elemento de verificación por haber llegado -- al término de su vida operable.

La determinación de la Fecha de Reemplazo Tentativa, se hará con -- la siguiente fórmula:

$$PRT = VR + \text{fecha del último monitoreo}$$

donde: VR = Vida Remanente del elemento de verificación.

Con el monitoreo de espesores y el análisis estadístico de las -- mediciones, se obtendrán buenos resultados en el mantenimiento y repa -- ración de los equipos, si se crean buenos programas de inspección. Pero, para asegurar que un equipo se encuentra operando sin riesgos, se debe -- rá comprobar los esfuerzos que actúan sobre él.

#### COMPROBACION DE UN RECIPIENTE A PRESION SOMETIDO A ESFUERZOS COMBINADOS

Para un recipiente a presión es necesario comprobar los efectos -- debidos a cargas y esfuerzos a lo largo de su vida de operabilidad, -- pues al estar en servicio se tienen varias causas que podrían ocasion -- nar una falla en el equipo y posiblemente un desastre.

La comprobación se efectúa en su totalidad, comprendiendo las tensio -- nes y compresiones que se producen por los estados de carga en cada -- caso.

En teoría, deberá realizarse un control en cada sección del reci -- piente a todo lo largo de éste. Pero, por razones prácticas se debe con -- trolar por lo menos las secciones de la línea de tangencia a la cara -- na, y en caso de que el recipiente tuviera secciones con diferentes --

dímetros, donde se modifican éstos (conos).

El control esté enfocado a comprobar que los espesores en cada sección, se encuentren bajo las condiciones requeridas. En caso de no cumplir con los espesores mínimos requeridos, se deberán reparar reforzando las secciones que así lo requieran.

Como regla, los planos de diseño y de fabricación de un recipiente a presión deberán presentar los datos de espesores; espesor para resistir la presión interna, para margen de corrosión y para los efectos de estabilidad, por la acción del viento y/o movimientos sísmicos, en combinación con el peso propio de la torre en operación o cuando sea sometido a pruebas hidráulicas o neumáticas.

En general, puede considerarse que el espesor mínimo requerido para efectos de presión interna y para margen de corrosión, permanezca constantes; si en un recipiente a presión se tiene considerado el espesor mínimo requerido para su estabilidad. Este espesor en muchos casos, va decreciendo de la parte inferior a la superior, en la base debe tener el espesor mínimo necesario, y en la parte superior puede estar sobrado.

#### COMPROBACION DEL ESPESOR MINIMO REQUERIDO EN RECIPIENTES A PRESION

El objetivo de la determinación de los espesores de pared en un recipiente a presión, es comprobar que éste se encuentra dentro de los límites para que pueda operar en condiciones seguras.

En el caso de que un recipiente a presión cambie de servicio o de condiciones de operación, es obligatorio determinar las condiciones del espesor de pared. Para los recipientes nuevos también se harán las determinaciones pertinentes para crear un programa general e ir formando su historial.

La comprobación se complementa totalmente con los trabajos de monitoreo de espesores y análisis de la información, para fines estadísticos.



y de control.

#### COMPROBACION POR PRESION INTERNA

Para comprobar que el espesor mínimo requerido es el indicado, se deberá calcular la presión máxima permisible de trabajo en función - del espesor mínimo medido. Esto se aplica para todos los casos, envolventes y tapes.

El valor que se obtenga de presión máxima permisible de trabajo, se compara contra la presión de diseño, o bien el espesor mínimo medido compararlo contra el espesor de diseño. De ésta forma se comprobará en que casos no se cumple con la especificación del espesor mínimo requerido, debiéndose reparar la sección correspondiente.

Las fórmulas o ecuaciones que se utilizan, para comprobar el espesor mínimo requerido en los diferentes casos, se basan en las especificaciones de diseño del Código ASME, Sección VIII, División 1.

