



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE TORRES DE
ACUERDO A LA NRF-028-PEMEX-2004 Y
COMPLEMENTÁNDOSE CON EL CÓDIGO
ASME, SECCIÓN VIII, DIVISIÓN 1.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A:
JULIO CÉSAR MOREIRA CHÁVEZ**

**ASESOR: M. I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ
COASESOR: ING. VICENTE RAMOS RAMOS**

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2009



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.

DEDICATORIAS

A mis Padres y Hermanos

*A quienes la ilusión de su vida ha sido convertirme en persona de provecho.
A quienes nunca podré pagar todos sus desvelos ni aún con las riquezas más
grandes del mundo.*

*Por que gracias a su apoyo y consejo, he llegado a realizar la más grande de
mis metas. La cual constituye; la herencia más valiosa que pudiera recibir.
Deseo de todo corazón que mi triunfo profesional lo sientan como suyo.*

Universidad Nacional Autónoma De México

*En especial a la Facultad de Estudios Superiores Cuatlilán por darme la
oportunidad de aprender valiosos conocimientos que contribuyeron a mi
desarrollo.*

*Gracias al departamento de Recipientes a Presión y Cambiadores de Calor del
Instituto Mexicano del Petróleo por todas las facilidades que me otorgaron y en
general a todas las personas que hicieron posible la terminación de este trabajo.*

*Agradezco a dios por darme la oportunidad de llegar hasta donde me encuentro
y el darme cuenta de la dicha más grande... el estar sano y encontrarme bien de
mis facultades por esto y más gracias.*

INDICE

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
CAPITULO 1 GENERALIDADES	
1.1 GENERALIDADES	4
1.2 DEFINICIÓN DE RECIPIENTES	4
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS RECIPIENTES A PRESIÓN	4
1.4 IMPORTANCIA DE LOS RECIPIENTES ATMOSFERICOS Y A PRESIÓN DENTRO DE UNA PLANTA.	7
1.5 CAMPO DE APLICACIÓN.	7
CAPITULO 2 CÓDIGOS	
2.1 GENERALIDADES.	9
2.2 CODIGOS Y LEYES QUE REGLAMENTAN EL CALCULO Y DISEÑO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RECIPENTES.	11
2.2.1 NRF-028-PEMEX-2004.	11
2.2.2 Código ASME.	12
2.3 CÓDIGOS AUXILIARES.	15
2.4 OTROS CODIGOS AUXILIARES	16
2.5 COMPARACIÓN DEL GRADO DE SEGURIDAD EN ALGUNOS CODIGOS.	18
CAPITULO 3 MATERIALES.	
3.1 ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES	19
3.2 MATERIALES AMPARADOS POR EL CÓDIGO ASME	20
3.3 SELECCIÓN DEL MATERIAL.	21
CAPITULO 4 DISEÑO	
4.1 RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERNA.	24
4.2 CÁLCULO Y DISEÑO DE LAS PARTES DE UN RECIPIENTE POR PRESIÓN INTERNA.	25
4.3 REVISIÓN DE LAS PARTES DE UN RECIPIENTE POR PRESIÓN EXTERIOR DE SEGURIDAD.	28
4.4 CONDICIONES REALES DE LA PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE (<i>PTMP</i>).	36
4.5 CALCULO DE LA TORRE.	40
CAPITULO 5 ANALISIS POR SISMO.	
5.1 CALCULO DE LA ESTABILIDAD DEL RECIPIENTE (TORRE).	55
5.1.1 Clasificación de las Estructuras.	55
5.1.2 Calificación de las Estructuras según su Diseño.	56
5.1.3 Clasificación de las Estructuras según su Estructuración.	57
5.1.4 Factor de Comportamiento Sísmico (<i>Q</i>).	58

5.1.5 Factor Reductivo por Ductilidad (Q').	59
5.1.6 Vibración.	60
5.2 REGIONALIZACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO.	60
5.2.1 Regionalización Sísmica de la República Mexicana.	60
5.2.2 Espectros para el Diseño Sísmico.	61
5.3 ESTRUCTURAS TIPO CHIMENEA, SILOS Y SIMILARES.	63
5.3.1 Consideraciones Generales.	63
5.3.2 Elección del tipo de Análisis.	63
5.3.3 Análisis Estático.	63
5.3.4 Factor de Incremento (ξ).	64
5.3.5 Valuación de Fuerzas Sísmicas.	64
5.4 ANÁLISIS POR SISMO.	66
5.5 DICTAMEN FINAL.	80

CAPITULO 6 ANÁLISIS POR VIENTO.

6.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SEGUN SU IMPORTANCIA.	81
6.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SEGUN SU RESPUESTA ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO.	82
6.3 EFECTOS DEL VIENTO QUE DEBEN CONSIDERARSE.	83
6.4 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LAS ACCIONES POR VIENTO.	84
6.5 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DISEÑO (V_D).	84
6.5.1 Categorías de terrenos y clases de estructuras.	84
6.5.2 Mapas de Isotacas, Velocidad Regional (V_R).	86
6.5.3 Factor de Exposición (F_w).	87
6.5.4 Factor de Tamaño (F_C).	87
6.5.5 Factor de rugosidad y altura (F_{rz}).	88
6.5.6 Factor de topografía (F_T).	88
6.6 PRESIÓN DINÁMICA DE BASE (q_z).	89
6.7 CHIMENEAS Y TORRES.	90
6.8 ANÁLISIS DINAMICO.	91
6.8.1 Limitaciones.	91
6.8.2 Presiones y Fuerzas sobre estructuras sensibles a efectos dinámicos.	92
6.8.3 Presiones en la dirección del viento (P_z).	92
6.8.4 Fuerza en la dirección del viento (F_z).	92
6.8.5 Factor de respuesta dinámica a ráfagas (F_g).	93
6.9 FACTOR DE EXPOSICIÓN (F_a).	97
6.10 ANÁLISIS POR VIENTO.	100

CAPITULO 7 ANÁLISIS POR PVElite 2008.

7.1 GENERALIDADES.	109
7.2 RESULTADOS.	110
CONCLUSIONES	113
BIBLIOGRAFÍA	115

INTRODUCCIÓN

En la medida que la Ingeniería de Proyectos se ha incrementado en nuestro País se requiere de un conocimiento más amplio de las diferentes especialidades que intervienen, siendo una de las más importantes la de recipientes, los cuales representan un amplio panorama, por la gran intervención que tienen en la totalidad de las Plantas Industriales.

En la actualidad toda empresa de proyecto, cualquiera que sea su capacidad no debe estar exenta del diseño de recipientes.

Dada la importancia que representa para un país la Industria tanto la Petrolera, Alimenticia, Química, Cañera, Cervecera, Cafetera, etc., es aquí donde el diseño de recipientes no sólo es una rama más de la ingeniería, sino una especialidad, en donde el diseñador y el calculista pueden elaborar el diseño del equipo más funcional de acuerdo a las condiciones de proceso y de los productos que se van a obtener.

En la especialidad de recipientes convergen varios conocimientos afines a distintas ramas de la ingeniería como son: resistencia de materiales, corrosión, ingeniería mecánica, ingeniería civil, ingeniería hidráulica, ingeniería química, etc; con esto, nos podemos dar cuenta de la importancia que tiene la intervención de personal con conocimientos en diseño y cálculo de recipientes para un proyecto determinado.

En el capítulo primero se abarcan las principales generalidades que pudiesen mencionarse acerca de los recipientes a presión, incluso podremos definirlos y clasificarlos, ya que a medida que la industria avanza, conjuntamente lo hacen las características de los recipientes.

Un rasgo muy importante que cabe señalar en recipientes es la forma en como pueden realizar diferentes procesos y sólo por mencionar algunos, se tienen procesos químicos, petroquímicos, etc; y lo cual hace que los tipos de recipientes se hagan muy extensos, así por ejemplo, para almacenar agua se tiene una gran diversidad de formas; los auto tanques y carros tanque que muestran algunos tipos de recipientes, los almacenadores de grano, los tanques de concreto, etc.

Es de suma importancia hacer notar que todo esto es resultado del avance acelerado y la modernización de las diferentes industrias y por tal motivo podemos destacar la importancia de los recipientes a presión dentro de las Plantas Industriales.

Con todo este desarrollo que han tenido los recipientes en la actualidad se hace notorio considerar la cantidad de nuevos Códigos y Normas que han surgido para el diseño, fabricación, inspección, pruebas, etc; de estos;

Las Normas y Códigos que son utilizados para el diseño (torres), son parte fundamental, ya que estos nos amparan con un margen de seguridad, además de que cada Código nos da un factor de seguridad distinto incluso los países más altamente industrializados cuentan con Códigos propios, lo cual se estudia en el Capítulo dos.

Los materiales usados para el diseño y fabricación de recipientes a presión, también están regidos por Normas y Códigos. Normalmente el Código que reglamenta el diseño del recipiente a presión, establece también los materiales a usar, así como los métodos y pruebas para dichos materiales. Todo esto mediante especificaciones que se mencionan en el capítulo tres.

En el capítulo 4 considerando lo antes establecido, es de suma importancia para un diseño óptimo conocer las condiciones a las que va a estar sometido el recipiente, como lo son su forma, sus dimensiones, su localización, su operación, etc; ya que con esto se establece el criterio a seguir para los cálculos, la selección de materiales, las fórmulas a usar, los distintos aditamentos (tipos de cabeza, etc) entre algunas por mencionar. La NRF-028-PEMEX-2004 establece los lineamientos para el diseño de recipientes a presión y complementándose con el Código ASME, Sección VIII, División 1, por lo que en adelante nos apoyaremos en los requisitos que esta sección establece.

Este trabajo se basa en el Manual de Diseño de Obras Civiles (CFE), desde su primera edición en 1969, ha sido producto de la experiencia y la tecnología más avanzada, tanto como del intenso trabajo de Ingenieros e investigadores mexicanos ligados al proyecto y construcciones de las obras de la CFE. (Capítulos 5 y 6).

Dado los problemas que se citaron durante el sismo de 1985, se tuvo que actualizar el manual; esto se hace con el fin de que cada vez que exista un sismo de mayor magnitud se modificara el manual, mientras no se presente un sismo de mayor magnitud este manual de diseño no quedará obsoleto. Es por eso que este trabajo está basado en la última edición (1993) del Manual de Sismo y Viento de la CFE, de la NRF-028-PEMEX-2004 y complementándose con el Código ASME.

Como un último capítulo se realiza el Diseño y Análisis del equipo mediante un Software (PVElite 2008). Se trata de un programa con una interfaz gráfica para el diseño y análisis completo de recipientes a presión, tanto horizontales, como verticales (torres).

Y con la ayuda del programa se puede llevar a cabo los cálculos de nuestro sistema.

OBJETIVOS

- Analizar las fuerzas que pueden intervenir en el Diseño de un recipiente vertical (Torre).
- Mejorar la eficiencia y seguridad del elemento a estudiar.
- Establecer recomendaciones que pueden ser aplicables al diseño de recipientes verticales de alturas considerables (mayor a 10 m).



CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 GENERALIDADES.

Como resultado del avance acelerado y modernización de la industria, los diferentes procesos químicos, de refinación e inclusive de almacenamiento de hidrocarburos, requieren de una absoluta seguridad para el personal y la planta en general, por lo que el diseño, selección y distribución del equipo debe ser el adecuado.

A consecuencia de ello, uno de los equipos fundamentalmente importantes son los recipientes tanto del tipo atmosférico como los que están sujetos a presión, mismos que deben ser calculados, diseñados y construidos, en base a la NRF-028-PEMEX-2004, las últimas ediciones del Código ASME, Sección VIII, División 1 y el manual de Sismo y Viento de la CFE; donde se dan los parámetros de seguridad que nos puedan garantizar la funcionalidad y eficacia de cualquier proceso en la industria.

1.2 DEFINICIÓN DE RECIPIENTES.

Se considera como un **Recipiente Atmosférico** a cualquier contenedor sin presión capaz de almacenar un fluido.

Un **Recipiente a Presión**, es un contenedor cerrado capaz de almacenar un fluido a presión manométrica, independientemente de su forma y dimensión.

Para el diseño de un recipiente a presión, se deben considerar los siguientes factores:

- Función y localización del recipiente dentro del área de proceso y de la planta.
- Características específicas del fluido.
- Temperatura y presión de operación.
- Volumen a almacenar.

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS RECIPIENTES A PRESIÓN.

Los recipientes a presión comúnmente se clasifican en:

- Horizontales
- Verticales
- Esféricos.

Recipientes Horizontales.

Son aquellos recipientes montados en silletas en posición horizontal, figura 1.1, conocidos comúnmente como salchichas, se utilizan como acumuladores ya sea de flujo de vapor y/o sustancias que provengan de equipos especiales.

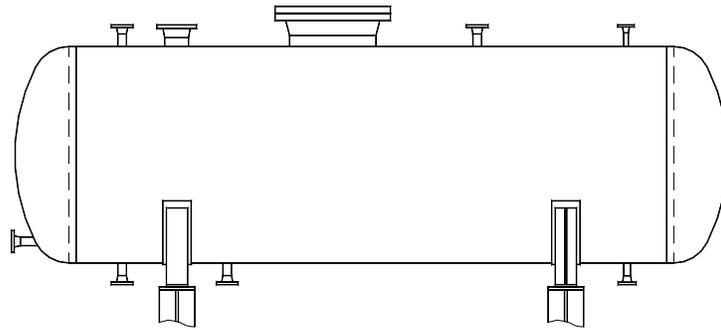


Figura 1.1. Recipiente horizontal.

Recipientes Verticales.

Los más usados son los reactores, las torres, etc. Normalmente los recipientes verticales están soportados por medio de la patas de ángulo o tubo, faldones cónicos o rectos y por soportes integrados en el cuerpo del recipiente, figura 1.2.

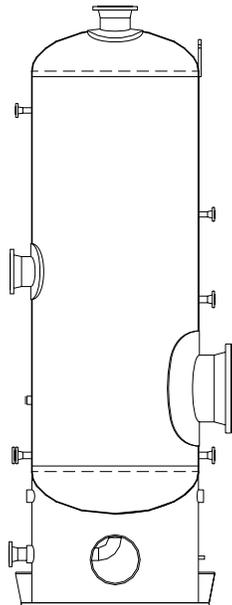


Figura 1.2. Recipiente vertical.

Recipientes Esféricos.

Se usan para almacenamiento de grandes volúmenes de fluidos principalmente, gas natural, butano, isobutileno, hidrógeno, amoníaco y otros productos petroquímicos, figura 1.3.

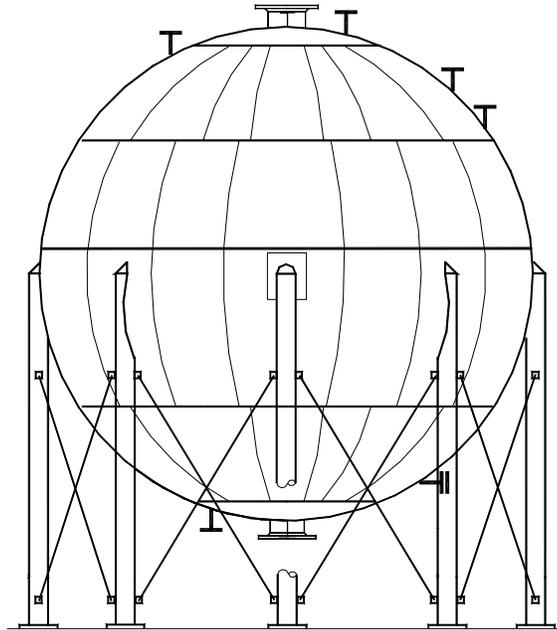
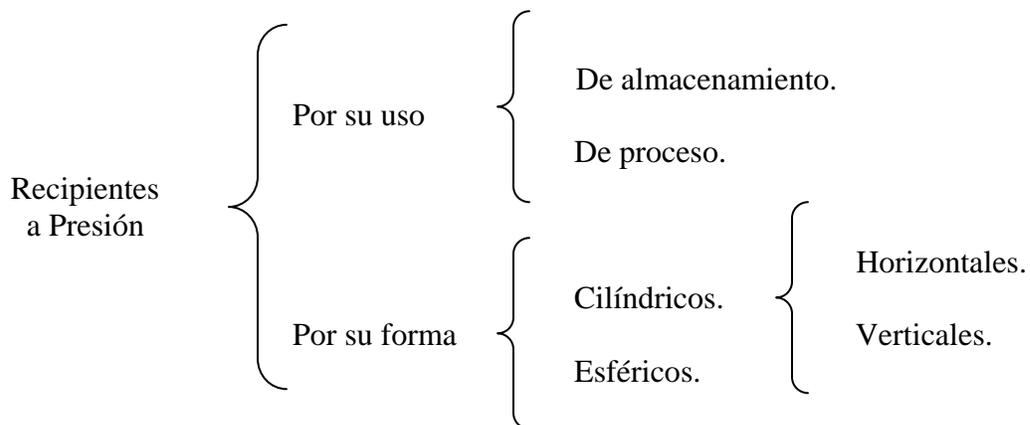


Figura 1.3. Recipiente esférico.

Tipos de recipientes sujetos a presión.

Los diferentes tipos de recipientes a presión que existen, se clasifican de la siguiente manera:



Por su uso.

Se dividen en; recipientes de almacenamiento y recipientes de proceso. Los primeros nos sirven únicamente para almacenar fluidos a presión atmosférica. Son conocidos como tanques de almacenamiento, tanques de día y tanques acumuladores.

Los recipientes de proceso se utilizan como intercambiadores de calor, reactores, torres fraccionadoras, torres de destilación, etc.

Por su forma.

Se clasifican en; cilíndricos o esféricos. Los cilíndricos pueden ser horizontales o verticales, y pueden contar con o sin chaquetas para incrementar o decrecer la temperatura de los fluidos según el caso.

Los recipientes esféricos se utilizan generalmente como tanques de almacenamiento y se recomiendan para almacenar grandes volúmenes a bajas presiones.

1.4 IMPORTANCIA DE LOS RECIPIENTES ATMOSFÉRICOS Y A PRESIÓN DENTRO DE UNA PLANTA.

Los recipientes atmosféricos y a presión son la parte básica de todas las plantas, principalmente donde se trabaje con equipo de proceso. Por esta razón, a todos los equipos de proceso se les puede considerar como recipientes, con las modificaciones y adiciones necesarias; Como por ejemplo: si consideramos un recipiente de alta presión, equipado con agitador y fuentes caloríficas. Un intercambiador de calor, considerado como un recipiente conteniendo una serie de paredes de contacto para lograr el intercambio calorífico; otro puede ser un evaporador que contenga un intercambiador en combinación con un espacio que permita la evaporación; una columna de absorción o destilación, etc.

El costo de la fabricación del recipiente en relación con la función y la vida útil del mismo es de gran importancia para la concepción integral de la planta de proceso donde operará dicho recipiente.

1.5 CAMPO DE APLICACIÓN.

El estudio de los recipientes día a día se hace más necesario e importante, porque a medida que la industria avanza, conjuntamente lo hacen los materiales, formas de equipos de procesos, etc., los cuales tienen relación directa con la ingeniería de recipientes.

Debido a la gran cantidad de procesos químicos, petroquímicos etc., los tipos de recipientes se hacen muy extensos, así por ejemplo, para almacenar agua se tienen una gran diversidad de formas, los autotanques y carros tanques nos muestran otros tipos de recipientes, los almacenadores de grano, etc.

Los tipos más comúnmente usados se pueden considerar como recipientes abiertos y recipientes cerrados.

Los recipientes abiertos se usan normalmente como tanques de almacén, tanques mezcladores, tanques de reposo, etc., evidentemente este tipo de recipientes es más barato a comparación de los recipientes cerrados, ambos de la misma capacidad.

Los recipientes cerrados pueden dividirse en recipientes cilíndricos verticales de fondo plano y cubierta cónica, los cuales normalmente trabajan a presiones atmosféricas y su función es la de almacenar productos. Existen recipientes cilíndricos con cabezas abombadas en sus extremos, este tipo de recipientes se usan en donde la presión de vapor del líquido acumulado impone un diseño riguroso y finalmente se tienen los recipientes esféricos, los cuales se usan normalmente para el almacenamiento de grandes volúmenes de fluidos bajo presiones moderadas, la figura 1.4 es un ejemplo de aplicación en el ramo de la Industria Petrolera.



Figura 1.4. Refinería.

CAPITULO 2

CÓDIGOS.

2.1 GENERALIDADES.

El desarrollo que han tenido los recipientes en la actualidad se hace notorio considerando la cantidad de nuevos Códigos que han surgido para el diseño, fabricación, inspección, pruebas, materiales, etc. También en las formas de fabricación, de materiales, espesores y un aspecto importante es el uso de la computadora, ya que actualmente se cuenta con varios programas para análisis y diseño.

Todos los diseños, fabricación, pruebas e inspección de recipientes a presión se basan en un Código en la mayoría de los países, incluyendo el nuestro, ha llegado a ser como una ley la cual dictamina los requerimientos mínimos para cualquiera de las fases antes mencionadas.

La NRF-028-PEMEX-2004 es la norma que establece los requisitos mínimos para el diseño y la construcción de recipientes a presión en México y que serán adquiridos o arrendados por PEMEX.

Esta Norma es revisada cada 5 años, o menos, cuando así lo amerite; Este documento normativo fue desarrollado en cumplimiento con la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el Reglamento de la Ley de Adquisiciones, Arrendamientos y Servicios del Sector Público y el Reglamento de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las mismas, con la finalidad de fomentar la transparencia y eficiencia en la elaboración, observancia y desarrollo de Normas oficiales mexicanas.

Las siguientes entidades, dependencias, organismos y empresas participaron en su elaboración o revisión:

- Petróleos Mexicanos.
- PEMEX Exploración y Producción.
- PEMEX Refinación.
- PEMEX Gas y Petroquímica Básica.
- PEMEX Petroquímica.
- IMP, Instituto Mexicano del Petróleo.
- SENER, Secretaría de Energía.
- STPS, Secretaría del Trabajo y Previsión Social.
- AMIME, Asociación Mexicana de Ingenieros Mecánicos y Electricistas.
- CIME, Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas.
- DNV, Det Norske Veritas.
- SWECOMEX.
- CONSORCIO INDUSTRIAL S.A. de C.V.
- CONCAMIN, Confederación Nacional de Cámaras Industriales.
- CANACINTRA, Cámara Nacional de la Industria de la Transformación.

Otro Código a seguir muy importante es el Código para calderas y recipientes a presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME.), este se origina por la necesidad de proteger a la sociedad de las continuas explosiones de calderas que se sucedían antes de reglamentar su diseño y construcción.

Basándose en lo anterior, los países más altamente industrializados cuentan con Códigos propios, dentro de los cuales, se pueden citar los siguientes:

- La NRF-028-PEMEX-2004 (NORMA DE REFERENCIA), rige en México actualmente.
- El Código ASME (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS), es el Código que rige actualmente Estados Unidos de América.
- El BS 5500 ó BS 1515 (BRITISH STANDAR), que es el Código Británico.
- El Código JIS (Japanese Industrial Standar), que es usado en Japón.
- El Código Alemán que rige físicamente en Alemania y países bajos.
- Algunos otros como el Italiano y el Australiano, etc.

Cabe mencionar que cada uno de los Códigos mencionados, tienen diferentes factores de seguridad, por ejemplo el ASME usa un factor de seguridad de 3.5 y el BS 1515 de 2.35, esto es sobre la resistencia última a la tensión especificada a la temperatura ambiente o de diseño.

A continuación se muestra el contenido temático de la NRF-028-PEMEX-2004, del Código ASME que como se ha venido mencionado, este complementa a la Norma Mexicana y también se muestran croquis de algunos Códigos indicando los diferentes párrafos que se usan para los diferentes casos.

2.2. CÓDIGOS Y LEYES QUE REGLAMENTAN EL CALCULO Y DISEÑO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE RECIPIENTES.

2.2.1 NRF-028-PEMEX-2004

0. INTRODUCCIÓN.

1. OBJETIVO.
2. ALCANCE.
3. CAMPO DE APLICACIÓN.
4. ACTUALIZACIÓN.
5. REFERENCIAS.
6. DEFINICIONES.
7. SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.
8. DESARROLLO.

8.1 Requisitos generales para todos los recipientes.

- 8.1.1 Materiales permitidos.
- 8.1.2 Diseño.
- 8.1.3 Fabricación.
- 8.1.4 Inspecciones y pruebas.
- 8.1.5 Dispositivos de alivio de presión.

8.2 Requisitos para recipientes de acuerdo al método de construcción

- 8.2.1. Recipientes fabricados por soldadura.
- 8.2.2. Recipientes fabricados por forja.

8.3 Requisitos para recipientes de acuerdo al tipo de materiales de construcción.

- 8.3.1. Recipientes contruidos de acero al carbono y de baja aleación.
- 8.3.2. Recipientes contruidos de materiales no ferrosos.
- 8.3.3. Recipientes contruidos de acero de alta aleación.
- 8.3.4. Recipientes soldados, contruidos de materiales revestidos integralmente, con soldadura o con forros resistentes a la corrosión.
- 8.3.5. Recipientes contruidos de acero ferrítico con propiedades de tensión mejoradas por tratamiento térmico.
- 8.3.6. Recipientes multicapas.

8.4 Marcado y certificación de cimientes térmicos.

8.5 Verificación del cumplimiento.

8.6 Documentación y registro del diseño y la construcción.

9. RESPONSABILIDADES.

10. CONCORDANCIA CON NORMAS OFICIALES.

11. BIBLIOGRAFÍA.

12. ANEXOS.



2.2.2 Código ASME

SECCIÓN

- I. Reglas para la Construcción de Calderas de Vapor.
- II. Materiales.
Parte **A** – Especificaciones de Materiales Ferrosos.
Parte **B** – Especificaciones de Materiales No Ferrosos.
Parte **C** – Especificaciones para la Soldadura, Electrodo y los Materiales de Aporte.
Parte **D** – Propiedades (Habituales y Métricas).
- III. Reglas para la Construcción de Componentes de Plantas Nucleares.
Subsección NCA – Requisitos Generales por la División 1 y División 2.
División 1
Subsección **NB** — Clase 1 Componentes.
Subsección **NC** — Clase 2 Componentes.
Subsección **ND** — Clase 3 Componentes.
Subsección **NE** — Clase MC Componentes.
Subsección **NF** — Soportes.
Subsección **NG** — Bases Estructurales de Soporte.
Subsección **NH** — Clase 1 Componentes en Servicio a Temperatura Elevada.
Apéndices
División 2 — Código para Contenciones de Concreto.
División 3 — Contenciones para Transportación y Almacenaje de desechos de Combustibles nucleares de alto nivel.
- IV. Reglas para la Construcción de Calderas de Vapor.
- V. Ensayos No Destructivos.
- VI. Reglas Recomendadas para el Cuidado y Operación de las Calderas de Calefacción.
- VII. Pautas Recomendadas para el Cuidado de Calderas de Potencia.
- VIII. Reglas para la Construcción de Recipientes a Presión.**
División 1
Subsección **A** — Requisitos generales.
Parte **UG** – Requisitos Generales para todos los Métodos de Construcción y todos los Materiales.

Subsección **B** — Requisitos Pertencientes a los Métodos de Fabricación en Recipientes a Presión.
Parte **UW** – Requisitos de Recipientes a Presión Fabricados por Soldadura.
Parte **UF** – Requisitos de Recipientes a Presión Fabricados por Forja.
Parte **UB** – Requisitos de Recipientes a Presión Fabricados por Soldadura Fuerte.

- Subsección **C** — Requisitos para Recipientes a Presión Construidos de Carbón y de Aleaciones Bajas de Acero.
- Parte **UCS** — Requisitos de Recipientes a Presión Construidos de Carbón y de Aleaciones Bajas de Acero.
- Parte **UNF** — Requisitos para Recipientes a Presión Construidos de Materiales no Ferrosos.
- Apéndice **NF** — Características de los Materiales No Ferrosos (Información y Normatividad).
- Parte **UHA** — Requisitos para Recipientes a Presión Construidos de Aceros de Alta Aleación.
- Parte **UCI** — Requisitos para Recipientes a Presión Construidos de Hierro Fundido.
- Parte **UCL** — Requisitos para Recipientes a Presión Soldados Construidos con Materiales con Revestimiento Integral Resistentes a la Corrosión, Material Soldado con Material de Aporte.
- Parte **UCD** — Requerimientos para Recipientes a Presión Construidos de Hierro Dúctil de Molde.
- Parte **UHT** — Requerimientos para Recipientes a Presión Construidos de Aceros Ferríticos, con Propiedades a Tracción mejoradas por Tratamientos Térmicos.
- Parte **UWL** — Requisitos para Recipientes a Presión Fabricadas por Estratificación.
- Parte **ULT** — Reglas Alternativas para la Construcción de Recipientes a Presión de Materiales de Gran Resistencia a Baja Temperatura.
- Parte **UHX** — Reglas Para Envolveres y Tubería de Cambiadores de Calor.

División 2 Reglas Alternativas.

Reglas Alternativas para la Construcción de Recipientes a Presión

Parte **1** — Requisitos Generales.

Parte **2** — Responsabilidades y Deberes.

Parte **3** — Requisitos de Materiales.

Parte **4** — Requisitos para las Reglas de Diseño.

Parte **5** — Requisitos para el Análisis de Diseño.

Parte **6** — Requisitos para Fabricación.

Parte **7** — Requisitos para la Inspección y de la Examinación.

Parte **8** — Requisitos de la Pruebas de Presión.

Parte **9** — Protección de Sobrepresión de Recipientes de Presión.

División 3 Reglas Alternativas.

Reglas Alternativas para la Construcción de Recipientes a Presión Altos.

Parte **KG** — Requisitos Generales.

Parte **KM** — Requisitos del Material.

Parte **KD** — Requisitos del Diseño.

Parte **KF** — Requisitos de Fabricación.

Parte **KR** — Dispositivos de la Relación de Presión.

Parte **KE** — Requisitos para la Examinación.

Parte **KT** — Requisitos de Prueba.

Parte **KS** — Marcas, Estampas, Informes y Expedientes.



- IX. Clasificaciones de Soldadura y Soldadura Fuerte.
 - Parte **QW** — Soldadura.
 - Parte **QB** — Como Soldadura.
- X. Recipiente a Presión de Plástico Reforzados con Fibra de Vidrio.
- XI. Reglas para Inspección de Servicios de Componentes para Centrales Nucleares.
- XII. Reglas para la Construcción y Servicio Continuo de Tanques de Transporte.

La sección VIII del Código ASME contiene tres divisiones. La División 1, que cubre el diseño de recipientes a presión no sujeta a fuego directo y las reglas de esta cubre los requisitos mínimos de construcción para el diseño, fabricación, inspección y certificación de recipientes a presión.

La División 2, contiene otras alternativas para cálculos de recipientes a presión.

Como se ha venido mencionando el considerable avance tecnológico que se ha tenido en los últimos años ha traído como consecuencia la implicación de nuevos Códigos y Normas; el ASME consiente de ello, crea dentro de la sección VIII de su Código, un nuevo tomo denominado División 2. "Reglas Alternativas".

La División 2 proporciona un juego alternativo de reglas para la construcción de recipientes a presión, aunque pareciera representar una aproximación completamente y moderna para el diseño y construcción de recipientes a presión, no se ha pensado remplazar a la División 1.

