

14  
2 Ejm



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“CUAUTITLAN”

DISEÑO DE EQUIPO DE PROCESO  
A PRUEBA DE VIENTO Y SISMO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A

**ALBA ROSIQUE NARANJO**

DIRECTOR DE LA TESIS:  
ING. HECTOR BECERRA RIOS

MEXICO, D. F.

1984



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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

	pág.
CAPITULO I	
<u>CALCULO DEL ESPESOR DE PARED EN RECIPIENTES SUJETOS A</u>	
<u>PRESION INTERNA O EXTERNA</u>	3
1.0. INTRODUCCION	4
1.1. DISEÑO DEL CILINDRO	8
1.1.1. Diseño a presión interna	8
1.1.2. Diseño bajo presión externa	12
1.2. DISEÑO DE CABEZAS O TAPAS	21
1.2.1. Diseño a presión interna	21
1.2.2. Diseño bajo presión externa	34
1.3. DISEÑO DE LA SECCION CONICA	36
1.3.1. Diseño a presión externa	36
1.3.2. Diseño bajo presión externa	42
1.4. DISEÑO DE ATIESADORES	43
CAPITULO II	
<u>DETERMINACION DE LAS FUERZAS DE COMPRESION DEBIDAS A</u>	
<u>LAS CARGAS MUERTAS</u>	48
2.0. INTRODUCCION	49
2.1. CARGAS ACTUANDO EN EL RECIPIENTE	49
2.2. CALCULOS RAPIDOS PARA EL PESO DEL RECIPIENTE	53
2.3. TABLAS DE PESOS DE DIFERENTES COMPONENTES DE UNA	61
TORRE	
CAPITULO III	
<u>FUERZAS CAUSADAS POR LA ACCION DEL VIENTO Y SISMO</u>	68
3.0. INTRODUCCION	69

	pág.
3.1. DISEÑO DEL RECIPIENTE POR EFECTOS DE VIENTO	69
3.1.1. Método diferencial para el cálculo de los efectos por viento.	69
3.1.2. Método integral para el cálculo de efectos por -- viento.	76
3.1.3. Deflexión debida al viento.	79
3.2. DISEÑO DEL RECIPIENTE POR EFECTOS DE SISMO	80
3.2.1. Método diferencial para el cálculo de los efectos por sismo.	82
3.2.2. Método integral para el cálculo de los efectos -- por sismo.	90
 CAPITULO IV	
<u>ANÁLISIS DE ESFUERZOS</u>	92
4.1. Excentricidad	93
4.2. Estabilidad elástica	94
4.3. Análisis de esfuerzos	96
 CAPITULO V	
<u>DISEÑO DEL SOPORTE Y ANCLAJE</u>	108
5.0. Diseño del soporte y anclaje	109
5.1. Diseño del aro base	112
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	119

## INTRODUCCION

El siguiente trabajo se realizó por el interés en el Diseño de Equipo, pretendiendo satisfacer la carencia de bibliografía especializada. Con esa finalidad se recopilaron las ecuaciones de diseño que el código de la American Society of Mechanical Engineers, Sección VIII Parte I, especifica para las dos formas de trabajo conocidas, es decir presión interna y presión externa y la parte del recipiente a tratar.

En el Capítulo I se enumeran las ecuaciones para el diseño de las diferentes partes del recipiente tales como cilindros, cabezas y secciones cónicas; todos los casos se analizan a presión interna y externa.

En el Capítulo II se establecen las cargas muertas que ha de soportar el recipiente, cargas que se toman en consideración para efectuar el análisis de esfuerzos, mismo que a su vez será utilizado para modificar los espesores dados según las condiciones planteadas en el Capítulo I.

En el Capítulo III se efectúa un análisis de los efectos causados por el viento y los sismos en el diseño del recipiente. Es posible observar que ambos fenómenos difícilmente se presentan juntos, es por ello que se toma el crítico para el diseño.

En el Capítulo IV se analizan todos los esfuerzos que actúan en el recipiente para definir el espesor que resista todos éstos. De esta forma el recipiente queda diseñado de modo que aun en casos críticos, siga operando sin exponer la seguridad de la planta, ya que en ocasiones se manejan productos peligrosos.

Por último se diseña el soporte y anclaje del recipiente, en particular para una torre, ya que son los recipientes a los que más afectan los fenómenos de viento y sismo, por ser algunos, de gran altura.

Se llevó el orden de diseño adecuado para evitar confusiones, además de proporcionar algunas gráficas y tablas para obtener los datos que en algunas ecuaciones son necesarios.

**CAPITULO I**

**CALCULO DEL ESPESOR DE PARED EN RECIPIENTES SUJETOS**

**A PRESION INTERNA O EXTERNA**

## 1.0 INTRODUCCION

Para el diseño de recipientes sujetos a presión interna o externa, estos se consideran constituidos de varias partes que son: el cuerpo del recipiente, generalmente cilíndrico; las tapas, que pueden ser de diferentes formas según las condiciones de trabajo; la transición cónica, en caso de que el recipiente tenga dos diámetros. Los cálculos para cada parte constitutiva son diferentes, por lo que se tratará cada una por separado.

Al diseñar un recipiente intervienen varios factores, como: temperatura, presión, fluido a manejar, material de construcción, corrosión, uniones soldadas, inspección, etc.

### Temperatura:

La temperatura de diseño, no deberá exceder a la máxima permisible del material seleccionado, dado en las tablas de la subsección C, de la sección VIII del código A.S.M.E., en las cuales se obtiene el máximo esfuerzo permisible a tensión.

Cuando en el recipiente existan diferentes zonas de temperatura durante la operación y puedan ser calculadas, el diseño de las diferentes partes, se hará de acuerdo a estas temperaturas.

Cuando existan diferencias cíclicas de temperatura durante la operación, con bajas fluctuaciones de presión, el diseño se hará con la mayor temperatura esperada.

La temperatura de diseño según el código A.S.M.E., deberá calcularse agregando 25°F a la temperatura máxima de operación.

#### Presión:

Para obtener la presión de diseño, el código A.S.M.E. recomienda que debe ser igual a la máxima de operación esperada más el 10% o  $2 \text{ kg/cm}^2$ , la que resulte mayor.

#### Fluido a manejar:

En la selección del material de construcción del equipo es importante tomar en consideración el fluido a manejar, más de un material puede ser utilizado para un determinado fluido; las propiedades físicas del material empleado en el equipo son afectadas de diferente forma, siendo necesario sacrificar algunas propiedades para obtener un máximo aprovechamiento en otras, por ello es necesario decidir, basandose en la experiencia que propiedad es más importante aprovechar.

#### Material de Construcción:

En resumen la sección VIII del código A.S.M.E. especifica materiales para recipientes a presión, la mayoría de ellos son aceros con bajo contenido de carbón.

No obstante que son los requisitos del proceso químico -- los que limitan la selección del material para la fabricación de un recipiente, la selección final será dictada por consideraciones económicas. Las principales propiedades de los aceros que afectan su costo son: resistencia mecánica, resistencia a la temperatura, resistencia química y maleabilidad para adoptar una forma determinada. Sin embargo, existen otras causas de aumento del costo en aceros como: tratamiento térmico, acabados especiales, pruebas, requisitos químicos, dimensiones especiales, mano de obra complicada, etc.

Otros factores de importancia que deben considerarse en la selección del material son: su fácil obtención, economía y rendimiento satisfactorio.

#### Corrosión:

La corrosión es un fenómeno de naturaleza química que suele ocurrir con frecuencia en recipientes destinados a la industria. Los principales elementos que estimulan la corrosión -- son: oxígeno, bióxido de carbono, sales que se disuelven en el agua produciendo soluciones ácidas, contacto entre metales diferentes que establezcan diferencia de potencia, etc.

Para contrarrestar este fenómeno, se emplean en la fabricación de recipientes, recubrimientos anticorrosivos, los cuales pueden ser aplicados en fábricas o bien, pueden ser instalados por medio de soldadura en el taller. También se usan -- aleaciones anticorrosivas como aceros inoxidable, reconendán-

dose su uso cuando se justifica su elevado costo.

El método más usual en la actualidad para contrarrestar la corrosión, es agregar un sobre-espesor al espesor calculado, dicho sobre-espesor debe ser tal, que al estar corroida la pared del recipiente el espesor que queda debe ser suficiente para que cumpla con los requisitos de resistencia mecánica.

Este sobre-espesor para corrosión puede estimarse a partir de las condiciones del proceso que se va a desarrollar en el recipiente, esto es: la composición del fluido, su temperatura, velocidad, cantidad, tiempo de operación, etc. En la práctica, el cálculo de este sobre-espesor se lleva a cabo haciendo uso de gráficas en las cuales intervienen algunos de los factores antes mencionados.

Este sobre-espesor es proporcionado por el departamento de ingeniería de proceso y se considera únicamente en: aceros al carbón, aceros de baja aleación (aleaciones férricas); ya que en el uso de los aceros inoxidable u otras aleaciones inoxidables no es necesario.

#### Soldadura:

Las uniones soldadas son puntos críticos en el diseño de un recipiente, ya que si no han sido ejecutadas con propiedad, pueden dejar grietas u otras imperfecciones que pueden originar fallas en el recipiente; con objeto de evitar estos ries-

gos, se inspeccionan dichas uniones, para lo cual existen varios métodos; el más común es la inspección por radiografía. El código A.S.M.E. UG-12 estipula diferentes eficiencias de las juntas longitudinales, para los diferentes tipos de inspección.

## 1.1 DISEÑO DEL CILINDRO

### 1.1.1 Diseño de cilindros bajo presión interna

La mayoría de los recipientes de proceso son cilíndricos debido a que poseen una fuerza estructural grande, además su fabricación es más sencilla. La presión ejercida sobre las paredes, provoca dos tipos de esfuerzos según la dirección en que se estudia su efecto. Uno de estos esfuerzos tiende a romper el recipiente a lo largo, longitudinalmente y otro a lo ancho, circunferencialmente.

Basándose en el párrafo UG-27 del código A.S.M.E. para el cálculo de espesores en recipientes cilíndricos, encontramos dos fórmulas para calcular el espesor debido a esfuerzos circunferenciales, una para dimensiones interiores:

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

y otra para dimensiones exteriores:

$$t = \frac{P R_o}{SE + 0.4 P} \quad (1-2)$$

Tomando en cuenta la tolerancia por corrosión:

$$t = \frac{P R_i}{SE - 0.6 P} + C \quad (1-3)$$

Donde:

t= Espesor de pared, in.

P= Presión de diseño, Lb/in<sup>2</sup>.

Ri=Radio interior, in.

Ro=Radio exterior, in.

S= Esfuerzo máximo permisible de trabajo del material --  
Lb/in<sup>2</sup>

E= Eficiencia de las juntas soldadas, adimencional.

C= Tolerancia por corrosión, in.

El código A.S.M.E. nos indica un factor de seguridad de 4 del esfuerzo máximo a tensión, o sea, que el esfuerzo permisible es igual al esfuerzo de tensión del material dividido entre 4.

Para calcular el esfuerzo producido por la presión interna nos basamos en los esfuerzos producidos en un cilindro, que son el longitudinal y el circunferencial.

### Esfuerzo longitudinal

La fuerza longitudinal  $P$ , resultante de una presión interna  $p$ , actuando en un cilindro de espesor  $t$ , y longitud  $L$ , y diámetro  $d$ , según la figura 1.1A es:

$$P = \frac{p\pi d^2}{4} \quad (1-4)$$

y el área  $a$ , resultante de la ruptura del material es:

$$a = t\pi d \quad (1-5)$$

el esfuerzo resultante de esta fuerza

$$S = \frac{P}{a} = \frac{p\pi d^2/4}{t\pi d} = \frac{pd}{4t} \quad (1-6)$$

### Esfuerzo circunferencial

Tomando en consideración el mismo cilindro para el esfuerzo longitudinal tenemos: ver figura 1.1B

$$\begin{aligned} P &= pdL \\ a &= 2tL \\ S &= \frac{P}{a} = \frac{pdL}{2tL} = \frac{pd}{2t} \end{aligned} \quad (1-7)$$

Analizando las ecuaciones (1-6) y (1-7) notamos que el esfuerzo circunferencial es el doble que el longitudinal.

De los dos esfuerzos mencionados, se tomará para el diseño el circunferencial debido a que es el controlante; la torre trabaja a

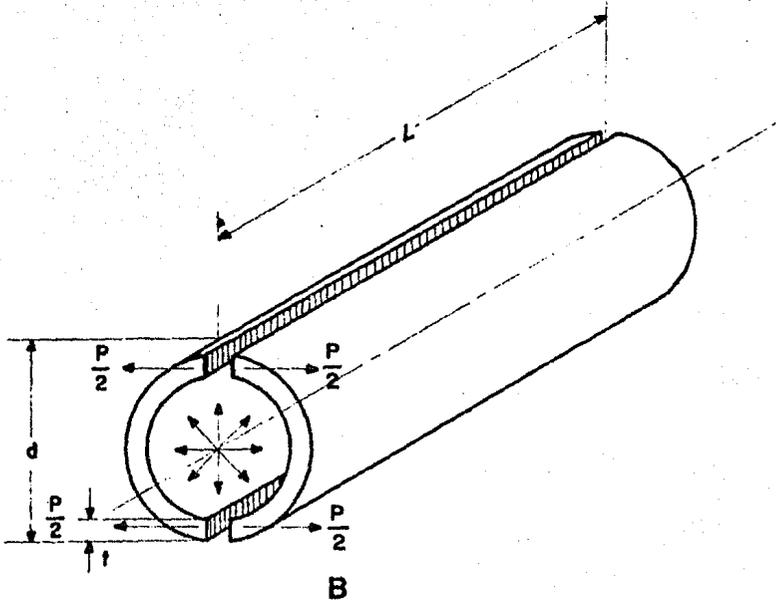
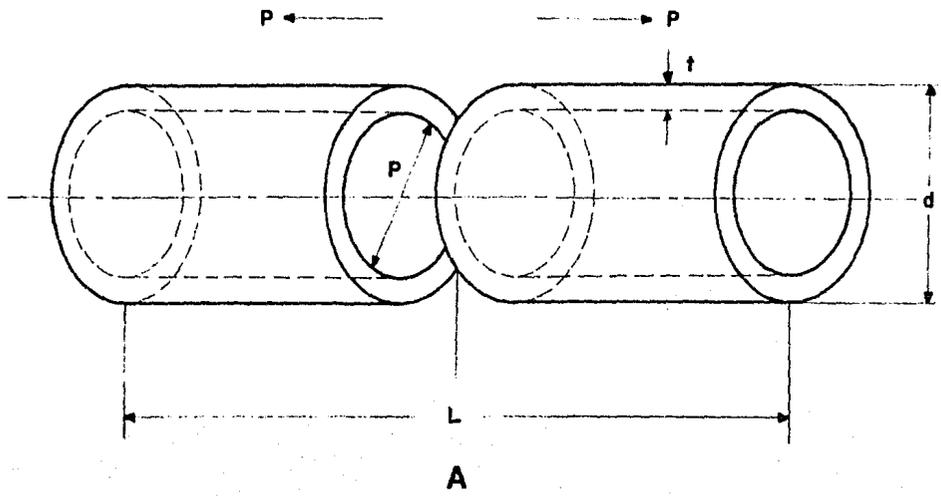


FIGURA 1.1

tensión o a compresión por la clase de cargas a que está expuesta. La presión interna produce un esfuerzo a tensión y la ecuación que lo representa es la (1-6).

### 1.1.2. Diseño de cilindros a presión externa

Una gran variedad de procesos químicos y petroquímicos requieren equipos que operan a vacío, en los cuales la presión exterior es la atmosférica; también son utilizados los recipientes que cuentan con chaquetas para transferir calor, en donde la presión exterior es la de la chaqueta.

Un recipiente bajo presión externa tiene un esfuerzo inducido de compresión circunferencial, bajo estas circunstancias el recipiente está expuesto a un colapso por la inestabilidad elástica causada por este esfuerzo, este colapso puede ser evitado colocando atiesadores a distancias regulares a lo largo del cilindro dividiendo su longitud.

Si la longitud del recipiente o largo entre atiesadores es mayor que una cierta longitud crítica, la presión a la cual ocurrirá el colapso será función únicamente de la relación  $t/d$  y del módulo de elasticidad del material. Si la longitud es menor que la longitud crítica, la presión crítica a la cual el colapso ocurre, es una función de la relación  $L/d$ ,  $t/d$  y del módulo de elasticidad del material.

Compare el valor de la presión permisible obtenido, con la presión de diseño, si la presión permisible es menor que la de diseño se supondrá un espesor de pared mayor, hasta que el valor de presión permisible sea mayor o igual a la de diseño.

Para cilindros que tienen  $Do/t < 10$

1. Utilizando el mismo procedimiento anterior se obtiene el valor de B. Si se obtienen valores de  $Do/t$  menores de 4, A puede ser calculado por la fórmula:

$$A = \frac{1.1}{(\Pi_0/t)^2} \quad (1-10)$$

Para valores de A mayores de 0.10 usar ese valor

2. Con el valor de B obtenido en el punto 1, calcular la presión permisible de la siguiente fórmula

$$P_{P1} = \left[ \frac{2.167}{Do/t} - 0.0833 \right] B \quad (1-11)$$

3. Calcule el valor de  $P_{P2}$  de la fórmula:

$$P_{P2} = \frac{2S}{Do/t} \left[ 1 - \frac{1}{Do/t} \right] \quad (1-12)$$

Donde S es menor que dos veces el máximo valor del esfuerzo permisible a la temperatura de diseño del metal o 0.9 veces el esfuerzo producido en el material a la temperatura de diseño.