#### ENVOLVENTES CILINDRICAS

La presión máxima permisible de trabajo, para envolventes cilíndricas se determina de la forma siguiente:

$$P_{mp} = \frac{S E t_k}{R + 0.6 t_k}$$

La fórmula es válida si:  $P_{mp} \leq 0.385 SE$  ó  $t_k \leq 0.5 R$

o bien: 
$$P_{mp} = S E \left( \frac{Z - 1}{Z + 1} \right)$$

donde: 
$$Z = \left( \frac{R + t_k}{R} \right)$$

cuando 
$$P_{mp} \geq 0.385 SE$$
 ó  $t_k \geq 0.5 R$

### ENVOLVENTES ESFERICAS

La presión máxima permisible de trabajo, para envoltantes esféricas se determina de la forma siguiente:

$$P_{mp} = \frac{2S E t_k}{R + 0.2t_k} - \rho \cdot h$$

La fórmula es válida sólo si:  $P_{mp} \leq 0.665 SE$  ó  $t_k \leq 0.356 R$

Para éste caso al aplicar la fórmula, es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

1. La altura  $h$  se tomará de arriba hacia abajo, y el punto considerado será a 12 pulgadas arriba de cada línea de soldadura, como se representa en la figura IV.1.

2. Los espesores mínimos requeridos son variables en cada anillo de la esfera, debido a la columna del líquido; en éstos cálculos se puede suponer la esfera totalmente llena.

3. En el anillo donde se apoyan las patas (normalmente el central) pueden tenerse espesores adicionales por sismo, siendo más gruesas aún las láminas donde se sueldan las tapas.

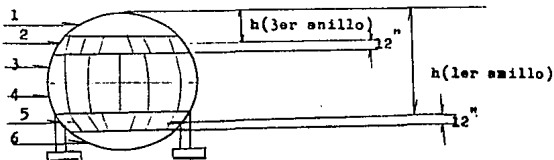


Figura IV.1 Recipiente esférico

## TAPAS

La presión máxima permisible de trabajo, para los diferentes tipos de tapas se determina de la forma siguiente:

Tapa elipsoidal

$$P_{mp} = \frac{2 S E t_k}{K D + 0.2 t_k}$$

$$K = 1/6 \left[ 2 + \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right]$$

El valor del factor de intensificación de esfuerzos (K), en función de la relación de eje mayor a eje menor (a/b), viene dado en la tabla II.1, del capítulo II.

Tapa toriésférica

$$P_{mp} = \frac{2 S E t_k}{L M + 0.2 t_k}$$

$$M = 0.25 \left[ 3 + (L/r_t)^{1/2} \right]$$

El valor del factor de intensificación de esfuerzos (M), en función del radio interior de corona (L) y el radio de transición interior de la tapa, viene dado en la tabla II.2, del capítulo II.

Tapa hemisférica

$$P_{mp} = \frac{2 S E t_k}{R + 0.2 t_k}$$

Tapa cónica

$$P_{mp} = \frac{2 S E t_k \cos \alpha}{D + 1.2 t_k \cos \alpha}$$

Tapa toricónica

$$P_{mp} = \frac{2 S E t_k \cos \alpha}{D_x + 1.2 t_k \cos \alpha}$$

; para la parte cónica

$$D_x = D - 2 r_t (1 - \cos \alpha)$$

$$P_{mp} = \frac{2 S E t_k}{L M + 0.2 t_k} \quad ; \text{ para la zona de transición}$$

$$M = 0.25 \left[ 3 + (L/r_t)^{1/2} \right]$$

El valor de intensificación de esfuerzos (M), es el mismo que para tapas toriesféricas, bajo la consideración siguiente:

$$L = D_x / 2 \cos \alpha$$

En todos los casos de comprobación por presión interna, el significado de las variables indicadas en las fórmulas, es el siguiente:

- $P_{mp}$  = presión máxima permisible de trabajo, en  $\text{lb/in}^2$ .
- $S$  = esfuerzo máximo permisible a la temperatura máxima de opn. -- del material de construcción, valor de tablas UCS-23 del Código ASME, Sección VIII, División 1, en  $\text{lb/in}^2$ .
- $E$  = eficiencia de soldadura de las juntas conforme a lo indicado en el Código ASME, Sección VIII, División 1, párrafos UW.
- $t_k$  = espesor mínimo medido obtenido directamente del monitoreo más cercano a la fecha de cálculo, en pulgadas (in).
- $R$  = radio interior de la envolvente o tapa, en pulgadas (in).
- $\rho_L$  = densidad del líquido contenido en el recipiente, en  $\text{lb/ft}^3$ .
- $h$  = altura del punto considerado, en pulgadas (in).
- $M$  = factor de intensificación de esfuerzos para tapas toriesféricas y torioónicas.
- $K$  = factor de intensificación de esfuerzos para tapas elípticas.
- $L$  = radio interior de corona, en pulgadas (in).
- $r_t$  = radio de transición interior, en pulgadas (in).
- $D$  = diámetro interior de la ceja recta de la tapa; o longitud interior del eje mayor de una tapa elíptica; o diámetro interior de una tapa cónica, en el punto considerado, medido perpendicularmente.