La División 2 es una modificación de la División 1. Nuevos requerimientos han sido añadidos y otros hechos más rigurosos para lograr un diseño balanceado. Los resultados están en recipientes con grado de seguridad que iguala o sobre pasa a los recipientes construidos de acuerdo a la División 1, en algunos aspectos la División 2 es similar a la Sección III del Código para recipientes nucleares, aunque no fuese es la intención del comité. Después de varios años de experiencia, un intento probablemente será el hecho de consolidar las divisiones 1 y 2.

2.3 CÓDIGOS AUXILIARES.

CÓDIGO BS-5500

La primera edición del BS-5500, el cual cubre los Recipientes a Presión construidos de acero al carbono, aleaciones ferríticas y austeníticas, reemplaza al estándar BS-1500 "Recipientes a Presión construidos por soldadura de fusión para uso en la industria química, petrolera e industriales afines.

Parte 1 (aceros al carbono y aceros ferríticos aleados).

Parte 2 (aceros inoxidable austeníticos).

Este estándar especifica los requerimientos para el diseño, construcción, inspección, pruebas y certificación de recipientes a presión construcción por soldadura de fusión y no expuestos a fuego directo. Los materiales de construcción son definidos en la sección 2 del mismo.

El Código BS-5500 no cubre los casos siguientes:

a) Tanques de almacenamiento diseñados para almacenar líquidos a presión cercanas a la atmosférica, por ejemplo, aquellos donde la presión hidrostática adicional debida al líquido no excede de 140 m bar ó 6 m bar abajo de la presión atmosférica de acuerdo con los estándares BS-2594 o BS-2654.

b) Recipientes en los cuales los esfuerzos calculados de acuerdo con las ecuaciones dadas en la sección tres del mismo Código, sean menores en 10% de los esfuerzos de diseño permitidos en la misma sección.

c) Recipientes Especiales para trabajar a presiones muy altas.

e) Recipientes Transportables, por ejemplo Carros Tanques, etc.

f) Recipientes para aplicaciones específicas, los cuales son cubiertos por los estándares listados en el "BSI Yearbook".

El Código BS-5500 cuenta con cinco secciones y once apéndices que a continuación se presenta.

Sección 1 — Generalidades.

Sección 2 — Materiales.

Sección 3 — Diseño.

Sección 4 — Mano de obra y manufacturera.

Sección 5 — Generalidades Inspección y pruebas.

APÉNDICES

- A.- Requisitos de diseños para cargas y componentes cubiertos por la sección tres.
- B.- Envolturas cilíndricas, esféricas y cónicas bajo cargas combinadas, incluyendo viento y sismo.
- C.- Prácticas recomendadas para evaluar los daños de recipientes sujetos a fatiga.
- D.- Prácticas tentativas recomendadas para evaluar los daños de recipientes construidos de acero al carbono y carbono-manganeso requeridos para trabajar a baja temperatura.
- E.- Conexiones soldadas para recipientes a presión.
- F.- Métodos alternativos de diseño usando el método compensación de área, gradientes térmicos, etc.
- G.- Métodos recomendados para el cálculo de esfuerzos debidos a cargas locales.
- H.- Recomendaciones generales para soldaduras consumibles y tratamiento de soldadura en juntas soldadas de acero ferrítico disimilar.
- J.- Mecanismo de protección para alivio de presión.
- K.- Derivación de las resistencias de diseño del material nominal.
- L.- Bases de diseños de las cartas usadas para aberturas y derivaciones.

2.4 OTROS CÓDIGOS AUXILIARES.

Los Códigos mencionados anteriormente cubren los requisitos para el diseño y fabricación de recipientes a presión pero existen ciertos elementos de estos, los cuales no son de consideración dentro de la jurisdicción del Código, o bien, no está definida explícitamente la forma en que deben ser analizados dichos elementos. Por tal motivo se hace necesario el uso de otros Códigos, los cuales reglamenten el análisis y/o diseño de los mismos. Así, a manera de ejemplo, podemos mencionar que el código ASME, establece que todos los recipientes a presión deben ser diseñados para resistir los esfuerzos generados por gradientes de temperatura, por solicitaciones de viento, nieve o sismos, pero en ningún momento proporciona los lineamientos en los cuales se deben basar para la cuantificación y evaluación de dichos efectos.

De acuerdo a lo anterior, es clara la necesidad de otros Códigos y manuales que respalden los elementos de los recipientes a presión, o bien que establezcan criterios para el análisis de los efectos antes mencionados.

De esta manera, los siguientes Códigos y Manuales nos pueden servir para el diseño de recipientes a presión.

- a).- Manual de diseño de obras civiles de la CFE.
- b).- Manual de IMCA y AHMSA.
- c).- Manual de la AISC (American Institute of Steel Construcción).
- e).- Standar BS-449 "Uso del acero estructural".

En el manual de diseño de obras civiles de la CFE, se establecen los requerimientos para el análisis de estructuras sujetas a solicitaciones debidas a viento o sismo, en este trabajo se establecen los criterios de diseño que deben seguirse para el diseño, proporcionando una estabilidad y soporte adecuado para el equipo.

Mientras que en los Estados Unidos, la ANSI, en unos de sus estándares (ANSI A-58.1) proporciona los lineamiento para el análisis por viento o sismo de estos equipos.

Por otra parte, en los manuales AHMSA, AISC y el BS-449 se encuentran los requerimientos que deben cumplir las secciones estructurales. Estos mismos manuales nos proporcionan además de los criterios que analizan las dimensiones, propiedades, resistencia de los perfiles y secciones estructurales que se encuentran disponibles en el mercado nacional (tal es el caso del manual AHMSA.), en los Estados Unidos (el manual de la AISC) o en el Reino Unido (estándar BS-449).

En lo que respecta a las conexiones y accesorios requeridos por el equipo, nos podemos auxiliar de los estándares siguientes:

- ASME B.16.5 2003 Pipe flanges and flanged fittings NPS ½ through NPS 24.
- ASME B.16.9 2003 Factory made wrought steel butt welding fittings.
- ASME B.16.11 2005 Forged fittings, socket-welding and threaded.
- ASME B.16. 47 2006 Large Diameter Steel Flanges, NPS 26 throught NPS 60.
- ASME B.36. 10M 2004 Welded and seamless wrouht steel pipe.

2.5. COMPARACIÓN DEL GRADO DE SEGURIDAD EN ALGUNOS CÓDIGOS.

Como se muestra en la Fig. 2.1 algunos códigos dan un grado de seguridad distinto, obteniendo como resultado espesores distintos; esto es por el grado de seguridad que maneja cada código.

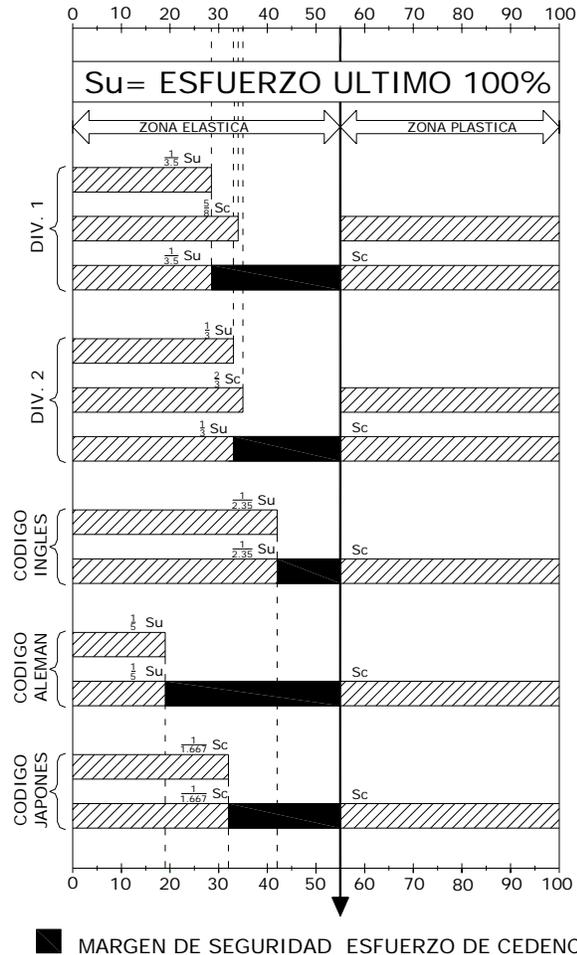


Fig. 2.1

■ MARGEN DE SEGURIDAD ESFUERZO DE CEDENCIA

	DIVISION 1		DIVISION 2		INGLES	
	CASCARÓN	CABEZA	CASCARÓN	CABEZA	CASCARÓN	CABEZA
ESPESOR (t) =	$\frac{PR}{SE - 0.6P} + C$	$\frac{PD}{2SE - 0.2P} + C$	$\frac{PR}{SE - 0.5P} + C$	$\frac{PR}{SE - 0.25P} + C$	$\frac{PR}{F - P} + C$	$\frac{PR}{2F - P} + C$
MATERIAL	SA-516 70	SA-516 70	SA-516 70	SA-516 70	SA-516 70	SA-516 70
PRESIÓN (P) =	290 Lb/in ²	290 Lb/in ²	290 Lb/in ²	290 Lb/in ²	290 Lb/in ²	290 Lb/in ²
RADIO (R) =	36 in	36 in	36 in	36 in	36 in	36 in
ESFUERZO (S) =	20,000	20,000	23,333.3	23,333.3	29,787	29,787
EFICIENCIA (E) =	85%	100%	100%	100%	100%	100%
FACTOR (C) =	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
t =	0.745 = 3/4	0.647 ≈ 3/4	0.575 ≈ 5/8	0.574 ≈ 5/8	0.480 ≈ 1/2	0.300 = 3/8

CAPITULO 3

MATERIALES.

3.1. ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES.

Los materiales usados para el diseño y fabricación de recipientes a presión, también están regidos por Normas y Códigos.

La NRF-028-PEMEX-2004 Capitulo 8, párrafo 8.1.1, establece que los materiales sujetos a esfuerzos debido a la presión para construcción de recipientes, deben fabricarse de conformidad con las especificaciones de la Sección II, del Código ASME.

Así, la ASTM (American Society For Testing and Materials) y la AWS (American Welding Society) son las autoridades máximas en Estados Unidos, mientras que en Inglaterra la BSI (British Standard Institución) es la encargada de normalizar el uso de materiales y soldaduras.

En el caso del Código ASME, toma bajo su jurisdicción los materiales amparados por la ASTM y solo le antepone una "S" a los materiales amparados por él. De manera similar lo hace para el material de los electrodos utilizados, los cuales son amparados por la AWS, ejemplo:

- Nominación ASTM A-515 70
- Nominación ASME SA-515 70

Es importante mencionar, que el Código ASME dedica toda la Sección II a los materiales que ampara, en donde nos proporciona el valor de los esfuerzos máximos permisibles a distintas temperaturas y parte de la Sección IX a materiales de los electrodos amparados por él.

En el caso de la BSI, la cual es una norma donde convergen la mayoría de los estándares usados industrialmente en Inglaterra, podemos mencionar los estándares siguientes, los cuales sirven de apoyo al estándar BS-550 en lo que respecta a los materiales usados.

- **BS-449** — Uso del acero estructural en la construcción.
- **BS-1501** — Aceros para Recipientes a Presión sometidos o no a fuego directo, Parte 1, Aceros al carbono y Aceros al carbono-magnesio.
- **BS-1502** — Aceros para recipientes a presión sometidos o no a fuego directo Secciones en barras.
- **BS-1503** — Aceros para recipientes a presión sometidos o no a fuego directo.
- **BS-1510** — Aceros para usarse en las industrias químicas, petroleras e industriales afines (requerimientos suplementarios para baja temperatura de acuerdo al BS-1501-6).
- **BS-1510 6** — Aceros para usarse en industrias químicas, petroleras e industrias a fines.

3.2. MATERIALES AMPARADOS POR EL CÓDIGO ASME

Las placas de acero al carbono, se usan en la mayoría de los casos, donde lo permiten las condiciones de servicio debido a su bajo costo y mayor disponibilidad. Estos aceros son fabricados para que puedan ser soldados por fusión y cortados por medio de oxígeno, su contenido de carbono no excede de un 35%.

Existe una gran diversidad de materiales especificados por el ASME de los cuales los aceros al carbono más comerciales en nuestro país son el **SA-285 C**, **SA-515 70**, **SA-516 70**.

Las partes secundarias de los recipientes (partes no sujetas a presión), como son soportes o algunas partes misceláneas, pueden ser fabricadas con aceros estructurales, tal como, **SA-36** y/o **SA-285** (grados A, B, C y D), para partes sujetas a presión, también estos aceros pueden ser usados cumpliendo con los siguientes requerimientos:

- a) Recipientes que no vayan a ser usados en servicios, como en sustancias letales, ya sean líquidas o gases.
- b) Que las temperaturas a las cuales el material vaya a ser usado, sean entre los rangos de -29°C (-20°F) y 343°C (650°F).
- c) Para cascarones, cabezas y boquillas en los cuales el espesor de la placa no excede de 1.6 cm. (5/8").
- d) El acero sea fabricado por el proceso de horno eléctrico, hornos de hogar abierto o por el proceso de oxígeno básico.

Uno de los aceros más empleados en la construcción de recipientes a presión es el **SA-285** grado **C**. Este acero es muy dúctil y fácil de conformar, soldar y maquinar. Es también de los aceros más económicos y de mayor existencia en el mercado, es el indicado para temperaturas moderadas.

En los casos de altas temperaturas, se usan con ventaja aceros de alta resistencia, para reducir el espesor de la pared, el **SA-515** grado **70** es adecuado para esas aplicaciones requiriendo un espesor de pared de solamente un 78% del que se requiere con el **SA-285** grado **C**. Este material, es también de fácil fabricación, aunque más caro que los otros aceros.

El material **SA-285**, normalmente se usa para temperaturas mayores de 18.33°C (61°F) y menores de 345°C (650°F), mientras que en **SA-515**, se usan para temperaturas que estén entre 18.33°C (61°F) y 413°C (775°F). En el caso de que haya temperaturas más altas que las indicadas, se usan por lo general aceros de baja aleación, tal es el caso del **SA-387** (1-1/4% de Cromo -1/2 Mo), el cual puede ser usado hasta aproximadamente 556°C (1050°F).

Ahora bien, se han mencionado solamente los casos para temperaturas moderadas o altas, pero definitivamente existe una gran variedad de procesos en los cuales, se tienen temperaturas criogénicas, en estos casos, los materiales más recomendables dentro de los aceros al carbono, son el **SA-516**, el cual puede usarse a -45°C (-50°F) en el caso de tener

temperaturas más bajas, se puede pensar en utilizar aceros a base de níquel como es el **SA-203** (2-1/2 a 3-1/2 de Ni), que se usa normalmente para temperaturas mucho más bajas que las anteriores; los aceros con mas contenido de níquel se usan hasta llegar a los inoxidable, como es el caso del **SA-240 304**, que resiste la temperatura hasta de -254 °C (-425°F).

Los esfuerzos permisibles para aceros al carbono y de baja aleación, así como aquellos usados en tuberías y forjas, se pueden consultar en la Sección II, parte D del Código ASME al igual que los aceros inoxidable.

3.3. SELECCIÓN DEL MATERIAL.

Los tres aspectos fundamentales que intervienen para una adecuada selección del material son los siguientes:

- Tipos de fluido a manejar.
- Condiciones de temperatura y presión.
- Facilidad para adquirir el material en el mercado.

Tomando en cuenta el Fluido a Manejar.

Para la selección del material con respecto al tipo de fluido a manejar, ésta estará sujeta a las características de corrosión de dicho fluido, ya sea un acero al carbono para fluido poco corrosivo o un acero de alta aleación o de recubrimiento para un fluido altamente corrosivo.

Por otro lado, existen fluidos que requieren el uso de materiales especiales, como por ejemplo: Hastelloy que es una aleación del Níquel, ampliamente utilizado y muy resistente a los ambientes corrosivos, como el de procesos químicos, control de contaminación, producción de papel, tratamiento de basuras y en la recuperación de gas ácido natural.

En lo relacionado con las sustancias a manejar podemos auxiliarnos con la *Tabla 3.1*. Cabe mencionar que es a manera de ilustración ya que no es posible indicar todas las sustancias existentes sino las más generales.

Uno de los principales aspectos que caracterizan a los materiales, es su comportamiento al estarlos habilitando, dentro de los más característicos se puede mencionar el de la unión de dos placas por medio de soldadura, lo que puede dar como resultado una reducción en la resistencia de la parte soldada o en las partes cercana a ella, esto puede ser por una discontinuidad metalúrgica del acero y/o esfuerzos residuales, por lo general al someter a las placas a trabajos mecánicos, ejemplo: rolado.

<i>TABLA 3.1 (LISTA DE MATERIALES DE ACUERDO AL SERVICIO)</i>						
<i>SUBSTANCIA</i>	<i>ACERO AL CARBONO</i>	<i>NIQUEL</i>	<i>INCONEL</i>	<i>MONEL</i>	<i>A.I. TIPO 304</i>	<i>A.I. TIPO 316</i>
Acetona	A	A	A	A	A	A
Acetileno	A	A	A	A	A	A
Cerveza	P	A	A	A	A	A
Benceno Benzal	A	A	A	A	A	A
Bencina Nafta	A	A	A	A	A	A
Acido Borico	X	---	---	P	A	A
Cloruro en Gral.	X	R	R	R	X	X
Butano	A	---	---	A	A	A
Acido Cítrico	X	R	A	A	A	A
Mercurio	A	A	---	A	A	A
Gas Natural	A	A	A	A	A	A
Aceite Petróleo 500°F Crudos	A	P	A	P	P	R
Ácidos Fosfórico	P	P	P	P	P	R
Azufre	A	A	A	A	P	P
Acido Sulfúrico	X	P	P	R	P	A
Acido Sulfuroso	X	P	P	P	A	A
Whiskey y Vinos	X	A	A	P	A	A
Substancias con Hidrógenos	A	A	A	A	A	A

Como referencia a la tabla, consideraremos lo siguiente:

A = Bueno

R = Recomendable,

P = Precaución (depende de las condiciones)

X = No recomendable.

Tabla 3.2 MATERIALES RECOMENDADOS PARA DIFERENTES RANGOS DE TEMPERATURA.

SERVICIO	CRIOGENICO		TEMPERATURA BAJAS			TEMPERATURAS INTERMEDIAS			TEMPERATURAS ELEVADAS			
TEMPERATURA DE DISEÑO °F	-425° a -321°	-320° a -151°	-150° a -91°	-90° a -51°	-50° a -41°	-40° a 60°	61° a 650°	651° a 775°	776° a 850°	851° a 1050°	1051° a 1150°	
CASCARÓN, CABEZAS Y PLANTILLAS DE REFUERZO	SA-240 304	SA-353 (9% Ni) (Ver Nota 1) SA-353 I (9% Ni) (Ver Nota 1)	SA-203 E (Ver Nota 1)	SA-203 B (Ver Nota 1)	SA-516 65 (Ver Nota 1)	SA-516 70 (Ver Nota 2)	SA-285 C	SA-515 70	SA-204 B	SA-387 11 CL2 ó CLAD SA-263 ó SA-264	SA-240 304	
	SA-240 304L	SA-240 304 (18Cr-8Ni) SA-240 304L (18Cr-8Ni)	SA-203 D (Ver Nota 1)	SA-203 A (Ver Nota 1)	SA-203 B (Ver Nota 1)	SA-516 65 (Ver Nota 2)	SA-515 70		SA-204 C ó CLAD SA-263 ó SA-264			
BRIDAS CIEGAS	PLACA	FORJA	FORJA	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	SOLO R/P/ SA-515 70	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	FORJA
	FORJA	SA-182 F304 SA-182 F304L	SA-522 (*9% Ni) SA-182 F304 SA-182 F304L	SA-350 LF3	SA-350 LF3	SA-350 LF2	SA-350 LF2 SA-10 S	SA-10 S	SA-105	SA-182 F1 (B) SA-182 F2 (C)	SA-182 F11	---
SILLETAS O FALDON	12m de L. Hasta L.B.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	SA-283 C	SA-515 70 SA-283 C	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.
RECUBRIMIENTO: CASCARON, CABEZAS, BOQUILLAS Y REGISTROS	---	---	---	---	---	---	VER CROQUIS Y HOJA DE PROCESO	VER CROQUIS Y HOJA DE PROCESO	VER CROQUIS Y HOJA DE PROCESO	VER CROQUIS Y HOJA DE PROCESO	VER CROQUIS Y HOJA DE PROCESO	---
BOQUILLAS Y BRIDAS SOLDADAS	IDEM BRIDAS CIEGAS DE FORJA	IDEM BRIDAS CIEGAS DE FORJA	SA-350 LF3	SA-350 LF3	SA-350 LF2	SA-350 LF2	SA-105	SA-105	IDEM BRIDAS CIEGAS DE FORJA	SA-182 F11	SA-182 F310	
R PARA CUELLOS DE BOQS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	SA-515 70	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	SA-240 304
COPLES	IDEM BRIDAS CIEGAS DE FORJA	IDEM BRIDAS CIEGAS DE FORJA	SA-350 LF3	SA-350 LF3	SA-350 LF2	SA-350 LF2	SA-105	SA-105	IDEM BRIDAS CIEGAS DE FORJA	SA-182 F11	SA-182 F310	
AROS APOYO, PLATOS Y SOPORTES DE BAJANTES	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	SA-283 C	SA-515 70	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	SA-240 304	
PERFILES ESTRUCTURALES EN GENERAL	TODO PERFIL QUE SE SUELDE A CASCARÓN, CABEZA Y FALDÓN SERA DE IDENTICO MATERIAL QUE ESTOS							A-36	A-36	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	SA-240 304
R DE BRIDAS INT. MAMPOSTEO COLECTORES Y MISELANEOS	TODO ACCESORIO DE PLACA QUE SE SUELDE A CASC. CABS. Y FALDÓN SERAN DE IDENTICO MAT. QUE ESTOS							A-36	SA-515 70	IDEM. CASC. Y CABS.	IDEM. CASC. Y CABS.	SA-240 304
REGILLAS	ACERO INOXIDABLE O ALUMINIO						ACERO AL CARBONO		ACERO INOXIDABLE Ó ALUMINIO			
TUBERIA INTERIOR	SA-312 TP304	SA-333 8 (9% Ni)	SA-333 3	SA-333 7	SA-333 6	SA-333 6	SA-53 B	SA-53 B	SA-335 P1	SA-335 P11	SA-312 TP304H	
	SA-312 TP304L	SA-312 TP304L										
CONEXIONES SOLDABLES	SA-403 WP304	SA-420 WPL8 (9% Ni)	SA-420 WPL3	SA-420 WPL3	SA-420 WPL6	SA-420 WPL6	SA-234 WPA	SA-234 WPB	SA-234 WP1	SA-234 WP11	SA-403 WP304H	
	SA-403 WP304L	SA-312 TP304 SA-312 TP304L					SA-234 WPB					
ESPARRAGOS EXTERIORES	SA-320 B8	SA-320 B8	SA-320 L7	SA-320 L7	SA-320 L7	SA-193 B7 (Ver Nota 4)	SA-193 B7	SA-193 B7	SA-193 B7	SA-193 B7 (Ver Nota 3)	SA-193 B8	
TUERCAS EXTERIORES	SA-194 8	SA-194 8	SA-194 4	SA-194 4	SA-194 4	SA-194 2H	SA-194 2H	SA-194 2H	SA-194 2H	SA-194 2H	SA-194 8	
TORNILERIA INTERIOR	SA-320 B8	SA-320 B8	SA-193 B6	SA-193 B6	SA-193 B6	SA-193 B6	SA-307 B	SA-193 B6	SA-193 B6	SA-193 B6	SA-193 B8	
	SA-194 8	SA-194 8	SA-194 6	SA-194 6	SA-194 6	SA-194 6		SA-194 6	SA-194 6	SA-194 6	SA-194 6	
EMPAQUES INTERIORES	A S B E S T O C O M P R I M I D O											
EMPAQUES EXTERIORES	GRAFITO LAMINADO FLEXIBLE CON INSERTO DE LAMINA EN ESPIRAL DE ACERO INOXIDABLE ASTM A-240/A-240M TP316											
MALLAS	A C E R O I N O X I D A B L E T - 3 0 4											
CONEXIONES SOLDABLES	SA-312 TP304	SA-333 8 (9% Ni)	SA-333 3	SA-333-7	SA-333-6	SA-333-6	SA-53 B	SA-106 B	SA-335 P1	SA-335 P11	SA-312 TP304H	
	SA-312 TP304L	SA-312 TP304 SA-312 TP304L					SA-106 B					
PLATOS												
<p>Nota 1.- HASTA 51mm DE ESPESOR, PARA MAYORES VER SA-20, TABLA 16, LLEVARA RELEVADO DE ESFUERZOS.</p> <p>Nota 2.- VER SA-20, TABLA 16. LLEVARA RELEVADO DE ESFUERZOS CUANDO SE TENGA UNA TEMPERATURA DE DISEÑO DE -20°F Y MENORES (CON PRUEBA CHARPY).</p> <p>Nota 3.- 1000°F SE PUEDE EMPLEAR ESTE MATERIAL.</p> <p>Nota 4.- HASTA 20°F SE PUEDE EMPLEAR ESTE MATERIAL.</p>												

CAPITULO 4

DISEÑO.

4.1 RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERNA.

El diseño de recipientes operando bajo presión interna consiste básicamente en el cálculo de los elementos que lo forman (cabezas, cascarones y conos que lo conforman), basándonos en la NRF-028-PEMEX-2004 Capítulo 8, párrafo 8.1.2, la cual nos remite al Código ASME, Sección VIII, División 1, parte UG, esta parte nos indica formulas y parámetros que se tienen que considerar para el diseño. Estos parámetros principalmente son presión (P) y temperatura (T).

Los recipientes deben ser diseñados al menos para la más severa condición de presión y temperatura esperada en operación normal más un incremento del valor mayor del 10% a 2.11 kg/cm² (30 psi), lo que da como resultado una Presión de Diseño. En cuanto a la temperatura usada en el diseño, esta no debe ser menor que la temperatura medida del metal (a través del espesor) esperada bajo condiciones de operación en la parte considerada, es usual que a la temperatura antes descrita entre 0°C (32°F) y 400°C (750 °F) se le haga un incremento mínimo de 14°C (25°F). Si es necesaria la temperatura del metal debe ser determinada por cálculo o por medición de un equipo en servicio bajo condiciones de operación equivalente,

Cuando un recipiente es sometido a una presión interna, se genera un esfuerzo circunferencial y un esfuerzo longitudinal, por lo que para el diseño del equipo, ambos esfuerzos deben ser determinados. De esta manera los distintos Códigos utilizados para el diseño de recipientes a presión, se basan en lo anterior para reglamentar el diseño de estos equipos y únicamente difieren unos Códigos de otros, en el factor de seguridad empleado por cada Código.

Otros factores que intervienen en el cálculo del espesor de recipientes, son el esfuerzo máximo permisible (S) del material que como se ha mencionado se encuentra en Tablas de esfuerzos en base a la temperatura de diseño y especificación del material seleccionado.

La corrosión es otro factor considerable que afecta al espesor calculado, ya que para recipientes que están sujetos a adelgazamiento por sustancias corrosivas se les debe incrementar el espesor de acuerdo al factor de corrosión considerado.

Finalmente la eficiencia de la junta (E) principalmente define el tipo de radiografiado que se hará al recipiente, además de afectar al espesor.

4.2 CÁLCULO Y DISEÑO DE LAS PARTES DE UN RECIPIENTE POR PRESIÓN INTERNA.

Cascarón.

El cascarón de los recipientes es generalmente cilíndrico debido a que en esta forma geométrica tiene un área transversal más grande para un perímetro dado y por lo tanto mayor resistencia que con otras formas exceptuando la esférica y con ello mayor economía y mejor facilidad de fabricación.

Los esfuerzos que se presentan en este tipo de formas son:

1. Esfuerzos Longitudinales: Causados por la presión del fluido contenido.
2. Esfuerzos Tangenciales: Causados por la misma presión anterior
3. Esfuerzos Residuales: Causados por el proceso de soldadura o cualquier trabajo mecánico.
4. Esfuerzos causados por Cargas Externas: Tales como viento y sismo.

Si consideramos al cilindro como un recipiente de pared delgada para aplicar la teoría de membranas, se obtiene que cualquier partícula del cilindro esta sometida a dos tipos de esfuerzos principalmente, que son el esfuerzo longitudinal y esfuerzo transversal.

Una vez analizado lo anterior, se indican las fórmulas especificadas por el código ASME.

Esfuerzo Longitudinal (Juntas Circunferenciales).- Cuando el espesor no exceda de la mitad del radio interior o P no exceda de $1.25 SE$, la siguiente fórmula es aplicada:

$$t = \frac{PR}{2SE + (0.4 \times P)} + C$$

Donde:

P .- Presión de diseño (kg/cm^2)

S .- Esfuerzo permisible del material (kg/cm^2)

E .- Eficiencia de la junta de Soldadura (Adimensional).

R .- Radio Interior del Recipiente (cm).

C .- Tolerancia por corrosión especificada (mm).

Fórmula que nos da el espesor de diseño mínimo requerido de un cilindro (cascarón) sujeto a presión interna.

Esfuerzo Circunferencial (Juntas Longitudinales).- Cuando el espesor no exceda de la mitad del radio interior, o P no exceda de $0.385 SE$, la siguiente fórmula es aplicada:

$$t = \frac{P(R + C)}{SE - (0.6 \times P)} + C$$

Donde:

P.- Presión de diseño (kg/cm²).

R.- Radio Interior del Recipiente (cm).

S.- Esfuerzo permisible del material (kg/cm²).

E.- Eficiencia de la junta de Soldadura (Adimensional).

C.- Tolerancia por corrosión especificada (mm).

Cabezas.

Las cabezas se clasifican en torisféricas, elipsoidales, hemisféricas y toricónicas, pero las más comunes son las tres primeras, a continuación se explica el tipo de cabeza que se usa en este estudio, además se ilustran en la Fig. 4.1.

Cabeza Elíptica (2:1)

Se emplea para recipientes que van a funcionar con presión relativamente alta y de diámetros considerables. Este tipo de cabezas su sección transversal es semi-elíptica y cuya relación del eje menor es generalmente 2:1, como se puede observar en Figura 4.1.

El esfuerzo en la cabeza es aproximadamente igual al esfuerzo en el cascarón cilíndrico, para cuando se tiene en ambos casos una eficiencia del 100% y el esfuerzo en la cabeza es ligeramente mayor, cuando se tiene una eficiencia del 85% en las soldaduras del cascarón cilíndrico. Sin embargo, la cabeza por tener integralmente la ceja recta, que es parte del cascarón cilíndrico, no podrá ser de menor espesor que el del cascarón. En este tipo de cabezas la profundidad es igual a:

$$H = \frac{D}{4}$$

Este tipo de cabezas es recomendable que se utilicen cuando los espesores estén entre 2.54 cm. (1") a 5.08 cm. (2"). Normalmente los espesores del cascarón y cabeza coinciden, de no ser así el criterio general es el de igualar los espesores con el del cascarón.

$$t = \frac{P(D + 2 \times C)}{2SE - (0.2 \times P)} + C$$

Donde:

P.- Presión de diseño (kg/cm²).

R.- Radio Interior del Recipiente (cm).

D.- Diámetro Interior del Recipiente (cm).

S.- Esfuerzo permisible del material (kg/cm²).

E.- Eficiencia de la junta de Soldadura (Adimensional).

C.- Tolerancia por corrosión especificada (mm).

