



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**Escuela Nacional de Estudios Profesionales
" A R A G O N "**

**DISEÑO MECANICO DE TORRES DE PROCESO POR MEDIO
DE COMPUTADORA PARA APLICACION EN EL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE RECIPIENTES
DEL INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

LUIS EDMUNDO ESPINOSA TOVAR

San Juan de Aragón, Méx.

1985



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 está 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.

INDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCION	1
1.1 VENTAJAS DEL USO DE COMPUTADORA	
EN EL DISEÑO	1
1.2 GENERALIDADES	3
CAPITULO 2. DISEÑO POR PRESION INTERIOR	9
2.1 INTRODUCCION	9
2.2 ESFUERZOS PRINCIPALES EN RECIPIENTES	
A PRESION	9
2.3 DISEÑO DE LA ENVOLVENTE Y CABEZAS ...	15
2.4 PROGRAMA FORTRAN PARA EL DISEÑO POR	
PRESION INTERIOR	27
CAPITULO 3. DISEÑO POR PRESION EXTERIOR	30
3.1 INTRODUCCION	30
3.2 DISEÑO POR PRESION EXTERIOR	31
3.3 PROGRAMA PARA EL DISEÑO POR PRESION	
EXTERIOR	40
CAPITULO 4. DISEÑO POR VIENTO	46
4.1 INTRODUCCION	46
4.2 VELOCIDADES DE DISEÑO	48
4.3 DETERMINACION DE LOS EFECTOS DE	
VIENTO	53
4.4 PROGRAMA PARA EL DISEÑO POR VIENTO ..	58

CAPITULO 5. DISEÑO POR SISMO	64
5.1 INTRODUCCION	64
5.2 SOLICITACION SISMICA EN LA BASE	67
5.3 METODO DE ANALISIS ESTATICO	73
5.4 ANALISIS DE ESFUERZOS EN EL CASCARON DEL RECIPIENTE	77
5.5 PROGRAMA PARA EL DISEÑO POR SISMO ...	80
CAPITULO 6. DISEÑO DEL FALDON	85
6.1 INTRODUCCION	85
6.2 DISEÑO DE LA ENVOLVENTE DEL FALDON ..	87
6.3 PROGRAMA PARA EL DISEÑO DEL FALDON ..	97
CAPITULO 7. INTEGRACION DEL PROGRAMA Y ANALISIS DE RESULTADOS	100
7.1 INTRODUCCION	100
7.2 ALCANCES	102
7.3 ANALISIS DE RESULTADOS	103
7.4 ANALISIS ECONOMICO	104
CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFIA	111
APENDICE A.....	112

1. INTRODUCCION

1.1. VENTAJAS DEL USO DE COMPUTADORA EN EL DISEÑO

El diseño de torres de proceso, por medio de una computadora, requiere del conocimiento de un procedimiento de diseño bien definido.

Las principales ventajas de utilizar técnicas computacionales en el diseño de torres de proceso, son las siguientes: rapidez, exactitud, riesgo mínimo de cometer errores, mínima posibilidad de omisiones en los análisis y por último, -- manejo de datos y cálculos con relativa sencillez.

En el diseño de equipos tan costosos y complicados como son las torres de proceso, la optimización y la seguridad deben estar presentes en el mayor grado posible. Es por esta razón, que en esta tesis se pretende hacer uso de las ventajas electrónicas para lograr un diseño más confiable y en menor tiempo.

1.1.1. Enfoque del trabajo

En esta tesis, sólo nos ocuparemos del diseño de torres de proceso con estructura de soporte tipo faldón. Debido a que éstas son, entre los diferentes tipos de recipientes, las que requieren de un procedimiento de diseño más laborioso y complicado, además de ser ampliamente usadas.

El diseño que a continuación se expone contempla los análisis para las siguientes cargas combinadas o individuales:

- a) Presión interna
- b) Presión externa
- c) Presión del viento
- d) Sismo
- e) Análisis por deflexión de la torre, debida a la carga de viento.

El diseño mecánico de una torre consiste en determinar:

1. Los espesores del cuerpo a lo largo de la torre y de las cabezas, bajo las diferentes cargas antes descritas.
2. Determinar el momento flexionante y la fuerza cortante, en la línea de trabajo y en la base de la torre, por la carga de viento o de sismo para la revisión de esfuerzos, en la línea de trabajo, y para el diseño del anclaje del equipo.
3. Determinar la deflexión máxima (flecha) y el ángulo de rotación en la línea de tangencia superior bajo la carga de viento, con el objeto de reducir éstas en caso de que sean excesivas.

1.2. GENERALIDADES

En esta sección haremos una breve clasificación de los recipientes, así como también, se mencionarán los principales Códigos que reglamentan el diseño de los recipientes a presión. Además se mencionará la forma en que está constituida la Sección VIII, División 1 del Código A.S.N.E., ya que es en ésta donde se establecen los lineamientos para el diseño de recipientes a presión.

1.2.1. Clasificación de los Recipientes

De acuerdo a la presión, podemos clasificar a los recipientes en dos grupos: Recipientes a Presión y Recipientes Atmosféricos. Se denominan recipientes a presión, a todos aquellos recipientes que trabajan a presiones arriba o abajo de la atmosférica, dichos recipientes deberán ser siempre cerrados.

Los recipientes atmosféricos, podrán ser abiertos ó cerrados. La razón de usar uno u otro, va a depender del tipo de fluido a almacenar. Así se usarán recipientes atmosféricos cerrados cuando se manejen combustibles tóxicos u ofensivos, ácidos y gases. De otra forma se usarán recipientes atmosféricos abiertos.

En la industria petroquímica se utilizan sustancias derivadas del petróleo, haciendo necesario el uso de recipientes cerrados, los cuales pueden ser atmosféricos o a presión.

Atendiendo a su geometría, los recipientes cerrados pueden ser divididos en:

- a) Recipientes cilíndricos verticales de fondo plano y cubierta cónica, los cuales trabajan a presiones atmosféricas y su función es almacenar productos.
- b) Recipientes cilíndricos con cabezas abombadas en sus extremos, los cuales se utilizan en donde la presión de vapor líquido almacenado impone un diseño riguroso.
- c) Recipientes esféricos, los cuales son usados en donde se requiere el almacenamiento de grandes volúmenes de fluido bajo presiones moderadas.

De acuerdo a lo antes expuesto, podemos decir que las torres de proceso son recipientes a presión cilíndricos y con cabezas abombadas en sus extremos.