mente al eje longitudinal, en pulgadas (in).

$D_x$  = diámetro interno de la porción cónica de una tapa toricónica en el punto de tangencia a la transición, en pulgadas (in).

$\alpha$  = un medio del ángulo en el vértice del cono de la tapa, sobre la línea de centros de la tapa, en grados.

En la comparación de las presiones, cuando se desconozca la presión de diseño, se tomará como tal la presión de calibración de la válvula de seguridad. Si ésta también se desconoce, a la presión usual de operación, se sumará la cantidad de  $1.75 \text{ Kg/cm}^2$  ( $25 \text{ lb/in}^2$ ) o se multiplicará por 1.2, utilizando la que resulte mayor como presión de diseño.

En todos los casos se deberá descontar el valor del margen de corrosión en el criterio de cálculo y será de preferencia en función de la velocidad real de corrosión o desgaste en el tiempo de vida útil estimada, o bien el marcado en el diseño.

#### COMPROBACION DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD

El procedimiento de comprobación de las condiciones de estabilidad se basa en el criterio del método de los esfuerzos máximos por tensión y compresión.

Este procedimiento es específico para verificar las condiciones de estabilidad de una torre de un solo diámetro, aunque también puede aplicarse a torres con diferentes diámetros. En la figura IV.2 se presenta una torre de un solo diámetro.

Esfuerzos debidos a cargas del viento

El esfuerzo debido a la presión del viento se determina con la siguiente fórmula:

$$P_{wx} = 0.637 \frac{P_v \cdot X^2 \cdot Def.}{D_o^2 \cdot t_m}$$

- donde:  $F_{wx}$  = esfuerzo de tensión o compresión en la torre debido al viento, en  $\text{lb/in}^2$ .
- $P_v$  = presión del viento del lugar o zona, en  $\text{lb/in}^2$ .
- $X$  = distancia de la tangente del domo al punto que se de sea checar, en pulgadas(in).
- Def. = diámetro efectivo de la torre; éste será igual al de la torre, más dos veces el espesor de aislamiento, -- más 17 pulgadas por las escaleras con protección, -- más diámetros de tuberías apoyadas a la torre o -- cualquier otra proyección, en pulgadas(in).
- $t_m$  = espesor medido de la torre en el punto considerado, -- en pulgadas(in).

#### Esfuerzos debidos a movimientos sísmicos

El esfuerzo debido a movimientos sísmicos, se determina a partir del momento flexionante, de la forma siguiente:

$$M_{sx} = \frac{4 C \cdot W_{rt} \cdot X^2 (3H - X)}{H^2}$$

$$F_{sx} = \frac{M_{sx}}{\pi \cdot R_0 \cdot t_m}$$

- donde:  $M_{sx}$  = momento flexionante debido a movimientos sísmicos en el punto considerado, en lb-in.
- $C$  = coeficiente sísmico de la zona.
- $W_{rt}$  = peso total de la torre en operación o prueba, en lb.
- $X$  = distancia de la línea tangente del domo al punto con siderado, en pulgadas(in).
- $H$  = distancia de la tangente de la tapa superior al piso, en pulgadas(in).

$F_{sx}$  = esfuerzo de tensión o compresión debido a movimientos sísmicos, en  $lb/in^2$ .

$R_o$  = radio exterior de la torre, en pulgadas(in).

$t_m$  = espesor medido de la torre en el punto considerado, en pulgadas(in).