Efecto de la Presión de Diseño.

Las **cabezas torisféricas**, son las más económicas en cuanto a costo de fabricación, por tener una área menor, lo que disminuye la cantidad de material utilizada, pero por tener un espesor mayor la hace incrementar el costo por el material y el de la fabricación, por ello, en base a la experiencia y en el análisis económico, se recomienda su uso para presiones entre 1 kg/cm² hasta 14 kg/cm², y espesores menores de 19 mm. (3/4"), sin embargo, teniendo una presión mayor de 10 kg/cm², es mejor considerar la posibilidad de emplear cabezas elipsoidales y hacer una comparación de costos.

Las **cabezas elipsoidales**, se forman en matrices cuya sección transversal diametral es una elipse, su costo de fabricación y la superficie es mayor que la de una torisférica de igual espesor, pero la igualdad de diámetro es menor; lo que no solo disminuye la cantidad de material empleado sino que también baja el costo de fabricación, principalmente tratándose de espesores mayores.

Este tipo de cabezas se usa mucho en recipientes que trabajan a presiones de 7 kg/cm², y mayores, pero se emplea en la mayoría de los recipientes que trabajan a presiones superiores a los 14 kg/cm² y siempre y cuando su espesor no resulte mayor de 51mm (2").

Si la relación de los ejes de la elipse es de 2:1, la resistencia de la cabeza es aproximadamente igual a la de un cilindro sin costuras con los mismos diámetros y espesores, por lo que resulta más económico el diseño y fabricación.

Geometría de las Cabezas.

Para hacer la elección del tipo de cabezas más adecuada para el diseño de recipientes tomando en cuenta la geometría de la misma, va a depender directamente de la presión de diseño y diámetro del recipiente como se verá más adelante, cuando seleccionemos sus fórmulas.

Es decir que para la presión de diseño podemos tomar la clasificación que se determinó en la sección "*Efecto de la Presión de Diseño*" y en el caso del diámetro del recipiente, en cuanto más grande sea el diámetro a una misma presión, el espesor será más grande y dado este espesor se pueda determinar la cabeza más apropiada.

La figura 4.1, es un esquema de las formulas utilizadas para el cálculo de espesores y presiones de prueba para los diferentes elementos antes mencionados.

Facilidad de Adquisición de los tipos de Cabezas en el Mercado.

Para hacer la elección desde este punto de vista, va a depender tanto de las condiciones de la presión de diseño, geometría de la cabeza y su costo; ésta última condición solamente se tomará en cuenta cuando por condiciones de diseño, exista la alternativa de seleccionar entre

dos cabezas, para ello se tienen que analizar sus costos y así elegir la más apropiada, esto es a criterio del diseñador.

La facilidad de adquisición de las cabezas va en proporción a su facilidad de fabricación y a la demanda existente en el mercado. Así tenemos por ejemplo que las cabezas torisféricas son más fáciles de adquirir o sea las más comerciales (por que se fabrican en México) y después las elípticas.

En el caso de las hemisféricas y las toricónicas como son un tipo de cabezas especiales, o sea que muy rara vez se utilizan y su fabricación sale muy costosa y por otro lado casi no se fabrican en el país, su adquisición se dificulta, por lo tanto como ya se dijo anteriormente solamente se utilizan en caso de presiones grandes y diámetros grandes a una misma presión.

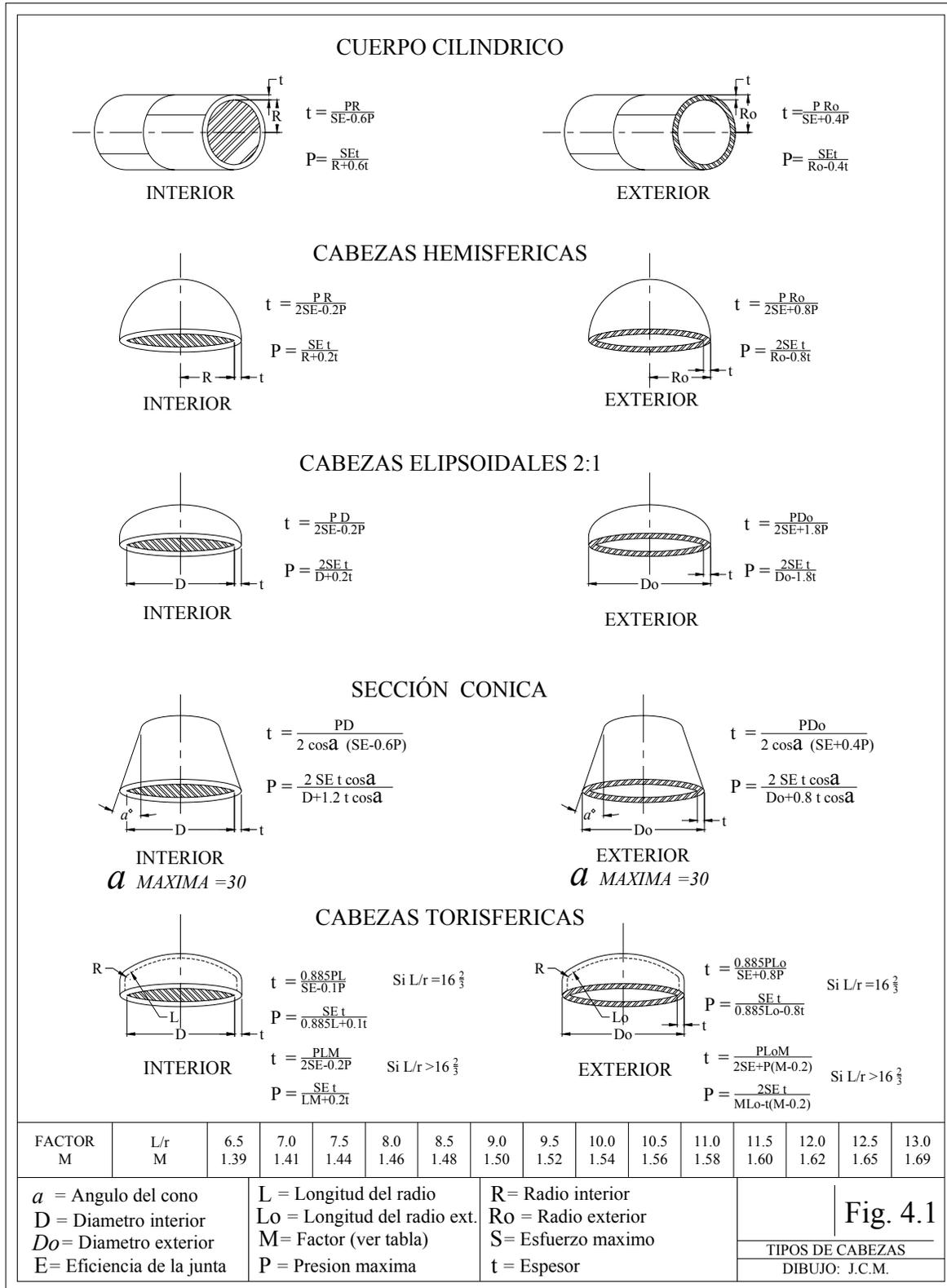
4.3 REVISIÓN DE LAS PARTES DE UN RECIPIENTE POR PRESIÓN EXTERIOR DE SEGURIDAD.

Dadas las condiciones de operación del recipiente cilíndrico (en nuestro estudio de la torre) y de los equipos conectados a ellos, puede presentarse el caso de que exista una presión negativa (presión de vacío) en el interior de ellos, este factor es de suma importancia en el diseño; dicha presión no puede ser determinada con exactitud, ya que se presentará únicamente cuando se lleve a cabo el vacío del recipiente, debido a la succión de la bomba.

Por lo antes expuesto el Código ASME, especifica para cálculo de recipientes cilíndricos a vacío total, un valor a partir de 1.055 kg/cm^2 (15 lb/in^2) y determina que para otros tipos de recipientes que no estén sometidos a vacío total se calcule para un valor a partir de 0.176 kg/cm^2 (2.5 lb/in^2), esto se refiere a recipientes que trabajan a presión atmosférica o mayor.

Esto quiere decir, que por el vacío que existe dentro del recipiente cilíndrico hay que revisarlo por presión exterior de seguridad y para el caso en que no exista presión interna en el recipiente o que ésta sea menor que 1.67 veces la presión exterior, dicho recipiente se diseña con una presión interna de 1.67 veces la presión exterior.

FORMULAS PARA EL CÁLCULO DE ESPESORES Y PRESIONES DE PRUEBA PARA LOS DIFERENTES ELEMENTOS.



Cilindro.

Un recipiente cilíndrico sometido a presión exterior tiene un esfuerzo circunferencial de compresión igual al doble del esfuerzo longitudinal causado por dicha presión exterior. En estas condiciones el recipiente puede llegar a fallar por inestabilidad estática, causada por el esfuerzo circunferencial de compresión.

Cuando un recipiente es sometido a presión interna y posee un espesor muy delgado en relación a su longitud relativamente grande, puede llegar a fallar, e incluso con esfuerzos que están abajo del punto de cedencia.

El valor de la presión exterior a la cual llega a fallar el recipiente se denomina "*Presión Crítica*", dicha presión está en función de la relación Do/tc (diámetro exterior/espesor corroído), del módulo de elasticidad del material y de la relación L/Do (longitud del recipiente/diámetro exterior).

El diseño por presión crítica de recipientes cilíndricos, como ya se dijo, está basado en consideración de la estabilidad elástica del mismo y su cálculo está hecho por aproximaciones sucesivas usando las siguientes fórmulas dadas por el Código ASME, Sección VIII, División 1, Parte UG-28.

Relaciones:

$$\frac{Do}{t} \geq 10 \quad y \quad \frac{L}{Do}$$

Donde:

Do. - Diámetro Exterior $\rightarrow Do = D + 2t$

L. - Longitud del cuerpo. $\rightarrow L = Lt + \frac{D}{6}$

Con estos valores y la Fig. G, de la Subparte 3 de la Sección II, Parte D del Código ASME, se obtiene el valor de A. De aquí se verifica para qué caso es aplicable.

Para valores de A < 0.000175

$$Pa = \frac{2 \times AE}{3 \times \left(\frac{Do}{t} \right)}$$

Para valores de A > 0.000175

Con el valor de A, la temperatura (T) y de la Fig. CS-2, Subparte 3 de la Sección II, Parte D del Código ASME:

$$B = ? \quad \frac{lb}{in^2} \rightarrow Pa = \frac{4 \times B}{3 \times \left(\frac{Do}{t} \right)}$$

Donde:

Pa.- Presión de trabajo externa máxima permitida (kg/cm² ó lb/pulg²).

B.- Factor de las gráficas G y CS-2, Subparte 3 de la Sección II, Parte D del Código, (este es el caso para el acero al carbono con bajo contenido de níquel).

Do.- Diámetro exterior del cascarón (cm ó pulg).

t.- Espesor mínimo del cascarón (cm ó pulg.)

L.- Longitud entre líneas de tangencia o longitud entre centro de atiezadores en (cm ó pulg).

E.- Modulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño.

Como $Pa = ? > P.E.S.$ **(El espesor es adecuado).**

Como $Pa = ? < P.E.S.$ **(Se incrementa el espesor o se agregan aros atiezadores).**

Si *Pa* (Presión de trabajo externa máxima permitida) resulta menor que la presión exterior de seguridad a la que va a estar sometido el recipiente, entonces esto puede fallar por inestabilidad elástica. Para evitar la falla, el recipiente requiere aumentarle su espesor o de uno o varios aros atiezadores, dependiendo de las dimensiones del recipiente; si es muy grande, el aumentar su espesor es incosteable por lo que es más conveniente y más barato poner aros atiezadores; el número de ellos depende hasta el momento en que la Presión de trabajo externa máxima permitida sea mayor que la presión exterior de seguridad a la que va ser sometido el recipiente, estos aros atiezadores son anillos exteriores colocados circunferencialmente con lo que aumenta la resistencia del recipiente.

Para determinar la altura de la cabeza (*h*), va a depender del tipo de ellas, así tenemos:

Para **cabezas torisféricas**: existe el Catálogo LUKENS que da valores de la altura para esta cabeza en proporción al diámetro del recipiente, con márgenes de 6 pulgadas.

Para casos en que el diámetro no coincida con un valor tabulado, es necesario hacer una interpolación y así poder determinar su altura.

Para **cabezas elípticas 2:1**: La altura es igual al diámetro interior entre cuatro, o sea:

$$H = \frac{D}{4}$$

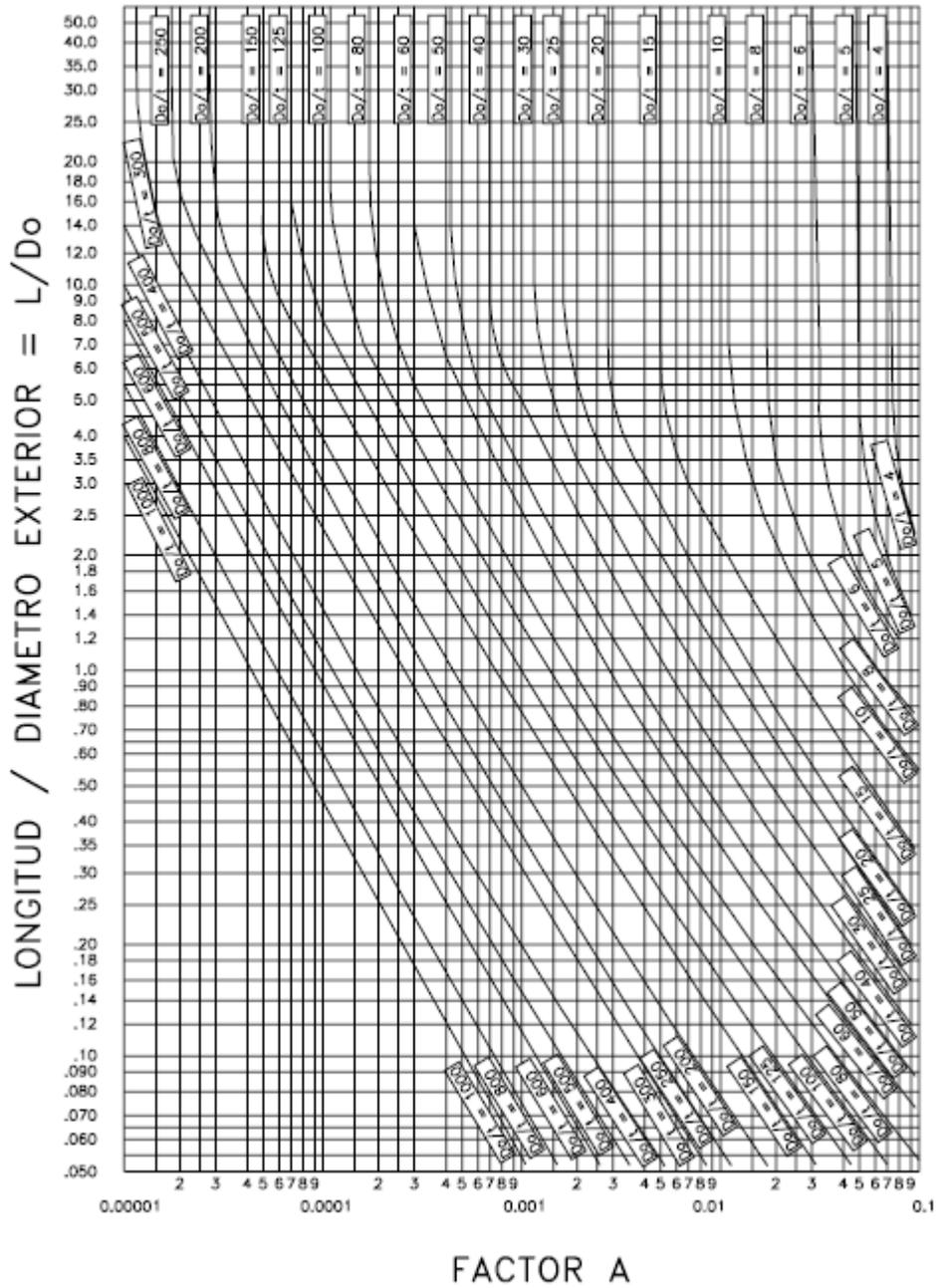
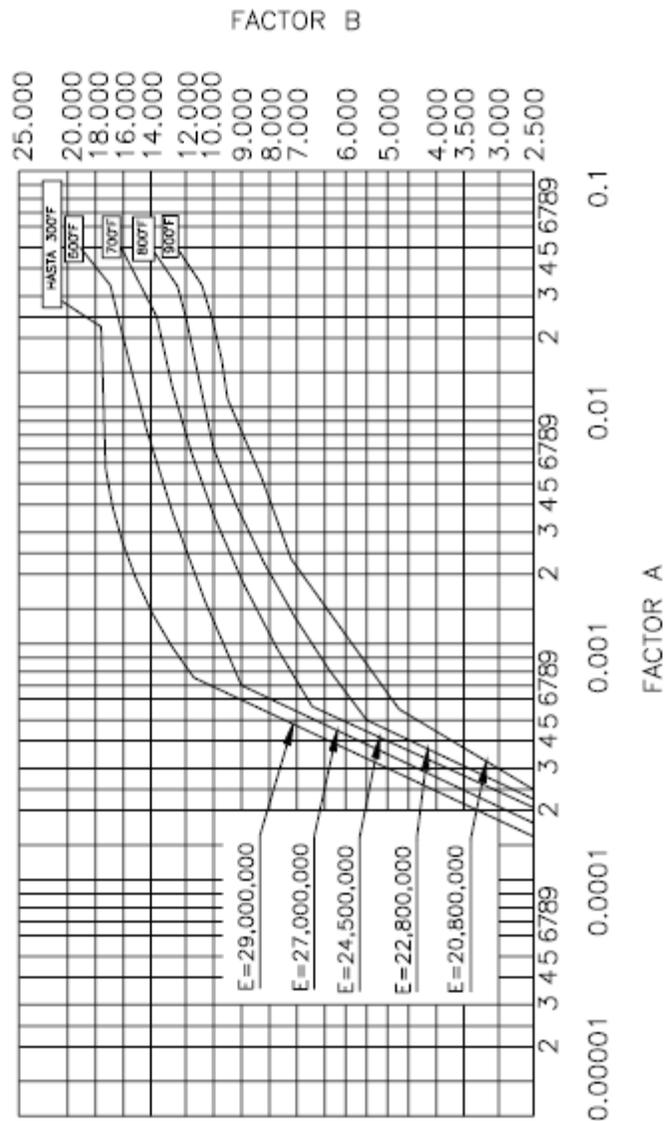


FIG. G. SUBPARTE 3, SECCIÓN II DEL CÓDIGO ASME- GRAFICA PARA RECIPIENTES CILÍNDRICOS SUJETOS A CARGAS EXTERNAS O COMPRESIVAS (PARA TODOS LOS MATERIALES)



LOS VALORES DE ESTA GRAFICA SON APLICABLES CUANDO EL RECIPIENTE ES FABRICADO CON ACERO AL CARBON Y LA RESISTENCIA A LA FLUENCIA ESPECIFICADA ES DE 30,000 PSI. O MAYOR. EN ESTA CATEGORIA PERTENECEN LOS SIGUIENTES MATERIALES USADOS MAS FRECUENTEMENTE:

- SA-283 C
 - SA-285 C
 - SA-515
 - SA-516
 - SA-53-B
 - SA-106-B
- TODOS LOS GRADOS
- TIPO 405
 - TIPO 410
- ACEROS INOX.

FIG. CS-2, SUBPARTE 3 DE LA SECCIÓN II DEL CÓDIGO ASME

NOTA:

EN LOS CASOS EN QUE EL VALOR "A" CAIGA A LA DERECHA DEL EXTREMO DE LA LINEA DE TEMPERATURA, SUPONGASE UNA INTERSECCION CON LA PROLONGACION HORIZONTAL DEL EXTREMO SUPERIOR DE LA LINEA DE TEMPERATURA.

Cabezas.

Para el diseño de cabezas elipsoidales (elípticas) y torisféricas por presión exterior (presión sobre el lado convexo de la cabeza), el Código ASME establece que el espesor requerido en el punto más delgado después de haber formado la cabeza, debe ser el mayor que resulte de las siguientes consideraciones:

1. El espesor calculado por las fórmulas correspondientes para Presión interna, haciendo las siguientes modificaciones:

- Presión externa de diseño = 1.67 la presión de diseño.
- Eficiencia de junta (E) = 1.00 para todos los casos.

2.- El espesor que resulte del siguiente procedimiento:

Primero: Supóngase un espesor de cabeza (t), para *cabezas torisféricas y cabezas elípticas*, en estas últimas el punto más débil es el centro, ya que es ahí donde su radio de curvatura es mayor (igual al diámetro del cascarón para una cabeza con relación de ejes de **2:1**). Este radio de curvatura es menor conforme alejamos el punto considerado del centro de la cabeza hacia la junta con el cascarón.

Por esta razón para el cálculo se toma un radio de curvatura promedio, el cual se determina por el Código ASME, Sección VIII, División 1, Parte UG-33, *Tabla UG-33.1*.

TABLE UG-33.1
VALUES OF SPHERICAL RADIUS FACTOR K_o FOR
ELLIPSOIDAL HEAD WITH PRESSURE ON
CONVEX SIDE

Interpolation Permitted for Intermediate Values

$D_o/2h_o$...	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2
K_o	...	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99
$D_o/2h_o$	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
K_o	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

$D_o/2h_o$.- Relación entre el eje mayor y el eje menor de tapas elipsoidales **2:1**.

K_o .- Factor dependiente de las proporciones de tapa elipsoidal $D_o/2h$ (Ver *Tabla UG-33.1*).

D_o .- Diámetro exterior del faldón de la tapa.

R_o .- Radio esférico equivalente = $K_o \times D_o$ en tapas elipsoidales y para tapas hemisféricas el radio exterior.

Segundo: Calcule el valor de A por medio de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{0.125}{\left(\frac{R_o}{t}\right)}$$

Tercero: Con el valor de A y el de la temperatura de diseño se entra a la Fig. CS-2, Subparte 3 de la sección II del Código ASME se obtiene el valor de B.

Cuarto: Para el cálculo de Pa el Código ASME tomando en cuenta el siguiente aspecto:

Para valores de A < 0.000175

$$Pa = \frac{0.0625 \times E'}{\left(\frac{Ro}{t}\right)^2}$$

Para valores de A > 0.000175

Con el valor de A, la temperatura (T), entrar a la Fig. CS-2, Subparte 3 de la sección II del Código ASME.

$$B = ? \frac{lb}{in^2} \rightarrow Pa = \frac{4 \times B}{\left(\frac{Ro}{t}\right)^2}$$

Donde:

E' = Modulo de Elasticidad a la temperatura de diseño (lb/in²), Fig. CS-2, Subparte 3 de la sección II del Código ASME.

t = Espesor mínimo requerido en la cabeza después del formado, sin incluir la tolerancia por corrosión (cm).

Ro = Radio exterior equivalente de la cabeza (cm).

Como Pa = ? > P.E.S. **(El espesor es adecuado).**

Como Pa = ? < P.E.S. **(Se incrementa el espesor o se agregan aros atiezadores).**

Quinto: Compárese el valor de Presión de trabajo externa máxima permitida (Pa), con la Presión Exterior de Seguridad (P.S.E.).

Si Pa < 2.5 lb/in² (0.176 kg/cm²) ó Pa < 15 lb/in² (1.055 kg/cm²) *Vacio total.*

Según sea el caso, es necesario aumentar el espesor de la cabeza, hasta que:

$$Pa > 0.176 \text{ kg/cm}^2 (2.5 \text{ lb/in}^2) \text{ ó } 15 \text{ lb/in}^2 (1.033 \text{ kg/cm}^2).$$

Determinadas ya las condiciones para el cálculo de la revisión por presión exterior de seguridad en cabezas, se procede a realizarlo. En nuestro caso *se realiza de acuerdo al punto 2 y segunda condición*, anteriormente descrita, y la presión a abatir va a ser la misma que para el cilindro.

Boquillas y Registros.

Las partes a presión prefabricadas o preformadas para recipientes a presión que están sujetas a esfuerzos de trabajo permisible causados por presión interna o externa en el recipiente, deberán estar en conformidad con los requerimientos aplicables de la Sección VIII, División 1, Parte UG, que se relacionen con el recipiente, incluyendo las restricciones de servicio aplicables al material, inspección en el taller del Fabricante de las partes.

Las partes a presión tales como accesorios de tubos, bridas, boquillas, cuellos soldables, casquetes soldables y tapas de registro hombre, que son formadas totalmente por fundición, forja, acción de rodillos o formadas con dados no requieren de inspección. Las partes a presión normales que cumplen con alguna Norma de ASME o Normas de Fabricantes se deben fabricar de materiales permitidos por esta División.

Esto considera ya la certificación del Fabricante y que el producto cumple con especificaciones del material y con las normas indicadas y que es adecuado para el servicio a la capacidad indicada.

4.4 CONDICIONES REALES DE LA PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE (*PTMP*).

Para el cálculo de las condiciones reales de la *PTMP* de un recipiente cilíndrico, se debe considerar la presión menor calculada con las fórmulas convencionales, para cualquiera de sus partes.

Para el cálculo de *PTMP*, deben utilizarse las fórmulas que se usaron para el cálculo del espesor por presión interna usando para dicho cálculo los espesores nominales excluyendo cualquier espesor de metal especificado como márgenes de corrosión.

La *PTMP* siempre debe ser mayor o igual a la presión de diseño.

$$PTMP \geq Pd$$

Cilindro.

Por lo que se estableció anteriormente, para el cálculo de la *PTMP*, se va a tomar en cuenta la fórmula que se indica a continuación, en la cual se despeja la presión (*P*) se tiene los mismos datos que la vez anterior, estos datos van a depender de la sección a calcular, así se tiene, que la fórmula a utilizar es:

$$P = \frac{S \times E \times tc}{Rc + (0.6 \times tc)}$$

Cabezas.

Para el cálculo de la *PTMP*, en las cabezas se procede igual que para el cálculo del cilindro, se determina la presión (*P*), la cual tiene los mismos datos junto con las condiciones expuestas en el párrafo 4.4; dichos datos van a depender de la cabeza a calcular y fórmula a utilizar es:

$$P = \frac{2 \times S \times E \times tc}{Dc + (0.2 \times tc)}$$

Boquillas y Registros.

Para el cálculo de la *PTMP* en boquillas y registros, en el departamento de Ingeniería de Recipientes se hace uso del ASME B16.5-2003, y el procedimiento para determinarlo es el siguiente:

Con los datos de temperatura de operación y presión de diseño, se seleccionara de la tabla de dicho Estándar el valor donde la *PTMP* sea mayor que la Presión de Diseño, el valor donde sea la máxima presión que soportarán las boquillas y registros. O también si se conoce el rango de las boquillas y registros, se puede determinar la *PTMP*; esto se hace con la temperatura de operación y el rango de las boquillas y registros, donde se crucen estos dos datos, ese va a ser el valor que asuma la *PTMP* que soportarán boquillas y registros.

Para nuestro caso, con los datos de temperatura de operación y la presión de diseño, determinamos el rango de las boquillas y registros (*300 lb*).

Table 2-1.1 Pressure-Temperature Ratings for Group 1.1 Materials

Nominal Designation	Forgings		Castings			Plates	
C-Si	A 105 (1)		A 216 Gr. WCB (1)			A 515 Gr. 70 (1)	
C-Mn-Si	A 350 Gr. LF2 (1)					A 516 Gr. 70 (1), (2)	
C-Mn-Si-V	A 350 Gr. LF6 Cl. (4)						
3½ Ni	A 350 Gr. LF3					A 537 Cl. 1 (3)	

Working Pressure by Classes, bar							
Class Temp., °C	150	300	400	600	900	1500	2500
-29 to 38	19.6	51.1	68.1	102.1	153.2	255.3	425.5
50	19.2	50.1	66.8	100.2	150.4	250.6	417.7
100	17.7	46.6	62.1	93.2	139.8	233.0	388.3
150	15.8	45.1	60.1	90.2	135.2	225.4	375.6
200	13.8	43.8	58.4	87.6	131.4	219.0	365.0
250	12.1	41.9	55.9	83.9	125.8	209.7	349.5
300	10.2	39.8	53.1	79.6	119.5	199.1	331.8
325	9.3	38.7	51.6	77.4	116.1	193.6	322.6
350	8.4	37.6	50.1	75.1	112.7	187.8	313.0
375	7.4	36.4	48.5	72.7	109.1	181.8	303.1
400	6.5	34.7	46.3	69.4	104.2	173.6	289.3
425	5.5	28.8	38.4	57.5	86.3	143.8	239.7
450	4.6	23.0	30.7	46.0	69.0	115.0	191.7
475	3.7	17.4	23.2	34.9	52.3	87.2	145.3
500	2.8	11.8	15.7	23.5	35.3	58.8	97.9
538	1.4	5.9	7.9	11.8	17.7	29.5	49.2

NOTES:

- (1) Up on prolonged exposure to temperatures above 425°C, the carbide phase of steel may be converted to graphite. Permissible but not recommended for prolonged use above 425°C.
- (2) Not to be used over 455°C.
- (3) Not to be used over 370°C.
- (4) Not to be used over 260°C.

Condición Gobernante.

Esta condición se refiere al valor menor del cálculo de la *PTMP*, esto quiere decir, que después de haber efectuado todos los cálculos de esta presión para las distintas secciones del recipiente (torre), la que resulte con el menor valor es la que va a gobernar, o será la sección que posiblemente puede fallar en primera instancia.

Condiciones Reales de la Presión de Prueba.

Todos los recipientes cilíndricos diseñados de acuerdo al Código ASME, deben de someterse a una presión de prueba que puede ser **Hidrostática** o **Neumática**. Solamente quedan fuera de este requisito aquellos recipientes de dimensiones pequeñas, que el Código los excluye de su jurisdicción.

Prueba Hidrostática.

En este tipo de pruebas el recipiente debe someterse a una presión de prueba cuando menos igual a 1.3 veces la *PTMP*, multiplicada por la relación mas baja del valor de esfuerzo permisible del material (*S*) para la temperatura de prueba respecto al valor de esfuerzo (*S*) para la temperatura de diseño.

$$P = 1.3 \times PTMP \left(\frac{(S) \text{ temp. de prueba}}{(S) \text{ temp. de diseño}} \right)$$

Al ir aplicando la presión de prueba y cuando ésta ha alcanzado las 2/3 partes de su valor, se inicia la inspección del recipiente, esta inspección se hace visual en todas las uniones y conexiones. La inspección para detectar fugas puede ser pasada por alto, siempre y cuando:

1. Se aplique una prueba de fuga de gas adecuada.
2. Una sustitución de prueba de fuga de gas sea por acuerdo alcanzado entre el fabricante y el inspector
3. Todas aquellas juntas que quedan ocultas después del armado, se les haga una inspección visual antes del montaje.
4. El recipiente no contendrá una sustancia “letal”.

Aunque generalmente en este tipo de pruebas se usa agua, también se puede usar cualquier líquido no perjudicial abajo de su temperatura de ebullición.

Prueba Neumática.