1.2.2. Principales Códigos que reglamentan el Diseño de Recipientes a Presión.

Algunos códigos que reglamentan el procedimiento de diseño, fabricación, pruebas y operación de los recipientes a presión han sido desarrollados, principalmente como una medida de seguridad. Mediante estos procedimientos, se pretende tener la garantía de la seguridad de los recipientes instalados en una ciudad, en un estado o en un país.

Entre los códigos más importantes, podemos citar los siguientes:

1. Código A. S. M. E. (American Society of Mechanical Engineer), desarrollado en los Estados Unidos.
2. Código J. I. S. (Japan Industrial Standars), desarrollado en Japón.
3. Código BS-5500 ó BS-1515 (British Standard), desarrollado en Inglaterra.
4. Código DIN, el cual es usado en los Países Bajos, Alemania, Australia e Italia.

El factor de seguridad en cada código es diferente. Así, a manera de ejemplo, podemos citar que el Código A. S. M. E. toma un factor de seguridad de 4, mientras que el Código BS-1515 de 2.35. El factor de seguridad, está especificado sobre la resistencia última a la tensión, especificada a la temperatura ambiente o de diseño.

Así, en nuestro país se ha adoptado el Código A.S.M.E. dado que las técnicas y materiales utilizados en las industrias nacionales son amparados por dicho código.

1.2.3. EL CODIGO ASME

El Código A.S.M.E. para Calderas y Recipientes a Presión es una norma reconocida y aceptada en todo el mundo para el diseño de recipientes a presión. Las reglas formuladas en él, proveen los requerimientos mínimos para la seguridad y servicio de los recipientes a presión, y al mismo tiempo - provee costos reales y razonables.

El Código A.S.M.E. está compuesto de once secciones. La sección del Código, en la cual se establecen los requerimientos para el diseño de recipientes a presión no sujetos a fuego directo, es la Sección VIII. En esta sección, se estipula el diseño de recipientes sujetos tanto a presión interna como a presión externa, sin ningún límite en el rango de presión o temperatura. Los recipientes, podrán estar sujetos también a condiciones cíclicas y sísmicas, o bien pueden estar en un ambiente que requiera consideraciones por erosión y/o corrosión.

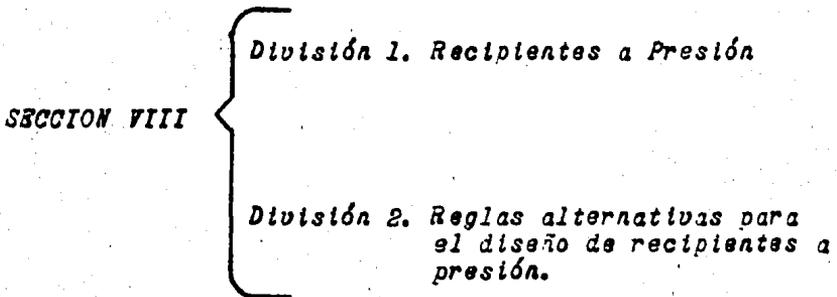
Aunque el código no provee las fórmulas para la evaluación de los esfuerzos desarrollados por cargas externas, sismo y - cargas térmicas, sí estipula que dichos esfuerzos deberán - ser considerados en el diseño.

Con lo que respecta al material, el código no provee reglas para la selección del material para un uso específico, pero - cuenta con tablas, en las cuales, se designan a los materiales-

amparados por dicho código, así como también, nos proporciona - los esfuerzos para cada material específico, a diversas tempe- raturas.

1.2.3.a. Sección VIII. División 1 del Código A.S.M.E.

Como se mencionó anteriormente, la sección del Código - que nos interesa para el desarrollo de esta tesis, es la - Sección VIII. Esta sección está compuesta de dos divisiones:



En esta tesis, se hará uso únicamente de la División 1, la cual está subdividida en tres subsecciones:

- a). Subsección A. La cual consta de las partes UG. En ella se establecen los requerimientos generales y deberá ser - usada en conjunción con los requerimientos específicos de las sub-secciones B y C que se refieren a los métodos de fabricación y material, respectivamente.
- b). Subsección B. Consta de las partes UW, UR, UF y UB relacionadas con los métodos usados en la fabricación de los recipientes, así :
 - UW se refiere a los recipientes a presión fabricados - por soldadura
 - UR a los recipientes fabricados por medio de remaches.

- UF a los materiales fabricados por forja.
- UB recipientes fabricados por brazing¹

c). Sub-sección C. Cubre los requerimientos específicos aplicables a las diferentes clases de materiales usados en la fabricación de recipientes a presión.

1.2.3.b. Jurisdicción de la Sección VIII, del Código A. S. M. E.

El Código A. S. M. E. cubre el diseño y prácticas de construcción para recipientes a presión no sometidos a fuego -- directo operando hasta presiones de hasta 211 Kg/cm^2 (3000 - psi). En general, los recipientes los cuales no excedan de 0.15 m^3 (5 pies³) en volumen y 17.58 Kg/cm^2 (250 psi) ó aquellos que no excedan de 0.0425 m^3 (1.5 pies³) en volumen para cualquier presión de diseño pueden estar exentos de inspección, siempre que estén de acuerdo, completamente, con los otros requerimientos del Código.

La Jurisdicción del Código, con respecto a tuberías exteriores de los recipientes es limitada a: la primera junta circunferencial en conexiones soldadas; la cara de la primera brida, en las conexiones bridas o atornilladas; y la primera junta roscada, en conexiones de este tipo.

Concluyendo, el Código no cubre todos los detalles de diseño y construcción, sino que sólo hace una lista de los requerimientos necesarios y otra de sugerencias necesarias, para la práctica de diseño. Con ésto, se busca que el diseñador y fabricantes usen prácticas de ingeniería aceptables además de su buen juicio, cuando se encuentren con partes no cubiertas por las especificaciones del código.

¹ *Brazing (pegadura o soldadura fuerte) : Unión de dos -
metales, por un proceso en donde la temperatura -----
oscila cerca de los 800 F. (427 C) y el material de --
aportación es no férreo y tiene un punto de fusión --
mas abajo que los metales base a unir.*

2. DISEÑO POR PRESION INTERIOR

2.1. INTRODUCCION

Como se menciona en el capítulo uno, el diseño mecánico de una torre de proceso consiste en determinar los espesores de la envolvente a lo largo de la torre. Los espesores requeridos en la envolvente por presión interna serán obtenidos en base a los esfuerzos principales que se presentan en él.