### GRAFICA PARA DETERMINAR LA DEFORMACION UNITARIA EN RECIPIENTES CILINDRICOS SUJETOS A PRESION EXTERNA

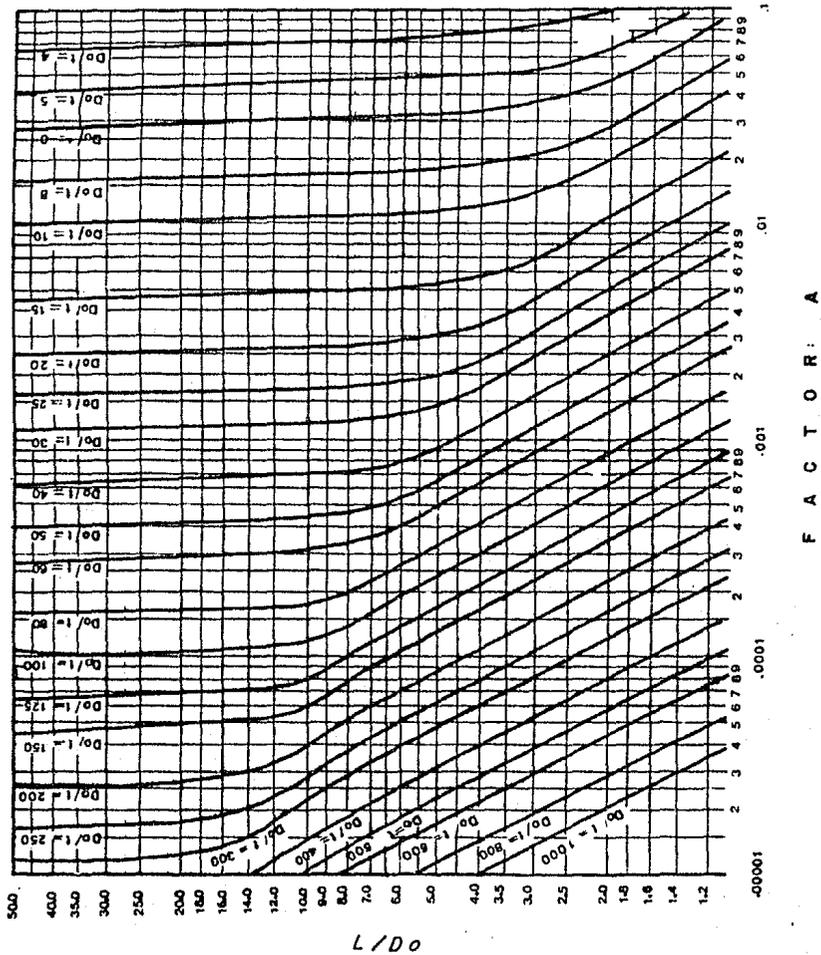


FIGURA 1.2

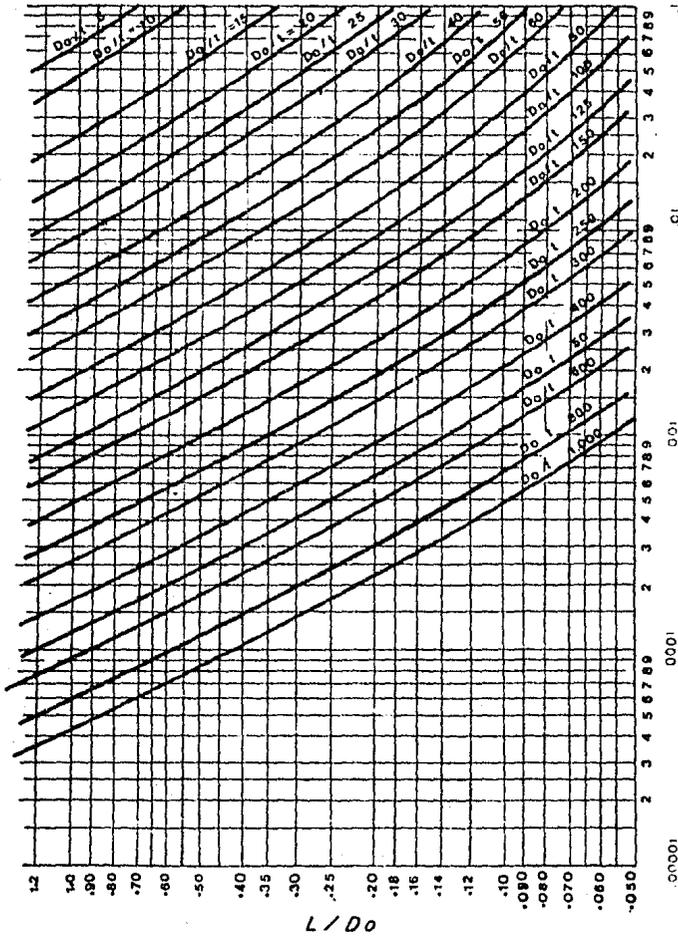
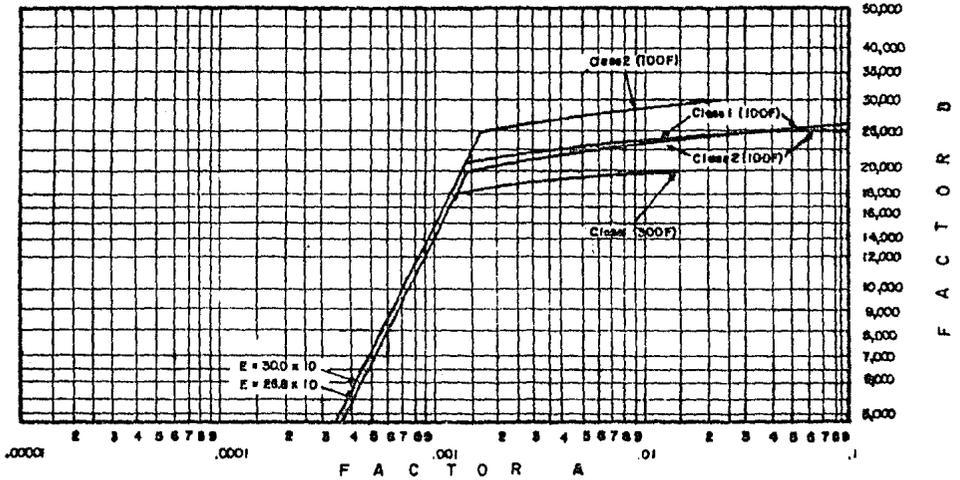
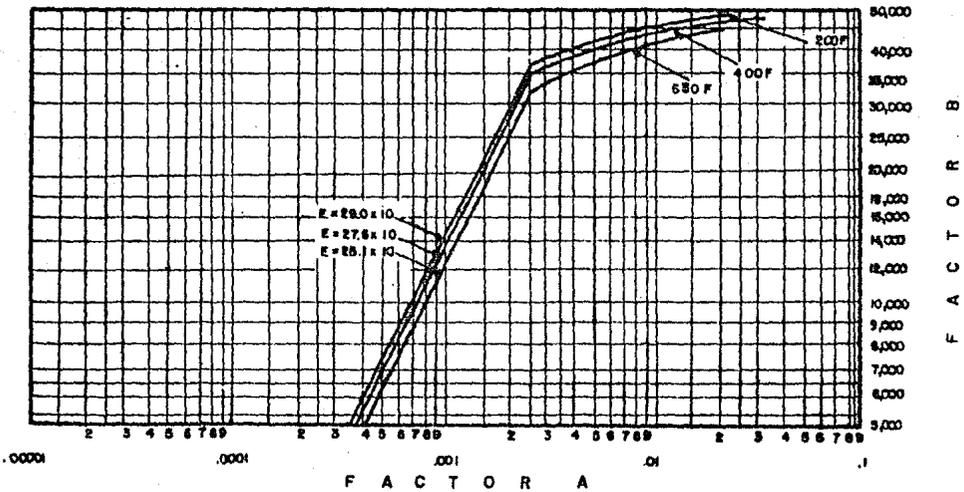


FIGURA 1.2A

F A C T O R A

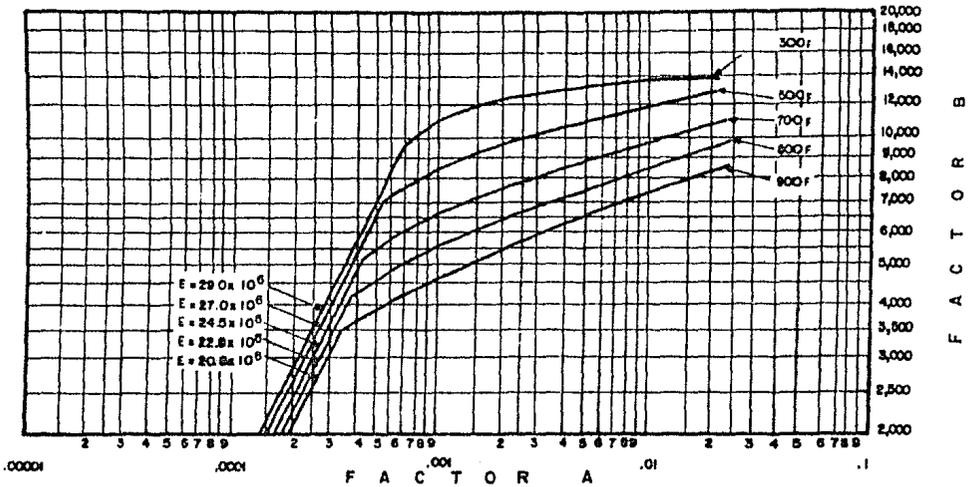


CARTA PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE RECIPIENTES CILINDRICOS Y ESFERAS BAJO PRESION EXTERNA CUANDO EL MATERIAL DE CONSTRUCCION SEA SA-537.

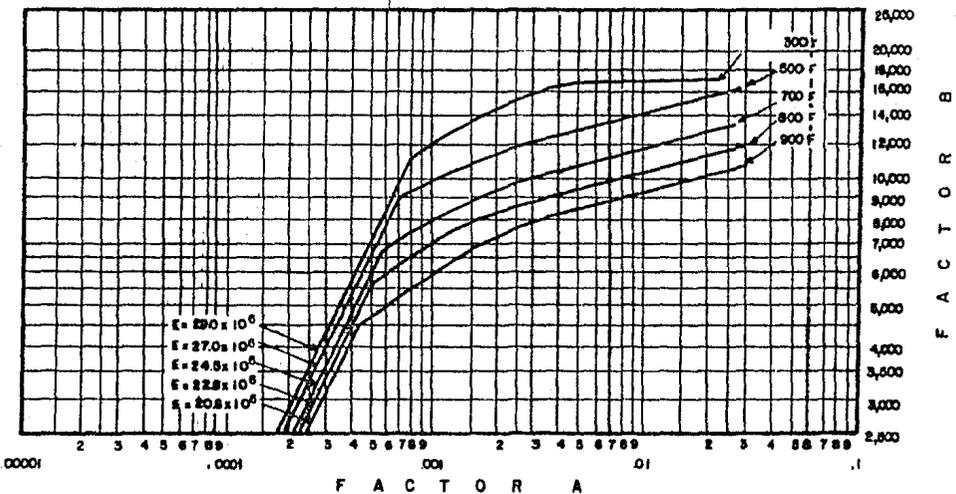


CARTA PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE RECIPIENTES CILINDRICOS Y ESFERAS BAJO PRESION EXTERNA CUANDO EL MATERIAL DE CONSTRUCCION SEA SA-517 TODOS LOS GRADOS Y SA-592 GRADOS A, E y F DONDE t-2 1/2 IN

FIGURA 1.3A



CARTA PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE RECIPIENTES CILINDRICOS Y ESFERAS BAJO PRESION EXTERNA CUANDO EL MATERIAL DE CONSTRUCCION SEA ACERO DE BAJA ALEACION. (ESFUERZO MAXIMO PERMISIBLE 24,000 PSI, SIN INCLUIR 30,000 PSI).



CARTA PARA DETERMINAR EL ESPESOR DE RECIPIENTES CILINDRICOS Y ESFERAS BAJO PRESION EXTERNA CUANDO EL MATERIAL DE CONSTRUCCION SEA ACERO DE BAJA ALEACION. (ESFUERZO MAXIMO PERMISIBLE DE 30,000 PSI A 38,000 PSI). Y TIPO 405 Y TIPO 410 DE ACERO INOXIDABLE.

FIGURA 1.3

4. El menor de los valores de  $P_p$  calculados en los pasos 2 y 3, será usado para la máxima presión externa permisible. Si  $P_p$  es menor que la presión de diseño seleccione un espesor mayor y repetir el diseño hasta que  $P_p$  sea la mayor.

La presión externa causa en el recipiente los mismos --- esfuerzos que los causados por la presión interna (1.1.1), con la diferencia de que estos esfuerzos tienden a aplastar el re cipiente, en sentido contrario de la presión interna. También en la presión externa se toma el esfuerzo circunferencial para el diseño, debido a las demás cargas que actúan en la torre y la ecuación (1-6) es la deducida para este esfuerzo. En la sección 4.3. se analizarán los esfuerzos a los que está sujeta la torre, y se observará la diferencia entre los esfuerzos producidos por las diferentes presiones.

Cálculo del espesor en cilindros utilizando la figura 1.4

Usando la siguiente figura, se puede calcular el valor de  $t$  de acuerdo con el código A.S.M.E. sección VIII, división 1. Siendo el material del cuerpo de acero al carbón, con esfuerzos producidos de 30 000 a 38 000 psi, incluyendo los ace ros inoxidables tipos 405 y 410.

La máxima temperatura de diseño es 300°F

Notaciones:

$P = 15$  psi de presión externa, o máxima presión permisi

### ESPESOR REQUERIDO PARA RECIPIENTES A PRESION EXTERNA

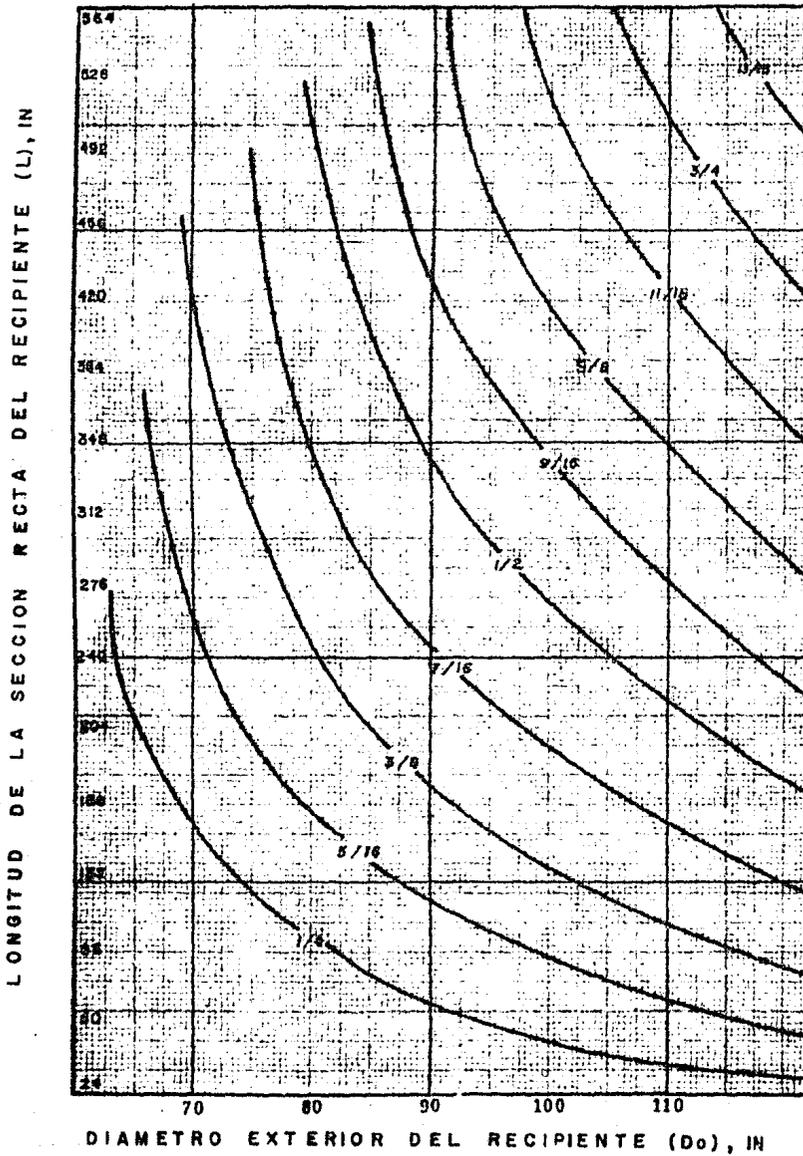


FIGURA I.4

ble de trabajo

$D_o$  = Diámetro exterior del cilindro, in.

$L$  = Largo del recipiente, teniendo en consideración lo siguiente:

1. Distancia entre líneas de tangencia más  $1/3$  de la profundidad de las cabezas, no teniendo atiesadores.

2. La distancia entre centros de atiesadores adyacentes.

3. La distancia del centro del primer atiesador a la línea de tangencia, más  $1/3$  de la profundidad de la cabeza.

$t$  = Espesor mínimo requerido del cilindro excluyendo la corrosión.

La manera de utilizar la figura es la siguiente:

Entrando en la gráfica con los valores de  $L$  y  $D_o$  e intersectándose, se toma el valor de la línea de espesores inmediata superior.

## 1.2. DISEÑO DE CABEZAS O TAPAS

### 1.2.1. Diseño a presión interna

Existen varios tipos de cabezas o tapas prefabricadas, las cuales se contruyen a partir de una placa circular plana,

sin embargo; a pesar de que el costo de las cabezas prefabricadas incluye el costo adicional del formado, generalmente son más económicas que las cabezas o tapas planas para recipientes de proceso, debido a los espesores excesivos que arrojan estas últimas.

Las cabezas prefabricadas llevan una transición que tiene por objeto eliminar la concentración de esfuerzos en la junta de la tapa con el cascarón. Así por ejemplo, tenemos la tapa plana rebordeada (ver Fig. 1.5a), la cual elimina parcialmente los esfuerzos en la junta cabeza-cascarón, pero este tipo de cabezas no es muy recomendable en recipientes a presión, ya que a presiones moderadas tiende a "abombarse" fácilmente y su uso generalmente se limita a recipientes que trabajan a presión atmosférica.

Analizando las deformaciones de una cabeza plana rebordeada, vemos como tiende a la forma esférica. Si fabricamos una tapa equivalente a una cabeza plana deformada, obtendremos la torisférica, en la cual se sustituye la porción plana por un segmento esférico, con un radio de curvatura que se llama "radio de la corona". Si el radio de la corona es mayor al diámetro exterior del recipiente, la cabeza se denomina "Torisférica rebajada" (ver Fig. 1.5b), si dicho radio es menor que el diámetro exterior del recipiente, la cabeza se denomina "Torisférica Estándar" (ver Fig. 1.5c).

El código A.S.M.E., especifica que el radio de la transición sea al menos igual a tres veces el espesor del cascarón o al 6% del diámetro del cilindro, esto es con el fin de aliviar la concentración de esfuerzos al no tener un cambio muy brusco en la forma del recipiente. Esta tapa es muy común tanto para recipientes de almacenamiento como de proceso debido a su bajo costo y a que resiste presiones moderadas, no obstante que el espesor siempre es mayor que el espesor de una cabeza elíptica.

Si observamos las deformaciones de una cabeza Torisférica sometida a presión interior, vemos que también tiende a adoptar la forma esférica, vemos que también existe una considerable concentración de esfuerzo en la transición. Sobre estas bases se creó la cabeza Elíptica (ver Fig. 1.5d), la cual tiene una sección transversal semielíptica; este tipo de cabezas es más resistente a la presión interna que las anteriores y es la más usada en recipientes sometidos a presión interior para proceso. Una variación de este tipo hemisférica (ver Fig. 1.5e), en la cual la relación de los ejes es 1:1 o sea la mitad de una esfera, este tipo es la más resistente llegando a obtenerse espesores igual a la mitad del espesor del cilindro; sin embargo su costo de fabricación y el área de la cabeza son muy grandes por lo que solamente se usan para servicio con presiones muy altas.

La cabeza Toricónica (ver Fig. 1.5f), se utiliza general

mente como transición de diámetros, debido que su costo de fabricación así como el material requerido resulta mayor que las demás tapas.

Además se usan tapas cónicas (ver Fig. 1.5g), en la parte inferior de algunos recipientes (tolvas, evaporadores, cristalizadores, etc.) por razones funcionales.

Resumiendo: la cabeza Torisférica es la más económica en cuanto a costo de fabricación, tiene un área menor, lo que disminuye la cantidad de material utilizado, pero tiene también el espesor mayor que las otras dos; lo que aumenta el costo del material y de fabricación. Con base a la experiencia y en análisis económicos, se recomienda este tipo de cabezas para presiones de 1 a 14  $\text{kg/cm}^2$ ; sin embargo, teniendo una presión del orden de 10  $\text{kg/cm}^2$  o mayor, se recomienda considerar la posibilidad de emplear cabezas elípticas y haciendo una comparación de costos.

Las cabezas Elípticas, se forman en matrices cuya sección transversal diametral es una elipse, tiene un costo de fabricación alto pero su espesor a igualdad de condiciones es menor, lo que no sólo disminuye la cantidad del material empleado, sino que también baja el costo de fabricación principalmente tratándose de espesores grandes. Este tipo de cabezas se usan en muchos recipientes que trabajan a presiones de 10  $\text{kg/cm}^2$  y mayores, pero se emplean en la mayoría de los re-

# TIPOS DE TAPAS

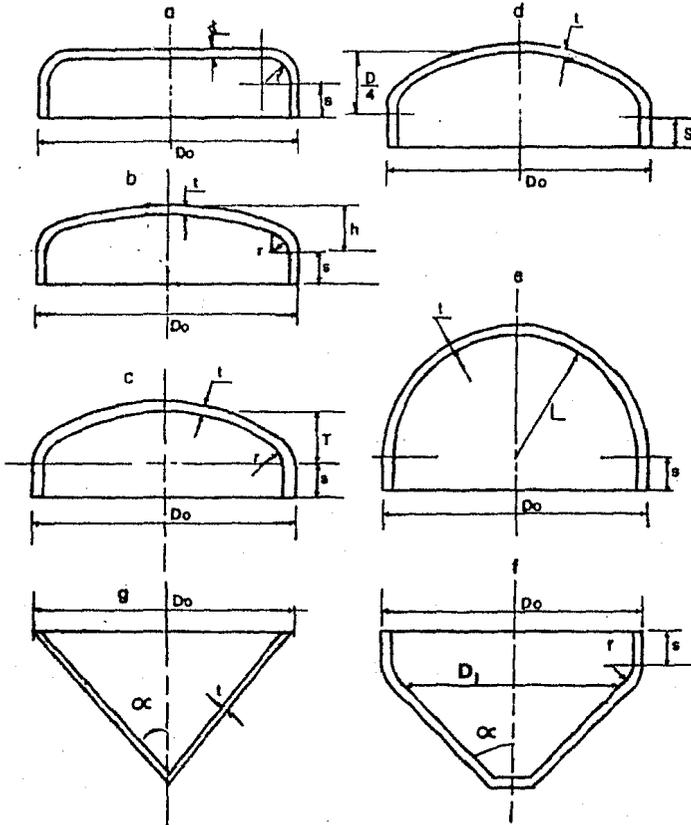


FIGURA 1.5

recipientes que trabajan a presiones superiores a los 14 kg/cm<sup>2</sup>.