Este tipo de prueba se utiliza para recipientes que son diseñados de tal modo, que no se tenga la seguridad de que se pueda llenar de agua completamente (tal es el caso de las torres verticales muy altas, diseñadas para manejar vapores). La presión de prueba Neumática, también debe ser al menos 1.1 veces del valor de la *PTMP*, multiplicada por la relación mas

baja del valor de esfuerzo permisible del material (S) para la temperatura de prueba respecto al valor de esfuerzo (S) para la temperatura de diseño.

$$P = 1.1 \times PTMP \left(\frac{(S) \text{ temp. de prueba}}{(S) \text{ temp. de diseño}} \right)$$

Al efectuar este tipo de pruebas la presión en el recipiente debe incrementarse gradualmente a no más de la mitad de la presión de prueba; de este valor en adelante la presión debe elevarse en incrementos de 1/10 de la presión de prueba hasta alcanzar la $PTMP$ y mantenerse por un tiempo suficiente (24 hrs.) para permitir la inspección del recipiente.

Las dos pruebas que pueden llevarse a cabo en un recipiente y dado que en este caso la prueba a la que se someterá la torre es Hidrostática; las fórmulas que se emplean para el cálculo de la Presión de Prueba son las mismas que se utilizaron para el cálculo de la $PTMP$ como ya se dijo, pero tendrán las siguientes modificaciones:

1. Los espesores que se toman para el cálculo de esta prueba, son los comerciales con los cuales se fabricará la torre (espesores nuevos).
2. Los diámetros y radios son los reales o sea que considera la corrosión.

Ya establecidas las condiciones para el cálculo de la Presión de Prueba, se procederá a determinar dicho cálculo.

Cilindro.

Como se dijo anteriormente, se utiliza la misma fórmula que se utilizó para el cálculo de la $PTMP$, con las modificaciones antes expuestas o sea que la fórmula a utilizar es la siguiente para el cálculo de presión de prueba:

$$P = \frac{1.3 \times S \times E \times t}{R + (0.6 \times t)}$$

Cabezas.

Para el cálculo de presión de prueba, en este caso se va a seguir el mismo procedimiento anterior, o sea que la fórmula a utilizar es:

$$P = \frac{1.3 \times 2 \times S \times E \times t}{D + (0.2 \times t)}$$

Boquillas y Registros.

Para el cálculo de presión de prueba en boquillas y registros se hace uso de la Norma de referencia ASME B16.5-2003, la cual en el punto 2 (Rangos Temperatura-Presión), Sub tema 2.6 (Sistema de Pruebas Hidrostáticas) establece que las Bridas, uniones y accesorios de bridas

pueden ser sujetas a sistema de pruebas hidrostáticas a una presión de 1.5 veces el rango de la presión de trabajo para una clase de brida a temperaturas de 38 °C (100 °F), este valor de presión se debe redondear al siguiente valor próximo.

Las pruebas en presiones más alta son la responsabilidad del usuario, teniendo en cuenta el las exigencias del Código aplicable del diseño.

Condición Gobernante.

Al igual que para el caso de la *PTMP*, también la presión de prueba (*Pruebas Hidrostáticas*), va a tener una condición de prueba gobernante, las presiones antes calculadas la menor de ellas va a ser el que va a gobernar o donde posiblemente va a fallar el recipiente.

4.5 CALCULO DE LA TORRE.

A continuación se muestra el cálculo de la torre DA-201 de Salamanca Guanajuato, la Fig. 4.2 (Hoja de datos) muestra los datos necesarios para el diseño, la Fig. 4.3 muestra el Plano de Arreglo General de Diseño del recipiente y las Figuras 4.4 y 4.5 estándares de fabricación.

Definiciones de Términos.

Presión de Operación (Po).- La presión en la parte superior del recipiente a la cual el recipiente opera normalmente. Esta no deberá exceder de la Presión de Trabajo Máxima Permisible (*PTMP*).

Presión de Diseño (Pd).- Es la presión que se emplea en el diseño del recipiente se recomienda diseñar un recipiente y sus partes constitutivas para una presión mayor que la de operación. Este requisito se satisface utilizando una presión de diseño de 30 lb/pulg² o 10% más que la presión de operación, la que sea mayor.

También debe tomarse en consideración la presión del fluido y de cualquier otra sustancia contenida en el recipiente.

Presión de Prueba.- La base de esta presión de prueba es la *PTMP* interna permitida que se determinadas por las formulas de diseño, para cada elemento del recipiente. Y se determina por medio de pruebas que pueden ser **Hidrostáticas** o **Neumáticas**.

Presión de Trabajo Máxima Permisible.- Es la presión máxima a la que se puede someter un recipiente, en condiciones de operación. Esta presión esta basada en los cálculos para cada elemento del recipiente usando para dicho cálculo los espesores nominales excluyendo cualquier espesor de metal especificado como márgenes de corrosión.

DATOS GENERALES		
Localización	Salamanca Gto.	
Planta:	UNIDAD DE ALQUILACIÓN	
Servicio:	DME STRIPPER (AGOTADOR)	
Clave del equipo:	DA-201	
Elaboro:	J.C.M.C.	
Fecha:	2008	
NRF-028-PEMEX-2004 y complementada con ASME Section VIII Div. 1		
CONCEPTO	Sistema Métrico (kg/cm ²)	Sistema Ingles (lb/in ²)
Fluido almacenado.	DME	
Presión Exterior de Seguridad (P.E.S.)	0.176	2.5
Presión de Diseño (Pd).	20.38	290
Presión de Operación (Po).	18.28	260
	°C	°F
Temperatura de Diseño (Td).	137	278
Temperatura de Operación (To).	104	219
	(mm)	(in)
Diámetro Interior (Di).	1829	72
Radio (R).	914.5	36
Longitud entre Tangentes (Lt).	39929	1,572
Corrección Permisible (C).	3.175	0.125
	%	
Eficiencia de la junta en cuerpo (E).	0.85	
Eficiencia de la junta en tapa (E).	1	
Material de Fabricación (Cuerpo y cabezas).	SA-516 70	
Material de Fabricación (Faldón).	SA-285 C	
Factor de la prueba Hidrostática.	1.3	
	kg/cm ²	lb/in ²
Esfuerzo permisible del material (S₁).	1406	20000
Esfuerzo permisible del material (S₂).	1104	15700
	kg/m ³	lb/ft ³
Densidad del Agua (ρ_{AGUA}).	1006	62.80
Densidad del Concreto (ρ_{CONCRETO}).	2400	149.83
Densidad del Acero (ρ_{ACERO}).	7900	493.18
Densidad del Fluido (ρ_{FLUIDO}).	440	27.44

CALCULO DE ESPESORES POR PRESIÓN INTERIOR		
CUERPO		
$t_1 = \frac{Pd (R+C)}{S_1 \times E - (0.6 \times Pd)} + C$	in	mm
	0.748	18.990
t_1 Comercial =	3/4	19
CABEZAS		
$t_2 = \frac{Pd (D+2C)}{2 \times S_1 \times E - (0.2 \times Pd)} + C$	in	mm
	0.650	16.500
t_2 Comercial =	3/4	19

CALCULO DE ESPESORES POR PRESIÓN EXTERIOR			
CUERPO			
CONCEPTO		in	mm
Diámetro Exterior (Do).	$Do = Di + 2t_1$	73 1/2	1867.0
Espesor de Cuerpo (t).	$t = t_1 - C$	5/8	15.875
Longitud de Cuerpo (L).	$L = Lt + D/6$	1,584	40234.0
Factores de presión critica	Do/t =	117.6	2987
	L/Do =	21.551	547.4

Con estos valores y la Fig. G, Subparte 3 de la Sección II del Código ASME se obtiene valor (A).

$$A = \mathbf{0.000085}$$

Para valores de $A \geq 0.000175$

Con el valor A más la Temperatura de Diseño y la Fig. CS-2, Subparte 3 de la Sección II del Código ASME obtenemos (B).

(B): Factor empleado en recipientes sujetos a presión externa fabricados de acero al carbono y con una resistencia a la fluencia de 30 000 lb/in² o mayor

Cabe señalar que se debe de cumplir la relación $Do/t \geq 10$, para que la Presión Máxima Permitida (Pa) se pueda calcular con la fórmula:

$$Pa = 4*B/3(Do/t)$$

Para valores de $A < 0.000175$

Con la Temperatura de Diseño del material y la Fig. CS-2, Subparte 3 de la Sección II del Código ASME obtenemos Modulo de Elasticidad (E').

Temperatura de Diseño (Td) en °F.	278
Modulo de Elasticidad (E') en lb/in ² .	29000000
Presión Máxima Permitida (Pa).	lb/in²
$Pa = \frac{2AE'}{3\left(\frac{Do}{t}\right)}$	13.97

Como **Pa. (13.97 lb/in²) ≥ P.E.S. (2.5 lb/in²)**
El espesor es adecuado

CABEZAS			
CONCEPTO		in	mm
Diámetro Exterior (Do).	Do = Di + 2t ₂	73.5	1867.0
Espesor de Cuerpo (t).	t = t ₂ -C	0.625	15.875
Radio Ext. Equivalente de la Cabeza (Ro).	Ro = 0.9*Do	66.15	1680.21
Factor de cabezas elípticas 2:1 (K).	K = 0.9	0.9	22.86
A = 0.125/(Ro/t)		0.00118	0.030

Para valores de A < 0.000175

Con la Temperatura de Diseño del material y la Fig. CS-2, Subparte 3 de la Sección II del Código ASME, obtenemos Modulo de Elasticidad (E').

$$Pa = 0.0625E'/(Ro/t)^2$$

Para valores de A ≥ 0.000175

Con el valor A, la Temperatura de Diseño y la Fig. CS-2, Subparte 3 de la Sección II del Código ASME, obtenemos (B).

$$B=12750$$

(B).- Factor empleado en recipientes sujetos a presión externa fabricados de acero al carbono y con una resistencia a la fluencia de 30 000 lb/in² o mayor

$$Pa = B/(Ro/t)$$

CONCEPTO	lb/in²
Presión Máxima Permitida (Pa).	$Pa = B/(Ro/t)$ 120.46

Como **Pa. (120.46 lb/in²) ≥ P.E.S. (2.5 lb/in²)**
El espesor es adecuado

BOQUILLAS		
Bridas (ASME B16.5-2003)	Clase 150 # (lb/in ²)	Clase 300 # (lb/in ²)
Presión Máxima Permisible de Trabajo (PTMP).	254*	675*
Presión de Diseño (Pd).	290	

Como *PTMP* Clase 150 # < Presión de diseño (*Pd*).

Como *PTMP* Clase 300 # ≥ Presión de diseño (*Pd*).

Se utilizaran boquillas Clase 300 #

NOTA: Las boquillas Clase 150 # no cumplen con la Presión de Diseño requerida por proceso, por esa razón se utilizan de 300 #.

* = Ver ASME B16.5-2003.

CALCULO DE LA PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE			
Nota: El espesor calculado por condición de diseño 19 (3/4"), no es considerado para el cálculo de la <i>PTMP</i> y de la Presión de Prueba, esto es debido a que por condiciones de estabilidad estructural por la acción del sismo y viento, este espesor no es el adecuado y mediante el análisis se llegó a los espesores finales de diseño (Ver dibujo de Arreglo General); por consiguiente el espesor menor en la torre es de 22 (7/8) y con este valor se determina la <i>PTMP</i> .			
CUERPO			
CONCEPTO		in	mm
Espesor del Cuerpo (tc)	tc = 7/8" - C	0.750	19.05
Diámetro Exterior (Dc)	Dc = D + 2C	72.250	1835.15
Radio Exterior (Rc)	Rc = Dc/2	36.125	917.58
$P_1 = \frac{S_1 \times E \times tc}{Rc + (0.6 \times tc)}$		lb/in ²	kg/cm ²
		348.60	24.48

CABEZAS			
CONCEPTO		in	mm
Espesor de la Cabeza (tc)	tc = 7/8" - C	0.750	19.05
Diámetro Exterior (Dc)	Dc = D + 2C	72.250	1835.15
$P_2 = \frac{2 \times S_1 \times E \times tc}{Dc + (0.2 \times tc)}$		lb/in ²	kg/cm ²
		414.365	29.09

BOQUILLAS		
Bridas (ASME B16.5-2003)	Clase #150 (lb/in ²)	Clase #300 (lb/in ²)
PTMP P3 =	254	675

CONCEPTO	lb/in ²	kg/cm ²
(Cuerpo) P1 =	348.60	24.48
(Cabezas) P2 =	414.36	29.09
(Boquillas)* P3 =	675	47.40

* = Ver ASME B16.5-2003.

GOBIERNA CUERPO

CALCULO DE LA PRESIÓN DE PRUEBA HIDROSTÁTICA			
CONCEPTO		in	mm
Espesor del Cuerpo (tc)	tc = 7/8" - C	0.750	19.05
Diámetro Exterior (Dc)	Dc = D + 2C	72.250	1835.15
Radio Exterior (Rc)	Rc = Dc/2	36.125	917.58
Espesor del Cabeza (tc)	tc = 7/8" - C	0.750	19.05

CUERPO				
$P_1 = \frac{1.3 \times S \times E \times tc}{Rc + (0.6 \times tc)}$		lb/in ²	kg/cm ²	
		453.18	31.82	
CABEZAS				
$P_2 = \frac{1.3 \times 2 \times S \times E \times tc}{Dc + (0.2 \times tc)}$		lb/in ²	kg/cm ²	
		538.67	37.82	
BOQUILLAS*				
$P_3 =$		lb/in ²	kg/cm ²	
		Clase 150	435.11	30.59
		Clase 300	1116.79	78.51

* = Ver ASME B16.5-2003.

GOBIERNA CUERPO

CALCULO DE PESOS		
CONCEPTO	lb/ft ³	kg/m ³
Densidad del Acero (ρ_{ACERO}).	493.18	7900

CUERPO		
SECCIÓN 1	in	m
Diámetro Interior (D_i).	72	1.829
Espesor de Cuerpo (t).	1 1/8	0.029
Diámetro Exterior (D_e).	74 1/4	1.886
Longitud entre Tangentes (L).	288 1/32	7.316
$W_1 = \frac{\pi}{4}(D_e^2 - D_i^2)(L)(\rho_{ACERO})$	lb	kg
	21172	9604

SECCIÓN 2	in	m
Diámetro Interior (D_i).	72	1.829
Espesor de Cuerpo (t).	1	0.025
Diámetro Exterior (D_e).	74	1.880
Longitud entre Tangentes (L).	432	10.974
$W_2 = \frac{\pi}{4}(D_e^2 - D_i^2)(L)(\rho_{ACERO})$	lb	kg
	28169	12777

SECCIÓN 3	in	m
Diámetro Interior (D_i).	72	1.829
Espesor de Cuerpo (t).	7/8	0.022
Diámetro Exterior (D_e).	73 3/4	1.873
Longitud entre Tangentes (L).	852	21.639
$W_3 = \frac{\pi}{4}(D_e^2 - D_i^2)(L)(\rho_{ACERO})$	lb	kg
	48491	21995

CABEZA SUPERIOR		
CONCEPTO	in	m
Diámetro Interior (D_i).	72	1.829
Espesor de Cuerpo (t).	7/8	0.022
Diámetro Exterior (D_e).	73 3/4	1.873
$W_4 = \frac{\pi}{24}(D_e^3 - D_i^3)(\rho_{ACERO})$	lb	kg
	1042	472.50

CABEZA INFERIOR		
CONCEPTO	in	m
Diámetro Interior (Di).	72	1.829
Espesor de Cuerpo (t).	1 1/8	0.029
Diámetro Exterior (De).	74 1/4	1.886
$W_5 = \frac{\pi}{24}(De^3 - Di^3)(\rho_{ACERO})$	lb	kg
	1349	611.70

FALDÓN		
CONCEPTO	in	m
Diámetro Interior (Di).	72.3	1.836
Diámetro Exterior (De).	74.3	1.887
Altura del Faldón (Hf).	144.0	3.658
	° C	
Angulo del Faldón (θ)	13	
$V = \frac{\pi}{4} \left[(2H_f^2)(Tan\theta)(De - Di) + H_f(De^2 - Di^2) \right]$	m³	
	0.793	
	lb	kg
$W_6 = (V)(\rho_a)$	13811	6265

BOQUILLAS Y REGISTROS				
	DIÁMETRO	CLASE	PESO (lb)	PESO (kg)
(N-1)	4"	300	50	22.7
(N-2)	34"	300	1955	887
(N-3A y N-3B)	2"	300	30	13.7
(N-4 @ N-6)	2"	300	45	20.5
(N-7)	4"	300	50	22.7
(N-8A y N-8B)	2"	300	30	13.7
(N-9)	4"	300	50	22.7
(N-10)	8"	300	130	59
(N-11)	3"	300	30	13.7
(N-12 @ N-15)	2"	300	60	27.3
(N-16)	4"	300	50	22.7
(M1 @ M4)	20"	300	4600	2086.6
	$W_7 =$		70,050	3,198

AROS SOPORTE DE PLATOS		
Solera 64 X10		
CONCEPTO	in	m
Diámetro Exterior (De).	72	1.829
Diámetro Interior (Di).	70	1.701
Numero de Platos (No.P).	50	
	lb/ft ³	kg/m ³
Densidad del Acero (ρ_{ACERO}).	493.18	7900
$W_8 = \frac{\pi}{4}(De^2 - Di^2)(\rho_{ACERO})(L)(No.P)$	lb	kg
	3,091	1,402

SOPORTE DE AISLAMIENTO		
CONCEPTO	lb/in	kg/m
Angulo de 25X5 (WL)	0.097	1.73

SECCIÓN 1		
	in	m
Diámetro Exterior (De).	74 1/4	1.886
Longitud Radial (LR).	233.3	5.925
No. de Soportes (No.Sop).	4	Espaciados a 2500 mm
$W_{1SA} = (LR) (WL)(No.Sop.)$	90	41
SECCIÓN 2		
	in	m
Diámetro Exterior (De).	74	1.880
Longitud Radial (LR).	232.5	5.905
No. de Soportes (No.Sop).	4	Espaciados a 2500 mm
$W_{2SA} = (LR) (WL)(No.Sop.)$	90	41
SECCIÓN 3		
	in	m
Diámetro Exterior (De).	73 3/4	1.873
Longitud Radial (LR).	231.7	5.885
No. de Soportes (No.Sop).	9	Espaciados a 2500 mm
$W_{3SA} = (LR) (WL)(No.Sop.)$	202	92
	lb	kg

$$W_9 = W_{1SA} + W_{2SA} + W_{3SA}$$

382

174

ARO BASE		
CONCEPTO	in	m
Diámetro Exterior (De).	144	3.600
Diámetro Interior (Di).	132	3.280
Espesor de Placa (t).	1.38	0.035
	lb	kg
$W_{10} = (\pi/4)(De^2-Di^2)(t)(\rho_{ACERO})$	1054	478

ARO DE COMPRESIÓN		
CONCEPTO	in	m
Diámetro Exterior (De).	145.9	3.706
Diámetro Interior (Di).	132.5	3.366
Espesor de Placa (t).	1.38	0.035
	lb	kg
$W_{11} = (\pi/4)(De^2-Di^2)(t)(\rho_{ACERO})$	1151	522

SILLETAS		
No. de Siletas (#SI).	36	
No. de Cartabones (No.C).	72	
	m ²	
Área de Cartabones (Ac).	0.027	
	m	
Espesor de Placa (t).	0.013	
	lb	kg
$W_{12} = (Ac)(t)(\rho_{ACERO})(\#SI)$	443	201

MISCELÁNEOS		
CONCEPTO	lb	kg
W_1 (CUERPO) =	21,172	9,604
W_2 (CUERPO) =	28,169	12,777
W_3 (CUERPO) =	48,491	21,995
W_4 (CABEZA SUP.) =	1,042	472.503
W_5 (CABEZA INF.) =	1,349	611.697
W_6 (FALDÓN.) =	13,811	6,265
W_7 (BOQUILLAS) =	7,050	3,198
W_8 (AROS SOPORTES.) =	3,090	1,402
W_9 (SOPORTES. AISLAMIENTO.) =	382	173
W_{10} (ARO BASE) =	1,054	478
W_{11} (ARO DE COMPRESIÓN) =	1,151	522
W_{12} (SILLETAS) =	443	201
W_{ACERO} TOTAL =	127,206	57,700

	lb	kg
$W_{13} \text{ (MISCELÁNEOS)} = 0.06 \sum_{i=1}^{12} W_i =$	7,632	3,462

PESO DE MONTAJE		
CONCEPTO	lb	kg
$W_{14} \text{ MONTAJE} = W_{\text{ACERO TOTAL}} + W_{13} \text{ MISCELÁNEOS}$	134,838	61,162

PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EN EL FALDÓN		
CONCEPTO	in	m
Espesor de Aislamiento (t_a).	2.01	0.051
Diámetro Exterior (De). INTERNAMENTE	72.36	1.838
Diámetro Interior (Di). INTERNAMENTE	68.34	1.736
Diámetro Exterior (De^*) EXTERNAMENTE	78.30	1.989
Diámetro Interior (Di^*) EXTERNAMENTE	74.25	1.886
Altura del Faldón (H_f).	144.02	3.658
	°C	
Angulo del Faldón (θ).	13	
	ft ³	m ³
$V_1 = \frac{\pi}{4} \left[(2H_f^2) (\tan\theta) (De^* - Di^*) + H_f (De^{*2} - Di^{*2}) \right]$	58	1.644
$V_2 = \frac{\pi}{4} \left[(2H_f^2) (\tan\theta) (De - Di) + H_f (De^2 - Di^2) \right]$	54	1.544
$V_{\text{TOTAL}} =$	113	3.188
	lb/ft ³	kg/m ³
Densidad del Concreto (ρ_{CONCRETO}).	150	2,400
	lb	kg
$W_{15} = (V_{\text{TOTAL}})(\rho_{\text{CONCRETO}})$	16869	7652

PESO DE AISLAMIENTO EN CUERPO		
	lb/ft ³	kg/m ³
Densidad del Aislante (ρ_{AISLANTE}).	8.99	144
CONCEPTO EN SECCIÓN 1	in	m
Diámetro Interior (Di) EXTERNAMENTE	74.25	1.886
Diámetro Exterior (De) EXTERNAMENTE	77.24	1.962
Longitud (L) EXTERNAMENTE	288.03	7.316
	lb	kg
$W_{\text{IPA}} = (\pi/4) (De^2 - Di^2) (L) (\rho_{\text{AISLANTE}})$	533.5	242

CONCEPTO EN SECCIÓN 2	in	m
Diámetro Interior (<i>Di</i>) EXTERNAMENTE	74	1.880
Diámetro Exterior (<i>De</i>) EXTERNAMENTE	76.99	1.956
Longitud (<i>L</i>) EXTERNAMENTE	432.05	10.974
	lb	kg
$W_{2PA} = (\pi/4) (De^2 - Di^2) (L) (\rho_{AISLANTE})$	797.5	361.8
CONCEPTO EN SECCIÓN 3	in	m
Diámetro Interior (<i>Di</i>) EXTERNAMENTE	73.75	1.873
Diámetro Exterior (<i>De</i>) EXTERNAMENTE	76.74	1.949
Longitud (<i>L</i>) EXTERNAMENTE	851.9	21.639
	lb	kg
$W_{3PA} = (\pi/4) (De^2 - Di^2) (L) (\rho_{AISLANTE})$	1567.4	711

PESO DE AISLAMIENTO EN CABEZAS		
	lb/ft ³	kg/m ³
Densidad del Aislante ($\rho_{AISLANTE}$).	8.99	144
CONCEPTO EN CABEZA INFERIOR	in	m
Diámetro Interior (<i>Di</i>) EXTERNAMENTE	74.25	1.886
Diámetro Exterior (<i>De</i>) EXTERNAMENTE	77.24	1.962
	lb/ft ³	kg/m ³
$W_{4PA} = (\pi/24)(De^3 - Di^3)(\rho_{AISLANTE})$	35.1	15.9
CONCEPTO EN CABEZA SUPERIOR	lb	m
Diámetro Interior (<i>Di</i>) EXTERNAMENTE	73.75	1.873
Diámetro Exterior (<i>De</i>) EXTERNAMENTE	76.74	1.949
	lb	kg
$W_{5PA} = (\pi/24)(De^3 - Di^3)(\rho_{AISLANTE})$	34.6	15.70

	lb	kg
$W_{16AISLAMIENTO} = W_{1PA} + W_{2PA} + W_{3PA} + W_{4PA} + W_{5PA}$	2,968	1,346

PESO DE PLATOS		
CONCEPTO	ft	m
Diámetro de Plato (<i>Dp</i>).	6	1.829
Numero de Platos (<i>No.p</i>).	50	
	lb/ft ²	kg/m ²
Peso (W_{PLATO})EABC-1.009.	5.62	27.44
	lb	kg
$W_{17(PLATOS)} = (\pi/4) (D_P^2) (W_{PLATO}) (No.P)$	7,945	3,604

PESO LIQUIDO		
CONCEPTO	lb/ft ³	kg/m ³
Densidad del Liquido ($\rho_{LIQUIDO}$).	27.44	440

CABEZA INFERIOR		
CONCEPTO	ft	m
Diámetro Interior (D_i).	6.0	1.829
	lb	kg
$W_{1LIQ.} = (\pi/24)(D_i^3)(\rho_{LIQUIDO})$	776	352

CUERPO		
CONCEPTO	ft	m
Diámetro Interior (D_i).	6.0	1.829
Altura de Nivel Normal (H_{NN}).	15.7	4.800
	lb	kg
$W_{2LIQ.} = (\pi/4)(D_i^2)(H_{NN})(\rho_{LIQUIDO})$	12,221	5549

PLATOS		
CONCEPTO	ft	m
Diámetro de Plato (D_p).	6.0	1.829
Altura del Vertedero (H_v).	0.335	0.102
Numero de Platos ($No.p$).	50	
	lb	kg
$W_{3LIQ.} = (\pi/4)(D_i^2)(H_{NN})(\rho_{LIQUIDO})$	12,985	5,896

	lb	kg
$W_{18(LIQUIDO)} = W_{1LIQ.} + W_{2LIQ.} + W_{3LIQ.}$	26,008	11,797

PESO DEL CAMBIADOR		
	lb	kg
$W_{19(CAMBIADOR)} =$	4,409	2,000

PESO DE PLATAFORMAS Y ESCALERAS		
	lb	kg
$W_{20(PLAT. Y ESC.)} = 0.07 \sum_{i=14}^{19} W_i =$	13,513	6,129

PESO DE OPERACIÓN		
$W_{21} \text{ (OPERACIÓN)} = \sum_{i=14}^{20} W_i =$	lb	Kg
	206,550	93,690

CAPACIDAD		
CONCEPTO	lb/ft ³	kg/m ³
Densidad del Agua (ρ_{AGUA}).	62.803	1006
	ft	m
Longitud entre Tangentes (L).	131.00	39.929
Diámetro Interior (D_i).	6	1.829

CUERPO	ft ³	m ³
$V_{CUERPO} = (\pi/4)(D_i^2)(L)$	3705	104.91

CABEZAS	ft ³	m ³
$V_{CABEZAS} = (\pi/12)(D_i^3)$	56.57	1.602

	ft ³	m ³
$CAPACIDAD = V_{CUERPO} + V_{CABEZAS}$	3,761.33	106.51

PESO LLENO DE AGUA		
	lb	kg
$W_{H_2O} = (CAPACIDAD \times \rho_{AGUA}) + W_{14(MONTAJE)}$	371,060	168,310

CAPITULO 5

ANÁLISIS POR SISMO.

5.1 CALCULO DE LA ESTABILIDAD DEL RECIPIENTE (TORRE).

Dado al incremento de sismos con mayor magnitud es necesario de nuevos parámetros en los cuales se tenga presente un estudio más completo de todas aquellas consideraciones que en un momento dado puedan hacer que fallen estructuras convencionales como las construcciones industriales, en este caso, se toman más puntos para un estudio más minucioso, tales como son el tipo de suelo, el tipo de estructura, factor de comportamiento sísmico, el periodo de vibración, periodos característicos, entre otros. Todo esto encaminado hacia un mismo objetivo, el de no tener pérdidas humanas.

5.1.1 Clasificación de las Estructuras.

La naturaleza del fenómeno sísmico implica que los temblores futuros se pueden describir sólo en términos probabilistas, en la elección de que su intensidad se exceda cuando menos una vez durante la vida útil supuesta para la estructura del recipiente. En consecuencia, si se supone que su resistencia es determinista e igual a la de diseño, la estructura tiene una probabilidad de falla que es igual a la que exceda la intensidad del diseño.

Aún la recomendación más conservadora no suministraría una protección absoluta contra el temblor más intenso que pudiera ocurrir, ni parece haber dentro de un rango práctico tal limite superior.

Por otra parte, las solicitaciones de diseño también dependen del sistema estructural de los elementos y materiales de la estructura, de los detalles de diseño y construcción, los cuales determinan la forma de falla. Conviene considerar estos aspectos estructurales mediante dos conceptos:

- a) Las características estructurales para soportar cargas sísmicas.
- b) La capacidad para disipar energía por comportamiento inelástico a través del desarrollo de deformaciones en los intervalos no lineales de la curvas carga deformación que se muestra en la Fig. 5.1.

Por todo lo anterior se puede concluir que, para fines de clasificación de las construcciones, la manera más adecuada de distinguir entre los diversos tipos de estructuras consiste en el empleo de dos parámetros:

- a) La seguridad estructural aconsejable para estructura.
- b) Las características estructurales que influyen en la respuesta sísmica de la estructura.

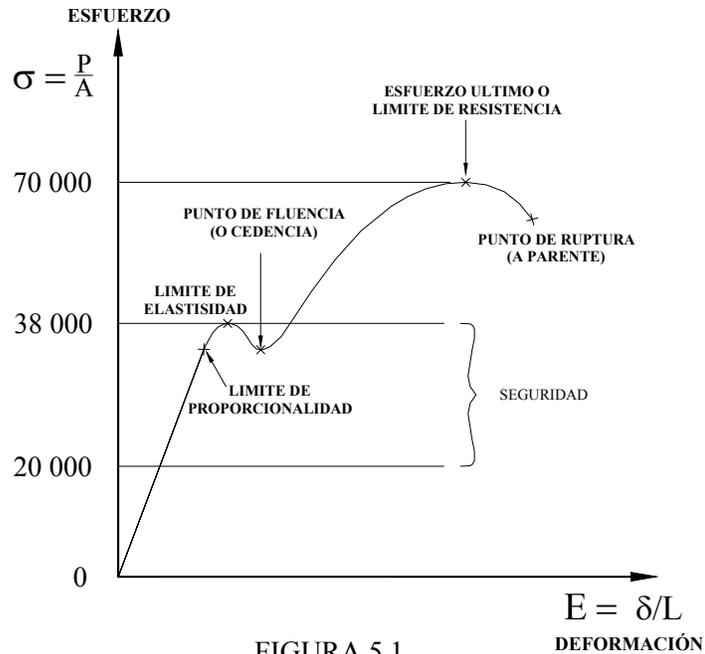


FIGURA 5.1.

5.1.2 Clasificación de las Estructuras según su Diseño.

Atendiendo a la seguridad estructural aconsejable para la estructura, las construcciones se clasifican según, su destino como se indica a continuación:

Grupo A:

Estructuras en donde se requiere un *grado de seguridad alto*. Construcciones cuya falla estructural causaría la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas o culturales de magnitud excepcionalmente alta, o que constituya un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o inflamables.

Grupo B:

Estructuras en las que se requieren un *grado de seguridad intermedio*. Construcciones cuya falla estructural ocasionaría pérdidas de magnitud intermedia o pondrían en peligro otras construcciones de este grupo o del grupo A, tales como naves industriales, locales comerciales, estructuras comunes destinadas a viviendas u oficinas, hoteles y estructuras urbanas o industriales no incluidas en el grupo A.