#### Esfuerzo debido a la presión interna

El esfuerzo debido a la presión interna se determina con la siguiente fórmula :

$$F_{ap} = \frac{P_{mt} D}{4 t_m}$$

donde:  $F_{ap}$  = esfuerzo axial debido a la presión interna, en  $lb/in^2$ .

$P_{mt}$  = presión máxima de trabajo, si se desconoce, se puede utilizar la presión de disparo de la válvula de seguridad, en  $lb/in^2$ .

$D$  = diámetro interior de la torre, en pulgadas(in).

$t_m$  = espesor medido de la torre en el punto considerado, en pulgadas(in).

#### Esfuerzo debido a las cargas por peso muerto

La determinación del esfuerzo total debido a las cargas por peso muerto, se hace considerando la contribución en peso por: envoltente, tapas, aislamiento, líquido contenido, etc.; hasta obtener el peso total que actúa sobre el área de la sección transversal en consideración.

Si se conoce de planos el peso de la torre en operación, se utiliza para efectuar la determinación del esfuerzo total, si se desconoce se determina de la forma siguiente:

$$W_T = W_e + W_t + W_a + W_{es} + W_p + W_{sd} + W_L$$

donde:  $W_T$  = peso total de la torra en operación o prueba, en lb.

$W_e$  = peso de la envolvente, en lb.

$W_t$  = peso de las tapas, en lb.

$W_s$  = peso del aislamiento, en lb.

$W_p$  = peso de la plataforma, en lb.

$W_{es}$  = peso de las escaleras, en lb.

$W_{ad}$  = peso de aditamentos, en lb.

$W_L$  = peso del líquido contenido, en lb.

El peso para cada caso, se determina de la forma siguiente:

Envolvente:  $W_e = V_e \cdot \rho_{mat.e}$

$$V_e = 2 \pi \cdot D_o \cdot t_s \cdot X$$

donde:  $\rho_{mat.e} = 490 \text{ lb/ft}^3$ , si se trata de acero

$D_o$  = diámetro exterior, en ft.

$t_s$  = espesor original de la envolvente, en ft.

$X$  = distancia de la tangente del domo al punto que se desea checar, en ft.

$V_e$  = volumen de la envolvente, en  $\text{ft}^3$

Tapas:  $W_t = V_t \cdot \rho_{mat.t}$

$$V_t = A_{Tt} \cdot t_c$$

donde:  $\rho_{mat.t} = 490 \text{ lb/ft}^3$ , si se trata de acero.

$A_{Tt}$  = área total de la tapa, considerando la parte cilíndrica (faldón), en  $\text{ft}^2$ .

$t_c$  = espesor de la tapa, en ft.



$V_t$  = volumen de la tapa, en  $ft^3$ .

Aislamiento:  $W_a = \pi D_a \cdot t_a \cdot \rho_{mat.a} \cdot X$

donde:  $D_a$  = diámetro real de la envolvente con aislamiento, en ft.

$t_a$  = espesor de aislamiento, en ft.

$\rho_{mat.a}$  = densidad del material de aislamiento, en  $lb/ft^3$ .

$X$  = distancia de tangente del domo al punto que se desea considerar, en ft.

Escaleras:  $W_{es} = 25 \text{ lb/ft} \times \text{longitud de las escaleras (ft)}$  ; para el caso de escaleras con protección.

Plataformas:  $W_p = 35 \text{ lb/ft}^2 \times \text{área de las plataformas (ft}^2)$

Aditamentos: Sólo para columnas de destilación o torres, con platos o charolas:

$$W_{ch} = 25 \text{ lb/ft}^2 \times \frac{\pi \cdot D^2}{4} \times N$$

donde:  $D$  = diámetro interno de la torre, en  $ft^2$ .

$N$  = número de platos o charolas

Para otro tipo de aditamentos, se tendrá que determinar su peso, si es que se desconoce.

Líquido:  $W_L = V_L \cdot \rho_L$

donde:  $V_L$  = volumen de líquido contenido, en  $ft^3$ .

$\rho_L$  = densidad del líquido contenido, en  $lb/ft^3$ .