Si la relación de los ejes mayor y menor de la elipse es de 2:1, la resistencia de la cabeza es aproximadamente igual a la de un cilindro sin costura con el mismo diámetro y espesor.

#### Tapas planas

Las tapas planas no soportan presiones arriba de 10 lb/in<sup>2</sup>, y se utilizan en recipientes de hasta 4 pies de diámetro.

El espesor requerido está dado por la siguiente ecuación

$$t = d (0.2 p/S)^{1/2} \quad (1-13)$$

Esta fórmula será aplicada cuando:

1. El diámetro no sea mayor de 24 in.
2.  $t_h/d$  no mayor que 0.25 y no menor de 0.05.
3. El espesor de la cabeza  $t_h$  no menor que el espesor del recipiente

El espesor también puede ser calculado por:

$$t = d (Cp/S)^{1/2} \quad (1-14)$$

$$C = t_r/t_s \quad (1-15)$$

$$C \text{ mínima} = 0.3$$

T A P A S P L A N A S

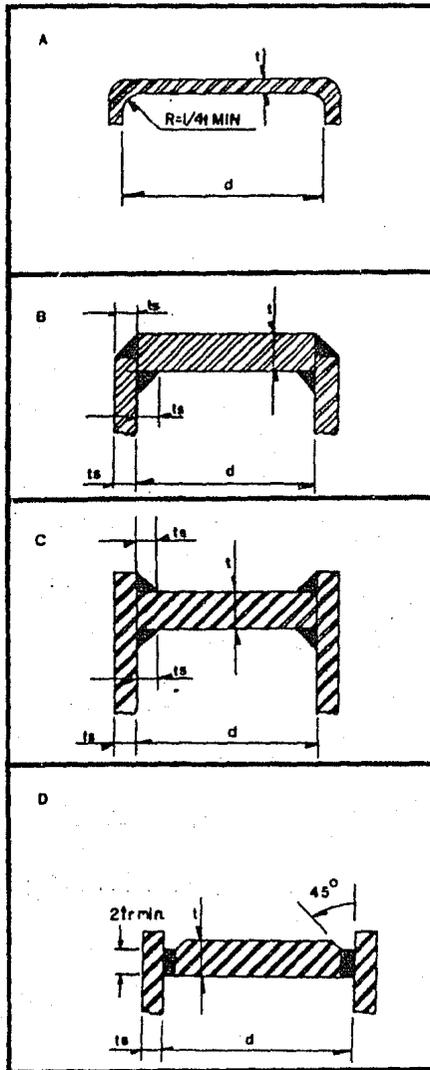


FIGURA 1.6

Si el valor de  $t_r/t_s$  es menor que uno, usado en el cálculo de  $t$ , el espesor del recipiente  $t_s$  será mantenido a lo largo de una distancia interna de la cara interior de la cabeza, igual a un mínimo de  $2 (dt_s)^{1/2}$

$p$  = presión interna o externa,  $\text{lb/in}^2$ .

$d$  = diámetro interior del recipiente, in.

$s$  = máximo esfuerzo permisible,  $\text{lb/in}^2$ .

$t$  = espesor mínimo requerido de la cabeza, excluyendo la corrosión, in.

$t_h$  = espesor comercial de la cabeza, in.

$t_r$  = espesor mínimo requerido del recipiente sin costura, in.

$t_s$  = espesor comercial del recipiente, excluyendo la corrosión, in.

### Cabezas Torisféricas

El espesor requerido para una cabeza torisférica, en la cual el radio de transición es 6% del radio de abombado puede ser determinado por la siguiente ecuación, según el código -- A.S.M.E., sección VIII, párrafo UG-32

$$t = \frac{0.885 pL}{SE - 0.1p} \quad (1-16)$$

$$p = \frac{SEt}{L 0.885 + 0.1t} \quad (1-17)$$

Para cualquier relación de radios:

$$t = \frac{p L_o M}{2SE + p(M - 0.2)} \quad (1-18)$$

$$p = \frac{2SEt}{M L_o - t(M - 0.2)} \quad (1-19)$$

Donde

$$M = 1/4((3 + (L/r)^{1/2})) \quad (1-20)$$

Los valores de M están dados en la tabla I

TABLA 1  
VALORES DEL FACTOR M

L/r	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.5	2.75	3.00	3.25	3.5
M	1.0	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.2	1.22
L/r	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
M	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.5
L/r	9.5	10.0	10.5	11.0	12.0	13.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.2/3"
M	1.52	1.54	1.56	1.58	1.6	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

" Máxima relación permitida por UG-32. Cuando L igual al diámetro exterior de la cabeza

Use valores cercanos de L/r, no es necesario interpolar

Cabezas Elípticas

Para el cálculo de los espesores de las cabezas elípticas

cas 2:1 sometidas a presión interior, utilizaremos las fórmulas dadas por el código A.S.M.E., sección VIII, párrafo UG-32: en donde los términos a usar, serán los mismos considerados en el cálculo de los cilindros agregando:

D = Diámetro interior de la ceja recta de la cabeza o -- longitud interior del eje mayor de una cabeza elíptica.

El espesor para cabezas elípticas 2:1 es:

$$t = \frac{pD}{2SE - 0.2p} + C \quad (1-21)$$

Refiréndonos al diámetro exterior:

$$t = \frac{pD_o}{2SE + 1.8p} + C \quad (1-22)$$

La relación 2:1 se refiere a la relación de ejes, la mitad del eje menor es igual a la cuarta parte del diámetro interior de la cabeza. En forma general para cualquier relación de ejes (A.S.M.E. UA-4).

$$t = \frac{pD_oK}{2SE + 2p(K - 0.1)} \quad (1-23)$$

$$p = \frac{2SE}{K D_o - 2t(K - 0.1)} \quad (1-24)$$

Donde:

$$K = 1/6 (2 + (D/2h)^2) \quad (1-25)$$

La ecuación (1-23) se le agrega el factor de corrosión.  
 Los valores de K se dan en la tabla II

TABLA II  
 VALORES DEL FACTOR K

D/2h	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
K	1.83	1.73	1.64	1.55	1.46	1.37	1.29	1.21	1.14	1.07	1.0
D/2h	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	
K	0.93	0.87	0.81	0.76	0.71	0.66	0.61	0.57	0.53	0.50	

Use valores cercanos de D/2h, no es necesario interpolar

#### Cabezas Hemisféricas

Cuando el espesor de la cabeza hemisférica no exceda  $0.365L$  o cuando  $p$  no exceda  $0.665SE$ , pueden usarse las siguientes fórmulas:

$$t = \frac{pL}{2SE - 0.2p} \quad (1-26)$$

$$p = \frac{2SEt}{L + 0.2t} \quad (1-26a)$$

### Cabezas Toricónicas

La cabeza toricónica en la cual el radio de la concavidad es mayor que el 6% del diámetro exterior del cilindro, y mayor que 3 veces el espesor de la tapa, además que la mitad del ángulo del cono exceda de  $30^\circ$ . El espesor requerido se calcula por la fórmula:

$$t = \frac{pLM}{2SE - 0.2p} \quad (1-27)$$

en el cual

$$L = \frac{D_1}{2 \cos \alpha} \quad (1-28)$$

El diámetro interior de la sección cónica  $D_1$ , de la cabeza toricónica en el punto de tangencia con el abombado, medido perpendicular al eje del cono (Ver Fig. 1.5f)

El espesor requerido para la sección cónica será determinada por la ecuación:

$$t = \frac{p L_o M}{2SE + p(M - 0.2p)} \quad (1-29)$$

### Cabezas Cónicas

El espesor requerido para una cabeza cónica o una sección cónica, que tenga la mitad del ángulo de apertura igual o menor de  $30^\circ$ , puede ser determinado por:

$$t = \frac{pD}{2 \cos \alpha (SE - 0.6p)} \quad (1-30)$$

o

$$p = \frac{2SEt \cos \alpha}{D + 1.2t \cos \alpha} \quad (1-31)$$

Una sección cónica unida a un cilindro provoca una gran concentración de esfuerzos, por lo que hay que efectuar un análisis para determinar si la junta resistirá estos esfuerzos, o será necesario un refuerzo. Para efectuar este análisis ver sección 1.3.1.

#### Nomenclatura

t = Espesor mínimo requerido de la cabeza después de formada la cabeza, in.

p = Presión de diseño, Lb/in<sup>2</sup>

D = Diámetro interior de la cabeza, in.

D<sub>o</sub> = Diámetro exterior, in.

S = Máximo esfuerzo permisible de trabajo, Lb/in<sup>2</sup>.

E = Eficiencia de la junta, adimensional.

r = Radio de Transición, in.

L<sub>o</sub> = Radio de la esfera exterior, in.

L = Radio interior de la esfera, in.

M = Factor de intensificación de esfuerzos en tapas torisféricas.

h = La mitad del eje menor de la cabeza elíptica, in.

K = Factor de intensificación de esfuerzos en tapas elípticas.

α = La mitad del ángulo de apertura en un cono.

$D_1$  = Diámetro interior de la sección cónica en una cabeza toricónica, in.

### 1.2.2. Diseño de Tapas a presión externa

Las cabezas también requieren del cálculo por presión exterior, considerándose como cabezas sujetas a presión en el lado convexo. El código A.S.M.E., párrafo UG-33; indica el método a usar para dicho cálculo

#### Cabezas Torisféricas

Para una cabeza que posee un radio de transición igual al 6 % del radio de abombado, entonces  $R \cong D_o$

1. Con  $R \cong D_o$
2. Suponer un valor de  $t$  y calcular el valor de  $A$  con la siguiente ecuación

$$A = \frac{0.125}{(R/t)} \quad (1-32)$$

3. Entrando en la figura 1.3 del material en consideración, con el valor de  $A$  y la temperatura de diseño obtenemos el valor de  $B$ .
4. La máxima presión permisible es:

$$P_a = \frac{4B}{3(R/t)} \quad (1-33)$$

Si  $P_a$  es mayor que la presión de diseño, el espesor es satis-

factorio, si no lo es suponer un espesor mayor.

### Cabezas Elípticas

El método consiste en los siguientes pasos:

1. Calcular  $R = KDo$  con la ayuda de la tabla I y con la relación  $D/2h$ .
2. Proceder de igual manera que para cabezas torisféricas, de los puntos del 2 al 4.

### Cabezas Hemisféricas

1. Para las cabezas hemisféricas  $R = Do/2$
2. Proceder igual que en las tapas torisféricas de los puntos 2 al 4.

### Cabeza Cónica

El espesor requerido para una cabeza cónica bajo presión está determinado por:

- a. Cuando el ángulo de el cono es de  $45^\circ$  o menor, el espesor será el mismo que el requerido para un cilindro de longitud igual a:

$$L = \frac{Do/2}{\text{tang } \alpha} \quad (1-34)$$

continuar como en la sección 1.1.2.

- b. Cuando el ángulo del cono es mayor de  $45^\circ$  pero menor de  $120^\circ$ , el espesor del cono es el mismo que el requerido por un cilindro, cuyo diámetro es igual al diá-

metro interior del cono y de longitud a la menor de las siguientes distancias, entre atiesadores o el diámetro interior de la sección cónica considerada.

- c. Cuando el ángulo del cono sea mayor de  $120^\circ$ , el espesor será calculado como el de una tapa plana cuyo diámetro es igual - que el diámetro interior del cono.

### 1.3. DISEÑO DE LA SECCION CONICA

#### 1.3.1. Diseño de la sección cónica a presión interna

La manera más razonable y práctica de unir dos cilindros del cascarón de una torre de dos o más diámetros, es empleando un cono. En una sección cónica a presión interior, se tienen dos tipos de esfuerzos, uno que tiende a alargar el cono y otro que tiende a aumentar la sección transversal del mismo en este caso, lo mismo que en un cilindro sujeto también a presión interior, el esfuerzo máximo es el circunferencial.

El código A.S.M.E., sección VIII, párrafo UG-32, da las siguientes fórmulas para el cálculo del espesor de pared de una sección cónica sujeta a presión interior:

$$t = \frac{pD}{2 \cos \alpha \cdot (SE - 0.6p)} + C \quad (1-35)$$

En donde:

t = Espesor mínimo del cono, in.

p = Presión de diseño, Lb/in<sup>2</sup>.

D = Diámetro interior de la sección mayor del cono, in.

$\alpha$  = Ángulo formado por la línea de centros a la pared

de la sección cónica.

S = Máximo esfuerzo permisible de trabajo del material,  
lb/in<sup>2</sup>.

E = Eficiencia de las juntas soldadas, adimensional.

C = Tolerancia por corrosión, in.

En una sección cónica unida directamente a un cascarón - cilíndrico, existen grandes concentraciones de esfuerzos en la junta cilindro-cono. El código A.S.M.E., da dos tablas para determinar si las juntas resistirán la concentración de esfuerzos, dichas tablas se utilizan cuando  $\alpha \leq 30^\circ$ .

La tabla III, se usa para la junta cilindro-cono de mayor diámetro y la IV para la de menor. La forma de utilizar estas tablas es como sigue: Se entra en la tabla con el valor de la relación p/SE y determinamos un cierto valor de  $\Delta$ , si  $\alpha < \Delta$  entonces la junta cilindro-cono no requerirá de un anillo de refuerzo. Aplicando las reglas antes expuestas y suponiendo un  $\alpha < 30^\circ$ , que se ha encontrado como el ángulo más conveniente.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(D_i - D_s)/2}{h} \quad (1-36)$$

por lo que

$$h = \frac{(D_i - D_s)/2}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (1-37)$$

Donde:

$h$  = Altura del cono, in.

$D_i$  = Diámetro interior del cilindro inferior, in.

$D_s$  = Diámetro interior del cilindro superior, in.

$\alpha$  = Angulo supuesto.

Análisis de la junta como cilindro

Entrando en las tablas III ó IV con relación  $p/SE$ , encontramos que si  $\alpha < \Delta$ , la junta no requiere anillo de refuerzo como se mencionó anteriormente; en caso que  $\alpha > \Delta$ , se requiere anillo de refuerzo teniéndose que calcular el área transversal del anillo, que está dada por la siguiente fórmula:

$$A = \frac{p(R_s)^2}{2SE} (1 - \Delta/\alpha) \operatorname{tg} \alpha \quad (1-38)$$

Siendo  $R_s = D_s/2$

Donde:

$A$  = Área transversal del anillo de refuerzo, in.

$p$  = Presión de diseño en  $\text{Lb/in}^2$

$D_s$  = Diámetro interior del cilindro analizado, in.

$\Delta$  = Angulo máximo en que la unión no necesita refuerzo.

$S$  = Máximo esfuerzo permisible de trabajo,  $\text{Lb/in}^2$

$E$  = Eficiencia de las juntas soldadas, adimensional.

$R_s$  = Radio interior del cilindro, in.

$\alpha$  = Angulo formado por el cono y su eje.

El área transversal del anillo de refuerzo, debe ser com

parada con una cierta área dada por un espesor en exceso. Este espesor de exceso es el resultado de la aproximación del espesor calculado, a uno comercial está dado por el menor valor de los siguientes:

$$t_e = (t_s - t) \quad (1-39)$$

$$t_e = (t_c - t/\cos \alpha) \quad (1-40)$$

Donde:

$t_s$  = Espesor nominal del cilindro (sin corrosión)

$t$  = Espesor mínimo del cilindro (sin corrosión)

$t_e$  = Espesor en exceso

$t_c$  = Espesor nominal del cono (sin corrosión)

Con este espesor obtenemos un parámetro  $M$ , el cual utilizamos para calcular el área en exceso y de esta forma comparar el área requerida con el área de exceso, siendo  $A$  el área requerida y  $A_e$  el área de exceso

$A > A_e$  Se requiere mayor área de refuerzo

$A_e \geq A$  No requiere área adicional

$M$  está dado por el menor de estos valores

$$M = t_s/t \cos (\alpha - \Delta) \quad (1-41)$$

$$M' = t_e \cos \alpha \cos (\alpha - \Delta)/t \quad (1-42)$$

$$A_e = M (R_s t)^{1/2} ((t_c - t/\cos \alpha) + (t_s - t)) \quad (1-43)$$

Donde:

$R_s$  = Radio interior del cilindro menor.

El área de refuerzo debe de estar contenida a una distancia de la unión menor de:

$$d = (R_s t)^{1/2} \quad (1-44)$$

quedando el centroide del área dentro de la distancia:

$$0.5 (R_s t)^{1/2} \quad (1-45)$$

TABLA III  
 VALORES DE  $\Delta$  PARA UNIONES EN EL CILINDRO  
 MAYOR PARA  $\alpha \leq 30^\circ$

P/SE	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
$\Delta$	11	15	18	21	23
P/SE	0.006	0.007	0.008	0.009	
$\Delta$	25	27	28.5	30	

TABLA IV  
 VALORES DE  $\Delta$  PARA UNIONES EN EL  
 CILINDRO MENOR PARA  $\alpha \leq 30^\circ$

P/SE	0.002	0.005	0.010	0.02
$\Delta$	4	6	9	12.5
P/SE	0.04	0.08	0.10	0.125
$\Delta$	17.5	24	27	30

### 1.3.2 Sección cónica a presión externa.

El espesor de la sección cónica, se basa en el cálculo de espesor para cilindros. Sustituyendo la relación dimensional  $Le/d_1$ , equivalente a  $L/d$  para cilindros; la relación  $do/t$  es sustituida por  $d_1/te$  para conos. El procedimiento es igual al descrito en la sección 1.1.2. y las ecuaciones de diseño son:

$$P_p = 4B/3(d_1/te) \quad (1-46)$$

$$P_p = 2AE/3(d_1/te) \quad (1-46a)$$

La ecuación (1-46a) se usará para valores del factor A que caen a la izquierda de la línea de temperatura sin tocarla.

Donde:

$Le$  = Longitud de una transición cónica, cuando se considera como un cilindro.  $Le = L/2 (1 + ds/dl)$ , in.

$d_1$  = Diámetro externo en el extremo mayor del cono, in.

$ds$  = Diámetro externo en el extremo menor del cono, in.

$L$  = Longitud axial del cono, in.

$te$  = Espesor efectivo de la cabeza o transición cónica.

$te = t \cos \alpha$ , in.

$t$  = Espesor mínimo requerido, in.

Cuando  $\alpha > 60^\circ$ , la forma cónica tiende a una cabeza plana, donde la presión interna o externa actúan de la misma forma,

por esta razón el espesor se calculará mediante las ecuaciones para cabezas planas descritas en la sección 1.2.1., el diámetro a utilizar es el diámetro en el extremo mayor del cono.

En el caso especial de un cono excentrico, aparecen dos valores del ángulo  $\alpha$ , el espesor será calculado usando cada valor de  $\alpha$ .

#### 1.4 Diseño de atiesadores.

Un recipiente a presión externa presenta un esfuerzo de compresión circunferencial inducido igual al doble del longitudinal. Por esta condición el recipiente está expuesto a un colapso debido a la inestabilidad causada por dicho esfuerzo. El colapso puede ser evitado aumentando el espesor del cilindro o con atiesadores circunferenciales, internos o externos, estos atiesadores también nos permiten economizar, ya que se puede escoger un espesor menor del requerido y atiesadores de un material más económico que el del cilindro.

Los atiesadores actúan dividiendo el largo del recipiente en subsecciones iguales en longitud. Sabiendo que la presión permisible del recipiente depende de las relaciones  $L/D_o$  y  $D_o/t$ , esta presión aumenta si la longitud disminuye o se puede mantener, si el espesor y la longitud disminuyen.