Grupo C:

Estructuras en las que sea admisible un *grado de seguridad bajo*. Construcciones cuya falla estructural ocasionaría pérdidas de magnitud sumamente pequeñas y no causaría normalmente daños a construcciones de los grupos A y B ni pérdidas de vidas.

5.1.3 Clasificación de las Estructuras según su Estructuración.

Atendiendo a las características estructurales que influyen en la respuesta sísmica de la estructura, las construcciones se clasifican según su estructuración como se indica a continuación:

Tipo 1 (Estructuras de Edificios).

Estructuras comunes tales como edificios urbanos, naves industriales típicas y estructuras semejantes, en que las fuerzas laterales se resisten en cada nivel por marcos continuos contraventados o no, por diafragmas o muros o por combinación de diversos sistemas como los mencionados.

Tipo 2 (Péndulos Invertidos y Apéndices).

Péndulos invertidos o estructuras en los que el 50 % ó más de su masa se hallen en el extremo superior y tengan un solo elemento resistente en la dirección de análisis o una sola hilera de columnas perpendiculares a ésta. Apéndices o elementos cuya estructuración difiera radicalmente de la del resto de la estructura tales como tanques, parapetos, anuncios, entre otros.

Tipo 3 (Muros de Retención).

Tipo 4 (Chimeneas, Silos y Similares).

La masa y rigidez se encuentran distribuidas continuamente a lo largo de su altura y donde dominen las deformaciones por flexión.

Tipo 5 (Tanques, Depósitos y Similares).

Tanques elevados y depósitos superficiales o estructuras semejantes destinadas al almacenamiento de líquidos que originan importantes fuerzas hidrodinámicas sobre el recipiente.

Tipo 6 (Estructuras Industriales).

Estructuras fabriles en las que se requieren grandes áreas libres de columnas, principalmente formadas en la mayoría de los casos por una sucesión de marcos rígidos transversales, ligados entre si por elementos de contraventeo que soportan los largueros para la cubierta y los recubrimientos de las paredes.

Tipo 7 (Puentes).

Tipo 8 (Tuberías).

Tipo 9 (Presas).

Tipo 10 (Otras Estructuras).

5.1.4 Factor de Comportamiento Sísmico (Q).

En la actualidad la forma más adecuada de caracterizar las estructuras en función de su ductilidad consiste en el empleo del factor de comportamiento sísmico " Q ", el cual en realidad no solo está asociado a la ductilidad estructural, sino también a la estructuración misma, al deterioro o efecto que puede llegar a contrarrestar gran parte de la capacidad extra en resistencia que suministra la ductilidad y a reservas de capacidad en cargas sísmicas que los métodos convencionales de diseño no consideran.

Para las distintas estructuras comprendidas dentro de la clasificación por tipos considerada, se adoptarán los siguientes valores del factor de comportamiento sísmico.

TIPO 1.

Se usará $Q = 4$ cuando se cumplan los requisitos siguientes:

1. La resistencia en todos los entrepisos es suministrada exclusivamente por marcos no contraventeados de acero o concreto reforzado, o bien por marcos contraventeados o con muros de concreto reforzado en los que en cada entrepiso los marcos son capaces de resistir cuando menos un 50 % de la fuerza sísmica actuante.
2. Si hay muros ligados adecuadamente en todo su perímetro a los marcos estructurales o castillos y dadas ligadas a los marcos, estos se deben tener en cuenta en el análisis de la estructura, pero su contribución a la capacidad ante fuerzas laterales solo se tomara en cuenta si los muros de concreto reforzado son capaces de resistir al menos 80 % de las fuerzas laterales totales sin la contribución de los muros de mampostería.
3. El mínimo cociente de la capacidad resistente de un entrepiso entre la acción de diseño no difiere en más 35% del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos.
4. Los marcos y muros de concreto reforzado cumple con las Normas técnicas para estructuras de concreto.
5. Los marcos rígidos de acero satisfacen los requisitos para marcos dúctiles que fijan las normas técnicas para estructuras metálicas.

TIPO 2.

Se emplearán los mismos valores de Q especificados para estructuras de edificios, dependiendo de la forma en que se encuentre estructurado el sistema resistente del péndulo invertido o apéndice.

TIPO 3.

Para muros de retención no se requiere del factor de comportamiento sísmico.

TIPO 4.

Se utilizara un valor de $Q = 2$ cuando se trate de chimeneas de concreto reforzado o bien aplicaremos $Q = 3$ en caso de chimeneas de acero (*Que aplica para nuestro estudio*).

TIPO 5

Tratándose de tanques elevados se emplean los mismos valores de Q estipulados para estructuras de edificios. Para depósitos apoyados directamente sobre el terreno se usará un valor de $Q = 1.5$ en caso de recipientes de concreto reforzado, o bien $Q = 2$ cuando se trate de recipientes de acero.

TIPO 6

En la tabla 2.1 (Ver Manual de Diseño de Obras Civiles 3.2.4.), se presentan valores representativos de ξ/Q para este tipo de estructuras, siendo ξ un factor reductivo que depende del amortiguamiento de la estructura.

Alternativamente, podrán emplearse los mismos valores de Q especificados para estructuras de edificios, siempre que se justifique y cuando se cumplan adicionalmente los requisitos para estructuras dúctiles que fijan en el AISC.

TIPO 7

Se usará $Q = 3$ cuando la resistencia a fuerzas laterales sea suministrada por marcos de dos o más columnas de concreto reforzado o acero.

TIPO 8

Para tuberías no se requiere del factor de comportamiento sísmico.

TIPO 9

En presas de enrocamiento con cara de concreto se utilizará un valor de $Q = 1$

TIPO 10

Para estructuras que no se encuentren comprendidas dentro de las clasificadas en los *Tipo 1 a 9* se deberán emplear valores de Q acordes con las reducciones por comportamiento inelástico que se concluyan a partir de estudios específicos sobre la respuesta probable de la estructura en cuestión.

5.1.5 Factor Reductivo por Ductilidad (Q').

Para fines de diseño es necesario tener en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura, aunque sea de manera aproximada. Para ello las ordenadas espectrales se pueden reducir dividiéndolas entre el factor reductivo Q' a fin de obtener las fuerzas sísmicas reducidas por ductilidad. Para cualquier tipo de estructura, el factor reductivo se calcula como sigue:

$$Q' = 1 + (Q - 1) \left(\frac{T}{T_a} \right); \quad \text{si } T < T_a$$

$$Q' = Q; \quad \text{si } T > T_a \text{ (Que aplica en nuestro estudio)}$$

Donde:

T .- Se toma igual que el periodo fundamental de vibración cuando se emplee el análisis estático e igual al periodo natural de vibración cuando se emplee el análisis modal espectral.

T_a .- Es el primer periodo característico del espectro de diseño.

5.1.6 Vibración.

Debido al viento, las torres altas vibran. El periodo de vibración debe limitarse, ya que los periodos naturales de vibración largos pueden conducir a falla por fatiga. El periodo permitido se ha calculado en base a la flexión máxima permisible. En esta investigación no se examina la llamada vibración armónica, ya que en la forma en que se instalan usualmente las artesas y su soporte, impide que se origine este problema.

Periodo de vibración permitido en seg. (T)

$$T = 0.0000265 \times \left(\frac{H}{D}\right)^2 \times \sqrt{\frac{w+D}{t}}$$

Máximo periodo de vibración permitido en seg.

$$T = 0.80 \times \sqrt{\frac{W+H}{Vg}}$$

Donde:

D .- Diámetro exterior del recipiente (ft).

H .- Longitud del recipiente incluyendo el faldón (ft).

g .- Aceleración de la gravedad, 32.2 (ft/s²).

t .- Espesor del faldón en la base, (in).

V .- Fuerza cortante total (lb).

W .- Peso de la torre (lb).

w .- Peso de la torre por pie de altura (lb).

5.2 REGIONALIZACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO.

5.2.1 Regionalización Sísmica de la República Mexicana.

Con base en un estudio de riesgo sísmico, descrito en los comentarios, se encontró que para fines de diseño sísmico la República Mexicana se considera dividida en cuatro zonas, según se indica en la Figura 5.2 siguiente.

Las fronteras entre zonas coinciden con curvas de igual aceleración máxima del terreno; la zona A es la de menor intensidad sísmica, mientras que la de mayor intensidad es la zona D.

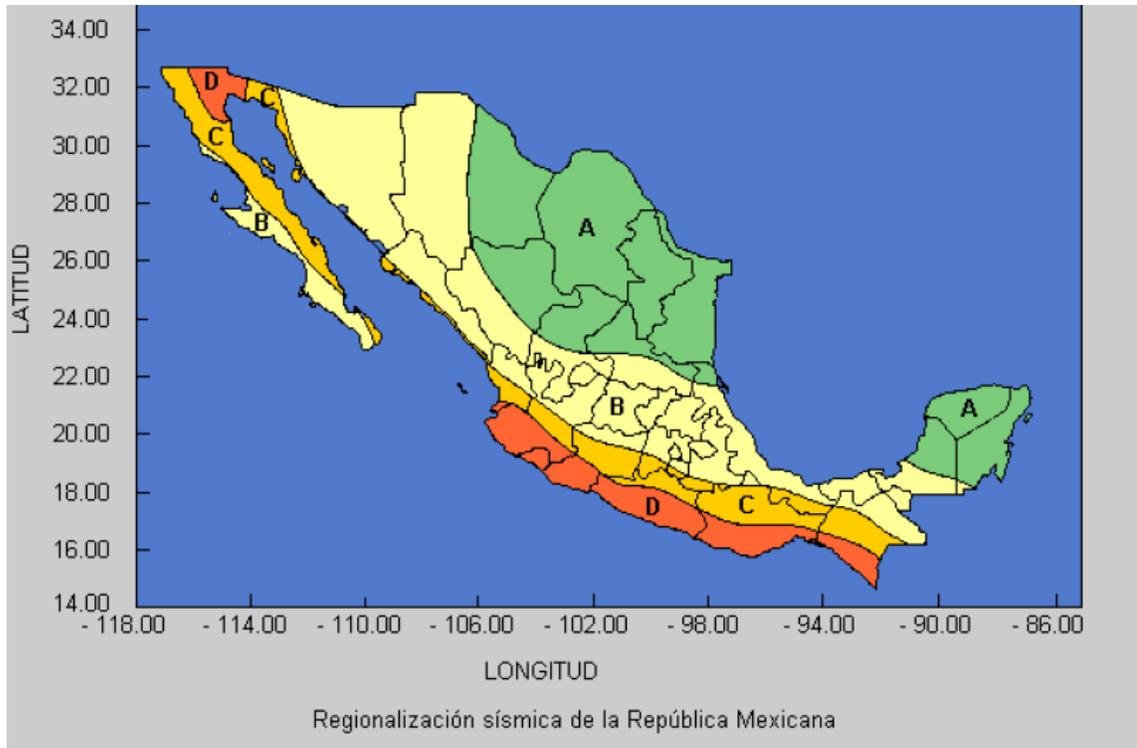


Figura 5.2

5.2.2 Espectros para el Diseño Sísmico

Las ordenadas del espectro de aceleración para diseño sísmico, a , expresadas como fracción de la aceleración de la gravedad, están dadas por las siguientes expresiones:

$$a = a_0 + (c - a_0) \left(\frac{T}{T_a} \right); \quad \text{si } T < T_a$$

$$a = c; \quad \text{si } T_a \leq T \leq T_b \text{ (Que aplica para nuestro estudio)}$$

$$a = c \left(\frac{T_b}{T} \right)^r; \quad \text{si } T > T_b$$

Donde:

a_0 = Coeficiente de aceleración del terreno.

c = Coeficiente sísmico.

T = Periodo de Vibración Natural de Interés.

T_a y T_b = Periodos característicos que delimitan la meseta.

r = Exponente que define la parte curva del espectro de diseño.

Los valores de estos parámetros se ilustran en la *Tabla 5.1*, para las diferentes zonas sísmicas y los distintos tipos de terrenos de cimentación.

TABLA 5.1 (ESPECTROS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS DEL GRUPO B)						
Zona Sísmica	Tipo de Suelo	a_o	c	T_a (seg.)	T_b (seg.)	r
A	I	0.02	0.08	0.2	0.6	1/2
	II	0.04	0.16	0.3	1.5	2/3
	III	0.05	0.20	0.6	2.9	1
B	I	0.04	0.14	0.2	0.6	1/2
	II	0.08	0.30	0.3	1.5	2/3
	III	0.10	0.36	0.6	2.9	1
C	I	0.36	0.36	0.0	0.6	1/2
	II	0.64	0.64	0.0	1.4	2/3
	III	0.64	0.64	0.0	1.9	1
D	I	0.50	0.50	0.0	0.6	1/2
	II	0.86	0.86	0.0	1.2	2/3
	III	0.86	0.86	0.0	1.7	1

Para los diferentes tipos de Suelos, se toman las siguientes consideraciones:
 I = Terreno Firme, II = Terreno Intermedio, III = Terreno Blando.

Los espectros de diseño especificados son aplicables a estructuras del grupo B. Para estructuras del grupo A, los valores de las ordenadas espectrales deben multiplicarse por 1.5, a fin de tener en cuenta la importancia de la estructura.

En sitios donde se conozca el periodo dominante del suelo (T_s), se permiten algunas modificaciones en las ordenadas espectrales, para ello tratándose de terrenos Tipo II y Tipo III se puede modificar los periodos característicos del espectro de diseño como se muestra a continuación:

Terreno Tipo I:

En este tipo de terreno no se admiten modificaciones en el espectro de diseño.

Terreno Tipo II:

Zona Sísmica	
A y B	$T_a = 0.64 T_s$ $T_b = 1.2 T_s ; 0.6 < T_b < 1.5 \text{ seg.}$
C	$T_b = 1.2 T_s ; 0.6 < T_b < 1.4 \text{ seg.}$
D	$T_b = 1.2 T_s ; 0.6 < T_b < 1.2 \text{ seg.}$

Terreno Tipo III:

Zona Sísmica	
A y B	$T_a = 0.35 T_s$ $T_b = 1.2 T_s ; 0.8 < T_b < 2.9 \text{ seg.}$
C	$T_b = 1.2 T_s ; 0.8 < T_b < 1.9 \text{ seg.}$
D	$T_b = 1.2 T_s ; 0.8 < T_b < 1.7 \text{ seg.}$

5.3 ESTRUCTURAS TIPO CHIMENEA, SILOS Y SIMILARES.

5.3.1 Consideraciones Generales.

Las chimeneas y silos son estructuras especialmente vulnerables a los temblores ya que cuentan tan sólo una línea de defensa, lo que implica que la falla de una sección traiga consigo el colapso de la estructura. En adición, son estructuras que se caracterizan por que durante la vibración disipan generalmente menos energía que las estructuras de edificios debido a su bajo amortiguamiento.

Por lo anterior, en el diseño sísmico de chimeneas y silos se debe tener presente que, aunque se trata de estructuras en voladizo sencillas de analizar, son más vulnerables que las estructuras de edificios por lo que para protegerlas es necesario considerar adecuadamente los efectos de los modos superiores de vibración y el bajo amortiguamiento.

Las recomendaciones que se estipulan en el presente capítulo, tienen por objeto determinar las fuerzas sísmicas que obran sobre chimeneas y silos sometidos a temblores y que se especifican mediante los espectros de diseño establecidos para estructuras de edificios. Tales fuerzas son función de la masa de la estructura así como de la aceleración espectral derivada del espectro de diseño correspondiente a la zona sísmica y el tipo de terreno en que se ubicará la estructura.

5.3.2 Elección del tipo de Análisis.

El análisis sísmico de chimeneas y silos se puede realizar mediante uno de los siguientes métodos:

- a) Análisis estático
- b) Análisis dinámico.

El método *Estático* es aplicable al análisis de estructuras cuya altura no sobrepase de 60 m; también se permite emplearlo en estructuras de mayor altura siempre que se trate de cálculos preliminares.

El método *Dinámico* se puede aplicar sin restricción, cualquiera que sea la altura de la estructura.

5.3.3 Análisis Estático.

Para el *análisis estático* de chimeneas y silos, los efectos dinámicos inducidos por el sismo se simularán mediante un fuerza lateral equivalente, distribuida a largo de la altura de la estructura y actuando en la dirección del movimiento del terreno.

Se opta por el *análisis estático*, para tomar en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura se procederá a:

5.3.4 Factor de Incremento (ξ).

En los espectros de diseño para estructuras de edificios está implícito un coeficiente de amortiguamiento igual a 5% del amortiguamiento crítico. Sin embargo, en chimeneas y silos esbeltos el amortiguamiento que se tiene generalmente es menor que el considerado en tales espectros de diseño.

Usualmente, en estructuras de concreto se miden valores de $\zeta_e = 0.03$, mientras que en estructuras de acero se miden valores de $\zeta_e = 0.02$. En vista de esta situación, es necesario aumentar las ordenadas espectrales multiplicadas por un factor de incremento que se define de la misma forma que el factor de amortiguamiento para estructuras de edificios.

Se concluye que las reducciones espectrales adecuadas por efecto de interacción suelo-estructura se obtienen mediante los factores de amortiguamiento de las siguientes expresiones:

$$\xi = \left[\left(\frac{0.05}{\zeta_e} \right)^k - 1 \right] \left(\frac{T}{T_a} \right); \text{ si } T < T_a$$
$$\xi = \left(\frac{0.05}{\zeta_e} \right)^k; \text{ si } T > T_a \text{ (Que aplica para nuestro estudio)}$$

Donde:

ξ .- Factor de incremento.

ζ_e .- Amortiguamiento efectivo.

T.-Periodo de vibración.

k.- Para este valor se tomará dependiendo el tipo de terreno.

k = 0.4 Para terreno Firme (*Tipo I*).

k = 0.5 Para terreno Intermedio (*Tipo II*).

k = 0.6 Para terreno Blando (*Tipo III*).

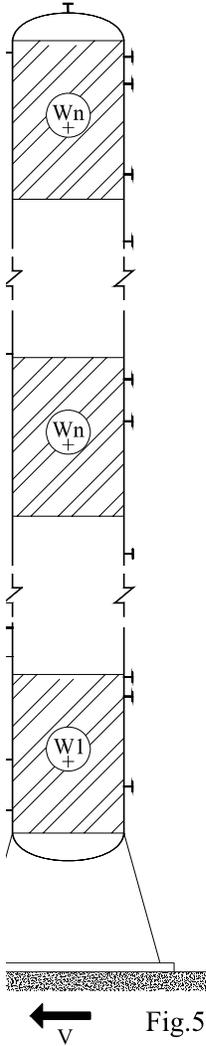
Asímismo, el valor calculado para el amortiguamiento efectivo en ninguna situación debe ser menor que 0.03 para estructuras de concreto o menor que 0.02 para estructuras de acero

En terrenos tipo I o en casos donde no se justifique llevar a cabo un análisis de interacción suelo-estructura, el factor de incremento se puede tomar como $\xi = 1.25$ para estructuras de concreto o $\xi = 1.45$ para estructuras de acero.

5.3.5 Valuación de Fuerzas Sísmicas.

La magnitud de la resultante de la fuerza lateral distribuida verticalmente será igual a la fuerza cortante basal determinada de acuerdo con lo dispuesto para estructuras de edificios, pero amplificada por un factor de incremento por lo que se aumentan las ordenadas espectrales con el objeto de tener en cuenta que el amortiguamiento en chimeneas y silos usualmente es menor que en estructuras de edificios.

La distribución vertical de la fuerza cortante basal amplificada se lleva a cabo dividiendo la estructura en N segmentos de igual altura, como se muestra en la Fig. 5.3. En el centro de la masa del n-ésimo segmento se aplica una fuerza horizontal que se define dependiendo del periodo característico T_b de las siguientes formas:



$$P_n = \sum W_T \left(\frac{0.85 W_i \times H_i}{\sum W_i \times H_i} \right) \left(\frac{a}{Q'} \right) (\xi) ; \text{ si } T < T_b \text{ (nuestro caso)}$$

$$P_n = 0.85 W_i (\alpha_1 H_i + \alpha_2 H_i^2) \left(\frac{a}{Q} \right) (\xi) ; \text{ si } T > T_b$$

Donde:

P_n .- Fuerza cortante basal amplificada.

W_T .- Peso total (kg).

W_i .- Peso del n-ésimo segmento (kg).

H_i .- Altura de su centro de gravedad del n-ésimo segmento medida desde el desplante (m).

Q' .- Factor reductivo por ductilidad.

a .- Ordenada espectral

T .-Periodo de vibración.

Q .- Factor de comportamiento sísmico.

α_1 y α_2 .- Coeficientes de proporcionalidad que se especifican para estructuras de edificios.

ξ .- Factor de incremento.

Para tener en cuenta los efectos de los modos superiores de vibración, en el N-ésimo segmento se aplica adicionalmente una fuerza horizontal que se define como:

$$P_s = 0.15 W_T \left(\frac{a}{Q'} \right) (\xi) ; \text{ si } T < T_b \text{ (nuestro caso)}$$

$$P_s = 0.15 W_T (1 + 0.5r - 0.5rq) \left(\frac{a}{Q'} \right) (\xi) ; \text{ si } T > T_b$$

Donde:

r .- El exponente de la parte curva del espectro de diseño

$$q = \left(\frac{T_b}{T} \right)^r$$

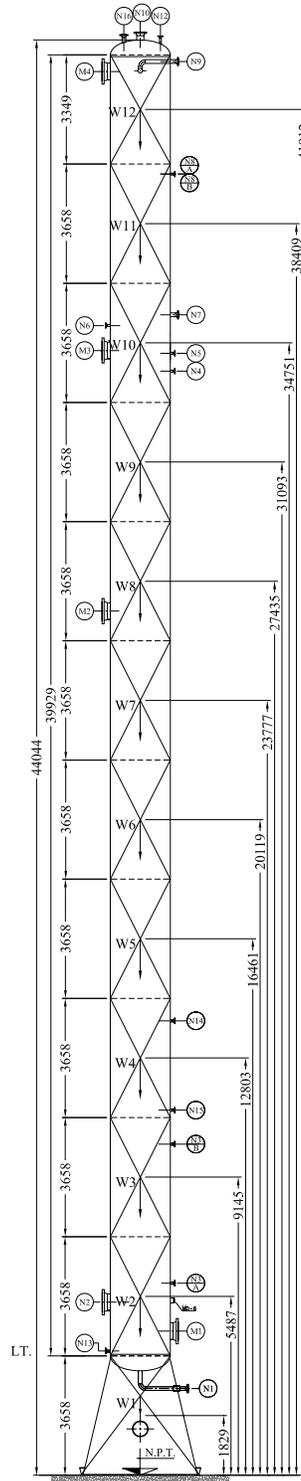
Con objeto de tener una aproximación adecuada en la valuación de las fuerzas sísmicas la estructura de interés se divide en al menos 12 segmentos.

Para aplicar el método estático con la opción que toma en cuenta el valor aproximado del periodo fundamental de la estructura, éste puede estimarse mediante las fórmulas empíricas o expresiones analíticas que sean apropiadas al tipo de estructura en cuestión.

5.4. ANÁLISIS POR SISMO.

Descritos los conceptos necesarios para el análisis de sismo, procedemos al cálculo de la Torre Da-201; como se muestra en la Fig. 5.4 es la manera de discretizar en varias secciones (12 segmentos) como se menciona anteriormente, para la obtención de valores más exactos.

Fig. 5.4



En la tabla de seccionamiento de pesos (*Tabla 5.2*), se obtiene el peso de cada sección.

<i>TABLA 5.2 (SECCIONAMIENTO DE PESOS)</i>													
CONCEPTO	SECCIÓN 1	SECCIÓN 2	SECCIÓN 3	SECCIÓN 4	SECCIÓN 5	SECCIÓN 6	SECCIÓN 7	SECCIÓN 8	SECCIÓN 9	SECCIÓN 10	SECCIÓN 11	SECCIÓN 12	TOTAL
CABEZA	612	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	473	1084
CASCARON	0	4802	4802	4259	4259	4259	3718	3718	3718	3718	3718	3404	44377
FALDÓN	6265	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6265
SILLETAS	201	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	201
ARO BASE	478	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	478
ARO DE COMP.	522	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	522
BOQUILLAS	23	900	7	14	0	0	0	0	0	43	14	111	1112
REGISTROS	0	522	0	0	0	0	0	522	0	522	0	522	2087
SOP. DE PLATOS	0	0	0	168	168	168	168	140	168	112	168	140	1402
" L " AISLANTE	0	14	27	10	10	20	10	20	10	20	10	20	173
MISCELÁNEOS	486	374	290	267	266	267	234	264	234	265	235	280	3462
MONTAJE	8586	6612	5126	4718	4704	4715	4130	4664	4130	4681	4145	4950	61162
PROT. INCENDIO	7652	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7652
AISLAMIENTO	16	121	121	121	121	121	120	120	120	120	120	126	1346
PLATOS	0	0	0	432	432	432	432	360	432	288	432	360	3604
LIQUIDO	352	4229	1320	707	707	707	707	590	707	472	707	590	11797
CAMBIADOR	0	2,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000
PLAT. Y ESC.	1162	907	460	419	418	418	377	401	377	389	378	422	6129
OPERACIÓN	17769	13869	7027	6397	6382	6393	5768	6136	5768	5950	5783	6448	93690

Periodo de Vibración.

Diámetro exterior del recipiente (D).	6.146 ft
Longitud del recipiente incluyendo el faldón (H).	144.502 ft
Espesor del faldón (t).	1 in.
Peso de la torre por pie de altura, (w).	1429.411 lb/ft.

$$T = 0.0000265 \times \left(\frac{H}{D}\right)^2 \times \sqrt{\frac{w \times D}{t}}$$

$$T = 0.0000265 \times \left(\frac{144.502}{6.146}\right)^2 \times \sqrt{\frac{1429.411 \times 6.146}{1}} = 1.37$$

$T = 1.37 \text{ seg.}$

Aceleración para Diseño de Sismo (a).

Condición	$a = c; \text{ si } Ta \leq T \leq Tb \text{ (Es correcto).}$
GRUPO DE LA ESTRUCTURA: A	
ZONA: B	
Terreno <i>Tipo II</i>	

(Datos ver *Tabla 5.1*).

Para estructuras del grupo A, los valores de las ordenadas espectrales deben multiplicarse por 1.5, a fin de tener en cuenta la importancia de la estructura.

Coefficiente de aceleración (a_o). = $0.08 \times 1.5 = 0.12$.

Coefficiente sísmico (c). = $0.30 \times 1.5 = 0.45$.

Periodo que delimita a la Meseta (Ta). = 0.3 seg.

Periodo que delimita a la Meseta (Tb). = 1.5 seg.

Exponente que define la parte Curva del espectro de Diseño (r) = 2/3.

$$a = c \Rightarrow a = 0.45$$

Factor Reductivo por Ductilidad (Q').

Condición	$Q' = Q; \text{ si } T > Ta \text{ (Es correcto).}$
-----------	---

Factor de Comportamiento Sísmico *Tipo 4(Q)*. = 3

$$Q' = 3$$

Factor de Incremento (ξ).

Amortiguamiento efectivo en estructuras de acero (ζ_e)	0.02
Terreno Tipo II	$K = 0.5$

NOTA: En chimeneas y silos esbeltos el amortiguamiento que se tiene generalmente es menor que el considerado en los espectros de diseño. En vista de esta situación, es necesario aumentar las ordenadas espectrales multiplicadas por un factor de incremento que se define de la misma forma que el factor de amortiguamiento para estructuras de edificios.

$$\xi = \left[\left(\frac{0.05}{\zeta_e} \right)^K \right] = \left(\frac{0.05}{0.02} \right)^{0.5} = 1.58$$

Fuerza Sísmica.

Fuerza cortante a diferentes Niveles (P_n).

$$P_n = \sum W_T \times \left(\frac{0.85 W_i \times H_i}{\sum W_i \times H_i} \right) \left(\frac{a}{Q'} \right) (\xi)$$

$$P_n = 93690 \times \left(\frac{0.85 \times 6448 \times 4191.2}{167241983.5} \right) \left(\frac{0.45}{3} \right) (1.58) = 3049.7723 \text{ kg.}$$

Fuerza horizontal adicional (P_s).

$$P_s = 0.15 (W_T) \left(\frac{a}{Q'} \right) (\xi)$$

$$P_s = (0.15) (93690) \left(\frac{0.45}{3} \right) (1.58) = 3330.70 \text{ kg.}$$

Con estos valores en la *Tabla 5.3* (Momentos), se obtendrán los momentos a línea de tangencia, cambio de espesor y línea de base; posteriormente se hará un análisis, el cual nos llevara a un dictamen preliminar.

<i>TABLA 5.3 (MOMENTOS)</i>												
Sección	Peso Wi (kg)	Altura Hi (cm)	Wi x Hi (kg-cm)	$0.85 \times Wi \times Hi$ (kg-cm)	$\frac{0.85 \times Wi \times Hi}{\sum Wi \times Hi}$	Pn (Kg)	Vn (Pn+Ps)	ΣVn	Hm -Hi	Mi (kg-cm)	$0.75+0.2\left(\frac{Hi}{H}\right)$	MOMENTO (kg-cm)
12	6,448	4,191.2	27,024,033	22970427.91	0.1373485	3049.7723	6380.4676	6380.4676	0	0.000	0.987898	0
11	5,783	3,840.9	22,213,723	18881664.35	0.1129003	2506.9092	8887.3768	15267.8444	350.30	2235077.801	0.968015	2163589
10	5,950	3,475.1	20,676,679	17575177.41	0.1050883	2333.4476	11220.8244	26488.6688	365.80	5584977.488	0.947252	5290379
9	5,768	3,109.3	17,934,223	15244089.97	0.0911499	2023.9503	13244.7747	39733.4435	365.80	9689555.055	0.926488	8977259
8	6,136	2,743.5	16,834,236	14309100.31	0.0855593	1899.8122	15144.5868	54878.0303	365.80	14534493.629	0.905725	13164254
7	5,768	2,377.7	13,714,406	11657245.27	0.0697029	1547.7267	16692.3135	71570.3438	365.80	20074383.488	0.884962	17765059
6	6,393	2,011.9	12,862,964	10933519.45	0.0653754	1451.6380	18143.9514	89714.2953	365.80	26180431.764	0.864198	22625085
5	6,382	1,646.1	10,505,171	8929395.21	0.0533921	1185.5514	19329.5028	109043.7981	365.80	32817489.205	0.843435	27679418
4	6,397	1,280.3	8,190,510	6961933.34	0.0416279	924.3324	20253.8353	129297.6333	365.80	39888221.337	0.822672	32814909
3	7,027	914.5	6,426,256	5462317.63	0.0326612	725.2292	20979.0645	150276.6978	365.80	47297074.276	0.801908	37927917
2	13,869	548.7	7,609,894	6468410.03	0.0386770	858.8076	21837.8721	172114.5699	365.80	54971216.057	0.781145	42940490
1	17,769	182.9	3,249,888	2762405.11	0.0165174	366.7632	22204.6352	194319.2051	365.80	62959509.655	0.760382	47873257
Σ	93690		167241983.5		0.850000				365.80	67020737.435	0.750000	50265553

Momento a la Línea de Tangencia (M_{LT}).