En el caso de que se tuviera una torre con diferentes espesores, para determinar su peso se tomarían tantos términos como secciones con diferente espesor se tengan. El peso de la envolvente en éste caso se determina de la forma siguiente:

$$W_e = 3078.768(h_1 d_1 t_{01} + h_2 d_2 t_{02} + \dots + h_n d_n t_{0n})$$

donde:  $h_1, h_2, \dots$  = alturas de las diferentes secciones, en ft.

$d_1, d_2, \dots, d_n$  = diámetros de las diferentes secciones, en ft.

$t_{01}, t_{02}, \dots, t_{0n}$  = espesores originales correspondientes a cada sección, en ft.

$h_n$  = la distancia a la soldadura con cambio de espesor, inmediato superior al punto considerado, en ft.

De los pesos individuales se obtiene el peso total, y con éste se determina el esfuerzo total de compresión debido al peso muerto, en la forma siguiente:

$$F_{dx} = \frac{W_T}{\pi D_o t_m}$$

donde:  $F_{dx}$  = esfuerzo de compresión debido al peso muerto de la torre, en  $\text{lb/in}^2$ .

$W_T$  = peso total de la torre, en lb.

$D_o$  = diámetro exterior de la torre, en pulgadas (in).

$t_m$  = espesor medido de la torre en el punto considerado, en pulgadas (in).

En la comprobación el objetivo que se deberá cubrir al determinar el espesor, es que éste deberá ser el mínimo requerido para soportar -- los esfuerzos máximos que se producen en un mismo tiempo, cuando el recipiente vertical (torre) se encuentra operando o en prueba.

La comprobación de los espesores mínimos requeridos, para la estabilidad de la torre, se realiza en base a los esfuerzos totales de tensión y compresión determinados, comparándolos con los esfuerzos máximos permisibles indicados en cada caso.

#### ESFUERZO TOTAL DE TENSION Y COMPRESION

El esfuerzo total de tensión se determina de la siguiente forma:

$$F_{TT} = F_{wx} + F_{ap} - F_{dx}$$

$$F_{TT} = F_{sx} + F_{ap} - F_{dx}$$

el valor que se utiliza en la comparación, es el que resulte mayor de cualquiera de las dos expresiones.

El esfuerzo total de compresión se determina de la siguiente forma:

$$F_{TC} = F_{wx} + F_{dx} - F_{ap}$$

$$F_{TC} = F_{sx} + F_{dx} - F_{ap}$$

de igual manera, que para la tensión, se utiliza el valor que resulte mayor.

La comprobación debe realizarse para las condiciones de operación o de prueba, adoptando los valores de tensión máxima admisible y compresión máxima admisible que se indican a continuación:

Tensión máxima permisible ( $F_{Tmp}$ )

$$F_{Tmp} = 1.0 \text{ del límite elástico del material; en lb/in}^2$$

Compresión máxims permisible ( $F_{Cmp}$ )

$$F_{Cmp} = 1/3 \text{ ( p.y. ) : en lb/in}^2$$

donde: p.y. = esfuerzo máximo o punto de cedencia del material, en lb/in<sup>2</sup> (valor de tablas).

$$\text{o bien: } P_{\text{Cmp}} = 3 \times 10^6 \frac{t_m}{D_o}$$

donde:  $t_m$  = espesor medido de la torre en el punto considerado, en pulgadas(in).

$D_o$  = diámetro exterior de la torre, en pulgadas(in).

El valor de  $P_{\text{Cmp}}$  que resulte menor, es el que servirá para compararlo contra el esfuerzo total de compresión.

El espesor mínimo requerido en éstos casos, deberá ser menor que el medido, si no es así, se deberá reparar la sección correspondiente con un refuerzo.

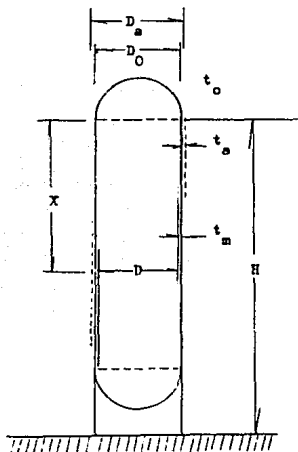


Figura IV.2 Torre de un sólo diámetro

## CONCLUSIONES

El Código ASME es una guía que indica la forma de organizar un control de calidad de la construcción de los recipientes a presión previendo, detectando y corrigiendo los problemas que pudieran presentarse en el transcurso del proceso.