La distancia entre atiesadores no es arbitraria, existe

una distancia crítica, después de la cual puede ocurrir el colapso. Esta distancia se puede calcular con las relaciones de Southwell

$$L_c = \frac{4\pi(6)^{1/2}}{27} ((1 - \mu^2)^{1/4}) (D) (D/t)^{1/2} \quad (1-46)$$

Sustituyendo el valor del módulo de Poisson como 0.3

$$L_c = 1.11D (D/t)^{1/2} \quad (1-47)$$

El diseño del recipiente con atiesadores, se basa en la comparación del momento de inercia requerido por el atiesador y el momento de inercia proporcionado por la sección adicional. En donde el momento requerido por el atiesador debe ser igual o menor que la proporcionada por el atiesador.

La ecuación de diseño de recipientes a presión externa (1-8)

$$p = \frac{4B}{3 D_o/t} \quad (1-48)$$

se modifica para darnos:

$$B = \frac{3pD_o}{4t + (A_s/L)} \quad (1-49)$$

El momento de inercia requerido por el atiesador, puede ser calculado por una de las siguientes ecuaciones:

$$I_s = (D_o^2 L_s (t + A_s/L_s) A) / 14 \quad (1-50)$$

$$I'_s = (D_o^2 L_s (t + A_s/L_s) A) / 10.9 \quad (1-51)$$

Teniendo en consideración para el cálculo, que el primero se refiere al momento de inercia requerido por el atiesador, y el segundo al momento de inercia requerido por la com-

binación de la cinta de cuerpo y atiesador; tomándose la ecuación según el caso a tratar.

Donde:

$I_s$  = Momento requerido de inercia de la sección transversal del atiesador referida al eje neutral paralelo al eje del cuerpo,  $\text{in}^4$ .

$I'_s$  = Momento de inercia de la sección transversal combinada cuerpo y atiesador referido a un eje neutral paralelo al eje del cuerpo,  $\text{in}^4$ .

$A_s$  = Área de la sección transversal del atiesador,  $\text{in}^2$ .

$A$  = Factor determinado por la figura 1.2.

$B$  = Factor determinado.

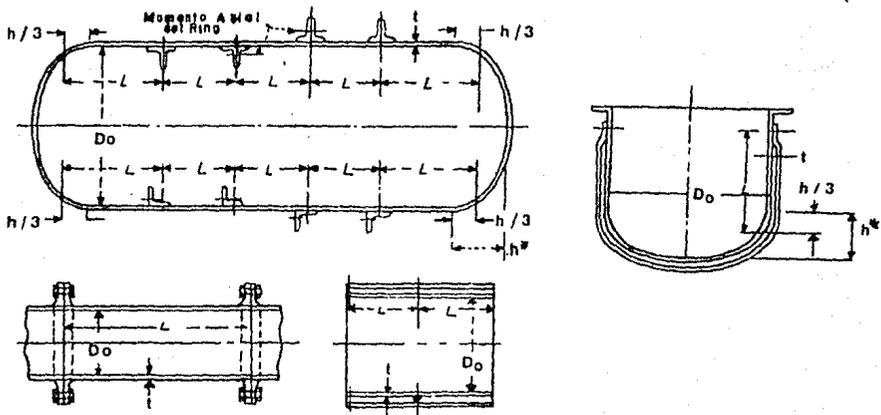
$L$  = Largo de la sección recta del recipiente,  $\text{in}$ .

$L_s$  = Distancia a línea de centros entre atiesadores. Ver figura 1.7.

El procedimiento es el siguiente:

1. Asumiendo que se tienen las dimensiones del tanque  $D_o$ ,  $L_s$ , y  $t$ , se selecciona el número de atiesadores y se obtiene el área de la sección transversal de éstos. Con la ecuación (1-49) se calcula  $B$ .
2. Entrando en la carta del material en consideración y con el valor de  $B$  calculado, obtener  $A$  de la figura 1.2.
3. Si son utilizados diferentes materiales para el recipiente y atiesadores, utilice la carta del material

### REPRESENTACION DIAGRAMATICA DE VARIABLES PARA EL DISEÑO DE RECIPIENTES SUJETOS A PRESION EXTERNA



•  $h$  = Profundidad de la cabeza.

FIGURA 17

que de el mayor valor de A.

4. Para valores de B que caigan fuera de la línea de -- resistencia del material a la temperatura de diseño, el valor de A puede ser calculado con la ecuación:

$$A = 2B/E$$

5. Calcule el valor del momento de inercia con las fórmulas (1-50) o (1-51), siendo este el momento requerido.
6. Calcule el valor del momento de inercia del perfil - propuesto como atiesador.
7. Si el momento de inercia proporcionado por el perfil propuesto es mayor o igual, que el requerido, la sección adicionada es adecuada; si por el contrario es menor, un nuevo perfil deberá ser seleccionado.

## CAPITULO II

### DETERMINACION DE LAS FUERZAS DE COMPRESION DEBIDAS A LAS CARGAS MUERTAS

## 2.0. INTRODUCCION

En el diseño de torres uno de los factores que deben tomarse en cuenta es el peso del equipo ya que este causa un esfuerzo de compresión en la base de la torre, por ello es importante conocerlo. Este peso debe incluir al cilindro en sí, el aislamiento, el fluido y los accesorios.

### 2.1. CARGAS ACTUANDO EN EL RECIPIENTE

Las cargas muertas actuando en el recipiente se determinan por el peso y colocación de los accesorios por ejemplo: bandejas, condensadores, plataformas, aislamiento, etc. Estas fuerzas pueden ser reducidas a una resultante vertical y a un momento respecto al eje del recipiente.

Los esfuerzos causados por las cargas muertas son tres:

1. Esfuerzos inducidos por el cuerpo y el aislamiento.
2. Esfuerzos inducidos por el líquido en el recipiente.
3. Esfuerzos inducidos por los accesorios del equipo.

El esfuerzo total por cargas muertas es:

$$S_{dx} = S_c + S_a + S_l + S_{acc}$$

Siendo:

$S_{dx}$  = Esfuerzo debido a las cargas muertas actuando en el eje longitudinal en un punto X, Lb/in<sup>2</sup>.

$S_c$  = Esfuerzo por el peso del cuerpo cilíndrico, Lb/in<sup>2</sup>.

$S_a$  = Esfuerzo por el aislamiento, Lb/in<sup>2</sup>.

$S_1$  = Esfuerzo por el líquido,  $\text{Lb/in}^2$

$S_{\text{acc}}$  = Esfuerzo por los accesorios,  $\text{Lb/in}^2$ .

Esfuerzo producido por el cuerpo y el aislamiento:

El peso del recipiente produce esfuerzos de compresión solamente cuando no existe excentricidad y la fuerza resultante coincide con el eje del recipiente. Usualmente la compresión debido al peso es insignificante por lo tanto no es controlante.

$$W_{\text{cx}} = (\pi/4)(D_o - D_i) \rho_s X \quad (2-1)$$

$W_{\text{cx}}$  = Peso del cascarón en el punto X, Lb

$D_o$  = Diámetro exterior del recipiente, ft.

$D_i$  = Diámetro interior del recipiente, ft.

$X$  = Distancia de la parte superior de la torre al punto en consideración, ft.

$\rho_s$  = Densidad del material del cuerpo,  $\text{Lb/ft}^3$ .

(490  $\text{Lb/ft}^3$  para el acero)

$$W_a = (\pi/12) D_a X t_a \rho_a \quad (2-2)$$

$W_a$  = Peso del aislamiento, Lb.

$D_a$  = Diámetro medio del aislamiento, ft.

$\rho_a$  = Densidad del aislamiento,  $\text{Lb/ft}^3$ .

$t_a$  = Espesor del aislamiento, in.

Los esfuerzos producidos serán:

$$S_c = \frac{\pi/4 (D_o^2 - D_i^2) X \rho_s}{\pi/4 (D_o^2 - D_i^2) 144} = \frac{X \rho_s}{144} \quad (2-3)$$

$$S_c = 3.4 X \quad \text{si } \rho_s = 490 \text{ Lb/ft}^3 \quad (2-4)$$

$$S_a = \frac{\pi D_a \rho_a X t_a}{144 D_a (t_s - C)} \quad (2-5)$$

Si  $D_a \cong D_o$

$$S_a = \frac{\rho_a X t_a}{144 (t_s - C)} \quad (2-6)$$

$t_s$  = Espesor del recipiente, in.

$C$  = Factor por corrosión, in.

Esfuerzo producido por el líquido en el recipiente.

$$S_1 = \frac{\Sigma \text{ peso del líquido}}{12 D_a (t_s - C)} \quad (2-7)$$

Esfuerzo producido por los accesorios (bandejas, plataformas, etc.).

$$S_{acc} = \frac{\Sigma \text{ peso de accesorios}}{12 D_a (t_s - C)} \quad (2-8)$$

El peso aproximado de plataformas de acero puede ser considerado de  $35 \text{ Lb/ft}^3$ . El de escaleras del mismo material se considera de  $25 \text{ Lb/ft}$ , para escaleras enrejadas y  $10 \text{ Lb/ft}$  es caleras planas. El peso de las bandejas en columnas de destilación se considera  $25 \text{ Lb/ft}^2$ .

Para recipientes que sólo consisten en el cuerpo cilíndrico, aislamiento, tapas y boquillas el esfuerzo adicional puede ser estimado como el 18% del peso del recipiente, y el esfuerzo total:

$$S_{dx} = 1.18 (3.4) X = 4.0 X \quad (2-9)$$

El peso del recipiente montado consiste en:

1. Cuerpo cilíndrico.
2. Tapas.
3. Bandejas.
4. Soportes de las bandejas.
5. Anillos de aislamiento.
6. Boquillas.
7. Faldón.
8. Base del anillo.
9. Anillo para anclas.
10. Saliente del ancla.
11. 6% del peso de los accesorios de los número del 1 al 10, por sobre peso de los platos y peso agregado por las soldaduras.
12. Aislamiento.
13. Plataformas.
14. Tuberías.
15. Escaleras.

El esfuerzo de compresión causado por el recipiente montado es:

$$S_{pm} = \frac{W}{ct} \quad (2-10)$$

$S_{pm}$  = Esfuerzo de compresión, Lb/in<sup>2</sup>

W = Peso del recipiente, Lb.

c = Circunferencia del recipiente o faldón obtenida con el diámetro medio, in.

t = Espesor del recipiente o faldón, in.

## 2.2. CALCULO RAPIDO DEL PESO DE RECIPIENTES

Puede estimarse fácilmente el peso de torres y recipientes mediante la utilización de la figura 2.1. Esta figura es para cuerpos de acero incluyendo todas las partes soldadas -- tales como entradas de hombre, boquillas con recubrimiento, partes de cubierta soldada, etc. Pero no incluye partes removibles como cubiertas de platos, los cuales tienen que ser -- adicionados separadamente si es necesario. Tampoco incluye -- las dos cabezas (superior e inferior). Para torres verticales y recipientes la longitud del faldón se adiciona al peso. Para recipientes horizontales mayores de un metro se adiciona las sillétas.

Peso aproximado de equipo

Estas correlaciones proveen de un método simplificado para la estimación del peso de equipo.

### PESO APROXIMADO DE RECIPIENTES

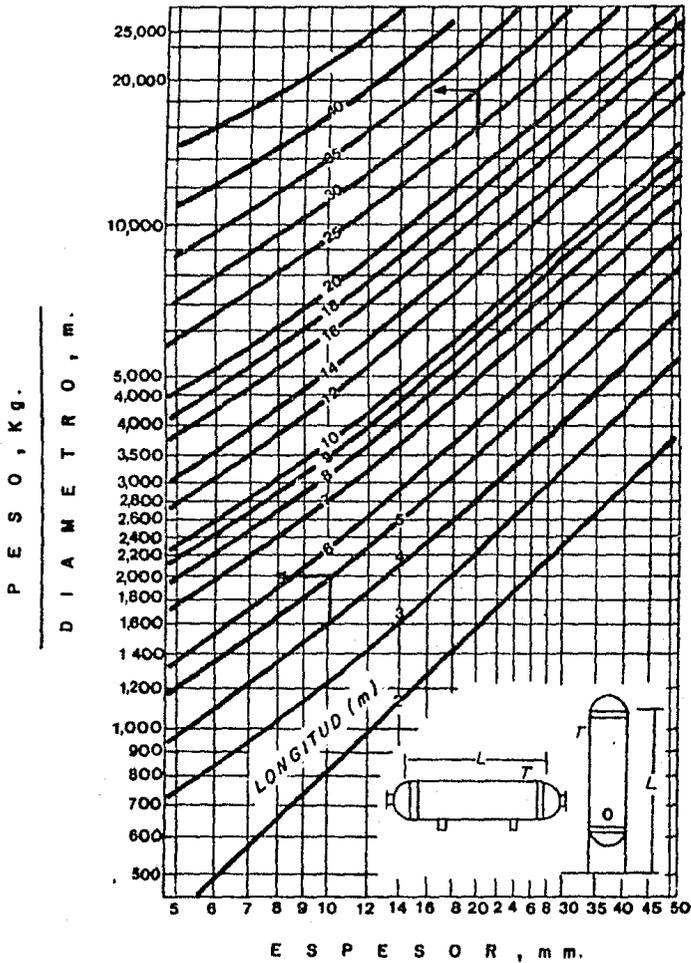


FIGURA 2.1

El peso aproximado del equipo es útil para el diseño de cimentaciones, para determinación de métodos de transporte y costos, para consideraciones de mantenimiento y una gran variedad de actividades. Se presentan correlaciones simplificadas para la determinación del peso del recipiente.

RECIPIENTES A PRESION Y TAMBORES: El peso puede ser determinado por el cálculo de E y leyendo W de la figura 2.2 -- gráfica a.

$$\ln W = 3.046 + 0.621 \ln E \quad (2-11)$$

$$E = [(L/D) + 1.82] PD^3 / (25600 + 1.2P) \quad (2-12)$$

W = Peso del recipiente en Kg. incluyendo boquillas, soporte y entradas de hombre.

L = Largo promedio del recipiente, in.

D = Diámetro nominal del recipiente, in.

P = Presión de diseño del recipiente, Lb/in<sup>2</sup>

Esta ecuación no es aplicable para tanques abiertos.

COLUMNAS: El peso de columnas o torres sin interiores - pero incluyendo faldón, entradas de hombre y boquillas puede ser determinado calculando R y leyendo W en la figura 2.3.

$$\ln W = 0.694 + 0.882 \ln R$$

$$R = [(L/D + 1.82) PD^3 / (25600 + 1.2P)] + 20L \quad (2-13)$$

W = Peso de la columna sin interiores, Kg.

D = Diámetro nominal, in.

P = Presión de diseño, Lb/in<sup>2</sup>

L = Altura de la columna, in.

CAMBIADORES DE CALOR: Para cambiadores de calor tubulares, el peso del cuerpo y del haz de tubos es calculado por separado. El cuerpo es tratado como un recipiente a presión.

$$\ln W = 4.144 + 0.537 \ln H \quad (2-14)$$

$$H = ((L_t/D_s) + 2.5) P_s D_s^3 / (25600 + 1.2 P_s) \quad (2-15)$$

W = Peso del cuerpo, Kg.

L<sub>t</sub> = Largo de los tubos, in.

D<sub>s</sub> = Diámetro nominal, in.

P<sub>s</sub> = Presión de diseño, Lb/in<sup>2</sup>

La ecuación (2-14), (Figura 2.2 gráfica b) es aplicable a todas las cabezas flotantes incluyendo AKT (kettle), pero no es aplicable al tipo de tubos en U.

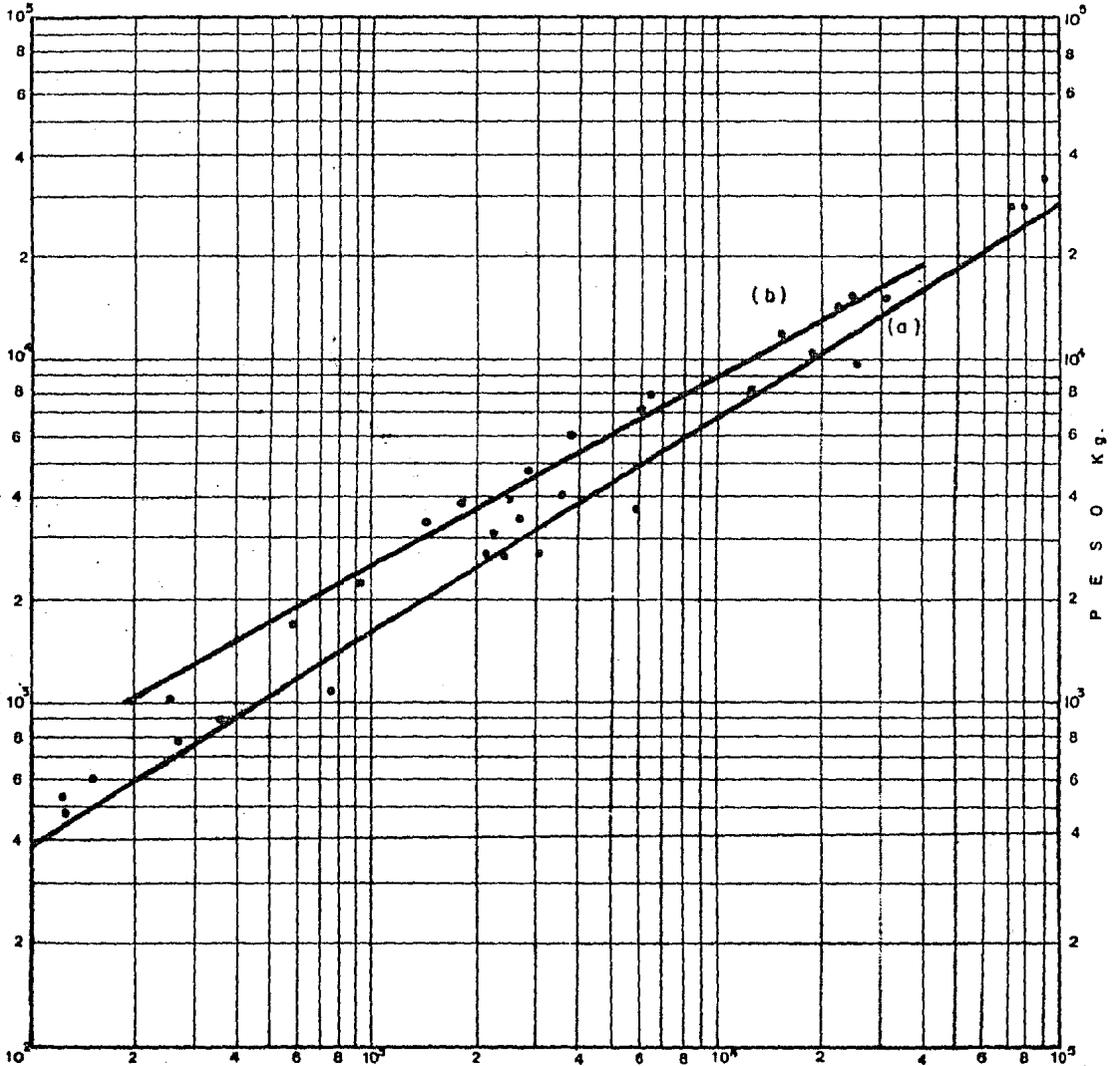
HAZ DE TUBOS: El peso es determinado con la figura 2.4 gráfica a y la ecuación (2-16), la cual es aplicable para acero al carbón, aleaciones de acero y aleaciones cupro-níquel. La ecuación (2-16) es válida cuando la diferencia de presión entre el cuerpo y los tubos no exceda 350 psig y el diámetro del cuerpo no sea mayor de 44 in.

$$\ln W = 3.630 + 0.1914 \ln A \quad (2-16)$$

W = Peso del haz de tubos, Kg.

A = Area de transferencia de calor, m<sup>2</sup>.