Valor del cortante anterior al punto de interés (V_n).	172114.5699 kg
Distancia igual a la del punto anterior de interés (D_a).	365.80 cm
Valor del Momento M_i anterior al punto de interés (M_x).	54971216.057 kg - cm
Distancia al punto de interés (D_b).	182.9 cm

$$M_i = \left(\left(\frac{V_n \times D_a - M_x}{D_a} \right) (D_b) \right) + M_x$$

$$M_i = 58965362.86 \text{ kg - cm}$$

Factor al Punto de Interés (F_a)

Distancia desde la base al punto de interés (H_i) = 365.80 cm

$$F_a = 0.75 + 0.25 \left(\frac{H_i}{H} \right) = 0.75 + 0.25 \left(\frac{365.80}{4404.4} \right) = 0.770763$$

$$M_{LT} = M_i \times F_a = 45448319.97 \text{ kg - cm} \rightarrow 39447431.52 \text{ lb - in}$$

Revisión de Esfuerzos a la Línea de Tangencia.

Diámetro int. (D_i)	72 in
Espesor diseño (t)	1.125 in
Corrosión (c)	0.125 in
Diámetro ext. (D_e)	74.25 in
(D_i)+(c)	72.25 in
(R_i)+(c)	36.125 in
Espesor corroído (t_c)	1.00 in
Diámetro medio (D_m)	73.125 in
Esfuerzo permisible SA-516 70 (S_1)	20000 lb/in ²
Eficiencia en cuerpo	0.85
Eficiencia en cabezas	1.00

M_{LT}	45448319.97 kg - cm	39447431.52 lb - in
W_{LT}	75,922 kg	167,379 lb
Presión de diseño (P)	20.38 kg/cm ²	289.934 lb/in ²

Modulo de Sección Corroída.

$$S_c = \frac{\pi(De^4 - Dic^4)}{32 \times De} = \frac{\pi(74.25^4 - 72.25^4)}{32 \times 74.25} = 4158.12$$

$$S_c = 4158.12 \text{ in}^3$$

Área Corroída.

$$A_c = \pi \times D_m \times t_c = \pi \times 73.125 \times 1 = 229.729 \text{ in}^2$$

Presión de Trabajo Máxima Permissible.

$$PMTP = \frac{S_1 \times E \times t_c}{R_c + (0.6 \times t_c)} = \frac{20000 \times 0.85 \times 1}{36.125 + (0.6 \times 1)} = 462.900$$

$$PMTP = 462.900 \frac{lb}{in^2}$$

Esfuerzo por Tensión.

$$\pi = \frac{M_{LT}}{S_c} = \frac{39447431.52}{4158.22} = 9486.819$$

$$\sum \text{Tensión (+)} = 9486.819 \frac{lb}{in^2}$$

$$\sum \text{Compresión (-)} = -9486.819 \frac{lb}{in^2}$$

Esfuerzo por Compresión.

$$\pi = \frac{W_{LT}}{A_c} = \frac{167,379}{229.729} = 728.593$$

$$\sum \text{Tensión (-)} = -728.593 \frac{lb}{in^2}$$

$$\sum \text{Compresión (-)} = -728.593 \frac{lb}{in^2}$$

Esfuerzo Axial.

$$\pi_{axial} = \frac{P \times D_m}{4 \times t_c} = \frac{289.934 \times 73.125}{4 \times 1} = 5300.356$$

$$\sum \text{Tensión (+)} = 5300.356 \frac{lb}{in^2}$$

$$\sum \text{Compresión (+)} = 5300.356 \frac{lb}{in^2}$$

Esfuerzo Axial Neto.

<i>Tensión (lb/in²)</i>	<i>Compresión(lb/in²)</i>
+ 9486.819	- 9486.819
- 728.593	- 728.593
+5300.356	+5300.356
Σ 14058.582	Σ -4915.056

Esfuerzo de Poisón.

$$\tau_{\text{Poisón}} = -0.3 \tau_{\text{axial neto}}$$

<i>Tensión (lb/in²)</i>	<i>Compresión(lb/in²)</i>
-4217.575	+1474.517

Esfuerzo Tangencial.

$$\tau_{\text{Tangencial}} = \frac{P \times Dm}{2 \times tc} = \frac{289.934 \times 73.125}{2 \times 1} = 10600.712$$

<i>Tensión (lb/in²)</i>	<i>Compresión(lb/in²)</i>
+10600.712	+10600.712

Esfuerzo Tangencial Real.

<i>Tensión (lb/in²)</i>	<i>Compresión(lb/in²)</i>
- 4217.575	+ 1474.517
+10600.712	+10600.712
Σ 6383.137	Σ 12075.229

Esfuerzo Permissible

$$\tau_{\text{Permissible}} = S_1 \times E = 20000 \times 1.00 = 20000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

Nota:

Esfuerzo Tangencial Real (Ten. o Comp.) < τ Permissible
Entonces el espesor es adecuado de lo contrario proponer otro.

Esfuerzo Tangencial Real (Comp.) = 12075.229 (lb/in²).

Esfuerzo Permissible = 20000.00 (lb/in²).

Momento al Cambio de Sección Mínimo (M_{6-7}).

Valor del cortante anterior al punto de interés (V_n).	71570.3438 kg
Distancia igual a la del punto anterior de interés (D_a).	365.80 cm
Valor del Momento M_i anterior al punto de interés (M_x).	20074383.488 kg - cm
Distancia al punto de interés (D_b).	182.9 cm

$$M_i = \left(\left(\frac{V_n \times D_a - M_x}{D_a} \right) (D_b) \right) + M_x$$

$$M_i = 23127407.62 \text{ kg - cm}$$

Factor al Punto de Interés (Fa).

Distancia desde la base al punto de interés (H_i) = 2194.80 cm

$$F_a = 0.75 + 0.25 \left(\frac{H_i}{H} \right) = 0.75 + 0.25 \left(\frac{2194.80}{4404.4} \right) = 0.874580$$

$$M_{6-7} = M_i \times F_a = 20226768.16 \text{ kg - cm} \rightarrow 17556073.63 \text{ lb - in}$$

Revisión de Esfuerzos entre Secciones 6 y 7.

Diámetro int. (D_i)	72 in
Espesor diseño (t)	0.875 in
Corrosión (c)	0.125 in
Diámetro ext. (D_e)	73.75 in
$(D_i) + (c)$	72.25 in
$(R_i) + (c)$	36.125 in
Espesor corroído (t_c)	0.75 in
Diámetro medio (D_m)	73 in
Esfuerzo permisible SA-516 70 (S_1)	20000 lb/in ²
Eficiencia en cuerpo	0.85
Eficiencia en cabezas	1.00

M_{6-7}	20226768.16 kg - cm	17556073 lb - in
W_{6-7}	35,583 kg	78,972 lb
Presión de diseño (P)	20.38 kg/cm ²	289.934 lb/in ²

Modulo de Sección Corroída.

$$S_c = \frac{\pi(De^4 - Dic^4)}{32 \times De} = \frac{\pi(73.75^4 - 72.25^4)}{32 \times 73.75} = 3107.446$$
$$S_c = 3107.446 \text{ in}^3$$

Área Corroída.

$$A_c = \pi \times Dm \times tc = \pi \times 73 \times 0.75 = 171.708 \text{ in}^2$$

Presión de Trabajo Máxima Permisible.

$$PMTP = \frac{S_1 \times E \times tc}{Rc + (0.6 \times tc)} = \frac{20000 \times 0.85 \times 0.75}{36.125 + (0.6 \times 0.75)} = 348.599$$
$$PMTP = 348.599 \frac{lb}{in^2}$$

Esfuerzo por Tensión.

$$\pi = \frac{M_{6-7}}{S_c} = \frac{17556073.63}{3107.446} = 5649.668$$
$$\sum Tensión (+) = 5649.668 \frac{lb}{in^2}$$
$$\sum Compresión (-) = -5649.668 \frac{lb}{in^2}$$

Esfuerzo por Compresión.

$$\pi = \frac{W_{6-7}}{A_c} = \frac{78972}{171.708} = 459.920$$
$$\sum Tensión (-) = -459.920 \frac{lb}{in^2}$$
$$\sum Compresión (-) = -459.920 \frac{lb}{in^2}$$

Esfuerzo Axial.

$$\pi_{axial} = \frac{P \times Dm}{4 \times tc} = \frac{289.934 \times 73}{4 \times 0.75} = 7042.980$$
$$\sum Tension (+) = 7042.980 \frac{lb}{in^2}$$
$$\sum Compresión (+) = 7042.980 \frac{lb}{in^2}$$

Esfuerzo Axial Neto.

<i>Tensión (lb/in²)</i>	<i>Compresión (lb/in²)</i>
+ 5649.668	- 5649.668
- 459.920	- 459.920
+7042.980	+7042.980
Σ +12232.728	Σ + 933.392

Esfuerzo de Poisón.

$$\tau \text{ Poisón} = -0.3 \times \text{axial neto}$$

<i>Tensión (lb/in²)</i>	<i>Compresión (lb/in²)</i>
- 3669.818	- 280.017

Esfuerzo Tangencial.

$$\tau \text{ Tangencial} = \frac{P \times Dm}{2 \times tc} = \frac{289.934 \times 73}{2 \times 0.75} = 14085.960$$

<i>Tensión (lb/in²)</i>	<i>Compresión (lb/in²)</i>
+14085.960	+14085.960

Esfuerzo Tangencial Real.

<i>Tensión (lb/in²)</i>	<i>Compresión (lb/in²)</i>
- 3669.818	- 280.017
+14085.960	+14085.960
Σ 10416.142	Σ 13805.943

Esfuerzo Permissible.

$$\tau \text{ Permissible} = S_1 \times E = 20000 \times 0.85 = 17000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

Nota:

Esfuerzo Tangencial Real (Ten. o Comp.) < τ Permissible
Entonces el espesor es adecuado de lo contrario proponer otro.

Esfuerzo Tangencial Real (Comp.) = 13805.943 (lb/in²).

Esfuerzo Permissible = 17000.00 (lb/in²).

Revisión y Análisis del Faldón.

Diámetro medio = Diámetro medio en LT. (Dm)	73.125in
Esfuerzo Permisible SA-285 C (S_2)	15,700 lb/in ²
Eficiencia de la junta (E)	0.70
Factor de Incremento para efectos de Sismo (α)	1.33

M_{LT}	45448319.97 kg - cm	39447431.52 lb - in
W_{LT}	75,922 kg	167,379 lb

Modulo de Sección.

$$S = \frac{\pi(Dm^2)}{4} = \frac{\pi(73.125^2)}{4} = 4199.733$$
$$S = 4199.733 \text{ in}^2$$

Área de la Sección.

$$A_s = \pi \times Dm = \pi \times 73.125 = 229.729 \text{ in}^2$$

Esfuerzo por Compresión.

$$\tau = \frac{W_{LT}}{A_s} = \frac{167379}{229.729} = 728.593 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

Esfuerzo por Flexión.

$$\tau_{\text{Flexion}} = \frac{M_{LT}}{S} = \frac{39447431.52}{4199.733} = 9392.842 \frac{\text{lb} - \text{in}}{\text{in}^2}$$

Esfuerzo Permisible.

$$\tau_{\text{Permisible}} = S_2 \times E \times \alpha = 15700 \times 0.70 \times 1.33 = 14616.70 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

Espesor Requerido en el Faldón.

$$tsk = \frac{\tau \times \tau_{\text{Flexión}}}{\tau_{\text{Permisible}}} = \frac{728.593 + 9392.84}{14616.70} = 0.692 \text{ in}$$
$$tsk = 17.58 \text{ mm}$$

Nota: Utilizar un espesor comercial de 25 mm.

Momento a la Línea Base (M_{LB}).

Valor del cortante anterior al punto de interés (V_n).	194319.2051 kg
Distancia igual a la del punto anterior de interés (D_a).	365.80 cm
Valor del Momento M_i anterior al punto de interés (M_x).	62959509.655 kg - cm
Distancia al punto de interés (D_b).	182.9 cm

$$M_i = \left(\left(\frac{V_n \times D_a - M_x}{D_a} \right) (D_b) \right) + M_x$$

$$M_i = 67020737.44 \text{ kg - cm}$$

Factor al Punto de Interés (F_a)

Distancia desde la base al punto de interés (H_i) = 0 cm.

$$F_a = 0.75 + 0.25 \left(\frac{H_i}{H} \right) = 0.75 + 0.25 \left(\frac{0}{4404.4} \right) = 0.75$$

$$M_{LB} = M_i \times F_a = 50265553.08 \text{ kg - cm} \rightarrow 43628609 \text{ lb - in}$$

Calculo y Revisión del Aro Base y del Aro de Compresión.

Diámetro exterior mayor del Faldón (D).	348 cm
Aplastamiento del Concreto (A_c).	52.70 kg/cm ²
Esfuerzo Permisible del Concreto (S_c).	1125.00 kg/cm ²
Distancia libre por el exterior del Aro (L).	6.20 cm

M_{LB}	50265553.08 kg - cm	43628609 lb - in
W_{LB}	93,690 kg	206,551 lb

Modulo de Sección.

$$S = \frac{\pi(D^2)}{4} = \frac{\pi(348^2)}{4} = 95114.86$$

$$S = 95114.86 \text{ cm}^2$$

Área de la Sección.

$$A_s = \pi \times D = \pi \times 348 = 1093.27 \text{ cm}^2$$

Esfuerzo por Compresión.

$$\tau_c = \frac{W_{LB}}{A_s} = \frac{93690}{1093.27} = 85.70 \frac{kg}{cm^2}$$

Esfuerzo por Flexión.

$$\tau_{Flexion} = \frac{M_{LB}}{S} = \frac{50265553.08}{95114.86} = 528.47 \frac{kg}{cm^2}$$

• **Ancho del Aro Base.**

$$B = \frac{\tau_{Flexión} + \tau_c}{A_c} = \frac{528.47 + 85.70}{52.70} = 11.65 \text{ cm}$$

Nota: Utilizar un ancho de aro de 16.0 cm.

• **Espesor del Aro Base.**

Aplastamiento sobre el Concreto

$$W = \frac{\tau_{Flexión} + \tau_c}{B} = \frac{528.47 + 85.70}{16} = 38.39 \frac{kg}{cm^2}$$

$$t_{1aro} = L \sqrt{\frac{3W}{S_3}} = 6.20 \sqrt{\frac{3 \times 38.39}{1125.00}} = 1.98 \text{ cm}$$

Nota: Utilizar un espesor de aro de 3.5 cm.

• **Espesor del Aro compresión.**

Espaciamiento entre cartabones (Q).	10.2 cm
Ancho del aro de compresión (A).	17.0 cm
Diámetro centro de anclas (Dca).	360.0 cm

Carga por ancla (Ca).

$$Ca = \frac{(4 \times M_{LB}) - (W_{LB} \times Dca)}{(n \times Dca)} = \frac{(4 \times 50265553.08) - (93690 \times 360)}{36 \times 360} = 12912 \text{ kg}$$

$$t_{2aro} = \sqrt{\frac{3 \times Ca \times Q}{4 \times A \times S_3}} = \sqrt{\frac{3 \times 12912 \times 10.20}{4 \times 17 \times 1125.00}} = 2.27 \text{ cm}$$

Nota: Utilizar un ancho de aro de 3.5 cm.

Revisión y Análisis de Anclas.

Numero de Anclas	36	
Esfuerzo Permissible del Ancla (S_3).	984.321 kg/cm ²	14000 lb/in ²

M _{LB}	50265553.08 kg - cm	43628609 lb - in
W _{LB}	93,690 kg	206,551 lb

- **Área requerida por Ancla (A_a).**

$$A_a = \frac{C_a}{\tau \text{ permisible}} = \frac{12912}{984.321} = 13.12 \text{ cm}^2$$

Ø Ancla	Área (cm ²)
44	11.22
51	14.83

Nota: Se utilizaran 36 anclas de 51mm

5.5. DICTAMEN FINAL.

Una vez obtenidos los cortantes y momentos necesarios para el análisis de esfuerzos tangenciales reales y comparados con los esfuerzos permisibles del material empleado en la fabricación de la torre, encontramos que este esfuerzo permisible es mayor al esfuerzo tangencial real actuante; por lo tanto nuestro diseño es el adecuado, de lo contrario el diseño no es adecuado.

σ PERM. > σ TAN. REAL. (ES CORRECTO).

σ PERM. < σ TAN. REAL. (NO ES CORRECTO).

CAPITULO 6

ANÁLISIS POR VIENTO.

6.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SEGÚN SU IMPORTANCIA.

La seguridad necesaria para que una construcción dada cumpla adecuadamente con las funciones para las que se haya destinado puede establecerse a partir de niveles de importancia o de seguridad. En la práctica dichos niveles se asocian con velocidades del viento que tengan una probabilidad de ser excedidas y a partir de estas se evalúa la magnitud de las sollicitaciones de diseño debidas al viento.

Todo el análisis de viento que se muestra aquí es con relación al Manual de diseño de la Comisión Federal de Electricidad, atendiendo al grado de seguridad aconsejable para una estructura, las construcciones se clasifican según los grupos que se indican a continuación.

Grupo A (Que es nuestro caso).

Estructuras para las que se recomienda un *grado de seguridad elevado*. Pertenecen a este grupo aquellas que en caso de fallar causarían la pérdida de un número importante de vidas, o perjuicios económicos o culturales excepcionalmente altos; o que constituya un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o inflamables

Quedan excluidos los depósitos y las estructuras enterradas. Ejemplos de este grupo son las construcciones cuya falla impida la operación de plantas termoeléctricas, hidroeléctricas y nucleares; entre estas, pueden mencionarse las chimeneas, las subestaciones eléctricas, las torres y postes que formen parte de líneas de transmisión principales. Del mismo modo pueden considerarse los locales, las cubiertas y los paraguas que protegen equipo especialmente costoso, y las áreas de reunión que puedan alojar a más de doscientas personas, tales como salas de espectáculos, auditorios y centros de convenciones.

Grupo B.

Estructuras en las que se requieren un *grado de seguridad moderado*. Construcciones cuya falla estructural representan un bajo riesgo de pérdida de vidas humanas o daños materiales de magnitud intermedia, tales como naves industriales, bodegas ordinarias, gasolineras, comercios, casas habitación y todas las construcciones cuya falla por viento pueda poner en peligro otras construcciones de este grupo o del Grupo A.

Grupo C.

Estructuras en las que sea admisible un *grado de seguridad bajo*. Construcciones cuya falla estructural no implica graves consecuencias ni puede causar daños a construcciones de los Grupos A y B. Abarca por ejemplo no solo bodegas provisionales, cimbras, carteles, muros aislados, si no también recubrimientos, tales como cancelarías y elementos estructurales que formen parte de fachadas y no represente un peligro que pueda causar daños corporales o materiales.

6.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SEGÚN SU RESPUESTA ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO.

De acuerdo con su sensibilidad ante los efectos de ráfagas del viento y a su correspondiente respuesta dinámica, las construcciones se clasifican en cuatro tipos. Con base en esta clasificación puede seleccionarse el método para obtener las cargas de diseño por viento sobre las estructuras y la determinación de efectos dinámicos suplementarios si es el caso.

Tipo 1

Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento.

Considera todas aquéllas en las que la relación de aspecto λ , (definida como el cociente entre la altura y la menor dimensión en planta), es menor o igual a cinco y cuyo periodo natural de vibración es menor o igual a un segundo. Pertenecen a este tipo, por ejemplo, la mayoría de los edificios para habitación u oficinas, bodegas, naves industriales, teatros, auditorios, puentes cortos y viaductos.

TIPO 2

Estructuras que por su alta relación de aspecto o las dimensiones reducidas de su sección transversal son especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración.

Ráfagas entre 1 y 5 segundos y cuyos periodos naturales largos favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes en la dirección del viento. Dentro de este tipo se encuentran los edificios con relación de aspecto, λ , mayor que cinco segundos o con periodo fundamental mayor que un segundo; por ejemplo, las torres de celosía atirantadas y las autosoportadas para líneas de transmisión, chimeneas, tanques elevados, antenas, etc. Se excluyen aquellas que explícitamente se mencionan como pertenecientes a los Tipos 3 Y 4.

TIPO 3

Estas estructuras, además de reunir todas las características de las del Tipo 2, presentan oscilaciones importantes transversales al flujo del viento provocado por la aparición periódica de vórtices o remolinos con ejes paralelos a la dirección del viento.

En este tipo se incluyen las construcciones y elementos aproximadamente cilíndricos o prismáticos esbeltos, tales como chimeneas, tuberías exteriores o elevadas, arbotantes para iluminación, postes de distribución, etc.

TIPO 4

Estructuras que por su forma o por lo largo de sus periodos de vibración (periodos naturales mayores que un segundo), presentan problemas aerodinámicos especiales.

Entre ellas se encuentran las formas aerodinámicamente inestables como son los cables de las líneas de transmisión, cuya sección transversal se ve modificada de manera desfavorable en zonas sometidas a heladas, las tuberías colgantes y las antenas parabólicas.

6.3 EFECTOS DEL VIENTO QUE DEBEN CONSIDERARSE.

A continuación se mencionan los efectos que según el tipo de construcción se deben tomar en cuenta en el diseño de estructuras sometidas a la acción del viento.

I. Empujes medios.

Son los causados por presiones y succiones de flujo del viento prácticamente laminar, tanto exteriores como interiores, y cuyos efectos son globales (para el diseño de la estructura en conjunto) y locales (para diseño de un elemento estructural o de recubrimiento en particular).

II. Empujes dinámicos en la dirección del viento.

Consisten en fuerzas dinámicas paralelas al flujo principal causadas por la turbulencia del viento y cuya fluctuación en el tiempo influye de manera importante en la respuesta estructural.

III. Vibraciones transversales al flujo.

La presencia de cuerpos en particular cilíndricos o prismáticos, dentro del flujo del viento, genera entre otros efectos el desprendimiento de vórtices alterantes que a su vez provocan sobre los mismos cuerpos, fuerzas y vibraciones transversales a la dirección del flujo.

IV. Inestabilidad Aerodinámica.

Se define como la amplificación dinámica de la respuesta estructural causada por los efectos combinados de la geometría de la construcción y de los distintos ángulos de incidencia del viento.

En el diseño de las estructuras pertenecientes al *Tipo 1*, basta con tener en cuenta los empujes medios (estáticos) y empleando las velocidades de diseño que se especifican en el punto 6.5.

Para diseñar las construcciones del *Tipo 2* se consideran los efectos dinámicos causados por la turbulencia del viento. Estos se toman en cuenta mediante la aplicación de del factor de respuesta dinámica a ráfagas.

Las estructuras del *Tipo 3* deben diseñarse de acuerdo con los criterios establecidos para las del Tipo 2, pero además debe revisarse su capacidad para resistir los empujes dinámicos transversales generados por los vórtices alterantes.

Finalmente, para las del *Tipo 4* los efectos del viento se determinan por medio de estudios representativos analíticos o experimentales; pero en ningún caso, los efectos resultantes pueden ser menores que los especificados para las construcciones del Tipo 3.

6.4 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LAS ACCIONES POR VIENTO.

A fin de evaluar las fuerzas provocadas por la acción del viento, se proponen principalmente dos procedimientos. El primero, referido como *análisis estático*, se emplea cuando se trate de estructuras o elementos estructurales suficientemente rígidos, que no sean sensibles a los efectos dinámicos del viento. En caso contrario, debe utilizarse el segundo procedimiento llamado *análisis dinámico*, en el cual se afirma que una construcción o elemento estructural es sensible a los efectos dinámicos del viento cuando se presentan fuerzas importantes provenientes de la interacción dinámica entre el viento y la estructura.

Un tercer procedimiento para evaluar la acción del viento sobre las construcciones consiste en llevar a cabo pruebas experimentales de modelos en túneles de viento. Estas pruebas deben realizarse cuando se desee conocer la respuesta dinámica de estructuras cuya geometría sea marcadamente diferente de las formas comunes.

6.5. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DISEÑO (V_D).

La velocidad de diseño, V_D , es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre un componente de la misma.

La velocidad de diseño, en km/h, se obtiene de acuerdo con la ecuación:

$$V_D = F_T \times F_\alpha \times V_R$$

Donde:

F_T .- Factor que depende de la topografía del sitio (adimensional).

F_α .- Factor que toma en cuenta el efecto combinado de las características de exposición locales, del tamaño de la construcción y de la variación de la velocidad con la altura (adimensional).

V_R .- Velocidad regional que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura (km/h).

Sin embargo, para un análisis dinámico, el factor que considera el tamaño de la estructura F_C , y del cual es función del factor de exposición F_α , se tomara igual a uno.

6.5.1 Categorías de terrenos y clases de estructuras.

Tanto en el procedimiento de análisis estático como dinámico intervienen factores que dependen de las condiciones topográficas y de exposición local del sitio en donde se desplantará la construcción, así como el tamaño de ésta. Por lo tanto, a fin de evaluar correctamente dichos factores, es necesario establecer clasificaciones de carácter práctico.

En la *Tabla I.1*, se consignan cuatro categorías de terreno atendiendo al grado de rugosidad que presenta alrededor de la zona de desplante.

TABLA I.1 CATEGORÍA DEL TERRENO SEGÚN SU RUGOSIDAD			
CAT.	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS	LIMITACIONES
1	Terreno abierto prácticamente plano y sin obstrucciones.	Franjas costeras planas, zonas de pantanos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bardas alrededor. Superficies nevadas planas	La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000 m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones.	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas alrededor, árboles y construcciones dispersas.	Las obstrucciones tienen alturas de 1.5 a 10 m en una longitud mínima de 1500 m.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas.	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas.	Las obstrucciones presentan alturas de 3 a 5 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500 m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas.	Centros de grandes ciudades y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos el 50% de los edificios tiene una altura mayor que 20 m. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m. de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400 m y 10 veces la altura de la construcción.

La *Tabla I.2* divide a las estructuras y a los elementos que forman parte de ellas en tres clases, de acuerdo con su tamaño.

TABLA I.2 CLASES DE ESTRUCTURAS SEGÚN SU TAMAÑO	
CLASE	DESCRIPCIÓN
A	Todo elemento de recubrimiento de fachadas, de ventanearías, de techumbres y sus respectivos sujetadores. Todo elemento estructural aislado, expuesto directamente a la acción del viento. Así mismo todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, sea menor que 20 metros.
B	Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, varíe entre 20 y 50 metros.
C	Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical sea mayor de 50 metros.

En la dirección del viento que se esté analizando, el terreno inmediato a la estructura debe presentar la misma rugosidad (categoría), cuando menos en una distancia denominada longitud mínima de desarrollo, la cual se consigna en la *Tabla I-1* para cada categoría de terreno. Cuando no exista esta longitud mínima, el factor de exposición F_a , definido en párrafos siguientes debe modificarse para tomar en cuenta este hecho, (ver punto 6.9).

En este caso el diseñador puede seleccionar, entre las categorías de los terrenos que se encuentren en una dirección de análisis dada, la que provoque los efectos más desfavorables y determinar el factor de exposición para tal categoría, o seguir un procedimiento analítico más refinado a fin de corregir el factor de exposición.

6.5.2 Mapas de Isotacas, Velocidad Regional (V_R).

La velocidad regional del viento, V_R , es la máxima velocidad medida probable de presentarse con un cierto período de recurrencia en una zona o región determinada del país.

En el mapa de isotaca incluido en este inciso con su periodo de retorno, dicha velocidad se refiere a condiciones homogéneas que corresponden a una altura de 10 metros sobre la superficie del suelo en terreno plano (categoría 2 según la *Tabla I.1*) es decir, no considera las características de rugosidad locales del terreno ni la topografía específica del sitio. Así mismo, dicha velocidad se asocia con ráfagas de 3 segundos y toma en cuenta la posibilidad de que se presenten vientos debidos a huracanes en las zonas costeras.

La importancia de las estructuras, (ver punto 6.1), dictamina los periodos de recurrencia que deben considerarse para el diseño por viento; de esta manera, los grupos A, B y C se asocian con los periodos de retorno de 200, 50 y 10 años respectivamente.

La velocidad regional, V_R , se determina tomando en consideración tanto la localización geográfica del sitio del desplante de la estructura como su destino.

En la Figura 6.1, se muestra el mapa de la isotaca regional correspondientes al período de recurrencia de 50 años.

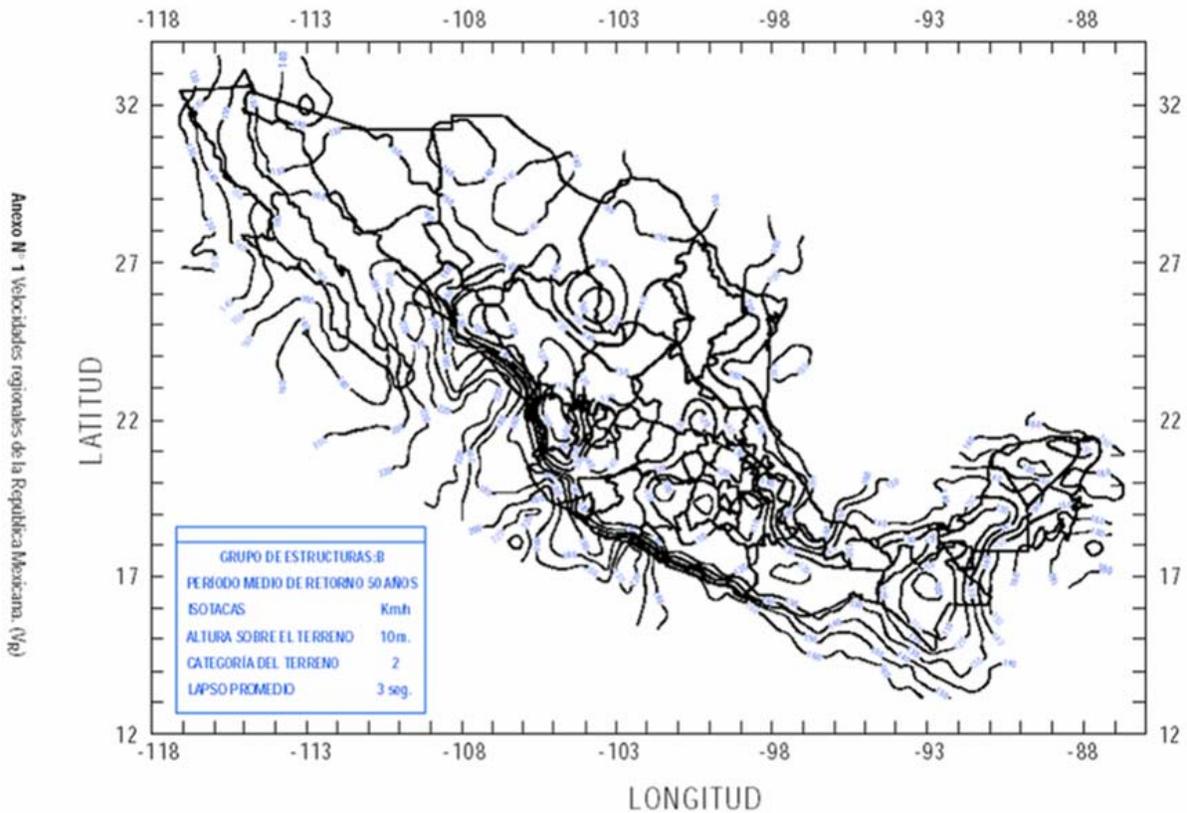


Figura 6.1. Isotaca regional de 50 años.

6.5.3 Factor de Exposición (F_a).

El coeficiente F_a refleja la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura Z . Así mismo, considera el tamaño de la construcción o de los elementos de recubrimiento y las características de exposición.