Todos los pasos de la construcción son evaluados en un orden progresivo y, tal vez, el más importante es el elegir el material específico para las funciones que va a desarrollar un recipiente y sus accesorios; ya que en base a sus propiedades se apoya prácticamente el diseño, tanto para las condiciones de espesor y corrosión en función de las condiciones de trabajo, como en la inspección, procedimientos de soldadura y tratamientos térmicos.

Durante la construcción se prevé efectuar inspecciones y comprobaciones, con el fin de detectar problemas de raíz y reparar las fallas que pudieran existir.

Las inspecciones y comprobaciones, se basan en la aplicación oportuna de pruebas no destructivas y destructivas como medidas de control durante la fabricación, instalación y operación de los recipientes a presión.

La aplicación de estos controles aparentemente incrementan el costo del recipiente, pero equivalen a tomar un seguro contra accidentes, ya que los beneficios que se obtienen son:

1. Reducir el riesgo de que una falla provoque un siniestro, en el cual se pueden perder vidas humanas y/o pérdidas materiales.
2. Reducir el riesgo de una falla, pues ésta perturba la operación y consecuentemente ocasiona pérdidas por no haber producción, por reparaciones y por mano de obra ociosa, además otro tipo de gastos no previstos.

3. Evitar la ejecución del mantenimiento correctivo o reducirlo al efectuar acciones de mantenimiento preventivo eficientes y debidamente programadas.

4. Bajo un sistema de control se asegura la productividad, la confianza y eficiencia en la operación de los equipos, instalaciones y servicios.

Estos puntos justifican que se deben estudiar, inspeccionar y comprobar los diferentes cargas y tensiones que se producen en un recipiente a lo largo de su vida y en forma especial, cuando se encuentre en operación o en prueba. Por ello, se establece que el objetivo de la determinación de espesores, es una medida de control para mantener las medidas de seguridad en la operación del equipo industrial.

La inspección y condiciones de seguridad en instalaciones y equipo industrial es de importancia capital, tanto en la economía como en la seguridad de funcionamiento de una planta de proceso, y su aplicación se extiende a toda la industria en general.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) ASME. "BOILER AND PRESSURE VESSELS"  
SECTION VIII, DIV. 1  
ASME, 1977
- 2) "DESIGN PROCESS EQUIPMENT". PRESSURE VESSELS  
Lloyd E. Brownell & Edwing H. Young  
Edit. John Willey & Sons, 1959
- 3) "CHEMICALS ENGINEER'S HANDBOOK"  
Robert H. Perry & Cecil Chilton  
Edit. Mc Millan, 1968
- 4) "EQUIPOS PARA INDUSTRIA QUIMICA Y ALIMENTARIA"  
J. Baquero Franco y V. Llorente Martinez  
Edit. Alhambra Mexicana, 1985
- 5) "ESPECIFICACIONES GENERALES PARA PROYECTOS DE OBRAS"  
"DISEÑO DE RECIPIENTES A PRESION"  
Norma No. 2.162.01, PEMEX 1985
- 6) "ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCION DE RECIPIENTES A PRESION"  
PEMEX RP-I, 1969
- 7) "PRIMER SEMINARIO DE INGENIERIA MECANICA PETROLERA"  
"RECIPIENTES A PRESION"  
I.M.P. 1971
- 8) "PROCEDIMIENTO PARA EL REGISTRO, ANALISIS Y PROGRAMACION DE  
LA CALIBRACION PREVENTIVA"  
Procedimiento GPE-IT-0204, PEMEX 1985
- 9) "PROCEDIMIENTO PARA LA INSPECCION DE RECIPIENTES A PRESION  
DE ALMACENAMIENTO DE GAS LICUADO DEL PETROLEO"  
Procedimiento GPE-IT-0003, PEMEX 1986

## 10) "DEFECTOS Y ROTURAS EN RECIPIENTES A PRESION Y TUBERIAS"

Helmut Thielsch

Edit. Grijelbo, 1979

## 11) "INTRODUCCION A LA ESTADISTICA MATEMATICA"

Erwin Kreyszig

Edit. LIMUSA, 1979