FUNCION DE PESOS PARA RECIPIENTES A  
PRESION Y CAMBIADORES DE CALOR



$$H = ((L/D) + 2.5) P_s D_s^3 / (25600 + 1.2 P_s)$$

$$E = ((L/D) + 1.82) P D^3 / (25600 + 1.2 P)$$

FIGURA 2.2



# AREA DE TRANSFERENCIA

(m<sup>2</sup>)

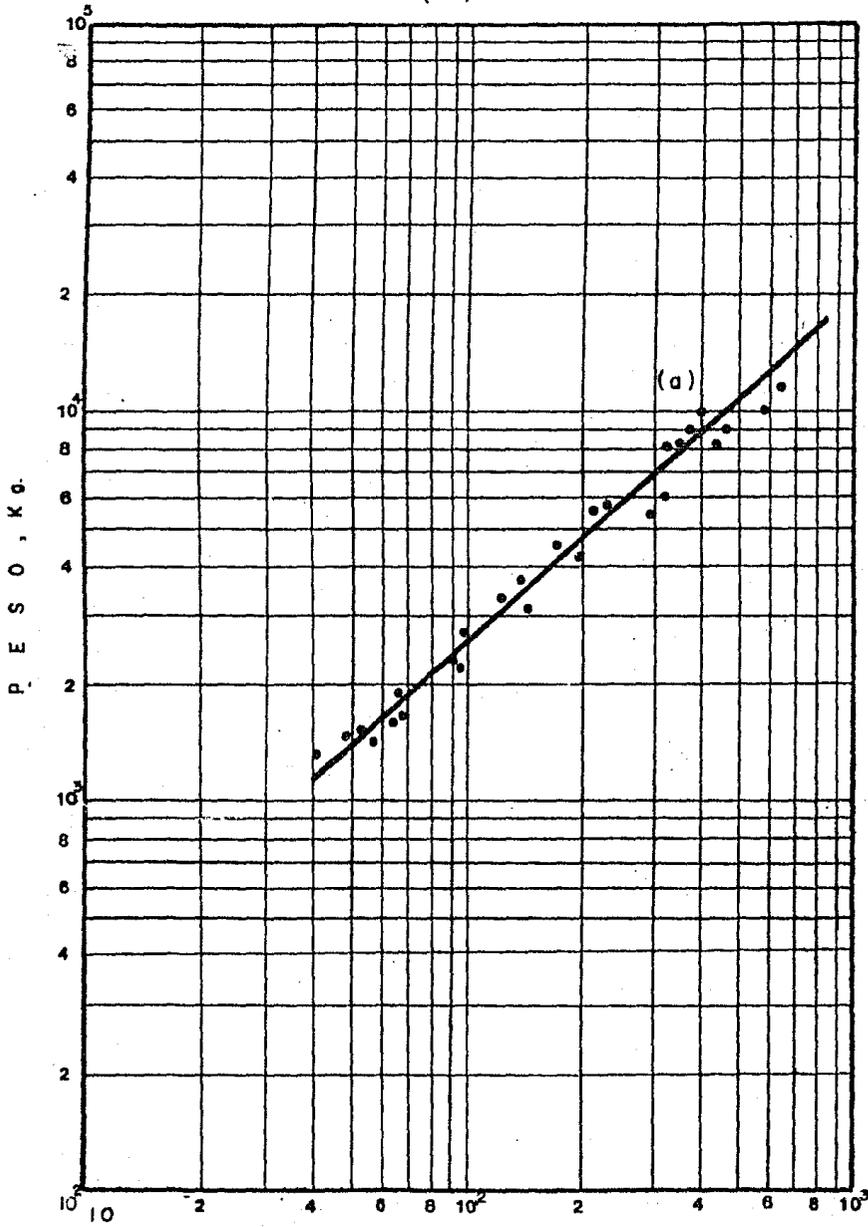


FIGURA 2.4



D. I. REC.PTE.	ESPESOR CASCARON															D. I. REC.PTE.
	1 1/8"	1 3/16"	1 1/4"	1 5/16"	1 3/8"	1 7/16"	1 1/2"	1 9/16"	1 5/8"	1 11/16"	1 3/4"	1 13/16"	1 7/8"	1 15/16"	2"	
1' 6"	239	253	267	281	296	311	325	339	354	369	384	399	415	429	444	1' 6"
2' 0"	314	332	350	369	388	406	425	443	462	481	501	519	538	558	577	2' 0"
2' 6"	389	411	434	456	479	502	525	548	571	594	617	640	663	687	710	2' 6"
3' 0"	464	490	517	544	571	598	625	652	679	706	734	761	788	816	844	3' 0"
3' 6"	539	569	600	631	662	694	725	756	787	819	850	882	913	946	977	3' 6"
4' 0"	614	648	684	719	754	790	825	860	896	931	967	1003	1038	1075	1110	4' 0"
4' 6"	689	728	767	806	846	885	925	964	1004	1044	1084	1123	1163	1204	1243	4' 6"
5' 0"	764	807	850	894	937	981	1025	1068	1112	1156	1200	1244	1288	1333	1377	5' 0"
5' 6"	839	886	934	981	1029	1077	1125	1172	1220	1269	1317	1365	1413	1462	1510	5' 6"
6' 0"	914	965	1017	1069	1121	1173	1225	1277	1329	1381	1434	1486	1538	1591	1643	6' 0"
6' 6"	989	1044	1100	1156	1212	1269	1325	1381	1437	1494	1550	1607	1663	1720	1777	6' 6"
7' 0"	1064	1123	1184	1244	1304	1364	1425	1485	1545	1606	1667	1727	1788	1850	1910	7' 0"
7' 6"	1139	1202	1267	1331	1396	1460	1525	1589	1654	1719	1784	1848	1913	1979	2043	7' 6"
8' 0"	1213	1282	1350	1419	1487	1556	1625	1693	1762	1831	1900	1969	2038	2108	2177	8' 0"
8' 6"	1288	1361	1434	1508	1579	1652	1725	1797	1870	1944	2017	2090	2163	2237	2310	8' 6"
9' 0"	1363	1440	1517	1594	1671	1748	1825	1901	1979	2056	2133	2211	2288	2366	2443	9' 0"
9' 6"	1438	1519	1600	1681	1762	1843	1925	2006	2087	2169	2250	2331	2413	2495	2576	9' 6"
10' 0"	1513	1598	1683	1768	1854	1939	2025	2110	2195	2281	2367	2462	2538	2624	2710	10' 0"
10' 6"	1588	1677	1767	1858	1946	2035	2125	2214	2304	2394	2483	2573	2663	2753	2843	10' 6"
11' 0"	1663	1757	1850	1943	2037	2131	2225	2318	2412	2506	2600	2694	2788	2883	2976	11' 0"
11' 6"	1738	1836	1933	2031	2129	2227	2325	2422	2520	2618	2717	2815	2913	3012	3110	11' 6"
12' 0"	1813	1915	2017	2118	2220	2323	2425	2526	2629	2731	2833	2935	3038	3141	3243	12' 0"
12' 6"	1888	1994	2100	2206	2312	2418	2524	2630	2737	2843	2950	3056	3163	3270	3376	12' 6"
13' 0"	1963	2073	2183	2293	2404	2514	2624	2735	2846	2956	3067	3177	3288	3399	3510	13' 0"
13' 6"	2038	2152	2267	2381	2495	2610	2724	2839	2953	3068	3183	3298	3413	3528	3643	13' 6"
14' 0"	2113	2231	2350	2468	2587	2706	2824	2943	3062	3181	3300	3419	3537	3657	3776	14' 0"
14' 6"	2188	2311	2433	2556	2679	2802	2924	3047	3170	3293	3417	3540	3662	3787	3909	14' 6"
15' 0"	2263	2390	2517	2643	2770	2897	3024	3151	3278	3406	3533	3660	3787	3916	4043	15' 0"
15' 6"	2338	2469	2600	2731	2862	2993	3124	3255	3387	3518	3650	3781	3912	4045	4176	15' 6"
16' 0"	2413	2548	2683	2818	2954	3089	3224	3360	3495	3631	3766	3902	4038	4174	4310	16' 0"
<b>SOBREPESO</b>	4%															<b>SOBREPESO</b>

PESO DE CASCARONES METALICOS CILINDRICOS  
(#/PIE LINEAL) INCLUYENDO SOBREPESO

D.E. CABEZA	ESPESOR MINIMO DE LA CABEZA														D.E. CABEZA		
	3/16"	1/4"	5/16"	3/8"	7/16"	1/2"	9/16"	5/8"	11/16"	3/4"	13/16"	7/8"	15/16"	1"		1 1/16"	
1' 6"	50	65	80	100	115	130	150	170	185	205	230	250	280	280	300	1' 5"	
2' 0"	110	140	170	200	230	260	290	320	350	370	400	430	490	560	590	2' 0"	
2' 6"	160	200	250	290	330	370	420	460	510	550	590	640	710	810	860	2' 6"	
3' 0"	220	280	340	400	460	520	580	640	700	760	810	870	970	1110	1160	3' 0"	
3' 6"	300	370	450	530	600	680	760	840	920	1000	1060	1140	1270	1450	1520	3' 6"	
4' 0"	380	470	570	670	770	870	970	1070	1170	1280	1380	1450	1610	1850	1920	4' 0"	
4' 6"	500	630	750	880	1010	1140	1270	1400	1540	1670	1770	1900	2100	2400	2500	4' 6"	
5' 0"	600	760	910	1070	1220	1380	1540	1700	1860	2020	2180	2300	2530	2850	3000	5' 0"	
5' 6"	720	900	1090	1270	1450	1640	1830	2010	2200	2400	2580	2800	2980	3400	3600	5' 6"	
6' 0"	850	1060	1270	1490	1700	1920	2150	2370	2600	2820	3000	3200	3500	3950	4150	6' 0"	
6' 6"	980	1230	1470	1730	1960	2230	2500	2750	3000	3260	3480	3700	4050	4600	4800	6' 6"	
7' 0"	1120	1410	1700	1980	2250	2550	2850	3150	3450	3750	3960	4250	4650	5300	5500	7' 0"	
7' 6"	1280	1610	1930	2280	2600	2950	3250	3600	3900	4280	4600	4880	5250	5950	6250	7' 6"	
8' 0"	1440	1810	2200	2550	2900	3300	3650	4050	4400	4800	5050	5450	5950	6700	7050	8' 0"	
8' 6"	1620	2050	2450	2860	3300	3700	4100	4500	5000	5350	5700	6100	6650	7500	7900	8' 6"	
9' 0"	1800	2250	2750	3200	3650	4100	4600	5050	5600	5950	6350	6800	7400	8350	8750	9' 0"	
9' 6"	2000	2500	3000	3550	4050	4580	5050	5600	6100	6600	7000	7500	8150	9250	9700	9' 6"	
10' 0"	2200	2750	3350	3900	4450	5000	5600	6150	6700	7300	7750	8300	9000	10200	10600	10' 0"	
10' 6"	2420	3050	3650	4250	4800	5300	5900	6500	7100	7750	8000	8450	9100	9850	11100	11700	10' 6"
11' 0"	2650	3300	4000	4650	5350	6000	6700	7400	8050	8750	9250	9900	10700	12200	12700	11' 0"	
11' 6"	2900	3600	4350	5050	5800	6550	7300	8000	8750	9500	10100	10800	11700	13200	13800	11' 6"	
12' 0"	3150	3950	4700	5500	6350	7100	7900	8700	9450	10300	10900	11700	12600	14300	15000	12' 0"	
12' 6"	3400	4250	5100	5950	6800	7650	8500	9400	10300	11200	11800	12700	13700	15400	16200	12' 6"	
13' 0"	3650	4550	5500	6400	7350	8250	9200	10300	11100	12000	12700	13700	14700	16700	17400	13' 0"	
13' 6"	3900	4900	5900	6900	7900	8900	9900	10900	11900	13000	13800	14700	15800	17900	18700	13' 6"	
14' 0"	4200	5250	6350	7400	8450	9550	10600	11700	12800	13900	14700	15800	17000	18200	20200	14' 0"	
14' 6"	4500	5650	6750	7950	9050	10200	11400	12600	13700	14900	15700	16800	18100	20500	21500	14' 6"	
15' 0"	4800	6050	7250	8450	9650	10900	12100	13400	14600	15800	16800	18000	19400	21800	22900	15' 0"	
15' 6"	5250	6550	7850	9200	10500	11800	13100	14500	15800	17200	18200	19500	21000	23700	24800	15' 6"	
16' 0"	5650	6950	8350	9750	11200	12600	14000	15400	16900	18300	19400	20700	22500	25100	26300	16' 0"	
SOBREPESO	7%											5%		4%		SOBREPESO	

PESO DE DOS CABEZAS INCLUYENDO SOBREPESO

D. E. CABEZA	ESPESOR MINIMO DE LA CABEZA															D. E. CABEZA
	11/8"	12/16"	11/4"	13/16"	13/8"	17/16"	11/2"	19/16"	16/8"	111/16"	13/4"	113/16"	17/8"	118/16"	2"	
1' 6"	330	340	355	370	385	400	420	435	455	470	485	500	520	540	560	1' 6"
2' 0"	430	470	710	750	790	830	870	910	950	990	1030	1080	1120	1170	1300	2' 0"
2' 6"	910	960	1010	1070	1120	1180	1240	1290	1350	1410	1470	1530	1590	1650	1800	2' 6"
3' 0"	1240	1310	1380	1450	1520	1600	1680	1750	1830	1910	1990	2070	2150	2240	2450	3' 0"
3' 6"	1510	1710	1800	1890	1980	2080	2180	2280	2380	2480	2580	2680	2780	2880	3200	3' 6"
4' 0"	2040	2160	2280	2380	2500	2610	2740	2860	2980	3110	3220	3350	3490	3620	4010	4' 0"
4' 6"	2580	2800	2930	3100	3250	3400	3550	3700	3850	4000	4150	4300	4500	4650	5150	4' 6"
5' 0"	3200	3350	3550	3700	3900	4100	4250	4450	4600	4800	5000	5200	5400	5600	6150	5' 0"
5' 6"	3900	4000	4200	4400	4600	4800	5000	5250	5450	5700	5900	6100	6350	6550	7250	5' 6"
6' 0"	4400	4550	4900	5150	5400	5600	5850	6100	6400	6600	6900	7100	7400	7650	8450	6' 0"
6' 6"	5100	5350	5550	5900	6200	6500	6750	7050	7350	7600	7900	8200	8500	8800	9700	6' 6"
7' 0"	5800	6150	6450	6750	7100	7400	7750	8050	8400	8700	9050	9350	9700	10100	11100	7' 0"
7' 6"	6800	7000	7300	7650	8000	8400	8750	9100	9500	9850	10200	10600	11000	11400	12500	7' 6"
8' 0"	7400	7850	8200	8600	9000	9500	9900	10300	10700	11100	11500	11900	12400	12900	14100	8' 0"
8' 6"	8300	8800	9200	9650	10100	10600	11000	11400	11900	12400	12800	13300	13800	14300	15700	8' 6"
9' 0"	9250	9750	10200	10700	11200	11700	12200	12700	13200	13700	14300	14800	15300	15800	17400	9' 0"
9' 6"	10200	10800	11300	11800	12400	12900	13500	14000	14600	15200	15700	16300	16800	17500	19200	9' 6"
10' 0"	11200	11800	12400	13000	13600	14200	14800	15500	16100	16700	17300	17900	18500	19200	21100	10' 0"
10' 6"	12300	13000	13600	14300	14900	15600	16200	16900	17600	18200	18900	19600	20300	21000	23000	10' 6"
11' 0"	13400	14100	14800	15500	16200	17000	17700	18400	19200	19900	20800	21400	22100	22900	25000	11' 0"
11' 6"	14600	15400	16100	16900	17700	18500	19200	20000	20800	21600	22400	23200	24000	24800	27000	11' 6"
12' 0"	15800	16500	17300	18100	19000	20000	20800	21700	22600	23400	24300	25100	26000	26900	29000	12' 0"
12' 6"	17100	18000	18900	19800	20700	21600	22500	23400	24300	25200	26100	27000	28000	29000	31700	12' 6"
13' 0"	18400	19400	20400	21300	22300	23200	24200	25200	26200	27200	28200	29200	30200	31200	34000	13' 0"
13' 6"	19700	20800	21800	22900	23900	25000	26000	27100	28100	29200	30200	31300	32400	33500	36500	13' 6"
14' 0"	21200	22400	23400	24500	25600	26700	27900	29000	30100	31200	32400	33500	34700	35900	39400	14' 0"
14' 6"	22400	23600	24800	26000	27200	28400	29600	30800	32000	33400	34800	36200	37600	39000	42000	14' 6"
15' 0"	24200	25400	26600	27900	29200	30500	31800	33000	34400	35800	37200	38600	40000	41500	44500	15' 0"
15' 6"	25200	27500	28900	30500	31700	33000	34400	35700	37200	38600	40000	41400	42800	44300	47900	15' 6"
16' 0"	27200	29500	30800	32100	33500	35100	36100	37000	38400	40000	41500	43000	44500	46000	51400	16' 0"

4%

PESO DE DOS CABEZAS INCLUYENDO SOBREPESO

DIAM. INT. DE LA CABEZA	ESPESOR MINIMO DE LA CABEZA															DIAM. INT. DE LA CABEZA
	3/16"	1/4"	5/16"	3/8"	7/16"	1/2"	9/16"	5/8"	11/16"	3/4"	13/16"	7/8"	15/16"	1"	1 1/16"	
1' 6"	70	80	100	120	130	150	170	180	200	220	230	240	260	280	290	1' 6"
2' 0"	120	150	180	210	240	270	300	340	370	400	420	450	490	550	580	2' 0"
2' 6"	180	230	280	320	370	420	460	510	560	610	640	690	740	830	870	2' 6"
3' 0"	260	320	380	450	520	590	660	720	790	860	910	980	1040	1180	1230	3' 0"
3' 6"	350	440	530	610	700	790	880	970	1060	1150	1220	1310	1400	1580	1660	3' 6"
4' 0"	450	570	690	800	910	1020	1140	1260	1380	1490	1580	1700	1810	2050	2140	4' 0"
4' 6"	600	750	900	1060	1210	1380	1510	1660	1830	1980	2100	2240	2400	2730	2840	4' 6"
5' 0"	740	920	1100	1290	1480	1660	1850	2040	2220	2430	2550	2750	2950	3310	3450	5' 0"
5' 6"	880	1100	1330	1550	1770	2000	2220	2450	2700	2900	3070	3300	3500	3970	4150	5' 6"
6' 0"	1040	1310	1570	1830	2100	2360	2650	2900	3150	3400	3550	3900	4150	4700	4900	6' 0"
6' 6"	1220	1520	1820	2130	2450	2750	3050	3400	3700	4000	4200	4550	4850	5450	5700	6' 6"
7' 0"	1400	1750	2100	2450	2820	3200	3550	3900	4250	4600	4900	5200	5600	6300	6600	7' 0"
7' 6"	1600	2000	2400	2820	3200	3650	4050	4450	4850	5250	5550	6000	6400	7200	7500	7' 6"
8' 0"	1820	2270	2750	3200	3700	4100	4600	5000	5500	6000	6300	6800	7200	8100	8500	8' 0"
8' 6"	2050	2550	3100	3600	4100	4600	5100	5700	6200	6700	7100	7600	8100	9200	9800	8' 6"
9' 0"	2300	2850	3400	4000	4600	5200	5700	6300	6900	7500	7900	8500	9100	10200	10700	9' 0"
9' 6"	2500	3150	3800	4400	5050	5700	6400	7000	7600	8300	8700	9400	10000	11300	11800	9' 6"
10' 0"	2800	3500	4200	4900	5600	6300	7100	7800	8500	9200	9700	10400	11000	12500	13100	10' 0"
10' 6"	3100	3900	4700	5400	6200	7000	7800	8600	9300	10100	10700	11500	12300	13800	14400	10' 6"
11' 0"	3400	4250	5100	6000	6700	7700	8500	9300	10100	11000	11700	12600	13400	15100	15800	11' 0"
11' 6"	3700	4600	5600	6500	7400	8300	9300	10200	11100	12000	12800	13700	14600	16400	17200	11' 6"
12' 0"	4000	5000	6000	7000	8100	9100	10100	11100	12100	13100	13900	14900	15900	17900	18700	12' 0"
12' 6"	4400	5500	6500	7600	8700	9800	10900	12000	13100	14200	15000	16100	17200	19400	20200	12' 6"
13' 0"	4700	5900	7100	8300	9400	10600	11800	13000	14200	15400	16300	17400	18600	21000	21900	13' 0"
13' 6"	5000	6300	7600	8900	10100	11400	12700	14000	15300	16600	17500	18800	20000	22500	23800	13' 6"
14' 0"	5400	6800	8200	9600	10900	12300	13700	15000	16400	17800	18800	20200	21400	24200	25300	14' 0"
14' 6"	5800	7300	8800	10200	11700	13200	14600	16100	17600	19100	20100	21600	23100	25900	27000	14' 6"
15' 0"	6200	7900	9300	10900	12500	14000	15600	17200	18700	20300	21500	23100	24800	27700	29000	15' 0"
15' 6"	6700	8400	10100	11800	13500	15200	17000	18700	20400	22100	23300	25000	26700	30000	31400	15' 6"
16' 0"	7200	9000	10800	12600	14400	16200	18000	19800	21600	23400	24800	26600	29400	31900	33400	16' 0"
SOBREPESO	7%							8%					4%			SOBREPESO