En un recipiente a presión, el cual generalmente es cilíndrico, los esfuerzos principales que se presentan en él son:

1. Esfuerzo longitudinal, causado por la presión del fluido almacenado.
2. Esfuerzo tangencial, causado por la misma presión.
3. Esfuerzos residuales, causados por el proceso de soldadura.
4. Esfuerzo debidos a viento y sismo.

En esta sección sólo nos ocuparemos de los esfuerzos longitudinales y tangenciales. A continuación se presenta la deducción de las ecuaciones, que nos permitirán, obtener la magnitud de los mismos.

2.2. ESFUERZOS PRINCIPALES EN RECIPIENTES A PRESION

2.2.1. Esfuerzo Longitudinal

Este esfuerzo es causado por la acción de la presión in

terior, ejercida sobre las cabezas del recipiente, o sea, alargándolo. Consideremos el recipiente mostrado en la fig. 2.1, y llamémos F_a a las reacciones debidas a la presión en la tapa, la cual origina esfuerzos longitudinales en la sección anular de contacto del depósito cilíndrico con su tapa. También llamémos F_t a la resultante de las fuerzas debidas a la presión en la tapa.

De las condiciones de equilibrio, fig. 2.1 (b), tenemos que:

$$\sum F_x = F_t - F_a = 0$$

las relaciones de dF sobre los ejes X y Y , se anulan por simetría por lo que, llegamos a

$$F_t = F_a \text{ -----(2.1)}$$

donde $F_a = f_1 A$, siendo A el área de un aro de espesor e , esto es

$$A = \pi (r + e)^2 - \pi r^2 = \pi (2re + e^2)$$

como e^2 es muy pequeña comparada con $2re$, puede despreciarse, de esta manera

$$F_a = f_1 (2\pi re) \text{ -----(2.2)}$$

La fuerza F_t , será

$$F_t = \int dF_x = \int dF \cos \theta = \int P dA \cos \theta$$

como P se considera constante,

$$F_t = P \int dA \cos\theta.$$

La expresión $\int dA \cos\theta$, corresponde a la proyección del área del casquete sobre el plano XO y que equivale a el área de un círculo, es decir

$$\int dA \cos\theta = \pi r^2$$

$$F_t = P(\pi r^2) \text{ ----- (2.3)}$$

Llevando los valores de F_a y F_t a la ec.(2.1), tenemos

$$f_1(2\pi r e) = P(\pi r^2)$$

de donde, el esfuerzo longitudinal estará dado por

$$f_1 = \frac{Pr}{2e} \text{ ----- (2.4)}$$

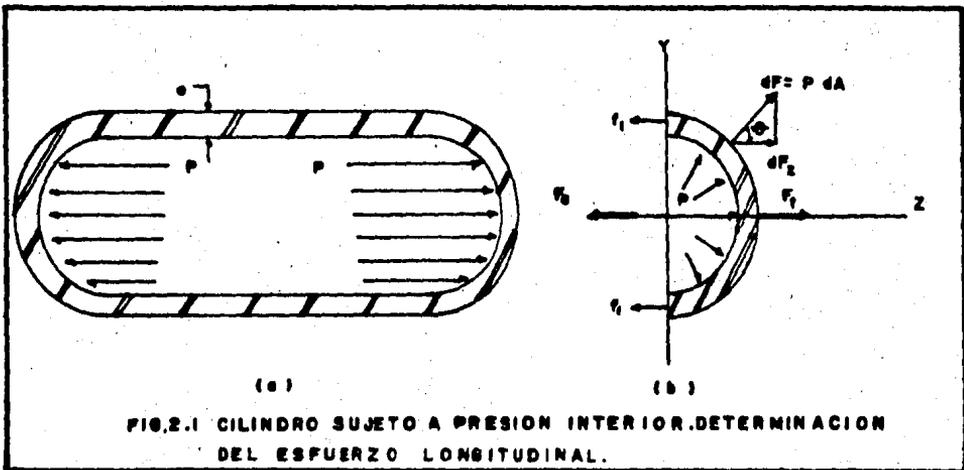


FIG.2.1 CILINDRO SUJETO A PRESION INTERIOR.DETERMINACION DEL ESFUERZO LONGITUDINAL.

2.2.2. Esfuerzo Tangencial

Este esfuerzo es causado por la presión interior, en un plano transversal, tendiendo a aumentar los diámetros del cilindro o a separar al mismo, como se muestra en la fig. 2.2.(a).

Considerando un cilindro, de paredes delgadas, cerrado - con placas en sus extremos y sometido a una presión uniforme P . Siendo e el espesor de la pared y r el radio interior.

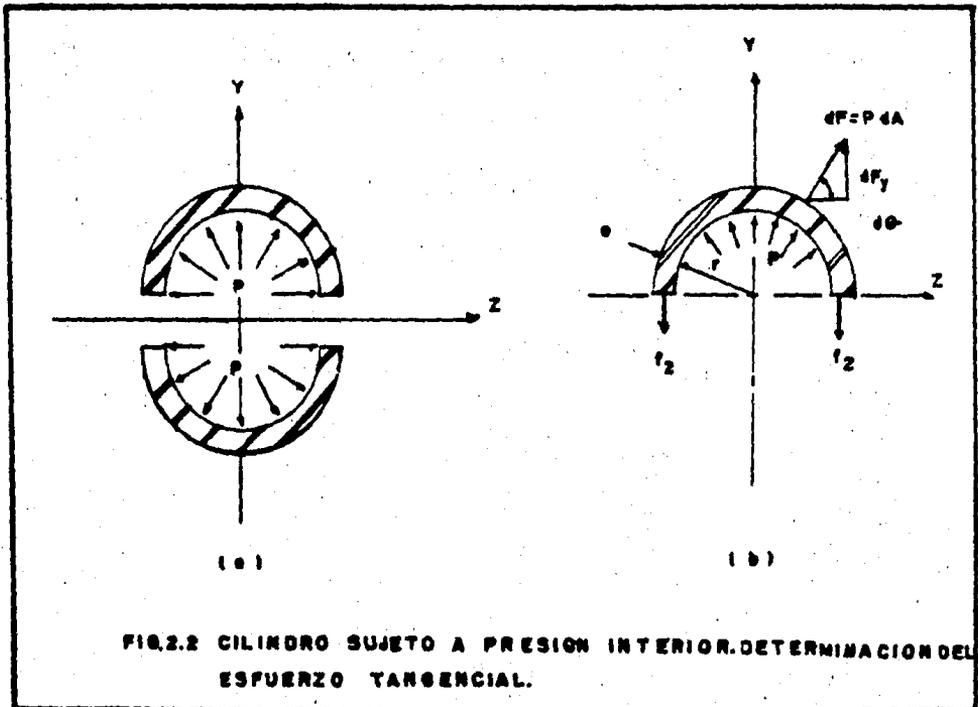


FIG.2.2 CILINDRO SUJETO A PRESION INTERIOR.DETERMINACION DEL ESFUERZO TANGENCIAL.