El factor de exposición se calcula con la siguiente expresión:

$$F_a = F_C \times F_{rz}$$

Donde:

F_C - Es el factor que determina la influencia del tamaño de la construcción, (adimensional).

F_{rz} - Factor que establece la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura Z en función de la rugosidad del terreno de los alrededores (adimensional).

Los coeficientes F_C y F_{rz} se definen en párrafos siguientes respectivamente.

Como se mencionó en el punto 6.5.1, cuando la longitud mínima de desarrollo de un terreno con cierta rugosidad no satisface lo establecido en la *Tabla I.1*, debe seleccionarse la categoría que genere las condiciones más desfavorables para una dirección del viento dada. Alternativamente, la variación de la rugosidad alrededor de la construcción en un sitio dado puede tomarse en cuenta corrigiendo el factor de exposición, F_a , (ver punto 6.9).

6.5.4 Factor de Tamaño (F_C).

El factor de tamaño, F_C , es el que toma en cuenta el tiempo en el que la ráfaga del viento actúa de manera efectiva sobre una construcción de dimensiones dadas. Considerando la clasificación de las estructuras según su tamaño (ver *Tabla I.2*), este factor puede determinarse de acuerdo con la *Tabla I.3*.

Clases de Estructuras	F_C
A	1.00
B	0.95
C	0.90

Nota: Este factor, que considera el tamaño de la estructura, para casos de *análisis dinámico* se tomara con un valor igual a uno.

6.5.5 Factor de rugosidad y altura (F_{rz}).

El factor de rugosidad y altura, F_{rz} , establece la variación de la velocidad del viento con la altura Z . Dicha variación está en función de la categoría del terreno y del tamaño de la construcción. Se obtiene de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{10}{\delta} \right]^\alpha \quad \text{si } Z \leq 10$$

$$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{Z}{\delta} \right]^\alpha \quad \text{si } 10 < Z < \delta \quad (\text{es nuestro caso})$$

$$F_{rz} = 1.56 \quad \text{si } Z \geq \delta$$

Donde:

- δ .- Es la altura, media a partir del nivel del terreno de desplante por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y se puede suponer constante (m), a esta altura se le conoce como *altura gradiente*.
- α .- Exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura (adimensional).

Los coeficientes α y δ están en función de la rugosidad del terreno (*Tabla I.1*) y del tamaño de la construcción (*Tabla I.2*). En la *Tabla I.4* se consignan los valores que se aconsejan para estos coeficientes.

TABLA I.4. VALORES DE (α) Y (δ)				
Categoría de Terreno	α			δ (m)
	Clases de Estructura			
	A	B	C	
1	0.099	0.101	0.105	245
2	0.128	0.131	0.138	315
3	0.156	0.160	0.171	390
4	0.170	0.177	0.193	455

6.5.6 Factor de topografía (F_T).

Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde desplantará la estructura. Así, por ejemplo, si la construcción se localiza en las laderas, cimas de colinas o montañas de altura importante con respecto a nivel general del terreno de los alrededores, es muy probable que se generen aceleraciones del flujo del viento y por consiguiente, debe incrementarse la velocidad regional.

En la *Tabla I.5* se muestran los valores que se recomiendan con base en la experiencia para el factor de topografía, de acuerdo con las características topográficas del sitio.

TABLA I.5. FACTOR DE TOPOGRAFÍA LOCAL (F_T)		
SITIOS	TOPOGRAFÍA	F_T
PROTEGIDOS	Base de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento.	0.8
	Valles cerrados.	0.9
NORMALES	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores que 5%.	1.0
EXPUESTOS	Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10%, valles abiertos y litorales planos.	1.1
	Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores que 10 %, cañadas cerradas y valle que formen un embudo o cañón, islas.	1.2

6.6 PRESIÓN DINÁMICA DE BASE (q_z).

Cuando el viento actúa sobre un obstáculo, genera presiones sobre su superficie que varían según la intensidad de la velocidad y la dirección del viento. *La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él se denomina comúnmente presión dinámica de base* y se determina con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.0048 \times G \times V_D^2$$

Donde:

G .- Factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar (adimensional).

V_D .- Velocidad de diseño, (km/h) definida en punto 6.5.

q_z .- Presión dinámica de base a una altura Z sobre el nivel del terreno (kg/m^2).

El factor de 0.0048 corresponde a un medio de la densidad del aire y el valor de G se obtiene de la expresión:

$$G = \frac{0.392 \times \Omega}{273 + \tau}$$

Donde:

Ω .- Presión barométrica. (mm de Hg).

τ .- Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

En la *Tabla I.7* se presenta la relación entre los valores de la altitud, h_m , en metros sobre el nivel del mar (msnm), y la presión barométrica (Ω).

<i>TABLA I.7 RELACIÓN ENTRE LA ALTITUD Y LA PRESIÓN BAROMÉTRICA.</i>	
<i>Altitud (msnm)</i>	<i>Presión Barométrica (mm de Hg)</i>
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

Nota: Puede interpolarse para valores intermedios de altitud, h_m .

6.7 CHIMENEAS Y TORRES.

La presión actuante sobre una construcción determinada se obtiene tomando en cuenta principalmente su forma, para nuestro caso, chimeneas y torres, esta *presión neta estática*, P_n , debida al flujo del viento, se calcula con la expresión:

$$P_n = C_a \times q_z$$

Donde:

P_n .- Presión neta estática (kg/m^2).

C_a .- Coeficiente de arrastre obtenido de la *Tabla I.28* (adimensional).

q_z .- Presión dinámica de base en una altura Z sobre el nivel del terreno (kg/m^2).

La fuerza de arrastre, F_z , se determina multiplicando la presión neta, por el área de la chimenea o torre proyectada sobre un plano vertical. Si la chimenea o torre es de sección transversal variable, la fuerza de arrastre podrá calcularse dividiéndolas en varios tramos con un diámetro o ancho medio constante en cada tramo.

Según se establece en el punto 6.8, para relaciones de aspecto, H/b , mayores que cinco o periodo fundamental mayor que uno, además de los efectos estáticos, deben tomarse en cuenta los dinámicos.

Por otra parte, los valores recomendados en la *Tabla I.28* no deben corregirse por el coeficiente de relación de aspecto.

TABLA I.28 COEFICIENTE DE ARRASTRE C_a , PARA CHIMENEAS Y TORRES.					
SECCIÓN TRANSVERSAL	Tipos de Superficie (Adimensional)	RELACIÓN H/b			
		1	7	25	≥ 40
CIRCULAR ($bV_D \geq 6m^2/s$)	Lisa o poca Rugosa ($d'/b \cong 0.0$)	0.5	0.6	0.7	0.7
	Rugosa ($d'/b \cong 0.02$)	0.7	0.8	0.9	1.2
	Muy rugosa ($d'/b \cong 0.08$)	0.8	1.0	1.2	1.2
Circular ($bV_D < 6m^2/s$)	Cualquiera	0.7	0.8	1.2	1.2
Hexagonal u Octagonal	Cualquiera	1.0	1.2	1.4	1.4
Cuadrada (viento normal a una cara)	Cualquiera	1.3	1.4	2.0	2.2
Cuadrada (viento sobre una esquina)	Cualquiera	1.0	1.1	1.5	1.6

Notas:

1. b es el diámetro o la dimensión horizontal de la estructura, incluyendo la rugosidad de la pared; para determinar el producto (bV_D), este diámetro debe ser el que se localiza a dos tercios de la altura total, a partir del nivel del terreno (m).
2. d' es la dimensión que sobresale de las rugosidades, tales como costillas o "spoilers", (m).
3. V_D es la velocidad del viento de diseño (inciso 6.5), convertida a m/s, y valuada para los dos tercios de la altura total.
4. Para valores intermedios de H/b y de d'/b se permite la interpolación lineal.

6.8 ANÁLISIS DINÁMICO.

Este procedimiento permite evaluar los empujes ocasionados por la interacción dinámica entre el flujo del viento y las estructuras, principalmente las pertenecientes a los *Tipos 2 y 3* definidos en el punto 6.2. Las fuerzas y presiones actuantes sobre algunas de sus partes o subsistemas, tales como tramos de muro o cubiertas, toldos adyacentes, cancelerías o recubrimientos de fachadas y sus soportes deben determinarse utilizando el análisis estático.

6.8.1 Limitaciones.

El procedimiento que establece el análisis dinámico se aplica para calcular las cargas por viento que actúan sobre las estructuras prismáticas sensibles a los efectos dinámicos producidos por la turbulencia del viento; en este capítulo, dichas construcciones corresponden a los *Tipos 2 y 3* definidos en el punto 6.2.

En particular, este método debe emplearse en el diseño de las estructuras que cumplan con alguna de las siguientes condiciones:

- a) La relación $H/b > 5$, en donde H es la altura de la construcción y b la dimensión mínima de la base.
- b) El periodo fundamental de la estructura es mayor que 1 segundo.

6.8.2 Presiones y fuerzas sobre estructuras sensibles a efectos dinámicos.

En el análisis dinámico, las presiones y fuerzas de diseño que aparecen cuando el viento actúa en una dirección dada se determinan separadamente para dos direcciones ortogonales; una de ellas es aquella en la que el viento actúa, y la otra, la transversal a la anterior. Dichas fuerzas de diseño y la consecuente respuesta estructural se valúan tomando como base la velocidad de diseño.

A fin de calcular las fuerzas de diseño en la dirección del viento, para las estructuras *Tipos 2 y 3* se consideran dos componentes: un medio (estático), debido a la acción media del viento asociada a un lapso de promediación de 3 segundos y uno dinámico caracterizado por el valor pico de la acción del viento. Estos dos componentes se toman en cuenta implícitamente en el *factor de respuesta dinámica debida a ráfagas, (Fg)*.

La fuerza transversal al flujo del viento causada por la posible aparición de vórtices periódicos en estructuras pertenecientes al Tipo 3 pueden omitirse cuando por medio de observaciones en prototipos o modelos se demuestre que la geometría y acabado exterior son tales que no pueden formarse vórtices importantes para velocidades del viento menores o igual que la de diseño.

6.8.3 Presiones en la dirección del viento (P_z).

La presión total en la dirección del viento se calcula con la siguiente expresión:

$$P_z = F_g \times C_a \times q_z$$

Donde:

F_g - Factor de respuesta dinámico debida a ráfagas, (adimensional).

C_a - Coeficiente de arrastre (adimensional), que depende de la forma de la estructura.

q_z - Presión dinámica de base en la dirección del viento (kg/m^2), a una altura Z , (m), sobre el nivel del terreno.

El coeficiente de arrastre C_a , es el mismo que se recomienda en un análisis estático y en el apéndice A del Manual de Sismo y Viento de la CFE, según la forma de la construcción o elemento estructural a estudiar y el coeficiente F_g , se determinan según párrafos posteriores.

6.8.4 Fuerza en la dirección del viento (F_z).

Las fuerzas que se generan en la dirección del viento sobre las estructuras prismáticas de los *Tipos 2 y 3* se calculan multiplicando la *Presión en la dirección del viento (P_z)*, por el área de la estructura o parte de ella, A_z , en m^2 , a la altura Z sobre la cual actúa P_z .

La fuerza total F sobre la construcción, en kg, debida al flujo del viento, resulta de sumar la contribución de cada una de las fuerzas que actúa sobre el área expuesta de la estructura o parte de ella, a una altura Z dada, según se muestra en la siguiente expresión:

$$F = \sum Fz = \sum (Pz \times Az)$$

El momento de volteo máximo de diseño se determina mediante la suma de los momentos producidos por cada una de las fuerzas Fz .

6.8.5 Factor de respuesta dinámica debida a ráfagas (Fg).

En el diseño de las construcciones pertenecientes a los *Tipos 2 y 3* se toman en cuenta los efectos dinámicos debidos a la turbulencia en la dirección del viento, utilizando el factor de respuesta dinámica, Fg , el cual se determina con:

$$Fg = \frac{1}{g^2} \left[1 + g_p \times \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \right]$$

Donde:

g .- Factor de ráfaga, variable con la altura Z .

g_p .- Factor pico o de efecto máximo de la carga por viento, (vea Figura I.20).

(σ/μ) .- Relación entre la desviación estándar (raíz cuadrada del valor cuadrático medio) de la carga por viento y el valor medio de la carga por viento.

Todas las variables son *adimensionales* y se obtienen como a continuación se explica.

La variación del factor de ráfaga con la altura Z se calcula con las siguientes expresiones:

$$g = k' \left[\frac{10}{\delta} \right]^n \quad \text{si} \quad Z \leq 10$$

$$g = k' \left[\frac{Z}{\delta} \right]^n \quad \text{si} \quad 10 < Z < \delta \quad (\text{es nuestro caso})$$

$$g = k' \quad \text{si} \quad Z \geq \delta$$

Donde:

k' y η .- Son adimensionales, dependen de la rugosidad del sitio de desplante.

δ .- Altura gradiente (m).

Estas variables se definen en la *Tabla I.29*, a continuación representada.

TABLA I.29 FACTORES k' , η Y δ				
Categoría	1	2	3	4
k'	1.224	1.288	1.369	1.457
η	-0.032	-0.054	-0.096	-0.151
δ	245	315	390	455

La relación (σ/μ) , que representa la variación de la carga debida a la turbulencia del viento, se calcula con la ecuación:

$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{kr}{C\alpha'} \left(B + \frac{S \times E}{\zeta} \right)}$$

Donde:

kr .- Factor relacionado con la rugosidad del terreno:

- Para terrenos con categoría 1 = 0.06
- Para terrenos con categoría 2 = 0.08
- Para terrenos con categoría 3 = 0.10
- Para terrenos con categoría 4 = 0.14 **(Que es nuestro caso).**

ζ .- Coeficiente de amortiguamiento crítico:

- Para construcciones formadas por marcos de acero = 0.01
- Para construcciones formadas por marcos de concreto = 0.02

B .- Factor de excitación de fondo.

S .- Factor de reducción por tamaño.

E .- Factor que representa la relación de la energía de ráfaga con la frecuencia natural de la estructura.

El factor $C\alpha'$ se define con las expresiones siguientes:

$$C\alpha' = 3.46(F_T)^2 \left(\frac{10}{\delta} \right)^{2\alpha'} \quad \text{si} \quad H \leq 10$$

$$C\alpha' = 3.46(F_T)^2 \left(\frac{H}{\delta} \right)^{2\alpha'} \quad \text{si} \quad 10 < H < \delta \quad (\text{es nuestro caso})$$

$$C\alpha' = 3.46(F_T)^2 \quad \text{si} \quad H \geq \delta$$

Donde:

F_T .- Factor topografía se determina según el párrafo del inciso 6.5.6.

δ .- Es la altura gradiente establecida en la *Tabla I.29*, (m).

H .- La altura total de la construcción (m).

α' .- Es igual a 0.13, 0.18, 0.245 ó 0.31 según la categoría de terreno 1, 2, 3 ó 4 respectivamente (*Tabla I.1*).

Las variables que intervienen en la ecuación de (σ/μ) son adimensionales.

Por lo que respecta al coeficiente de amortiguamiento crítico, ζ , en *construcciones cilíndricas tales como chimeneas de acero*, su valor puede encontrarse entre 0.0016 y 0.008, según su estructuración y el tipo de material empleado. Pueden utilizarse otros valores de dicho coeficiente sólo si se justifica de manera adecuada con base en métodos analíticos o resultados de ensayos experimentales.

Por lo que concierne a los parámetros B , S , E y g_p , éstos se pueden calcular con ayuda de las gráficas de la *Figura I.20*.

En las graficas de la *Figura I.20*, b/H es la relación entre el ancho b , y la altura H , de la construcción, ambos en metros y corresponden al lado de barlovento. Asimismo, la relación que expresa la frecuencia reducida adimensional es:

$$\frac{(3.6 \times n_o \times H)}{V'_H}$$

Donde:

- n_o .- Frecuencia natural de vibración de la estructura (Hz).
- H .- Altura más elevada de la estructura (m).
- V'_H .- Velocidad media de diseño del viento (km/h).

Dicha velocidad se calcula para la altura más elevada de la estructura, H , en m, y se determina a partir de la ecuación siguiente:

$$V'_H = \left(\frac{1}{g_H} \times V_H \right)$$

Donde:

- g_H .- *Factor de ráfaga* definido en párrafos anteriores de este mismo punto y se calcula para $Z = H$.
- V_H .- Velocidad de diseño (km/h), también para $Z = H$.

Así mismo, en la *Figura I.20* aparece el número de ondas,

$$\frac{(3.6 \times n_o)}{V'_H}, \text{ en ondas/m.}$$

En donde n_o está en Hz y V'_H en km/h , determinado en el párrafo anterior.

Finalmente el factor de pico, g_p , se obtiene en función del coeficiente de rapidez de fluctuación promedio v , en Hz , el cual se define mediante:

$$v = n_o \sqrt{\frac{SE}{SE + \zeta B}}$$

Los términos en esta formula ya se han establecido con anterioridad en esta sección.

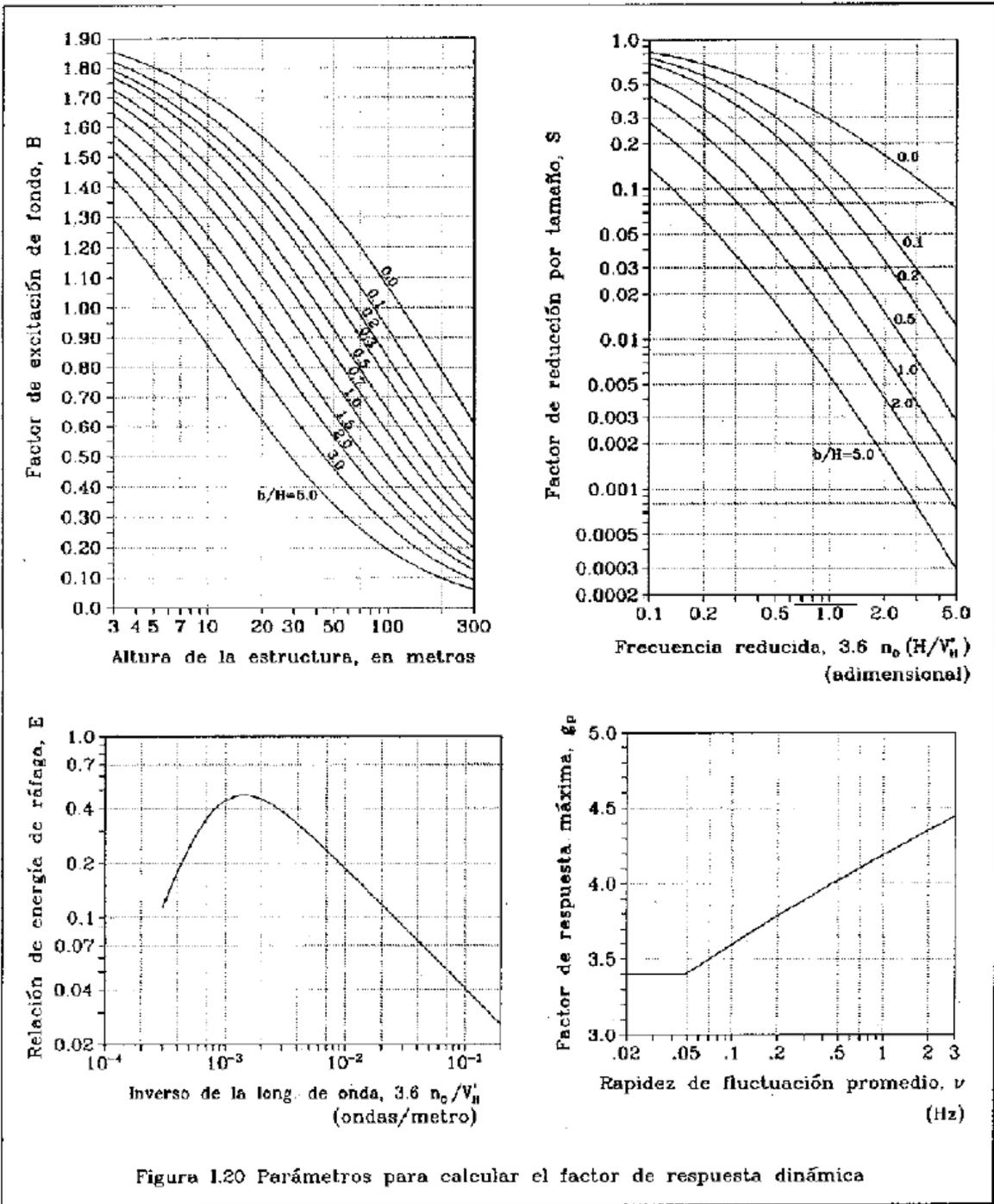


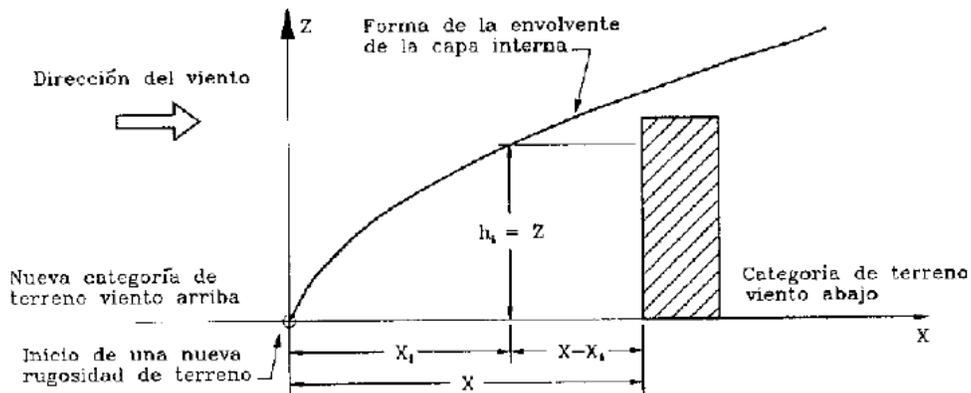
Figura 1.20 Parámetros para calcular el factor de respuesta dinámica

6.9 FACTOR DE EXPOSICIÓN (F_a).

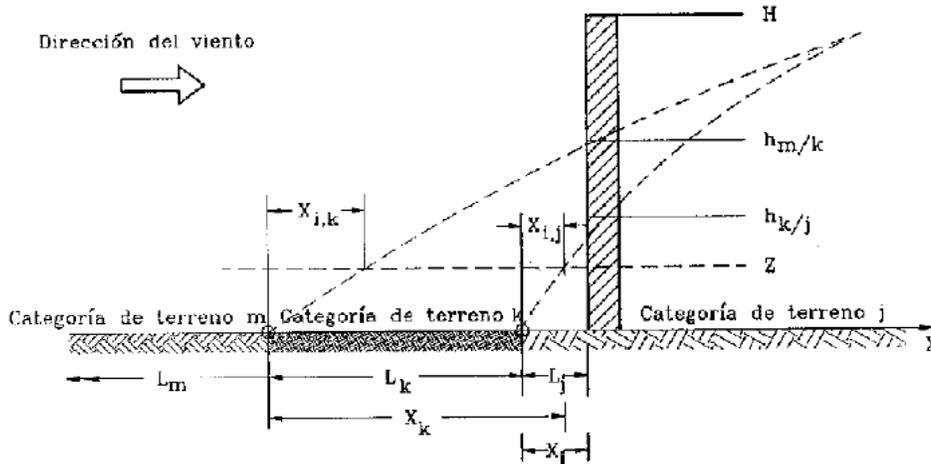
A continuación se describe el procedimiento analítico recomendado en la referencia 10, del Manual de Sismo y Viento de la CFE, el cual indica cuándo y como debe corregirse el factor de exposición, F_a , para una dirección de análisis y una rugosidad del terreno determinadas. Al aplicar este método no deben tomarse en cuenta los límites de longitud de desarrollo mínima que se establece en la *Tabla I.1*.

Es importante hacer notar que el proceso de corrección se efectúa en el sentido de viento arriba (*barlovento*) hacia viento abajo (*sotavento*) hasta el sitio de desplante de la estructura.

Cuando el viento fluye sobre un terreno de categoría dada, forma una capa interna delimitada por una envolvente como la que se muestra en la *Figura II.5a*.



a) Una sola envolvente cubre a la estructura.



b) Varias envolventes influyen sobre la estructura

Figura II.5 Cambios en la rugosidad del terreno

La ecuación de esta envolvente es:

Con respecto a h_i .

$$X_i = Z_{o,r} \left(\frac{h_i}{0.3 \times Z_{o,r}} \right)^{1.25} \dots\dots (a)$$

Con respecto X_i .

$$h_i = 0.3 Z_{o,r} \left(\frac{X_i}{Z_{o,r}} \right)^{0.8} \dots\dots (b)$$

Donde:

h_i - Corresponde a una altura cualquiera Z ($h_i = Z$), en metros, de la envolvente de la capa interna para la que se desea obtener el valor de X_i , (ver *Figura II.5a.*), será igual a la altura total de la estructura ($h_i = H$) cuando se quiera obtener el mayor valor de X_i .

X_i - La distancia horizontal, (m), medida desde donde se inicia una nueva categoría de terreno, hasta el punto en donde se desea conocer la altura correspondiente, h_i , de la capa interna (ver *Figura II.5a.*).

$Z_{o,r}$ - La mayor de las dos longitudes de rugosidad, de dos categorías de terreno colindantes, en metros. Las longitudes de rugosidad son:

- Para la Categoría 1 = 0.002
- Para la Categoría 2 = 0.02
- Para la Categoría 3 = 0.2
- Para la Categoría 4 = 2.0**

El factor de exposición modificado, F'_α , esta dado por las siguientes ecuaciones (*Figura II.5*).

Para $(X-X_i) < 0$:

$$F'_\alpha = F_{\alpha o} \dots\dots (c.1)$$

Para $0 \leq (X-X_i) \leq 2500$ m:

$$F'_\alpha = F_{\alpha o} + \left[(F_\alpha - F_{\alpha o}) \left[\frac{X - X_i}{2500} \right] \right] \dots\dots (c.2)$$

Para $(X-X_i) > 2500$ m:

$$F'_\alpha = F_\alpha \dots\dots (c.3)$$

Donde:

F'_α - Factor de exposición modificado, para una altura Z y una distancia X , que considera el cambio en la categoría de terreno, (adimensional).

- $F_{\alpha o}$ - Factor de exposición al inicio de cada terreno que se encuentre viento arriba (barlovento), con categoría diferente y para una altura Z , (adimensional).
- F_{α} - Factor de exposición, evaluando según el punto 6.5.3, párrafos anteriores, para cada categoría de terreno que se encuentre viento abajo (*sotavento*), y para una altura Z (adimensional).
- X - Es la distancia horizontal, en metros, desde un cambio de categoría a otro (*Figura II.5*).
- = L_j . para el primer tramo de terreno j (ver *figura II.5b*).
- = $L_k + X_{ij}$. para el tramo de terreno k (ver *figura II.5b*) y así sucesivamente para los terrenos en barlovento.

De esta manera, para cada altura Z en que se requiera calcular el factor de exposición es necesario realizar los siguientes pasos:

- 1) Obtenga el valor de X_i mediante la ecuación (a), considerando $h_i = Z$.
- 2) Si $L_j \geq (2500 + X_i)$, el factor de exposición no sufre ninguna modificación y este es evaluado según el punto 6.6.3, con lo cual se dará por terminado el proceso. Por lo contrario si $L_j < (2500 + X_i)$, continúe con el paso 3).
- 3) Seleccione el mayor valor entre 2500 m o 50 veces la altura total de la estructura.
- 4) Determine la categoría del terreno que se localiza a la distancia que se obtuvo en el paso 3), desde el desplante de la construcción hacia barlovento.
- 5) Si a esa distancia el terreno es de categoría 3 o menor con cualquier longitud, o si la categoría de este terreno es 4 y su longitud es mayor o igual que 2500 m, continúe con el paso 7). En caso contrario, prosiga con lo indicado en el paso 6).
- 6) En este paso se puede seleccionar una de las siguientes opciones:
 - a) Suponga que al terreno *Tipo 4*, le corresponde la categoría 3 y siga con el paso 7).
 - b) Determine la nueva categoría del terreno en barlovento y siga con el paso 7).
- 7) Considere que $F_{\alpha o} = F_{\alpha}$, donde F_{α} se calcula según el inciso 6.5.3 (Factor de Exposición, F_{α}), para el tipo de terreno definido en el paso 5) o 6).
- 8) Si la estructura se encuentra en el siguiente terreno en sotavento, pase a 11); si no es así, continúe con el paso 9).
- 9) Calcule F'_{α} para el siguiente terreno en sotavento empleando las ecuaciones (c).
- 10) Considere que $F_{\alpha o} = F'_{\alpha}$ para el inicio del siguiente terreno en sotavento, y regrese al paso 8).
- 11) Finalmente, obtenga el F'_{α} sobre la construcción, utilizando las ecuaciones (c).

6.10 ANÁLISIS POR VIENTO.

Clasificación de la Estructura según su Importancia y Categoría del Terreno

Grupo de la Estructura =	A
Categoría del Terreno =	4

Determinación de la Velocidad de Diseño (V_D)

Clase B ya que $20 < H \leq 50$ (ver tabla I.2)

Clase de la Estructura según su Tamaño =	B
--	---

Velocidad Regional (V_R)

Tomando en cuenta el lugar en donde se desplantara la torre y que la estructura pertenece al grupo A.

Velocidad Regional V_R (km/hr) =	150
------------------------------------	-----

Factor de Tamaño (F_C)

Factor de Tamaño (F_C) * =	1.00
--------------------------------	------

*Nota: Este factor, para casos de análisis dinámico se tomara con un valor igual a uno.

Factor de Rugosidad y Altura (F_{rz})

Dicha variable esta en función de la categoría del terreno y del tamaño de la construcción (Para una Categoría del Terreno 4).

Datos: (ver Tabla I.4)

Altura de desplante o altura gradiente δ (m) =	455
---	-----

Variación de la velocidad del viento con la altura α (adimensional) =	0.177
--	-------

Variación de las diferentes alturas Z (m) =	10
---	----

$$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{Z}{\delta} \right]^\alpha \quad \text{si } 10 < Z < \delta \quad 0.794$$

Factor de Exposición (F_a) Para una Categoría de Terreno 4.

$F_a(4) = (F_C)(F_{rz})$	0.794
--------------------------	-------

Cambios en la categoría del terreno

Conforme a la Tabla I.1 la longitud mínima de desarrollo que se requiere para terrenos con categoría 4 es el valor resultante mayor entre las siguientes dos opciones.

- 400m.
- 10 veces la altura de la torre = $10(44.044) = 440.44\text{m}$.

NOTA: Como regla general siempre consideraremos que la distancia de localización de una torre a un terreno con categoría 2 (terreno plano u ondulado) será de 1.0 km.

PASOS A SEGUIR

1) Calculo de X_i Para una Categoría de Terreno 4.

La mayor de las dos longitudes de rugosidad, de dos categorías de terreno colindantes

$Z_{o,r} \text{ (m)} = 2.0$

Altura cualquiera Z ($h_i = Z$), de la envolvente de la capa interna para la que se desea obtener el valor de X_i .

$h_i \text{ (m)} = 10$

$X_i = Z_{o,r} \left(\frac{h_i}{0.3 \times Z_{o,r}} \right)^{1.25} = 67.35$

2) Longitud existente desde donde estará la estructura hasta el terreno Categoría 2.