PESO PARA DOS CABEZAS INCLUYENDO SOBREPESO

DIAM. INT. DE LA CABEZA	ESPESOR MINIMO DE LA CABEZA															DIAM. INT. DE LA CABEZA
	1 1/8"	1 3/16"	1 1/4"	1 5/16"	1 3/8"	1 7/16"	1 1/2"	1 9/16"	1 5/8"	1 11/16"	1 3/4"	1 13/16"	1 7/8"	1 15/16"	2"	
1' 6"	300	320	340	350	370	390	400	420	430	450	470	490	500	520	550	1' 6"
2' 0"	610	640	680	710	740	770	810	840	880	920	960	980	1010	1040	1160	2' 0"
2' 6"	920	970	1020	1070	1120	1170	1220	1270	1320	1370	1420	1470	1530	1580	1750	2' 6"
3' 0"	1300	1370	1440	1510	1580	1650	1720	1790	1860	1930	2000	2070	2150	2220	2450	3' 0"
3' 6"	1750	1840	1930	2020	2120	2210	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3250	3' 6"
4' 0"	2260	2380	2490	2600	2740	2850	2970	3100	3200	3330	3450	3570	3700	3830	4200	4' 0"
4' 6"	2990	3140	3300	3460	3620	3780	3920	4100	4290	4400	4580	4730	4900	5050	5550	4' 6"
5' 0"	3650	3840	4080	4200	4400	4590	4780	4980	5170	5360	5550	5750	5950	6150	6700	5' 0"
5' 6"	4400	4600	4850	5050	5300	5500	5750	5950	6200	6450	6650	6900	7100	7350	8000	5' 6"
6' 0"	5200	5400	5700	6000	6250	6500	6750	7050	7300	7600	7900	8100	8400	8700	9500	6' 0"
6' 6"	6000	6300	6650	6950	7250	7600	7900	8200	8500	8900	9200	9500	9800	10100	11200	6' 6"
7' 0"	7000	7300	7700	8000	8400	8700	9100	9500	9800	10200	10500	10900	11200	11600	12700	7' 0"
7' 6"	7900	8300	8700	9100	9500	10000	10400	10800	11200	11600	12000	12400	12900	13300	14500	7' 6"
8' 0"	9000	9500	9900	10300	10800	11300	11700	12200	12700	13100	13600	14000	14500	15000	15400	8' 0"
8' 6"	10100	10600	11100	11600	12100	12600	13200	13700	14200	14700	15300	15800	16300	16900	18400	8' 6"
9' 0"	11300	11800	12400	13000	13600	14200	14700	15300	15900	16400	17000	17600	18200	18800	20600	9' 0"
9' 6"	12400	13100	13700	14300	15000	15600	16200	16900	17500	18200	18800	19500	20100	20800	22500	9' 6"
10' 0"	13900	14500	15200	15900	16600	17300	18000	18800	19500	20200	20900	21600	22300	23100	25200	10' 0"
10' 6"	15200	16000	16700	17500	18300	19100	19900	20800	21400	22200	23000	23800	24600	25400	27800	10' 6"
11' 0"	16700	17500	18400	19200	20100	20900	21800	22600	23500	24400	25200	26000	26900	27700	30300	11' 0"
11' 6"	18100	19000	20000	20900	21600	22700	23600	24600	25500	26400	27400	28300	29200	30200	33000	11' 6"
12' 0"	19700	20700	21700	22700	23700	24700	25700	26700	27700	28700	29700	30700	31800	32800	35800	12' 0"
12' 6"	21300	22400	23500	24600	25700	26800	27900	29000	30100	31200	32200	33300	34400	35600	38900	12' 6"
13' 0"	23100	24300	25400	26600	27800	29000	30200	31300	32500	33700	34800	36000	37200	38400	41900	13' 0"
13' 6"	24800	26100	27400	28800	29900	31200	32400	33600	34900	36200	37500	38700	40000	41300	45100	13' 6"
14' 0"	26600	28100	29400	30800	32000	33500	34800	36200	37500	38900	40200	41500	42900	44300	48500	14' 0"
14' 6"	28600	30000	31400	32900	34400	35800	37200	38700	40200	41600	43100	44500	46000	47600	51800	14' 6"
15' 0"	30600	32100	33600	35100	36700	38200	39800	41300	42800	44400	46000	47600	49100	50700	55300	15' 0"
15' 6"	33100	34800	36400	38100	39800	41800	42200	44900	46500	48200	49900	51500	53200	55000	60000	15' 6"
16' 0"	35200	37000	38800	40800	42300	44100	45600	47600	49500	51300	53000	54800	56500	58400	63000	16' 0"
SOBREPESO	4%															SOBREPESO

PESO PARA DOS CABEZAS INCLUYENDO SOBREPESO

PESO DE BOQUILLAS EN #

DIAMETRO		1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"	18"	20"	24"
150#	TIPO I	8	9	12	16	20	30	65	90	130	185	195	215	250	300	400
	TIPO II	5	6	8	12	15	20	40	55	65	95	110	170	185	220	265
300#	TIPO I	8	14	15	20	30	50	95	130	190	255	310	370	430	510	730
	TIPO II	5	10	12	16	20	30	55	80	100	155	190	300	365	465	660
600#	TIPO I	9	14	17	25	30	55	140	190	305	375	425	500	580	750	980
	TIPO II	7	12	14	20	25	45	105	145	215	260	365	540	600	740	1050

PESO APROX. 2 SILLETAS EN #

(DIAM. = PIES)

2"	120	5 1/2"	600	9"	1850
2 1/2"	150	6"	650	9 1/2"	1950
3"	180	6 1/2"	950	10"	2050
3 1/2"	210	7"	1050	10 1/2"	2150
4"	250	7 1/2"	1150	11"	2300
4 1/2"	500	8"	1550	11 1/2"	2400
5"	550	8 1/2"	1700	12"	2550

**CAPITULO III**  
**FUERZAS CAUSADAS POR LA ACCION DEL VIENTO Y**  
**SISMO**

### 3.0 INTRODUCCION

En este capítulo se trataran los efectos que causan el viento y los sismos en las torres y su influencia en el diseño. Considerando que es difícil que ambos fenómenos se presenten al mismo tiempo se calcula el equipo para el que presente mayor insidencia en la zona de instalación.

#### 3.1 DISEÑO DEL RECIPIENTE POR EFECTOS DE VIENTO

##### 3.1.1 Método diferencial para el cálculo de los efectos de viento.

La exposición de un recipiente al viento, produce esfuerzos en el cuerpo de acuerdo con el área expuesta y con la intensidad de las fuerzas que actúan sobre ésta. Suelen presentarse problemas de estabilidad dinámica, consistentes en desplazamientos producidos al actuar el viento sobre la estructura, llegando a producir estados críticos.

Por lo tanto, en el análisis de viento se determinan cargas que debe soportar el cascarón con un espesor determinado, de tal manera que resista los esfuerzos y las deformaciones.

Para lo anterior, se parte de la velocidad del viento -- que actúa a una altura de 10 m. sobre el nivel del terreno, -- llamada velocidad básica, dependiendo su valor de:

- La localización geográfica.
- Las características topográficas en las cercanías de la estructura.
- El tiempo de recurrencia de la intensidad del viento para la cual se diseña.
- La velocidad regional estimada.

Debido a que la velocidad del viento va variando con la altura, la velocidad se supondrá en incrementos de variación a cada 10 m., a partir de la línea de base de la estructura; y así, le corresponderá una velocidad de diseño a cada elevación determinada.

La velocidad básica del viento " $V_b$ " se obtiene a partir de la velocidad regional, de acuerdo con la expresión:

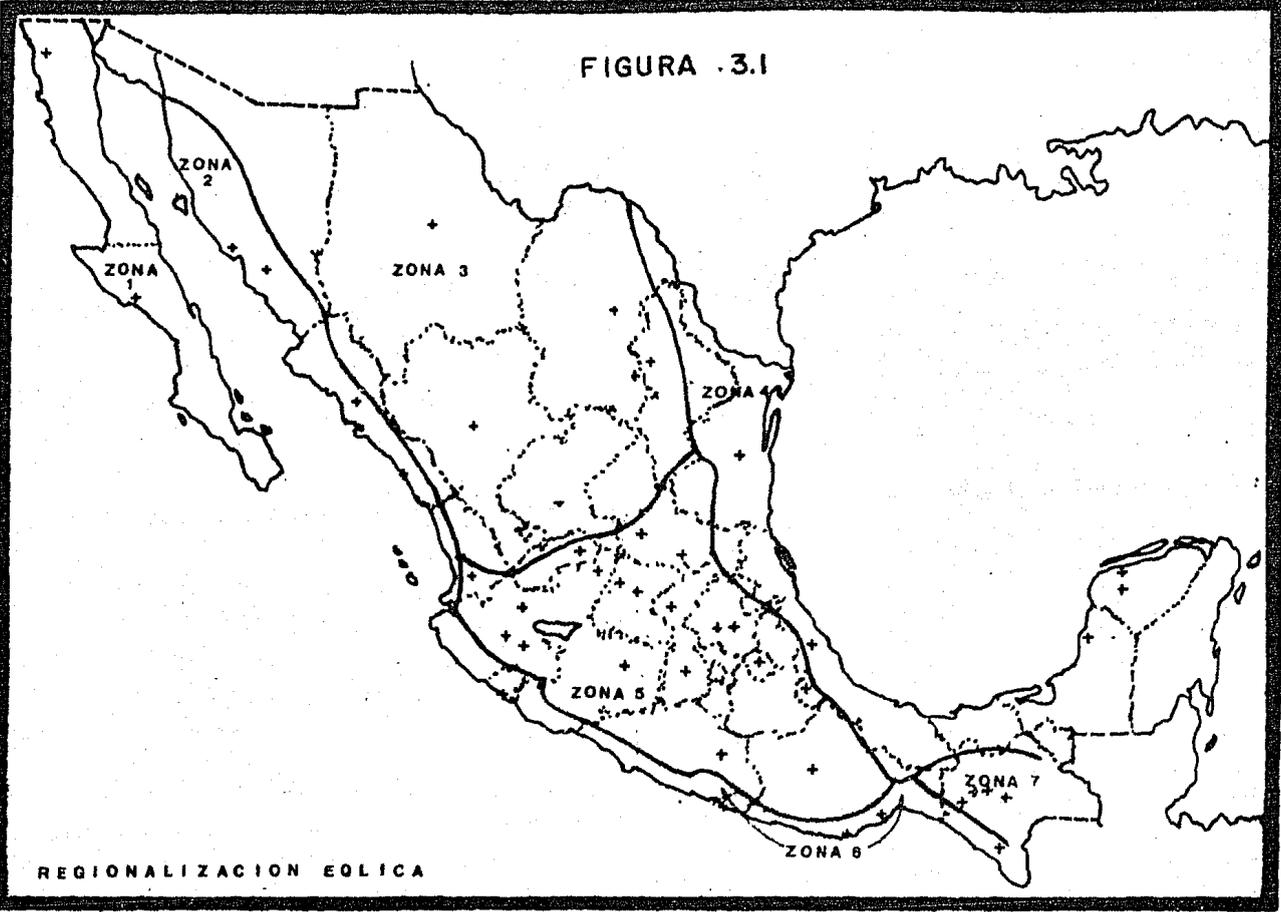
$$V_b = KV_r \quad (3-1)$$

donde K es un factor que depende de la topografía del sitio y se tomará conforme a la tabla V.

$V_b$  = Velocidad básica, Km/h.

$V_r$  = Velocidad regional, Km/h. (Se adoptará para la velocidad regional la definida por la figura 3.1 y por las tablas VI y VII).

FIGURA 3.1



REGIONALIZACION EOLICA

TABLA V FACTOR DE TOPOGRAFIA

TOPOGRAFIA	FACTOR K
a. Muy accidentada, como en el centro de ciudades importantes	0.70
b. Zonas arboladas, lomeríos, barrios residenciales o industriales	0.80
c. Campo abierto, terreno plano	1.0
d. Promotorios	1.2

TABLA VI VELOCIDADES REGIONALES

ZONA EOLICA (fig.31)	VELOCIDAD REGIONAL (Km/hora)	
	ESTRUCTURAS GRUPO B ( $T_R = 50$ años)	ESTRUCTURAS GRUPO A ( $T_R = 200$ años)
1	90	105
2	125	150
3	115	125
4	160	185
5	80	90
6	150	170
7	80	95

Las leyes de variación de la velocidad con la altura, se basan en observaciones en lugares con diversas configuraciones topográficas y ante vientos de distintas velocidades. Para simplificar las leyes de variación propuestas, se hacen depender únicamente de la topografía; y se supone, que la velocidad varía de acuerdo con la relación:

$$V_z = V_b (Z/10)^\alpha \quad (3-2)$$

En la cual:

$V_z$  = Velocidad a una altura  $Z$  sobre el terreno, Km/h.

$V_b$  = Velocidad básica, Km/h.

$Z$  = Altura sobre el terreno, m.

$\alpha$  = Coeficiente que depende de la topografía en la vecindad de la estructura (ver tabla VIII).

Para obtener la velocidad de diseño,  $V_d$ , se tomará en cuenta el efecto de ráfaga en la estructura, multiplicando la velocidad de viento,  $V_z$ , por un factor de ráfaga,  $F_R$ ; esto es:

$$V_d = F_R V_z \quad (3-3)$$

El factor de ráfaga será de 1.3 para estructuras sensibles a ráfagas cortas y de 1.0 para estructuras poco sensibles a ráfagas.

Los efectos de viento se tomarán equivalentes a los de

TABLA VII CRITERIO PARA ELEGIR LA VELOCIDAD REGIONAL,  $V_R$

ESTRUCTURAS DEL GRUPO	$V_R$ CON PERIODOS DE RECURRENCIA DE:
A	200 años
B	50 años
C	No requieren diseño por viento

TABLA VIII VALORES DE  $\alpha$  Y  $\delta$

TIPO DE TERRENO	ALTURA GRADIENTE	
	$\alpha$	$\delta$ (metros)
a. Litoral	0.14	200
b. Campo abierto (interior)	0.14	275
c. Terenos subur- banos	0.22	400
d. Centro de grandes ciudades	0.33	460

una fuerza distribuida sobre el área expuesta. Dicha fuerza se supondrá perpendicular a la superficie en que actúa y su valor por unidad de área se calculará por:

$$P = 0.0048 G C (V_d)^2 \quad (3-4)$$

$P$  = Presión debida al viento,  $\text{Kg/cm}^2$ .

$V_d$  = Velocidad de diseño,  $\text{Km/h}$ .

$C$  = Coeficiente de empuje sin dimensiones (para torres y chimeneas = 0.7). (Manual de diseño de obras civiles de La Comisión Federal de Electricidad).

$G$  = Factor de reducción de densidad de la atmósfera, a la altura "h" en  $\text{Km}$ ., sobre el nivel del mar y está dado por la fórmula:

$$G = \frac{8 + h}{8 + 2h} \quad (3-5)$$

El momento por viento se calcula con la fórmula siguiente:

$$M_v = C_p A H P \quad (3-6)$$

$M_v$  = Momento por viento,  $\text{Km-m}$ .

$C_p$  = Coeficiente para considerar la superficie ocupada por las plataformas y accesorios  $C_p = 1.2$ .

$P$  = Presión del viento,  $\text{Kg/cm}^2$ .

$A$  = Area sobre la cual se considera actuando la presión del viento.

H = Altura del centroide de la sección analizada con respecto al eje de momentos (línea de base).

La torres se analizará en secciones según la variación de la presión del viento, calculándose sobre 10m., y la suma de estos efectos será el momento total que actúa sobre la torre con respecto a la línea de base (ver figura 3.2).

### 3.1.2 Método de integración.

La carga del viento es función de su velocidad, su densidad y la forma de la torre, dándonos la siguiente relación para la fuerza producida por el viento.

$$P_v = 0.004 \frac{B}{30} V^2 F_s \quad (3-7)$$

Donde:

$P_v$  = Presión del viento en una superficie, lb/ft<sup>2</sup>.

B = Presión barométrica, in de Hg.

V = Velocidad del viento, millas/h.

$F_s$  = Factor de forma, adimensional.

El factor de forma para una lámina plana perpendicular al viento, es 1.0 y para un cilindro liso es tomado como 0.60. Este valor es cuestionable, por lo que para el diseño se usa de 0.60 a 0.85 dependiendo de la proyección del recipiente.

# DISEÑO CONTRA VIENTO

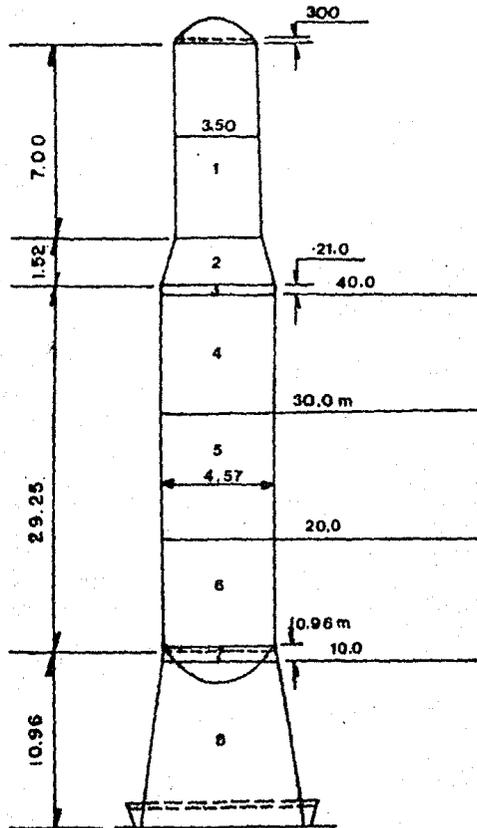


FIGURA 3.2

Para una presión barométrica de 30 in. de Hg. y sustituyendo el valor de 0.60 en la ecuación (3-7) nos da:

$$P_v = 0.0025 V^2 \quad (3-8)$$

Dato similar al encontrado por el método de diferenciación, dado por la Comisión Federal de Electricidad.

El momento que produce esta fuerza está dado por:

$$M = 1/2 P_v X^2 D_{ef} \quad (3-9)$$

Esta ecuación está sujeta a la limitación de que el viento actúa en la distancia total X.

El esfuerzo por viento a la distancia "X", es:

$$S_{vx} = \frac{P_v X^2 R_o D_{ef}}{12 (R_m)^3 (t-c)} \quad (3-10)$$

Si  $R_m = R_o$  y  $D_o/2 = R_m$  entonces:

$$S_{vx} = \frac{2 P_v X^2}{D_o (t-c)} \quad (3-11)$$

Para torres sin aislante no aparece  $D_{ef}$ , por lo tanto, la ecuación del esfuerzo es:

$$S_{vx} = \frac{2 P_v X^2}{D_o (t-c)} \quad (3-12)$$

Donde:

- $M$  = Momento dado por la fuerza del viento a la distancia "X" Lb/in.
- $D_{ef}$  = Diámetro efectivo del recipiente, in.
- $P_v$  = Presión del viento, lb/ft<sup>2</sup>.
- $X$  = Distancia de la parte superior de la torre al punto en consideración, in.
- $S_{vx}$  = Esfuerzo por viento a la distancia X, lb/in<sup>2</sup>.
- $D_o$  = Diámetro exterior, in.
- $R_o$  = Radio exterior, in.
- $R_m$  = Radio medio, in.

Las ecuaciones (3-7) a la (3-12) están integradas con respecto a la altura, por lo que se puede obtener el momento para una determinada altura, así como el momento total en la base de la torre; efectuándose el mismo tratamiento para los esfuerzos. De esta manera si queremos analizar la torre por secciones, se integra hasta la distancia en cuestión.

### 3.1.3. Deflexión.

La deflexión en un torre es similar a la de una viga en voladizo. La viga bajo la carga será deflexionada y este doblamiento será proporcional a la resistencia que opone la cimentación y a la distancia del punto de aplicación de la fuerza, ver figura 3.3

Las torres serán calculadas para una deflexión no mayor de 6 in por cada 100 ft de altura (Pressure vessel handbook).