Las componentes horizontales de las presiones radiales se anulan entre si, en virtud de la simetría que existe con respecto al eje vertical. Por lo que, en la dirección vertical, podemos plantear las siguientes ecuaciones de equilibrio.

$$(+) \uparrow \sum F_y = 0$$
$$-2f_2A + F_y = \text{-----}(2.5)$$

donde; $A = Le$

$$dA = rLd\theta$$

$$dF_y = dF \sin\theta = PdA \sin\theta = PLr \sin\theta d\theta$$

integrando la ecuación anterior, tenemos

$$F_y = PLr \int_0^\pi \sin\theta d\theta = PLr \left[-\cos\theta \right]_0^\pi$$

$$F_y = PLr(-\cos\pi - (-\cos 0)) = PLr(1 + 1) = 2PLr$$

Sustituyendo el valor de F_y en la ec.(2.5), tenemos que:

$$f_2 = \frac{Pr}{\sigma} \text{-----}(2.6)$$

De las ecs.(2.4) y (2.6) deducimos que el esfuerzo crítico, o sea, el que debemos de tomar en consideración, en el diseño, es el esfuerzo tangencial. Debe notarse, que en la deducción de ambas ecuaciones, se asumió una distribución de esfuerzos uniforme, en el espesor de la pared del tanque, lo cual va separándose de la realidad conforme aumenta el espesor y no se aconseja el uso de estas ecuaciones para relacionarse de $e/r > 0$, siendo r el radio interno del recipiente.

Para recipientes de pared gruesa, se utilizan las ecuaciones de Lamé, mediante las cuales pueden determinarse los esfuerzos longitudinales, radial y tangencial a los que está sometida cualquier partícula del cilindro, estando este último sometido tanto a presión interior como exterior.

2.2.3. Ecuación de la Membrana Modificada por la A. S. M. I.

La ecuación (2.6) es conocida como ecuación de la membrana. Ahora, como $e = (r_0 - r_i)$ tenemos que la ecuación de la membrana se puede escribir como:

$$f_i = \frac{P r_i}{(r_0 - r_i)}$$

Siendo r_0 y r_i el radio exterior y el radio interior del recipiente. Si la relación entre r_0/r_i es igual a una constante K , la ecuación de la membrana viene siendo:

$$f = P_i \frac{1}{(K - 1)} \text{ ----- (2.7)}$$

Como ya se mencionó, la aplicación de esta ecuación está limitada a relaciones de $e/r < 10$, para relaciones de $e/r > 0.10$ se hace uso de las ecuaciones de Lamé. La ecuación de Lamé para la determinación del esfuerzo tangencial es:

$$f = P_i \frac{(K^2 + 1)}{(K^2 - 1)} \text{ ----- (2.8)}$$

La ecuación de dicha ecuación, puede verse en el Brownell and Loyd, "Design Equipment".

El inconveniente que presenta la ecuación de Lamé, para el cálculo del espesor, es que éste debe calcularse por medio de aproximaciones sucesivas. Mientras que mediante la ecuación de la membrana, el cálculo del espesor es directo.

El rango de aplicación, de la ecuación membrana, ha sido extendido mediante la adición de una constante, empíricamente, cuyo valor es de 0.6. Esta nueva ecuación, es conocida como la ecuación de la membrana modificada por la A. S. M. E. y en muchos casos concuerda con la ecuación de Lamé. Hasta valores de t/d de 0.25 la ecuación de la membrana modificada por la A. S. M. E. concuerda con la ecuación de Lamé, con diferencias de 1%. Esta ecuación, es:

$$\frac{f_t}{P} = \frac{1}{k-1} + 0.6 \text{ ----- (2.9)}$$

o si la eficiencia de la junta soldada y la corrosión permisible son incluidas, la ec. (2.9) puede escribirse como:

$$t = \frac{Pr}{f_t R - 0.6P} + C \text{ ----- (2.10)}$$

Esta ecuación, es la que se estipula con el Código A. S. M. E. para la determinación del espesor del cuerpo de un recipiente a presión

2.3. DISEÑO DE LA ENVOLVENTE Y CABEZAS

En el Código A. S. M. E. se estipulan las fórmulas para la determinación del espesor de la envoltente, de las cabezas y reducciones cónicas para recipientes a presión.

La ec. (2.10) se utiliza para la determinación del espesor de la envolvente, cabe aclarar, que esta ecuación es referida a dimensiones interiores, y es usada cuando se utilizan cabezas elípticas 2:1, ya que la fabricación de dichas cabezas se hace en función de las dimensiones interiores. En los casos en los que se usen cabezas torisféricas es conveniente determinar el espesor en función de las dimensiones exteriores, así la ec. (2.10) puede ser escrita en función de dimensiones exteriores como:

$$t = \frac{P r_o}{f_t S + 0.4 P} + c \text{ ----- (2.11)}$$

Así el espesor de la envolvente será determinado por medio de la ec. (2.10), o bien por medio de la ec. (2.11).

2.3.1. Diseño de las Cabezas.

En las torres de proceso, se usan dos tipos de cabezas fundamentalmente, cabezas elípticas 2:1 y cabezas torisféricas. En la fig. 2.3 se muestran en forma esquemática ambos tipos de cabezas, así como también se muestran algunas restricciones que impone el Código A.S.M.E., también se muestra una cabeza hemisférica.

De los tres tipos de cabezas antes mencionados, la cabeza que tiene mayor capacidad para resistir la presión es la hemisférica, la que le sigue es la elíptica y por último la torisférica. En la Tabla 2.1, se muestra la presión que es capaz de resistir cada tipo de cabeza. En este ejemplo se considerará que las tres cabezas son del mismo material, SA-515-70, y un espesor de 25.4 mm.