Calculo de $L_j \text{ (m)} = 1000$

3) Seleccione del valor mayor entre los 2 siguientes

a) 2500 m

b) 50 veces la altura de la estructura (torre) = $50(44.044) = 2202.2$ m

4) Se considera que la categoría del terreno que se localiza a la distancia obtenida en el paso anterior (2500 m), pertenece a la categoría de terreno 2 desde el desplante de la estructura (torre) hacia cualquier sentido de la velocidad del viento.

5) Se considera terreno de categoría 2 a los 2500m; antes mencionados.

7) Se considera que $F_{\alpha 0} = F_{\alpha}$ Para una Categoría de Terreno 2.

Datos: (ver *Tabla I.4* y *Tabla I.5*).

Altura de desplante o altura gradiente $\delta \text{ (m)} = 315$

Variación de la velocidad del viento con la altura α (adimensional) = 0.131

Variación de las diferentes alturas $Z \text{ (m)} = 10$

Factor de Tamaño (F_C)

Factor de Tamaño (F_C) * = 1.00

*Nota: Este factor, para casos de análisis dinámico se tomara con un valor igual a uno.

Factor de Rugosidad (F_{rz})

$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{Z}{\delta} \right]^{\alpha}$ si $10 < Z < \delta$ 0.993

Factor de Exposición (F_{α}) Para una Categoría de Terreno 2.

$F_{\alpha} (2) = (F_C)(F_{rz}) = 0.993$

Factor de Exposición Modificado (F'_{α})

8), 9), 10) y 11) Cálculo de, F'_{α} , para una altura Z y una distancia X , que considera el cambio en la categoría de terreno

$F'_{\alpha} = F_{\alpha} (2) + \left[(F_{\alpha} (4) - F_{\alpha} (2)) \left[\frac{X - X_i}{2500} \right] \right]$ 0.919

Factor de Topografía (F_T)	Datos: (ver <i>Tabla I.5</i>)
$F_T =$	1.1

Velocidad de Diseño en km/h (V_D)

$$V_D = F_T \times F_\alpha \times V_R \quad (\text{Km/h}) \quad 151.553$$

Presión Dinámica de Base (q_z)
--

Para la altura de la refinera de Salamanca Gto.

Presión Barométrica Ω (mm. de Hg) = 608.05

Temperatura τ ($^{\circ}\text{C}$) = 19.2

Factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar

$$G = \frac{0.392 \times \Omega}{273 + \tau} \quad (\text{adimensional}) \quad 0.816$$

$$q_z = 0.0048 \times G \times V_D^2 \quad 89.932$$

Presión de Diseño (P_z)

$$P_z = F_g \times C_a \times q_z \quad 55.419$$

Coefficiente de Arrastre (C_a)
--

b.- Diámetro a (2/3) Altura Total (m) 2.339

H.- Altura Total (m) = 44.044

(2/3) Altura total para valuar V_D

$$Z = \left(\frac{2}{3}\right) \times (H) \quad 29.36$$

Altura Promedio (Z)	Categoría de Terreno 4		$X_i = Z_o, r \left(\frac{h_i}{0.3 \times Z_o, r}\right)^{1.25}$	Categoría de Terreno 2	
	Factor de Rugosidad (F_{rz})	Factor de Exposición (F_α)		Factor de Rugosidad (F_{rz})	Factor de Exposición (F_α)
29.36	0.960	0.960	259	1.143	1.143

$$F_\alpha = F_\alpha(2) + \left[(F_\alpha(4) - F_\alpha(2)) \left[\frac{X - X_i}{2500} \right] \right] \quad 1.089$$

Velocidad de Diseño a 2/3 Altura Total	(Km/h)	(m/s)
--	--------	-------

$$V_D = F_T \times F_\alpha \times V_R \quad 179.688 \quad 49.92$$

	(m^2/s)		Tabla I.28 (m^2/s)
--	---------------------------	--	--------------------------------------

$$bV_D \quad 116.76 \quad > \quad 6.00$$

--	--	--

$$\frac{H}{b} = 18.83$$

Interpolación de la relación H/b en la Tabla I.28	
$Ca =$	0.666
Periodo de Vibración T (seg.)	
T.- Período de la Torre (ver punto 5.4. Análisis por Sismo) =	1.37
$\eta^{\circ} = \frac{1}{T}$	0.728
Factor de respuesta dinámica a ráfagas (Fg)	
Datos: (ver <i>Tabla I.29</i> , Para una Categoría de Terreno 4)	
$k'.$ - Depende de la rugosidad del sitio de desplante (adimensional). =	1.457
$\eta.$ - Depende de la rugosidad del sitio de desplante (adimensional). =	-0.151
$\delta.$ - Altura de desplante o altura gradiente (m). =	455
Z.-Variación de las diferentes alturas (m). =	10
$g = k' \left[\frac{Z}{\delta} \right]^{\eta}$ si $10 < Z < \delta$	2.593
Variación de la carga debida a la turbulencia del viento (σ/μ)	
$kr.$ - Factor relacionado con la rugosidad del terreno. =	0.14
$\zeta.$ - Coeficiente de amortiguamiento critico en chimeneas de acero. =	0.0016
B.- Factor de excitación de fondo (ver <i>Figura I.20</i>). =	1.29
S.- Factor de reducción por tamaño (ver <i>Figura I.20</i>). =	0.180
E.-Relación de la energía de ráfaga con la frecuencia natural de la estructura =	0.09
$C\alpha'.$ -Factor =	0.984
$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{kr}{C\alpha'} \left(B + \frac{S \times E}{\zeta} \right)}$	1.275
Relación (b/H)	
b.- Diámetro a (2/3) Altura Total (m)	2.339
H.- Altura Total (m) =	44.044
$\frac{b}{H} =$	0.053
Factor de excitación de fondo (B)	
Datos: (ver <i>Figura I.20</i>) B =	1.29
Factor ($C\alpha'$)	
Datos: (ver <i>Tabla I.29</i> , para una Categoría de Terreno 4).	
$\delta.$ - Altura de desplante o altura gradiente (m) =	455
$\alpha'.$ - Factor según la categoría de terreno =	0.31
H.- Altura Total (m) =	44.044
$F_T.$ -Factor de Topografía (ver <i>Tabla I.5</i>).	1.1
$C\alpha' = 3.46 (F_T)^2 \left(\frac{H}{\delta} \right)^{2\alpha}$ si $10 < H < \delta$	0.984

Velocidad media de Diseño del viento (V'_H)

Datos: (ver *Tabla I.29*, para una Categoría de Terreno 4)

k' - Depende de la rugosidad del sitio de desplante (adimensional) =	1.457
η - Depende de la rugosidad del sitio de desplante(adimensional), =	-0.151
H - Altura Total (m) =	44.044
δ - Altura de desplante o altura gradiente (m) =	455
g_H - Factor de ráfaga calculado para $Z = H$.	

$$g_H = k' \left[\frac{Z}{\delta} \right]^\eta \quad 2.073$$

Calculamos la distancia horizontal X_i en m, medida desde donde se inicia una nueva categoría de terreno, hasta el punto máximo correspondiente para una altura H .

$$X_i = Z_o, r \left(\frac{h_i}{0.3 \times Z_o, r} \right)^{1.25} \quad 429.73$$

Altura Promedio (Z)	Categoría de Terreno 4		$X_i = Z_o, r \left(\frac{h_i}{0.3 \times Z_o, r} \right)^{1.25}$	Categoría de Terreno 2	
	Factor de Rugosidad (F_{rz})	Factor de Exposición (F_a)		Factor de Rugosidad (F_{rz})	Factor de Exposición (F_a)
44.044	1.032	1.032	429.73	1.206	1.206

Factor de exposición modificado para una distancia $X = 1000$ (F'_a).

$$F'_a = F_a(2) + \left[(F_a(4) - F_a(2)) \left[\frac{X - X_i}{2500} \right] \right] \quad 1.166$$

Velocidad de diseño en la altura max. de la Torre (V_H) (Km/h)

$$V_H = V_D = F_T \times F'_a \times V_R \quad 192.382$$

Velocidad media de diseño del viento (V'_H) (Km/h)

$$V'_H = \left(\frac{1}{g_H} \times V_H \right) \quad 92.805$$

Frecuencia Reducida (f_r)

n_o - Inversa del Periodo (Hz). =	0.728
H - Altura Total (m) =	44.044
V'_H -Velocidad media de diseño del viento (Km/h) =	92.805

$$f_r = \frac{(3.6 \times n_o \times H)}{V'_H} \quad 1.244$$

Factor de reducción por tamaño (S)

Datos: (ver *Figura I.20*) $S = 0.180$

Relación de Energía de ráfaga (E)	
n_o .- Inversa del Periodo (Hz). =	0.728
V'_H .-Velocidad media de diseño del viento (Km/h) =	92.805
$\frac{(3.6 \times n_o.)}{V'_H}$	0.028
Datos: (ver <i>Figura I.20</i>) E =	0.09

Coeficiente de rapidez de Fluctuación promedio (v)	
ζ .- Coeficiente de amortiguamiento crítico:	0.0016
B .- Factor de excitación de fondo. =	1.29
S .- Factor de reducción por tamaño. =	0.180
E .- Relación de Energía de ráfaga =	0.09
η^o .- Inversa del Periodo (Hz). =	0.728
$v = \eta^o \sqrt{\frac{SE}{SE + \zeta B}}$	0.686

Factor de Respuesta máxima (gp)	
Datos: (ver <i>figura I.20</i>)	
gp =	4.1

Factor de respuesta dinámica debido a ráfagas (Fg)	
$Fg = \frac{1}{g^2} \left[1 + gp \times \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \right]$	0.926

El análisis anterior da como resultado la *Tabla 6.1 (Fuerzas actuantes del viento para dos categorías de terreno)*, la cual representa los valores de las fuerzas actuantes del viento sobre cada sección conforme a la manera en que se discretizo la Torre, esto para dos categorías de terreno distintas, cabe señalar como una ultima columna los valores que representan el momento máximo que actúa sobre la base de nuestro recipiente.

Es importante mencionar que este tipo de análisis no es considerado en la memoria de cálculo editada por el Software de Diseño y Análisis PVElite 2008. Por tal motivo se incluye la *Tabla 6.2 (Fuerzas actuantes del viento para una categoría de terreno)*, la cual representa los valor de las fuerzas antes señaladas, tomando en cuenta solo *una* categoría de terreno.

TABLA 6.1 (FUERZAS ACTUANTES DEL VIENTO PARA DOS CATEGORÍAS DE TERRENO)

Sección	Diámetro exp. (m)	Altura H _{CG} = Z (m)	Altura de Sección (m)	Área Az (m ²)	Factor Rug. F _{rz}	F actor de Exp. F _α	Nuevo terreno X _i (m)	Factor Rug. Frz	F actor de Exp. F _α	Factor Exp. Modif. F' _α	V _D = V _H para Z (kg/hr)	Presión dinámica q _z (kg/m ²)	Factor de ráfaga g	Factor de resp. Din. a ráfagas F _g	Presión de Diseño P _z (Kg/m ²)	Fuerza F _z (AzxPz) (Kg)	Momento M _z (Kg-m)
12	2.339	41.912	3.350	7.836	1.023	1.023	403.8907570	1.198	1.198	1.156	190.7496	142.467	2.089	1.427	135.334	1060.477	44446.706
11	2.339	38.409	3.658	8.556	1.007	1.007	362.1447411	1.184	1.184	1.139	187.9340	138.292	2.116	1.390	127.951	1094.803	42050.301
10	2.339	34.751	3.658	8.556	0.989	0.989	319.5582732	1.169	1.169	1.120	184.7901	133.704	2.148	1.348	120.023	1026.966	35688.092
9	2.339	31.093	3.658	8.556	0.970	0.970	278.0796552	1.152	1.152	1.099	181.3964	128.838	2.185	1.304	111.834	956.903	29752.989
8	2.339	27.435	3.658	8.556	0.949	0.949	237.8056333	1.133	1.133	1.077	177.6958	123.635	2.227	1.256	103.337	884.197	24257.952
7	2.339	23.777	3.658	8.556	0.925	0.925	198.8553386	1.112	1.112	1.052	173.6080	118.012	2.275	1.202	94.465	808.287	19218.643
6	2.339	20.119	3.658	8.556	0.898	0.898	161.3797064	1.088	1.088	1.024	169.0144	111.849	2.333	1.143	85.128	728.389	14654.449
5	2.347	16.461	3.658	8.584	0.867	0.867	125.5773174	1.060	1.060	0.992	163.7286	104.963	2.405	1.076	75.189	645.443	10624.640
4	2.347	12.803	3.658	8.584	0.829	0.829	91.7234992	1.025	1.025	0.954	157.4312	97.044	2.498	0.997	64.435	553.132	7081.748
3	2.354	9.145	3.658	8.612	0.794	0.794	67.3505168	0.993	0.993	0.919	151.5527	89.932	2.593	0.926	55.419	477.281	4364.738
2	2.354	5.487	3.658	8.612	0.794	0.794	67.3505168	0.993	0.993	0.919	151.5527	89.932	2.593	0.926	55.419	477.281	2618.843
1	2.354	1.829	3.658	8.612	0.794	0.794	67.3505168	0.993	0.993	0.919	151.5527	89.932	2.593	0.926	55.419	477.281	872.948
					Categoría de Terreno 4							Categoría de Terreno 2				9190.441	235632.048

El análisis de la *Tabla 6.2* es muy similar al descrito en el punto 6.10, solo que este no considera la modificación del Factor de Exposición, (F_a), para diferentes categorías de terreno ya que solo se analiza la intervención del terreno del cual la estructura desplanta. Este análisis si es él editado por el Software de Diseño y Análisis PVElite 2008.

TABLA 6.2 (FUERZAS ACTUANTES DEL VIENTO PARA UNA CATEGORÍA DE TERRENO)

Sección	Diametro exp. (m)	Altura $H_{CG} = Z$ (m)	Altura de Sección (m)	Area Az (m^2)	Factor Rug F_{rz}	Factor de Exp. (F_a)	$V_D = V_H$ para Z (kg/m)	Presión dinámica q_z (kg/m^2)	Factor de ráfaga (g)	Factor de resp. Din. ráfaga (F_g)	Presión de Diseño P_z (Kg/m^2)	Fz ($Az \times P_z$) (Kg)
12	2.339	41.912	3.350	7.836	1.023	1.023	168.77	111.53	2.089	1.427	105.942	830.162
11	2.339	38.409	3.658	8.556	1.007	1.007	166.18	108.13	2.116	1.390	100.047	856.043
10	2.339	34.751	3.658	8.556	0.989	0.989	163.26	104.37	2.148	1.348	93.689	801.645
9	2.339	31.093	3.658	8.556	0.970	0.970	160.08	100.34	2.185	1.304	87.097	745.237
8	2.339	27.435	3.658	8.556	0.949	0.949	156.57	95.99	2.227	1.256	80.231	686.492
7	2.339	23.777	3.658	8.556	0.925	0.925	152.66	91.25	2.275	1.202	73.042	624.981
6	2.339	20.119	3.658	8.556	0.898	0.898	148.21	86.01	2.333	1.143	65.461	560.110
5	2.347	16.461	3.658	8.584	0.867	0.867	143.04	80.11	2.405	1.076	57.387	492.624
4	2.347	12.803	3.658	8.584	0.829	0.829	136.82	73.29	2.498	0.997	48.664	417.750
3	2.354	9.145	3.658	8.612	0.794	0.794	130.96	67.15	2.593	0.926	41.382	356.392
2	2.354	5.487	3.658	8.612	0.794	0.794	130.96	67.15	2.593	0.926	41.382	356.392
1	2.354	1.829	3.658	8.612	0.794	0.794	130.96	67.15	2.593	0.926	41.382	356.392
Categoría de Terreno 4											7084.222	

La Tabla 6.3 (Momentos máximos), representa los valores de los momentos máximos de cada sección, desde Nivel de Piso Terminado del equipo hasta el nivel de base de la última sección.

TABLA 6.3 (MOMENTOS MAXIMOS)														
Sección	Fz (AzxPz) (Kg)	Altura H _{CG} = Z (m)	Momento Mz (Kg-m)											
			12	830.162	41.912	34,793.75	31,831.73	28,869.71	25,907.69	22,945.68	19,983.66	17,021.64	14,059.62	11,097.60
11	856.043	38.409	32,879.77	29,825.41	26,771.05	23,716.68	20,662.32	17,607.96	14,553.59	11,499.23	8,444.87	5,390.51	2,336.14	0.00
10	801.645	34.751	27,857.98	24,997.71	22,137.44	19,277.17	16,416.90	13,556.62	10,696.35	7,836.08	4,975.81	2,115.54	0.00	0.00
9	745.237	31.093	23,171.65	20,512.65	17,853.64	15,194.64	12,535.63	9,876.63	7,217.62	4,558.61	1,899.61	0.00	0.00	0.00
8	686.492	27.435	18,833.92	16,384.52	13,935.11	11,485.71	9,036.30	6,586.90	4,137.49	1,688.09	0.00	0.00	0.00	0.00
7	624.981	23.777	14,860.17	12,630.24	10,400.31	8,170.38	5,940.44	3,710.51	1,480.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	560.110	20.119	11,268.86	9,270.38	7,271.91	5,273.44	3,274.96	1,276.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	492.624	16.461	8,109.08	6,351.40	4,593.72	2,836.04	1,078.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	417.750	12.803	5,348.46	3,857.92	2,367.39	876.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	356.392	9.145	3,259.21	1,987.60	715.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	356.392	5.487	1,955.52	683.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	356.392	1.829	651.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ			182,990.21	158,333.47	134,916.27	112,738.59	91,890.59	72,598.76	55,107.28	39,641.64	26,417.90	15,641.63	7,509.71	2,211.55

CAPITULO 7

ANÁLISIS POR PVElite 2008.

7.1 GENERALIDADES.

PVElite es un Software para PC, basado en el diseño y análisis de recipientes a presión, desarrollado y comercializado por COADE Software de Ingeniería.

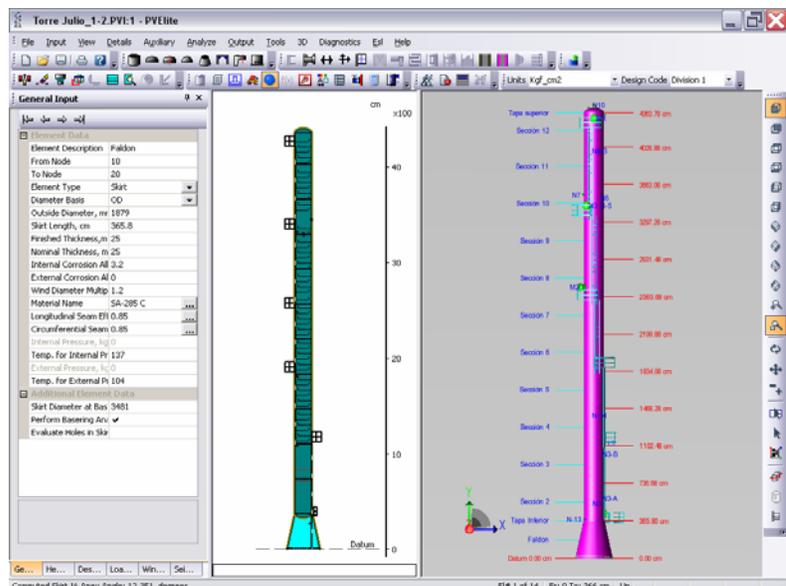
Se trata de un programa con una interfaz gráfica para el diseño y análisis completo de recipientes a presión, tanto horizontales, como verticales (torres). Aunado a todo el análisis por sismo y viento esta basado en el procedimiento que marca el Manual de la CFE, que es el documento que rige para la Republica Mexicana.

El modelado del recipiente es construido gráficamente por el levantamiento estructural de sus variables.

Las dimensiones, materiales, propiedades físicas del elemento y algunas constantes que pueden intervenir en el funcionamiento del recipiente, etc; se cargan en las diferentes hojas de calculo, esto con la finalidad de recabar la información requerida de cada componente y con la ayuda del programa se pueden llevar a cabo los cálculos de nuestro sistema basado todo esto en la NRF-028-PEMEX-2004 y complementándose con el Código ASME, Sección VIII, División 1 y el Manual de la CFE.

PVElite es un Software de diversas aplicaciones para el diseño y análisis de recipientes a presión e intercambiadores de calor, contando con un amplio criterio de los diversos servicios que se pudiesen presentar en general como se listan de la siguiente manera

- Recipientes en General
- Recipientes Verticales.
- Recipientes Horizontales.
- Cabezas y Envolventes.
- Boquillas.
- Secciones Cónicas.
- Cabezas flotantes.
- Bridas.
- Cambiadores.
- Tubos y Parches de refuerzo.
- Aros atezadores.
- Soportes (Orejias de Izaje, Silletas, Faldones y Patas)
- Aro base.
- Uniones de espesores.
- Resumen en general del equipo.



7.2 RESULTADOS.

A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos en la memoria de cálculo editada por el Software.

PV Elite Vessel Analysis Program: Input Data

Design Code: ASME Code Section VIII Division 1, 2007

Diameter Spec : 1829.000 mm OD		
Vessel Design Length, Tangent to Tangent	4003.06	cm
Distance of Bottom Tangent above Grade	365.80	cm
Distance of Base above Grade	0.00	cm
Specified Datum Line Distance	0.00	cm
Skirt Material	SA-285	C
Shell/Head Matl	SA-516	70
Nozzle Material	SA-106	B
Nozzle Material	SA-516	70
Nozzle Material	SA-105	
Re-Pad Material	SA-516	70
Internal Design Temperature	137	C
Internal Design Pressure	20.38	kgf/cm ²
External Design Temperature	104	C
External Design Pressure	1.05	kgf/cm ²
Maximum Allowable Working Pressure	24.19	kgf/cm ²
External Max. Allowable Working Pressure	1.51	kgf/cm ²
Hydrostatic Test Pressure	31.45	kgf/cm ²
Required Minimum Design Metal Temperature	-29	C
Warmest Computed Minimum Design Metal Temperature	-29	C
Wind Design Code		Mexico 93
Earthquake Design Code		México Sismo

Element Pressures and MAWP: kgf/cm²

Element Desc	Internal	External	M.A.W.P	Corr. All.
Tapa Inferior	20.402	1.050	39.399	3.2000
Sección 2	20.380	1.050	33.045	3.2000
Sección 3	20.380	1.050	33.045	3.2000
Sección 4	20.380	1.050	27.993	3.2000
Sección 5	20.380	1.050	27.993	3.2000
Sección 6	20.380	1.050	27.993	3.2000
Sección 7	20.380	1.050	24.188	3.2000
Sección 8	20.380	1.050	24.188	3.2000
Sección 9	20.380	1.050	24.188	3.2000
Sección 10	20.380	1.050	24.188	3.2000
Sección 11	20.380	1.050	24.188	3.2000
Sección 12	20.380	1.050	24.188	3.2000
Tapa superior	20.380	1.050	28.747	3.2000

MAWP: 24.188 kgf/cm², limited by: Sección 7.

Element Type	"To" Elev cm	Elev cm	Length cm	Element Thk mm	R e q d Int.	T h k Ext.	Joint Long	Eff Circ
Skirt	365.8		365.8	25.0	No Calc	No Calc	0.85	0.85
Ellipse	370.9		5.1	29.0	16.5	8.1	1.00	1.00
Cylinder	736.7		365.8	29.0	19.0	20.0	0.85	0.85
Cylinder	1102.5		365.8	29.0	19.0	20.0	0.85	0.85
Cylinder	1468.3		365.8	25.0	19.0	19.9	0.85	0.85
Cylinder	1834.1		365.8	25.0	19.0	19.9	0.85	0.85
Cylinder	2199.9		365.8	25.0	19.0	19.9	0.85	0.85
Cylinder	2565.7		365.8	22.0	19.0	19.8	0.85	0.85
Cylinder	2931.5		365.8	22.0	19.0	19.8	0.85	0.85
Cylinder	3297.3		365.8	22.0	19.0	19.8	0.85	0.85
Cylinder	3663.1		365.8	22.0	19.0	19.8	0.85	0.85
Cylinder	4028.9		365.8	22.0	19.0	19.8	0.85	0.85
Cylinder	4363.8		334.9	22.0	19.0	19.8	0.85	0.85
Ellipse	4368.9		5.1	22.0	16.5	8.0	1.00	1.00

Element thicknesses are shown as Nominal if specified, otherwise are Minimum

Wind/Earthquake Shear, Bending

From	To	Distance to Support cm	Cummulative Wind Shear kgf	Earthquake Shear kgf	Wind Bending kgf-m.	Earthquake Bending kgf-m.
10	20	182.900	6995.85	19565.6	178761.	631530.
20	30	368.340	6453.84	19355.6	154162.	560343.
30	40	553.780	6449.59	19309.5	153834.	559361.
40	50	919.580	6143.94	19021.5	130801.	489253.
50	60	1285.38	5834.38	18613.0	108892.	420419.
60	70	1651.18	5409.17	17904.5	88327.7	353629.
70	80	2016.98	4969.56	17037.1	69345.0	289720.
80	90	2382.78	4403.03	15864.3	52202.5	229544.
90	100	2748.58	3756.55	14477.1	37278.6	174049.
100	110	3114.38	3153.51	12944.5	24640.1	123895.
110	120	3480.18	2500.72	11324.4	14298.5	79507.0
120	130	3845.98	1696.15	8259.46	6622.43	43688.1
130	140	4196.33	949.364	6143.51	1783.79	17345.0
140	150	4366.32	101.205	3284.20	24.6035	1558.29

Basing Data : Continuous Top Ring W/Gussets

Thickness of Basing	35.0000	mm
Inside Diameter of Basing	3280.0002	mm
Outside Diameter of Basing	3600.0000	mm
Nominal Diameter of Bolts	50.8000	mm
Diameter of Bolt Circle	3600.0000	mm
Number of Bolts	36	

Thickness of Gusset Plates	13.0000	mm
Average Width of Gusset Plates	80.0000	mm
Height of Gussets	232.0000	mm
Distance between Gussets	102.0000	mm
Thickness of Top Plate or Ring	35.0000	mm
Circumferential Width of the Top Plate	165.5000	mm
Radial Width of the Top Plate	165.0000	mm

Wind Moment on Support	180590.	kgf-m.
Wind Shear on Support	6996.	kgf
Earthquake Moment on Support	633358.	kgf-m.
Earthquake Shear on Support	19566.	Kgf.

Note: Wind and Earthquake moments include the effects of user defined forces and moments if any exist in the job and were specified to act (compute loads and stresses) during these cases. Also included are moment effects due to eccentric weights if any are present in the input.

Weights:

Fabricated - Bare W/O Removable Internals	57761.2	kgm
Shop Test - Fabricated + Water (Full)	164489.3	kgm
Shipping - Fab. + Rem. Intls.+ Shipping App.	72311.4	kgm
Erected - Fab. + Rem. Intls.+ Insul. (etc)	72311.4	kgm
Empty - Fab. + Intls. + Details + Wghts.	72311.4	kgm
Operating - Empty + Operating Liquid (No CA)	80618.0	kgm
Field Test - Empty Weight + Water (Full)	179039.5	kgm

CONCLUSIONES

1.- El diseño y análisis que se menciona en este estudio es aplicable únicamente a torres de una altura no mayor de 60 m.

2.- En cuanto a los materiales, los más empleados en la fabricación de torres son aceros al carbono, debido a su bajo costo comparado con otros aceros, así como a sus características técnicas; a menos que tengamos un fluido altamente corrosivo estaremos utilizando aceros al carbono con recubrimiento de acero inoxidable. Los materiales de acero al carbono más utilizados en el diseño de torres de acuerdo a sus propiedades de ductilidad y tenacidad son:

Para envolventes:	SA-515 70, SA-516 70 y SA-285 C
Para boquillas y Bridas Forjadas:	SA-105
Para tuberías y Conexiones:	SA-106
Perfiles Estructurales en general:	SA-36 B
Tuercas exteriores:	SA-194 2H
Espárragos exteriores:	SA-193 B7
Faldón:	SA-283 C y SA-285 C

3.- De acuerdo a la nueva revisión del comportamiento estructural debido a los sismos que han acontecido en nuestro país, ha sido necesario ampliar los valores de seguridad de los parámetros, tales como: el tipo de estructura, factor de comportamiento sísmico, periodo de vibración, clasificación de la construcción, factor de ductilidad, coeficiente de aceleración, entre otros.

4.- Es conveniente realizar el análisis ya sean por sismo o viento lo más posibles discretizados, esto para obtener valores más reales, y definir el diseño más adecuado a las características del lugar en donde se localizara el equipo.

5.- Los criterios y recomendaciones especificados, deben estar basados en los resultados sobre los fenómenos físicos involucrados en la respuesta estructural ante sismo y viento principalmente.

6.- Para diseñar y analizar una torre es necesario considerar en primera instancia, que el diseño sea seguro; además de que el diseñador tenga la capacidad suficiente, para poder dar alternativas que se presenten en el diseño, tales como:

- En cálculo por presión interior y exterior obtenemos un espesor de 19mm (3/4"), pero al analizarlo por sismo y viento en el Software (PVElite 2008), este espesor no es el adecuado, por lo tanto se debe modificar ese espesor en tres secciones de diferente espesor (29mm (1-7/8"), 25mm (1") y 22 (7/8")), los cuales son indicados para los análisis correspondientes.
- Es conveniente conocer los factores que intervienen en el análisis ya sean por sismo o viento de acuerdo a la región geográfica, misma que será mandataria para el diseño.

- Obtenidos los pesos y los momentos necesarios, se hace la comparación de los momentos por sismo y viento y depende del momento de mayor magnitud, el cual es el que rige para el análisis (para nuestro caso fue sismo).
- Se analizaron los momentos resultantes (sismo), en la línea de tangencia y cambios de espesor (este último es una alternativa para disminuir costo del equipo), para obtener el esfuerzo tangencial real o (axial neto), y compararlo con el esfuerzo permisible, este es menor al esfuerzo permisible es correcto (es nuestro caso), pero si es mayor no es el adecuado y por lo tanto hay que cambiar espesores.

$$\sigma \text{ PERM.} > \sigma \text{ TANG. REAL (ES EL CORRECTO).}$$
$$\sigma \text{ PERM.} < \sigma \text{ TANG. REAL (NO ES EL CORRECTO).}$$

7.- Es importante señalar, que siempre un diseño óptimo además de disminuir el costo de un equipo, mejora la eficiencia y respalda un grado de seguridad apropiado.

BIBLIOGRAFÍA

1. NRF-028-PEMEX-2004.
2. Código ASME, Sección VIII, División 1.
Edición 2007.
3. Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad e Instituto de investigaciones de Electricidad, Análisis por Sísmico y Viento CFE. Edición 1993.
4. Pressure Vessel Design Manual.
Dennis R. Moss
Edition by golf Publishing Company Edition 1987.
5. Pressure Vessel Handbook.
Eugene F. Meegyesey.
Sixt Edition. New York, 1993.
6. Design. Handbook
Henry H. Bednar.
First Edition. New York Ed Van Nostran Rein Hold Co. 1981.
7. Manual de Construcción en Acero
Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A.C. Limusa. México. 1987
8. Theory and Design Loads For Buildings and Other Structures.
Edite by American National Stander Edition 1974.
9. Structural Analysis and Design of Process Equipment.
Maan H. Jawad
Edite by Wiley-interscience Publication Edition 1989.
10. Design of Process Equipment.
Kanti K. Mahajan
Publishing Inc. Edition 1994.