La deflexión debida a la carga del viento puede ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta_m = \frac{P_v D_1 H (12 H)^3}{8 EI} \quad (3-13)$$

Donde:

$\Delta_m$  = Máxima deflexión (en la parte superior), in.

$D_1$  = Ancho de la torre con aislamiento, accesorios, etc., ft.

$E$  = Módulo de elasticidad, lb/in<sup>2</sup>.

$H$  = Altura del recipiente, incluyendo el faldón, ft.

$I$  = Momento de inercia para cilindros de pared delgada -  
 $R^3 \pi t \approx (R > 10t)$ , in<sup>4</sup>.

$R$  = Radio medio de la torre, in.

$t$  = Espesor del faldón, in.

$P_v$  = Presión del viento, lb/ft<sup>2</sup>.

### 3.2. DISEÑO DE TORRES POR EFECTO DE SISMO

El diseño de estructuras sujetas a cargas por sismo puede ser realizado en dos formas: en la primera se suman los momentos producidos por secciones de la torre, ya que la intensidad del esfuerzo que produce el momento varía según el brazo de palanca, o sea la altura, por lo que tomando diferencia

D E F L E X I O N

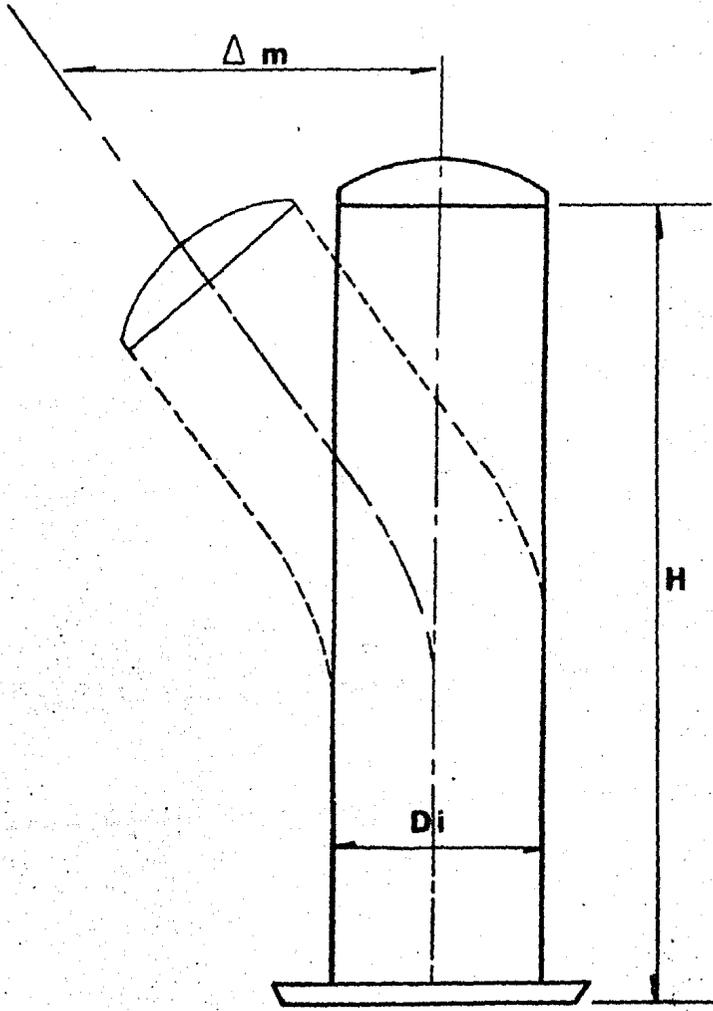


FIGURA 3.3

les de altura y sumando los momentos producidos por la fuerza media que actúa en ella, se obtiene el momento total producido en la base. El segundo método consiste en integrar las -- fuerzas con respecto a la altura, obteniéndose una ecuación -- para el momento producido a cualquier altura, según varía la fuerza que lo produce.

### 3.2.1. Método diferencial para el cálculo de los efectos por sismo.

Considerando una torre alta al comienzo de un sismo, durante el movimiento hay cambios horizontales y verticales en la corteza terrestre. Un recipiente cilíndrico vertical es -- muy estable a fuerzas en dirección vertical; las fuerzas hori-- zontales causan mayor preocupación, es comparable a un despla-- zamiento repentino de la cimentación, estos cambios causan una curvatura similar a la producida por una fuerza empuje contra un lado del recipiente y provoca en éste un movimiento vibra-- cional.

La columna tomará así características de vibración perío-- dica y la frecuencia de vibración será una función de la masa y dimensiones de la columna y del módulo de elasticidad del -- material de construcción. Si la columna tiene un período de vibración largo puede ser considerada flexible.

Expresando el factor de tiempo en el período de vibración "T" como:

$$T = (2\pi/3.53) ((WH^4)/(EIg))^{1/2} \quad (3-14)$$

Si se sustituye el valor de 30 000 000 lb/in<sup>2</sup> para E, el módulo de elasticidad, sustituyendo el momento de inercia del recipiente y usando  $g = 32.2 \text{ ft/seg}^2$ , la ecuación se reduce a:

$$T = 2.65 \times 10^{-5} (H/D)^2 (WD/t)^{1/2} \quad (3-15)$$

Donde:

T = Período de vibración, seg.

H = Altura total de la torre, ft. (recipiente + faldón)

D = Diámetro de la torre, ft.

W = Peso total, Lb/ft.

t = Espesor del recipiente, in.

El diseño de estructuras sujetas a cargas sísmicas es empírica y está basada en análisis de estructuras que sufrieron temblores en el pasado. La aceleración "a" producida por la oscilación de la tierra, dividida por la constante de la gravedad "g", nos da el coeficiente sísmico. El coeficiente sísmico es el factor que multiplicado por el peso total de una estructura, proporciona la fuerza cortante horizontal en la base debido a la acción del sismo es decir:

$$F = \frac{a}{g} W = cW \quad (3-16)$$

Donde:

$a$  = Aceleración sísmica, ft/seg<sup>2</sup>.

$g$  = Aceleración de la gravedad, ft/seg<sup>2</sup>.

$W$  = Peso de la estructura, lb.

$F$  = Fuerza cortante horizontal, lb.

$c$  = Coeficiente sísmico, adimensional.

Para una estructura sometida a efectos de sismo, el diseño está en función de algunos factores como : la sismicidad del lugar, el grado de seguridad aconsejable para la estructura, el cual a su vez, es función creciente de la pérdida que implicaría su falla, además función creciente de la rapidez de aumento de su costo con respecto a su resistencia. Atendiendo a lo anterior las estructuras se dividen en:

GRUPO A. Estructuras que en caso de falla causarían pérdidas directa o indirecta, excepcionalmente altas en comparación con el costo necesario para aumentar su seguridad.

GRUPO B. Estructuras donde las pérdidas ocasionales serían de magnitud intermedia entre las del grupo A y C.

GRUPO C. Estructuras cuya falla no pueda causar efectos de pérdida considerable.

Estructuras del Tipo 1. Dentro de este tipo se incluyen los edificios y naves industriales, salas de espectáculos y construcciones semejantes, en las que las fuerzas laterales se resisten en cada nivel por marcos contínuos, contraventeados o no, por diafragmas o muros, o por combinación de diversos sistemas como los mencionados. Comprende también las chimeneas, torres y bardas, así como los péndulos invertidos, o estructuras en que 50% o más de su masa se encuentre en el extremo superior, y que tengan sólo elemento resistenten en la dirección de análisis.

Estructuras del Tipo 2. Muros de retención.

Estructuras del Tipo 3. Otras estructuras.

Para fines de diseño sísmico, la República Mexicana se considera dividida en cuatro zonas, según se indica en la figura 3.4. La zona D es la de mayor intensidad sísmica, mientras que la zona A es la de menor intensidad.

Atendiendo a su rigidez, se consideran los siguiente tipos de terreno.

Tipo 1. Terreno firme.

Tipo 2. Suelo de baja rigidez.

Tipo 3. Arcillas blandas muy compresibles.

FIGURA 3.4



REGIONALIZACION SISMICA DE LA REPUBLICA MEXICANA

TABLA IX

ZONA SISMICA DE LA REPUBLICA	TIPO DE SUELO	C
A	1	0.08
	2	0.12
	3	0.16
B	1	0.16
	2	0.20
	3	0.24
C	1	0.24
	2	0.30
	3	0.36
D	1	0.48
	2	0.56
	3	0.64

## NOTA:

Los datos son para estructuras del grupo B. Estas deberán -- multiplicarse por 1.3 en el caso de estructuras del grupo A.

Del manual de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) obtenemos la tabla IX, en donde se relacionan la zona sísmica con el tipo de suelo, para un determinado grupo de estructuras, en este caso el grupo B.

La magnitud de las fuerzas que actúan sobre el recipiente, se determinan con el producto del peso de cada elemento componente y el coeficiente sísmico. Con el peso de la torre pueden calcularse las fuerzas cortantes de diseño a diferentes niveles del recipiente de acuerdo con la expresión:

$$F = C W (W_i h_i / \sum W_i h_i) \quad (3-17)$$

Siendo:

F = Fuerza sísmica a diferentes niveles, kg.

C = Coeficiente sísmico, adimensional.

W = Peso total de la torre, kg.

$W_i$  = Peso de la masa i, kg.

$h_i$  = Elevación de la masa i considerada a partir de la línea de base del recipiente o a la línea de apoyo de la torre al faldón considerado, m.

El momento considerado para cada uno de los pesos componentes será:

$$M_i = F_i h_i \quad (3-18)$$

Finalmente la suma de todos los momentos nos dará el momento total que actúa en la torre (ver. figura 3.5)

DISEÑO CONTRA SISMO

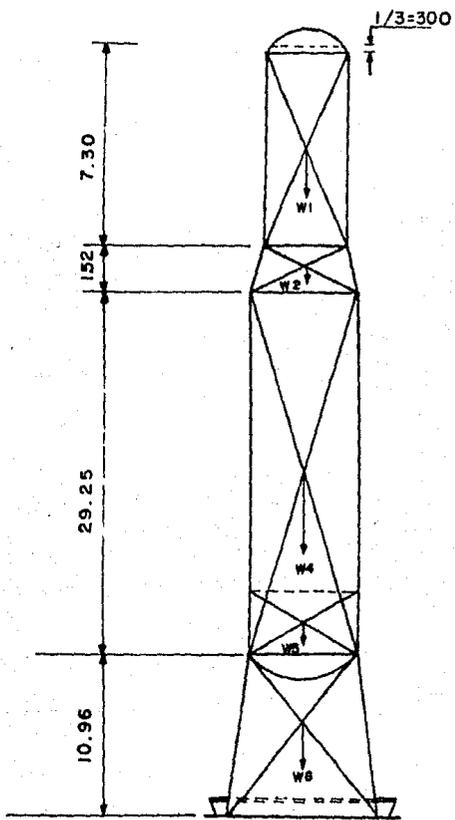


FIGURA 3.5

### 3.2.2. Método de integración para el cálculo de los --- efectos por sismo.

En una torre alta flexible la fuerza producida por la -- aceleración durante la oscilación varía con la velocidad del eje neutral. Porque esta velocidad se incrementa desde cero en la base hasta una velocidad máxima en la parte superior de la torre; la torre flexible consideraría la carga como un -- triángulo, con la media localizada a 2/3 de la altura. Los - esfuerzos resultantes inducidos por las oscilaciones del movi miento sísmico aparecen en orden inverso y son cero en la par te superior de la torre, y se incrementan a un máximo en la - base donde la acumulación de fuerzas es máxima.

Las ecuaciones para el diseño son:

$$M = \frac{2CH}{3} \quad (3-19)$$

$$M_{sx} = \frac{CWx^2 (3H - x)}{3H^2} \quad (3-20)$$

$$S_{sx} = \frac{M_{sx}}{\pi R^2 t} \quad (3-21)$$

$$t = \frac{12 M}{R^2 \pi SE} \quad (3-22)$$

Donde:

C = Coeficiente sísmico, dimensional.

D = Diámetro exterior del recipiente, ft.

E = Eficiencia de las juntas soldadas, dimensional.

H = Altura del recipiente incluyendo faldón, ft.

M = Máximo momento en la base, lb-ft.

$M_{sx}$  = Momento a una distancia X, lb-ft.

R = Radio medio del recipiente, in.

$S_{sx}$  = Esfuerzo por sismo a una distancia X, lb/in<sup>2</sup>.

t = Espesor requerido excluyendo corrosión, in.

Estas ecuaciones son el resultado de la integración de los momentos producidos en la torre con respecto a la altura, de esta forma es posible determinar el momento y el esfuerzo producido por el sismo en cualquier punto de la torre, pudiéndose de esta forma analizarse por secciones.

**CAPITULO IV**  
**ANALISIS DE ESFUERZOS**

#### 4.1 CARGAS EXCENTRICAS.

Aunque en general es recomendable no cargar sobre los re  
cipientes equipo o accesorios, en ocasiones el hacerlo consti  
tuye la alternativa más económica.

Cuando el centro de gravedad de los objetos que constitu  
yen la carga se encuentra sobre el eje del recipiente, esta -  
se considera dentro del peso propio. Si el centro de grave-  
dad se encuentra desplazado del eje del recipiente, se produ-  
ce un momento y consecuentemente un esfuerzo en las paredes a  
tensión o compresión según la localización de la carga.

Accesorios tales como escaleras pequeñas, tuberías y en-  
tradas de hombre pueden ser ignoradas, pero el momento total  
combinado que producen los equipos colocados en la parte supe  
rior, como cabezales y condensadores, puede ser importante.

La excentricidad "e", se define como la distancia del --  
eje de la columna al centro de reacción y se calcula como:

$$e = \frac{\sum Me}{\sum We} \quad (4-1)$$

Me = Suma de momentos de cargas excéntricas, lb-in.

We = Suma de todas las cargas excéntricas, lb.

Las cargas excéntricas producen un momento de curvatura

igual a:

$$M_{ce} = \Sigma We(e) \quad (4-2)$$

y el esfuerzo adicional en el plano "X" causado por este momento es:

$$S_e = \frac{\Sigma We(e)}{\pi R^2 (ts - C)} \quad (4-3)$$

#### 4.2 Estabilidad elástica.

Las placas que forman el cuerpo cilíndrico de una torre, están sujetas a cargas compresibles axiales y pueden fallar por dos tipos de inestabilidad:

- 1.- Pandeo de Euler o total del recipiente.
- 2.- Pandeo local o por arrugas.

La falla debida al pandeo de Euler envuelve la curvatura del cascarón en conjunto y es raro que sea controlante.

La falla por arrugamiento es local, es decir depende de la combinación de cargas y consecuentemente de esfuerzos en cada punto. Por lo tanto es requerido el cálculo del esfuerzo, bajo el cual ocurre el fenómeno.

El esfuerzo crítico permisible por compresión, debido al

cual se presenta la falla por arrugamiento está dada por:

$$S_{cp} = 1.5 \times 10^6 (t/r) = S_{pf}/3 \quad (4-4)$$

El esfuerzo crítico permisible a compresión puede ser -- disminuido, por el efecto de elementos constitutivos del recipiente tales como bandejas, soportes, etc., que pueden ser como refuerzos contra pandeo, si están a espacios adecuados. -- Siendo más eficientes los atiesadores longitudinales que los circunferenciales. Y para estos casos tenemos:

$$S_{cp} = 1.5 \times 10^6 / r (t_y t_x)^{1/2} = S_{pf}/3 \quad (4-5)$$

$$t_y = t + (A_y/d_y) \quad (4-6)$$

$$t_x = t + (A_x/d_x) \quad (4-7)$$

Donde:

$t$  = Espesor del cascarón, in.

$t_y$  = Espesor equivalente del cascarón en dirección circunferencial, in.

$t_x$  = Espesor equivalente del cascarón en dirección longitudinal, in.

$A_y$  = Area de sección transversal de un refuerzo circunferencial, in<sup>2</sup>.

$A_x$  = Area de sección transversal de un refuerzo longitudinal, in<sup>2</sup>.

$d_y$  = Distancia entre refuerzos circunferenciales, in.

$d_x$  = Distancia entre refuerzos longitudinales, in.

$S_{cp}$  = Esfuerzo crítico permisible, lb/in<sup>2</sup>.

$S_{pf}$  = Esfuerzo permisible de trabajo, lb/in<sup>2</sup>.

#### 4.3 Análisis de esfuerzos.

Analizando la combinación de los esfuerzos calculados en la parte superior de la columna, el espesor mínimo es usualmente controlado por el esfuerzo circunferencial resultante de la presión de trabajo (interna o vacío), el espesor se especifica con estas bases y se toma un espesor comercial de placa mayor que el mínimo. En la sección baja de la torre, donde las cargas muertas de compresión y las cargas por viento son significativas, el espesor de las placas debe ser incrementado de acuerdo a las cargas adicionales, la estabilidad del recipiente se obtiene mediante una combinación de esfuerzos. Durante la construcción y posterior uso del recipiente, el esfuerzo total combinado varía de acuerdo a las fuerzas que actúan sobre este, en cualquier tiempo dado (ver figura 4.1).

Los esfuerzos deberán ser examinados en las siguientes condiciones:

1.- Durante el montaje o instalación.

a) Erecto y vacío: Únicamente se tiene el cilindro cerrado en sus extremos y colocado en su lugar de

finitivo.

b) Con accesorios: Se tiene además el equipo auxiliar, empaque o platos, sin aislante.

2.- Recipiente Completo: Se tiene el recipiente con sus accesorios, partes exteriores e interiores.

3.- Recipiente durante la prueba.

a) Prueba hidrostática: Además del recipiente y todas sus partes, se tiene la carga debida a la presión interna de prueba.

b) Prueba de aire: Semejante a la anterior.

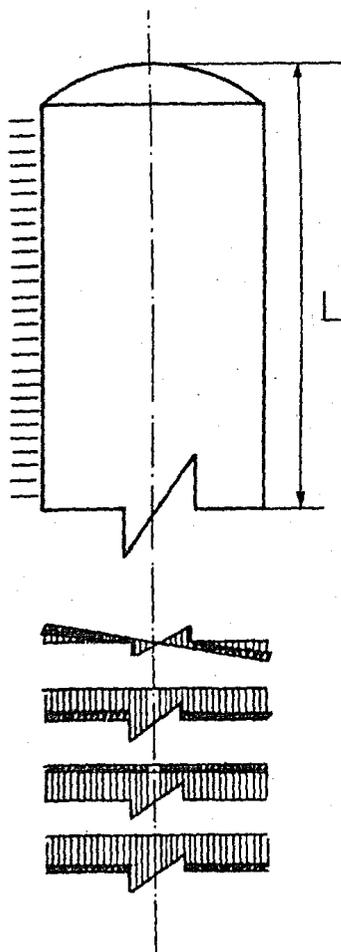
4.- Recipiente en operación.

En esta condición se considera el efecto de viento o sismo, el más crítico, de acuerdo a las características del lugar.

Los esfuerzos inducidos por las cargas previamente descritas serán investigados en combinación con los esfuerzos gobernantes establecidos.

Máximo esfuerzo a tensión en un punto "X".

Para un recipiente no aislado, bajo presión interna y en ausencia de carga excéntrica, el esfuerzo se obtiene como:



ESFUERZO POR CARGA DEL VIENTO  
O ESFUERZO POR CARGA DE SISMO

ESFUERZO POR EL PESO

ESFUERZO POR PRESION INTERNA

ESFUERZO POR PRESION EXTERNA

FIGURA 4.1

$$S_{tmax} = (Svx \text{ o } Ssx) + Sa - Sdx \quad (4-8)$$

Para presión externa la expresión es:

$$S_{tmax} = (Svx \text{ o } Ssx) - Sa - Sdx \quad (4-9)$$

Máximo esfuerzo de compresión en un punto "X".

Para un recipiente en las mismas condiciones del caso anterior, el esfuerzo a compresión está dado por:

$$S_{cmax} = (Svx \text{ o } Ssx) + Sdx - Sa \quad (4-10)$$

Para presión externa la expresión es:

$$S_{cmax} = (Svx \text{ o } Ssx) + Sdx + Sa \quad (4-11)$$

En todas estas ecuaciones la expresión (Svx o Ssx) significa el uso alternativo de viento o sismo según el esfuerzo que sea mayor.