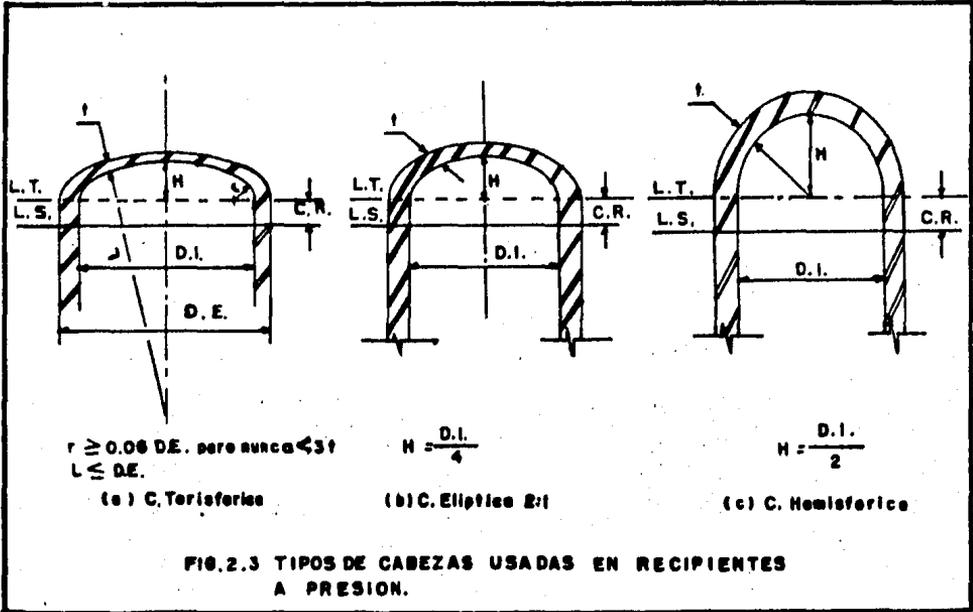


TABLA 2.1 PRESIONES QUE SOPORTAN LOS 3 TIPOS DE CABEZAS.

TIPO DE CABEZA	PRESION QUE SOPORTA (Kg/cm ²)	% DE LA PRESION DE UNA C. HEMISF.	% DE LA PRESION DE UNA C. ELIPTICA	% DE LA PRESION DE UNA C. TORISF.
HEMISFERICA	40.88	100.00	199.70	305.78
ELIPTICA 2:1	20.49	50.07	100.00	153.10
TORISFERICA 90°	13.37	32.70	66.31	100.00

DIAMETRO INTERIOR: D.I. = 304.8 cm.

DIAMETRO EXTERIOR: D.E. = 308.8 cm.

ESPESOR: t = 2.54 cm.

ESFUERZO A TENSION PERMISIBLE DEL MATERIAL: S = 1230.00 Kg/cm²

EFICIENCIA DE LA SOLDADURA EN LA JUNTA: E = 100%.

2.3.1.a. Cabezas Elípticas 2:1

Las cabezas elípticas son recomendadas a usarse cuando los espesores se encuentran entre 25.4 mm (1") y 50.8 mm (2"). Normalmente los espesores de la envolvente y el de este tipo de cabezas coinciden, de no ser así, el criterio general es el de igualar ambos espesores. El espesor, de una cabeza elíptica, puede determinarse por medio de la fórmula siguiente:

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P} + C \text{ ----- (2.12)}$$

Siendo : P = La presión del fluido almacenado, Kg/mm² ó en Lb/pulg².

D = Diámetro interior del recipiente, mm ó pulg.

E = Eficiencia de la junta, generalmente es igual al 100 % (radiografiado total).

t = Espesor de la cabeza, mm ó pulg.

C = Corrosión permisible, mm ó pulg.

S = Esfuerzo permisible del material, Kg/mm² ó en Lb/pulg².

2.3.1.b. Cabeza Torisféricas

Este tipo de cabezas, se recomienda, que se diseñen hasta espesores de 25.4 mm (1"). Comercialmente, este tipo de cabezas, se fabrican con diámetros exteriores, por lo que en el cálculo deberán usarse fórmulas referidas a dimensiones exteriores.

El espesor para cabeza torisférica en donde el radio de transición r es el 6% del diámetro exterior, D_o , y L es el radio de la corona y según el Código es igual a $0.9 D_o$, será determinado por:

$$t = \frac{PLM}{2SE + P(M - 0.2)} + c \text{ ----- (2.13)}$$

En donde: M es un coeficiente de intensificación de esfuerzos,

$$M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right)$$

2.3.1.c. Cabezas Hemisféricas

Normalmente este tipo de cabezas es usada para presiones altas y espesores arriba de 50.8 mm ($2''$). En general el espesor de estas cabezas es la mitad del espesor del cascarón.

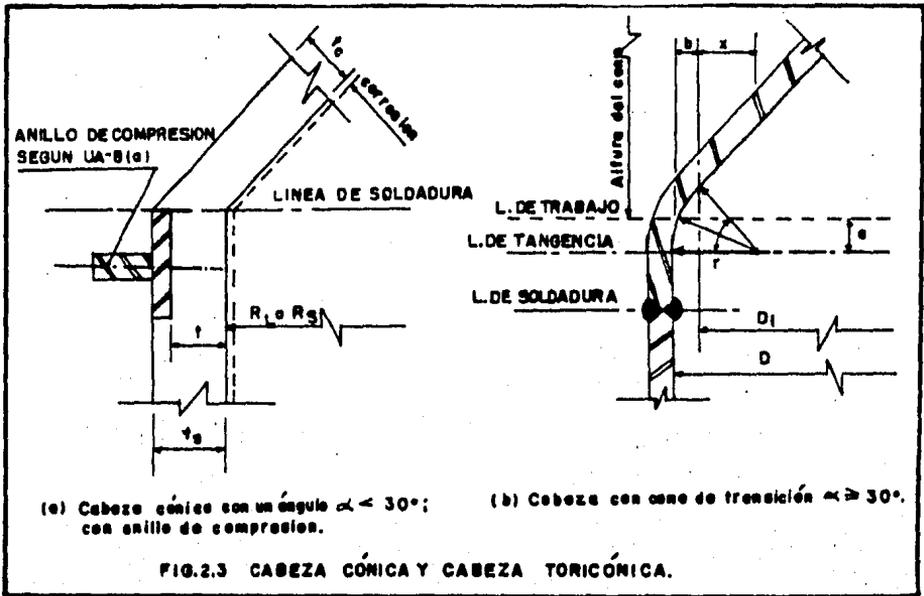
Cuando, $t < 0.356 L$ ó $P < 0.665SE$, las fórmulas siguientes se aplican:

$$t = \frac{PL}{2SE - 0.2P} \text{ ----- (2.15)}$$

$$t = \frac{PR}{SE + 0.8P} \text{ ----- (2.16)}$$

donde: L es el radio del recipiente, en mm

La ec. (2.15) se refiere a dimensiones interiores y la ec. (2.16) a dimensiones exteriores.



2.3.1.d. Cabezas Cónicas.

Este tipo de cabezas se usan con frecuencia en la unión de dos diámetros diferentes, especialmente en las torres, ya que es un elemento cuya forma tiene la propiedad de proporcionar un cambio moderado de esfuerzos debidos principalmente al peso propio y a la presión.

También son usuales como cabezas de equipos que trabajan a baja presión. El espesor requerido de una cabeza o sección cónica que tengan un ángulo menor de 30° se determina por la siguiente fórmula :

$$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (SS - 0.6P)} \text{ ----- (2.17)}$$

Para cabezas cónicas en donde el ángulo es mayor de 30° lo más común es usar cono con transición (toricóno), ver fig. 2.3.b, en donde el radio de transición r deberá ser, cuando menos, el 6% del diámetro exterior pero no menor de 3 veces el espesor de la transición.

En el caso de que se requiera toricóno, las siguientes fórmulas serán aplicadas:

a) Espesor del núcleo

$$t = \frac{PLN}{2SS - 0.2P} \text{ ----- (2.18)}$$

en donde :

$$L = \frac{D_i}{2 \cos \alpha} \text{ ----- (2.18.1)}$$

Y N tiene el mismo significado que para la ec. (2.13) y se determinará en base a la ec. (2.14), de la Fig. 2.3 (b) se deduce que D_i será :

$$D_i = D - 2b \text{ ----- (2.18.2)}$$

y

$$b = r - x \text{ ----- (2.18.3)}$$

donde :

$$x = r \cos \alpha \text{ ----- (2.18.4)}$$

Sustituyendo las ecs. (2.18.3) y (2.18.1), tenemos finalmente que:

$$D_i = D - 2r (1 - \cos \alpha) \text{ ----- (2.19)}$$

b) Espesor de la parte cónica

$$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (33 - 0.6P)} \text{ ----- (2.20)}$$

La distancia de la línea de tangencia a la línea de trabajo, denotado por "a" en la fig. 2.3.(b), será :

$$a = r \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \text{ ----- (2.21)}$$

2.3.1.d.1. Diseño de refuerzos en la unión cono-cilindro

En la práctica, dada la dificultad que presenta para su fabricación los toriconos, se utilizan cabezas o secciones reductoras cónicas donde todos los elementos tienen un eje común y el ángulo del cono menor de 30 ; por tal razón en esta tesis solo se tratará el diseño de estos últimos.

Las fórmulas que a continuación se presentan corresponden al diseño de refuerzos si son necesarios en la unión cono-cilindro. La nomenclatura usada en el cálculo de refuerzos en la unión cono-cilindro, referida a la fig. 2.4, se muestra a continuación.

t = Espesor mínimo requerido del cilindro en la unión cono-cilindro, sin corrosión.

t_s = Espesor nominal del cilindro en la unión cono-cilindro, sin corrosión.

t_c = Espesor nominal del cono en la unión cono-cilindro, sin corrosión.

C = Corrosión permisible.

R_I = Radio del cilindro mayor

R_s = Radio del cilindro menor

A_c = Área efectiva, del sobreespesor del cono ó cilindro, que contribuye como refuerzo.

t_e = Espesor efectivo, del área que contribuye como refuerzo, en la unión cono-cilindro mayor, y será el menor de los siguientes:

$$t_e = (t_s - t)$$

$$t_e = t_c - \left(\frac{t}{\cos \alpha} \right)$$

m = Espesor efectivo, del área que contribuye como refuerzo, en la unión cono-cilindro menor, y será el menor de:

$$m = \frac{ts}{t} \cos (\alpha - \Delta)$$

$$m = \frac{tc (\cos \alpha \cos (\alpha - \Delta))}{t}$$

Δ = Será obtenida de la Tabla UA-5.1 del Código A.S.M.E., la cual será determinada en función del valor de P/SE .

2.3.1.d.1.a Unión cono con cilindro mayor

Para conos sin transición, la unión cono con cilindro mayor requiere refuerzo cuando $\Delta < \alpha$; obteniendo Δ de la Tabla 5.1. del Código A.S.M.E.

En el caso de requerir refuerzos, el área transversal de éste, será cuando menos la que arroje la siguiente fórmula:

$$A = \frac{PRL^2}{2S^3} \left(1 - \frac{\Delta}{\alpha} \right) \tan \alpha \quad (2.22)$$

Cuando el espesor, sin la corrosión, del cilindro se pase del calculado por la fórmula, ese exceso puede considerarse - que contribuye como área de refuerzo de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$A = 4te \sqrt{RLts}$$

El refuerzo que se requiera deberá estar dentro de una distancia de \sqrt{RLts} , medida desde la unión (Ver fig. 2.4). El centroide del área de refuerzo estará dentro de una distancia de $0.5 \sqrt{RLts}$.

2.3.1.d.1.b. Unión Cono Cilindro Menor

Para conos sin transición, la unión cono cilindro mayor requiere refuerzo cuando $\Delta < \alpha$; obteniéndose de la Tabla UA-5.2 del Código A.S.N.E.

Para el caso de que se requiera refuerzo, el área transversal de éste, será cuando menos la que arroje la fórmula siguiente:

$$A = \frac{PRs^2}{\cos \alpha} \left(1 - \frac{\Delta}{\alpha} \right) \tan \alpha \quad (2.23)$$

De igual manera que son en el caso anterior, el exceso de espesor del cono ó del cascarón, en la unión cono-cilindro, contribuye como refuerzo y el área que contribuye como refuerzo podrá ser determinada por la expresión siguiente:

$$A_e = (\pi \sqrt{Rst} \left(t_c - \frac{t}{\cos \alpha} \right) (t_s - t)) \quad (2.24)$$

El refuerzo que requiere deberá colocarse dentro de \sqrt{Rst} , medida desde la unión cono cilindro y el centroide del refuerzo estará dentro de una distancia de $0.5\sqrt{Rst}$.

2.4. PROGRAMA FORTRAN PARA EL DISEÑO POR PRESIÓN INTERIOR

Dado lo engorroso que resultaría, en esta tesis, exponer detalladamente los diagramas de flujo y el listado del programa, aquí sólo haremos un diagrama de flujo, muy general, de la forma en que está constituido el programa. Los diagramas de flujo se muestran en las figs. (2.5) y (2.6).