Si el recipiente opera en una zona sísmica crítica, la selección deberá basarse en una combinación de esfuerzos por presión interna o externa y por sismo. Esto se debe a que el esfuerzo por sismo puede resultar significativo en la parte superior. La expresión que describe esta situación en un recipiente a presión interna es:

$$S_{tmax} = Ssx + Sa \quad (4-12)$$

Se representa el esfuerzo a presión interna dado por la ecuación (1-6), no incluye el esfuerzo debido al peso del recipiente y accesorios, así como el debido al viento ya que en la parte superior resultan pequeños.

En el caso de recipientes operando a presión interna, el esfuerzo a tensión máxima está dado por:

$$S_{tmax} = Ssx - Sa \quad (4-13)$$

Se representa el esfuerzo a presión externa dado por la ecuación (1-6).

El diseño se inicia con el cálculo del espesor a presión interna o externa, este espesor será modificado con el cálculo de la combinación de los esfuerzos.

El valor límite para la primera sección con el espesor inicial, es el esfuerzo de trabajo. Se debe determinar la distancia a la cual el esfuerzo total alcanza este valor.

$$S_{tmax} = (Svx \text{ o } Ssx) + Sa - Sdx \cong Sw \quad (4-14)$$

Con esta limitación ya sea con un método iterativo o bien resolviendo una ecuación cuadrática, se puede determinar la

distancia "X" a la cual ocurre la igualdad que plantea la ecuación (4-14).

La ecuación cuadrática se deriva de la combinación de esfuerzos y por la sustitución de ellos en la ecuación (4-14) y tenemos que para viento:

$$S_{tmax} = \frac{2PvX^2}{d(t-c)} + \frac{pd}{4(t-c)} - \frac{(W/ft) X}{d(t-c)} \quad (4-15)$$

y por lo tanto:

$$0 = \frac{2PvX^2}{d(t-c)} - \frac{(W/ft) X}{d(t-c)} + \frac{pd}{4(t-c)} \quad (4-16)$$

Esta ecuación de forma cuadrática está completa y puede ser resuelta para "X" según fórmula general.

$$X = \frac{-b \pm (b^2 - 4ac)^{1/2}}{2a} \quad (4-17)$$

El valor de "X" obtenido es la distancia máxima que puede tener como espesor el inicial. Para distancias mayores se debe de aumentar el espesor de la placa y checar la distancia para la cual el nuevo espesor es el adecuado. De esto sacamos en conclusión que la torre, estará constituida de placas de diferentes espesores. Para cada distancia también deberá checar se, si dicho espesor es suficiente para soportar los esfuerzos por sismo y por compresión.

Estableciendo que el esfuerzo por presión interna es a --

tensión, el esfuerzo por presión externa es a compresión y que el esfuerzo producido por la carga excéntrica es constante a tensión y compresión a lo largo del recipiente, se puede hacer un resumen de correlaciones de esfuerzos:

#### DISEÑO A PRESION INTERNA Y VIENTO.

Operación:

$$S_{tmax} = Svx + Sa - Sdx + Se \quad (4-18)$$

$$S_{cmax} = Svx - Sa + Sdx + Se \quad (4-19)$$

Erección:

$$S_{tmax} = Svx - Sdx \quad (4-20)$$

$$S_{cmax} = Svx + Sdx \quad (4-21)$$

Cheque la sección por sismo, si el espesor es correcto  $Svx > Ssx$ .

#### DISEÑO POR PRESION INTERNA Y SISMO.

Operación:

$$S_{tmax} = Ssx + Sa - Sdx + Se \quad (4-22)$$

$$S_{cmax} = Ssx - Sa + Sdx + Se \quad (4-23)$$

Erección:

$$S_{tmax} = Ssx - Sdx \quad (4-24)$$

$$S_{cmax} = Ssx + Sdx \quad (4-25)$$

Verificar la sección por viento, el espesor es correcto si  $Ssx > Sv_x$ .

#### DISEÑO A PRESION EXTERNA Y VIENTO.

Operación:

$$S_{tmax} = Sv_x - Sa - Sdx + Se \quad (4-26)$$

$$S_{cmax} = Sv_x + Sa + Sdx + Se \quad (4-27)$$

Erección:

$$S_{tmax} = Sv_x - Sa - Sdx \quad (4-28)$$

$$S_{cmax} = Sv_x + Sa + Sdx \quad (4-29)$$

Checar cada sección por sismo, el espesor es el adecuado si  $Sv_x > Ssx$ .

#### DISEÑO POR PRESION EXTERNA Y SISMO.

Operación:

$$S_{tmax} = Ssx - Sa - Sdx + Se \quad (4-30)$$

$$S_{cmax} = Ssx + Sa + Sdx + Se \quad (4-31)$$

Erección:

$$S_{tmax} = Ssx - Sa - Sdx \quad (4-32)$$

$$S_{cmax} = Ssx + Sa + Sdx \quad (4-33)$$

Verificar cada sección por viento, el espesor es el correcto si  $Ssx > Sv_x$ .

Cuando se calculan los esfuerzos por sismo se introduce  $Ssx$  en lugar de  $Sv_x$  en la ecuación (4-14). La diferencia en este caso al procedimiento por viento es que no se encontrará un valor de "X" mediante la ecuación cuadrática, sino después de igualar la expresión con  $Sw$  o  $Scp$  según sea el caso se tomará un valor de "X", entre  $X = 0$  y  $X = X$  y se comprobará la expresión por prueba y error hasta obtener la igualdad a cero.

Nomenclatura:

$Sa$  = Esfuerzo a presión externa o interna.

$Sdx$  = Esfuerzo producido por los pesos de las cargas muertas (cascarón, líquido, accesorios, etc.).

$Se$  = Esfuerzo por excentricidad.

$S_{sx}$  = Esfuerzo por sismo.

$S_{vx}$  = Esfuerzo debido al viento.

$S_w$  = Esfuerzo de trabajo.

$S_{tmax}$  = Esfuerzo a tensión máximo.

$S_{cmax}$  = Esfuerzo a compresión máximo.

El momento producido por el viento decrece de la base de la torre a la parte superior, por lo que el espesor puede también decrecer de acuerdo a esto. Cuando se tiene un diseño por viento la figura 4.2 nos puede ayudar para calcular el espesor adecuado para cierta altura.

El esfuerzo longitudinal dado por la presión interna es la mitad de el esfuerzo circunferencial. Por lo que la mitad del espesor requerido por presión interna está disponible para resistir la fuerza debida al viento. De la tabla A, el factor M puede ser usado para calcular la distancia "X", abajo de la línea de tangencia superior, para el cual el espesor calculado satisfactoriamente por presión interna, también resiste la presión del viento.

$$X = H M$$

(4-34)

$$X = H M$$

$t_p$  = Espesor requerido por presión interna.

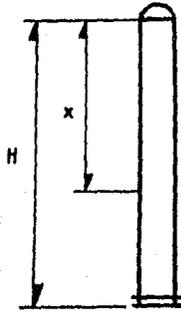
$t_w$  = Espesor requerido por la presión del viento.

$t_r$  = Espesor calculado por presión interna

La figura B muestra el diagrama de los momentos de una torre sobre presión de viento. El diagrama puede ser usado para seleccionar el espesor apropiado para diferentes alturas.

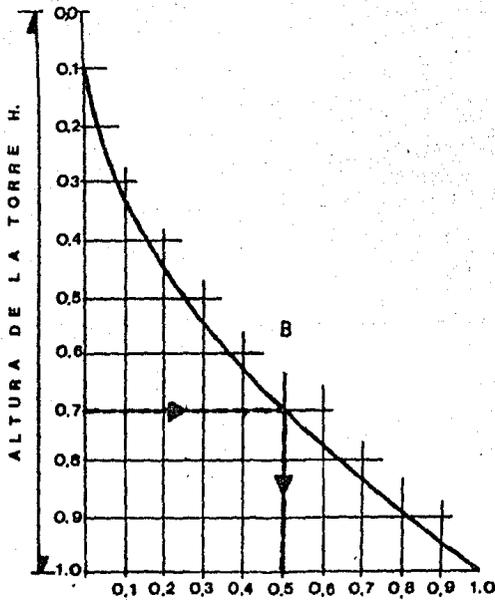
$t_w/t_p$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
m	1.0	0.91	0.84	0.79	0.74	0.71	0.67	0.64	0.62
$t_w/t_p$	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.2	2.4
m	0.60	0.58	0.56	0.54	0.53	0.51	0.50	0.48	0.46
$t_w/t_p$	2.6	2.8	3.0	3.3	3.6	4.0	4.5	5.0	
m	0.44	0.42	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.32	

TABLA A, VALORES DEL FACTOR m.



A

FIGURA 4.2



ESPESOR REQUERIDO EN LA BASE ( $t_r/2 + T_w$ ),  
ESPESOR REQUERIDO A UNA ALTURA EN CONSIDERACION

**CAPITULO V**  
**DISEÑO DEL SOPORTE Y ANCLAJE**

## 5.0 DISEÑO DEL SOPORTE Y ANCLAJE.

Los recipientes verticales que tengan una altura considerable pueden o no ser autosoportados. El diseño de estos recipientes es relativamente reciente, anteriormente se diseñaban para ser sujetos por medio de cables tensores. Las torres altas autosoportadas son hoy en día el tipo más común, ya que resulta antieconómico proveer espacio para los cables tensores. Además se ha comprobado que la apariencia estética de una planta limpia tiene un cierto valor económico.

Los recipientes autosoportados son normalmente soportados por una estructura que descansa en una cimentación de concreto reforzado, esta estructura soporte localizada entre el recipiente y la cimentación, es generalmente un cilindro de acero conocido como faldón.

Para recipientes muy altos y cuyas cargas son considerables, se recomiendan faldones cónicos, ya que no sólo se reducen los esfuerzos en la sección inferior debido a su mayor área de trabajo, sino que se reducen considerablemente el número y diámetro de las anclas de cimentación.

El material del cascarón trabaja en forma muy diferente al del faldón, ya que la función de este último se limita a soportar los esfuerzos de compresión y flexión del equipo, lo cual conduce a la elección de un tipo de acero estructural.

En ocasiones cuando se tienen temperaturas muy altas o muy bajas, el material del faldón pierde sus características, en la zona de la unión faldón-recipiente, por lo que es conveniente utilizar un material de las mismas características del material del recipiente en esa zona, en una longitud de 36 in. -- aproximadamente, entre la línea de apoyo de la torre y el faldón; con el objeto de disipar en dicha longitud el incremento de temperatura que afecta al material del faldón.

La unión faldón-recipiente se efectúa por medio de una soldadura continua y usualmente el tamaño requerido de esta soldadura, determina el espesor del faldón.

Las figuras A y B muestran el tipo más común de unión entre el faldón y el recipiente. En el cálculo de el tamaño requerido de soldadura, el valor de la eficiencia de la junta está dada por el código A.S.M.E., párrafo UW-12.

La fórmula para el espesor del faldón esta dada por:

$$t = \frac{12 M_t}{R^2 \pi S E} + \frac{W}{D \pi S E} \quad (5-1)$$

donde:

D = Diámetro del faldón, in.

E = Eficiencia de junta faldón-recipiente, adimensional.

M<sub>t</sub> = Momento de la junta faldón recipiente, lb-ft.

S = Esfuerzo del material de la cabeza o faldón el que

sea menor,  $\text{lb}/\text{in}^2$ .

$t$  = Espesor requerido en el faldón, in.

$W$  = Peso de la torre en condiciones de operación, lb.

Usando faldones extremadamente altos, gobiernan los esfuerzos en la base; en este caso pueden usarse las fórmulas arriba mencionadas. El momento y el peso serán tomados en la base y la eficiencia de la junta será 1.0.

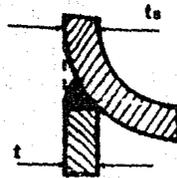


Figura A. junta Butt Weld. Eficiencia de junta 0.60

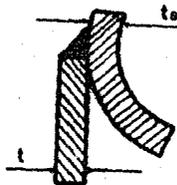


Figura B. junta Lap Weld. Eficiencia de junta 0.45.

### 5.1 Diseño del aro base.

El faldón no podría descansar directamente sobre la cimentación de concreto, ya que los esfuerzos de penetración serían enormes y el concreto no resistiría. Para evitar esto se usa un aro de base que es un anillo que aumenta el área de apoyo del faldón sobre el concreto.

Las fórmulas que a continuación se dan están basadas en las siguientes consideraciones:

1. La superficie del aro base será lo suficientemente grande para distribuir uniformemente la carga en la cimentación de concreto no permitiendo que se rebase el esfuerzo permisible del concreto.
2. El espesor del aro base será resistente al esfuerzo inducido por viento o sismo.

El máximo esfuerzo de compresión:

$$p_c = \frac{12 M}{A_s} + \frac{W}{C_s} \quad (5-2)$$

Para calcular el ancho del aro base, basta dividir la carga de compresión por unidad de longitud, entre el esfuerzo permisible del concreto.

$$L = \frac{P_c}{f_b} \quad (5-3)$$

El espesor está dado por:

$$t_b = 0.32 L_1 \quad (5-4)$$

Los esfuerzos en la base son:

$$S_1 = \frac{P_c C_s}{A_R} \quad (5-5)$$

$$S_2 = \frac{3 S_1 L_1^2}{t_b^2} \quad (5-6)$$

Donde:

$A_R$  = Area del aro base, in<sup>2</sup>.

$A_s$  = Area transversal del faldón, in<sup>2</sup>.

$C_s$  = Circunferencia exterior del faldón, in.

$f_b$  = Esfuerzo permisible del concreto, lb/in<sup>2</sup>.

$L_1$  = Distancia del diámetro interior del aro base a el perno de anclaje, (ver figura 5.1) in.

$L_2, L_3$  = Dimensiones mostradas en la figura 5.1 y tabla X.

$M$  = Momento en la base debido a viento o a sismo, lb-ft.

$W$  = Peso del recipiente durante la prueba, lb.

Alrededor del faldón, distribuidos a una distancia constante, se localizan elementos fijadores llamados silletas; cuya función es de sujetar el recipiente contra desplazamiento y efecto de volteo, producidos en el recipiente y transmiti-

dos por medio del faldón a la cimentación por conducto de las anclas. En el diseño de estas anclas, se determina el número y área de las mismas para resistir los esfuerzos de flexocompresión.

El número de anclas será un múltiplo de cuatro y para torres altas es preferible que se use un mínimo de ocho.

El espaciamiento entre anclas no será menor de 18 in. tomando este mínimo espaciamiento entre anclas en el caso de recipientes de diámetro pequeño, el círculo de anclas puede ser aumentado por medio de faldones cónicos o aumentando el ancho del aro base con una escuadra metálica.

Sólo se considera el área del ancla que penetra en la cimentación, se muestran en la tabla X. Del área del ancla se puede obtener el diámetro al cual se le agregará 1/8 in. por efectos de corrosión.

Un método simple para el diseño de anclas, es asumir que el perno es remplazado por una circunferencia continua que pasa por la línea de centros de los barrenos.

El área requerida del perno será calculada con la torre vacía. Las ecuaciones son las siguientes:

$$T = \frac{12M}{A_s} - \frac{W}{C_s} \quad (5-7)$$

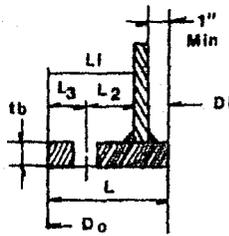


Fig. 5.1

TABLA X

TAMAÑO DE ANCLA	AREA DEL ANCLA	DIMENSIONES PULG.	
		L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
1/2	0.126	7/8	5/8
5/8	0.202	1	3/4
3/4	0.302	1 1/8	13/16
7/8	0.419	1 1/4	15/16
1	0.551	1 3/8	1 1/16
1 1/8	0.693	1 1/2	1 1/8
1 1/4	0.890	1 3/4	1 1/4
1 3/8	1.054	1 7/8	1 3/8
1 1/2	1.294	2	1 1/2
1 5/8	1.515	2 1/8	1 5/8
1 3/4	1.744	2 1/4	1 3/4
1 7/8	2.049	2 3/8	1 7/8
2	2.300	2 1/2	2
2 1/4	3.020	2 3/4	2 1/4
2 1/2	3.715	3 1/16	2 3/8
2 3/4	4.618	3 3/8	2 5/8
3	5.621	3 5/8	2 7/8

TABLA XI          NUMERO DE ANCLAS

DIAMETRO DEL CIRCULO DE ANCLAS    PULG.	MINIMO	MAXIMO
24 a 36	4	4
42 a 54	8	8
60 a 78	12	12
84 a 102	12	16
108 a 126	16	20
132 a 144	20	24

TABLA XII          MAXIMO ESFUERZO PERMISIBLE PARA  
PERNOS USADOS EN ANCLAS

NUMERO DE ESPECIFICACION	DIAMETRO PULGADAS	MAXIMO ESFUERZO PERMISIBLE psi
SA 325	Todos los diámetros	15 000
SA 193 B 7	2 1/2 y menores	18 000
SA 193 B 16	2 1/2 y menores	18 000
SA 193 B 7	2 1/2 a 4	16 000
SA 193 B 16	2 1/2 a 4	15 700

$$B_a = \frac{T C_B}{S_B N} \quad (5-8)$$

$$S_B = \frac{T C_B}{B_a N} \quad (5-9)$$

Donde:

T = Máxima tensión, lb/in.

B<sub>a</sub> = Area requerida por un perno, in<sup>2</sup>.

S<sub>B</sub> = Esfuerzo en el ancla, lb/in<sup>2</sup>.

A<sub>B</sub> = Area del círculo de pernos, in<sup>2</sup>.

C<sub>B</sub> = Circunferencia formada por la línea de centros de los barrenos, in.

M = Momento en la base debido al viento o sismo, lb-ft.

N = Número de pernos.

S<sub>B</sub> = Máximo esfuerzo permisible del material de los pernos, lb/in<sup>2</sup>.

W = Peso del recipiente durante el montaje, lb.

## CONCLUSION

El recipiente se diseña según las condiciones de trabajo, tomando en consideración la presión de operación, temperatura, fluida a manejar, etc. de esta manera se obtiene un espesor adecuado que cumple con dichos requisitos; pero que se ve afectado por el peso del recipiente y factores externos debido a la región en que van a ser instalados, específicamente viento y sismo.

Estas fuerzas adicionales que influyen también en el diseño, se tienen que calcular y analizar para determinar los esfuerzos que producen, y en dado caso modificar si es necesario el espesor original.

El análisis que se efectúa en el capítulo IV es la conclusión del diseño; en él podemos observar las diferentes combinaciones que se obtienen de las diferentes presiones de trabajo y el factor dominante externo; se notará que el peso no es controlante y que siempre actúa como una fuerza de compresión, por el contrario el viento y sismo actúan a tensión y a compresión; la presión interna actúa a tensión y la presión externa a compresión.

## BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Brownell, Lloyd E. y Young, Edwin H.  
Process Equipment Design.  
John Wiley & sons, inc. 1959.
  
- 2.- Buthod, Paul.  
Pressure Vessel Handbook.  
Eugene F. Magyesy, 1975.  
3a. Edición.
  
- 3.- Evans, W.  
Process Equipment.  
McGraw Hill, 1976.  
2a. Edición.
  
- 4.- Código A.S.M.E., Sección VIII División I, 1977.
  
- 5.- Manual de diseño de obras civiles.  
C.1.4 Diseño por viento.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1981.
  
- 6.- Manual de diseño de obras civiles.  
C.1.3 Diseño por sismo.  
Comisión Federal de Electricidad.  
México, 1981.

7.- Diseño de recipiente a presión norma

2. 612. 01 Pemex 1975.

8.- Tablas de peso de cascarones cilíndricos

norma A 2. 610

I.M.P.

#### HEMEROGRAFIA

1.- El-Rifal, Mustafa

"Estimate equipment weights"

Hidrocarbon Processing, September 1979.

pág. 225-226.

2.- Heinze, A.J.

"Pressure vessel design for process engineers"

Hidrocarbon Processing, May 1979.

pág. 181-189.

3.- Jordans, A.

"Simple Weight calculation for steel towers and vessels"

Hidrocarbon Processing, August 1981

pág. 146.

4.- Tankha, A.

"Selecting formed heads for cylindrical vessels".

Chemical Engineering, June 1, 1981.

pág. 89.