El programa para presión interior, está constituido de un programa principal y tres subrutinas, las cuales son:

- a) Subrutina APROX. Esta subrutina apróxima, el espesor, calculado, a un espesor más comercial, en este caso, el espesor calculado se apróxima al octavo de pulgada más próximo.
- b) Subrutina CONOS. Esta subrutina es llamada por el programa principal, cuando se trate de una torre con varias secciones, de diámetro distinto, se requerirá de reducciones cónicas. Así, en esta subrutina se determina el espesor de la sección cónica, además, determina si hay necesidad de reforzar la unión cono-cilindro, lo cual de ser necesario, se determina la dimensión del anillo de refuerzo y la distancia a la cual deberá ser colocado.
- c) Subrutina REFUERZO. Es llamada por la subrutina CONOS cuando es necesario el uso del anillo de compresión. En esta subrutina se determina el factor de las 5 Tablas UA-5.1 y UA-5.2 del Código A. S. M. E.

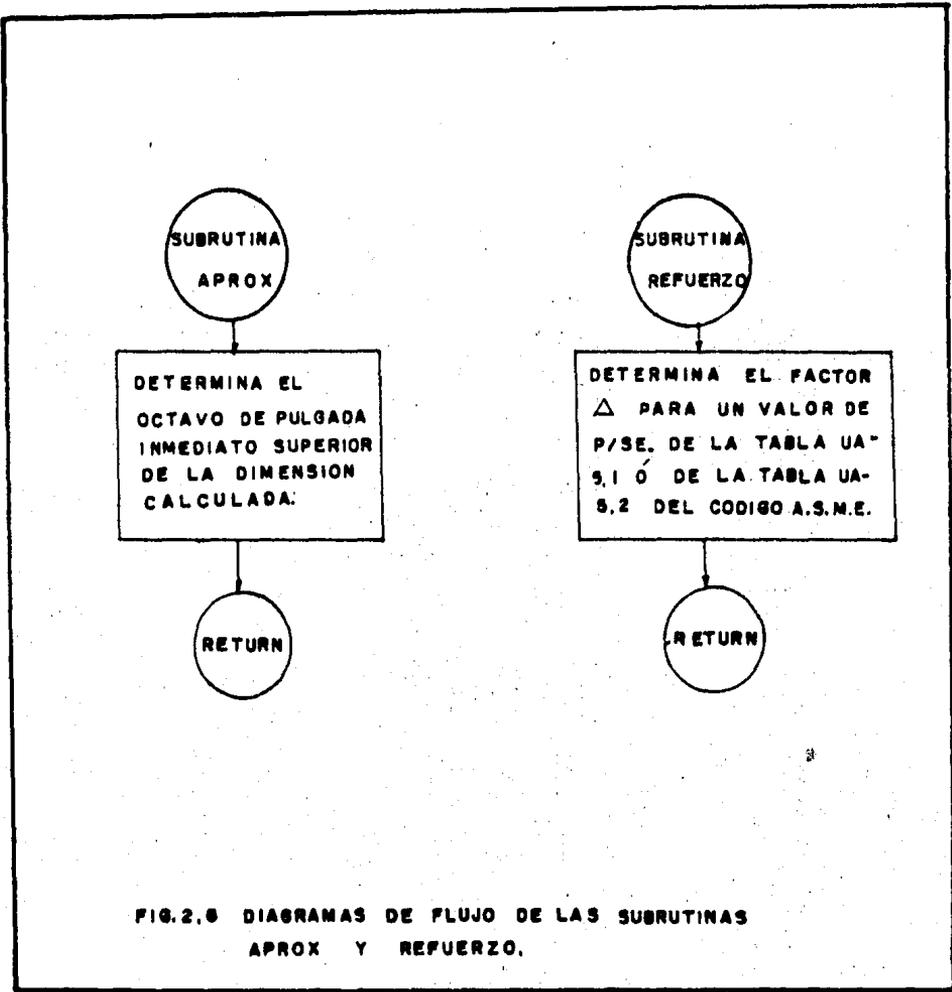


FIG.2.6 DIAGRAMAS DE FLUJO DE LAS SUBRUTINAS APROX Y REFUERZO.

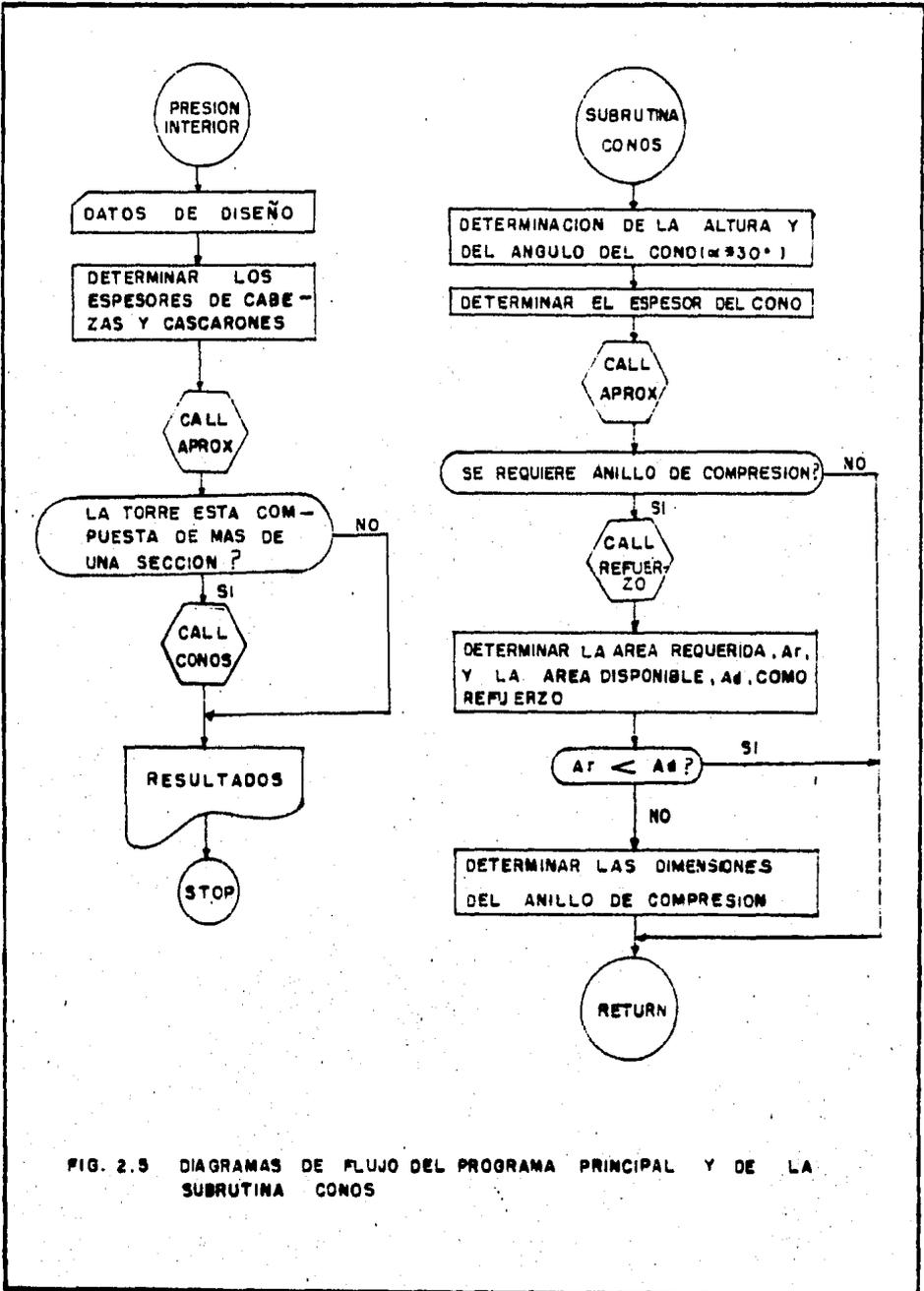


FIG. 2.5 DIAGRAMAS DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL Y DE LA SUBROUTINA CONOS

3. DISEÑO POR PRESIÓN EXTERIOR

3.1. INTRODUCCION

Una gran variedad de procesos químicos y petroquímicos requieren de equipos que operen a vacío parcial. Tal es el caso de un condensador de vacío para torres evaporadoras y destiladoras. Estos equipos están sujetos a la presión exterior de la atmósfera, y por lo tanto, los esfuerzos generados en éstos serán de compresión.

En un recipiente cilíndrico, sujeto a presión exterior, se induce un esfuerzo de compresión circunferencial el cual es igual a dos veces el esfuerzo de compresión longitudinal. Bajo tal condición, el recipiente puede llegar a fallar debido a la inestabilidad elástica causada por dicho esfuerzo. El uso de aros atiesadores, internos o externos, espaciados uniformemente pueden incrementar la resistencia del equipo. Ya que el uso de tales atiesadores, tiene la función de dividir la longitud total del recipiente hasta divisiones iguales, en longitud, que la distancia centro a centro entre aros atiesadores.

Los cilindros de pared delgada sin aros atiesadores, o con aros atiesadores espaciados más allá de una longitud crítica, se pandearán a esfuerzos menores que el esfuerzo de cedencia del material. La presión crítica a la cual el pandeo ocurre es función únicamente de la relación del espesor y el diámetro, t/d , y el módulo de elasticidad, E , del material. En los casos, en donde la longitud del cascarón, incluyendo las cabezas, L , o la distancia entre aros atiesadores, también designada como L , es menor que la longitud crítica, lo cual sucede en la mayoría de los casos, la presión crítica a la cual la falla ocurre, es una función de las relaciones L/d , d/t y el módulo de elasticidad, E .

Así, el procedimiento de diseño por presión exterior descrito en el Código A. S. M. E. se basa en el uso de gráficas y de las relaciones antes descritas para la determinación de la presión exterior que es capaz de resistir el equipo, la cual deberá ser mayor que la presión exterior de diseño.

Cabe aclarar, que el diseño por presión exterior no sólo se lleva a cabo en equipos que de antemano se sabe trabajarán a vacío, sino que todos los equipos deberán diseñarse para soportar una presión exterior de seguridad mínima de 0.176 - - Kg/cm² (2.5 psi). Debe notarse, que la máxima presión exterior será cuando el recipiente esté sujeto a vacío total y, por lo tanto, la presión exterior de diseño será de 1.05 Kg/cm² (15 - psi).

3.2. DISEÑO POR PRESION EXTERIOR

El procedimiento de diseño por presión exterior que se usará en esta tesis será obtenido del Código A. S. M. E., en su sección correspondiente, para entender el porqué del mismo, se explicará brevemente cuales son los fundamentos teóricos de dicho procedimiento.

3.2.1. Cascarones Cilindricos Sujetos a Presión Exterior

La presión exterior teórica a la cual un cascarón cilíndrico fallará se determina en base a consideraciones de estabilidad elástica. Así, la presión exterior crítica a la cual éste fallará, esta dada por :

$$P \text{ teórica} = 2.2E \left(\frac{t}{d} \right) \text{ ----- (3.1.)}$$

Siendo t el espesor del cascarón y d el diámetro del mismo. Así, para fines de diseño, un factor de seguridad de 4, recomendado en el Código A. S. M. S., puede ser aplicado en la ec. (3.1) quedando :

$$P_a = 0.55E \left(\frac{t}{d} \right)^3 \text{ -----(3.2)}$$

Las ecs. (3.1) y (3.2) aplican para cascarones cilindricos sujetos a presión exterior sin aros atesadores, o con éstos espaciados más allá de la longitud crítica, L_c . Esta longitud, puede ser determinada por:

$$L_c = 1.11d \sqrt{d/t} \text{ -----(3.3)}$$

Así para cascarones cilindricos en donde la longitud del cascarón ó la distancia entre aros atesadores es menor a la longitud crítica, el coeficiente de la ec. (3.2) deberá ser modificado de acuerdo a las características geométricas del recipiente, esto es:

$$P_a = \frac{K}{4} E \left(\frac{t}{d} \right)^3 \text{ -----(3.4)}$$

donde K es coeficiente el cual es función de las relaciones L/d y d/t .

Ahora como se vió en el capítulo 2, el esfuerzo circunferencial, que en este caso es de compresión, puede ser evaluado por :

$$f = \frac{Pd}{2t} \text{ -----(3.5)}$$

Si P_a es la presión admisible, la ec. (3.5) puede ser escrita como:

$$P_a E \left(\frac{d}{t} \right) = \frac{f}{2}$$

denotando a la relación $\frac{f}{2}$ como B , tenemos

$$P_a = B \left(\frac{t}{d} \right) \text{ ----- (3.8)}$$

La ec. (3.8) fué modificada por el Código A. S. M. E., y para relaciones de $d/t \geq 10$, quedó como sigue:

$$P_a = \frac{4B}{3(d/t)} \text{ ----- (3.9)}$$

Y para relaciones $d/t < 10$, se usará la expresión siguiente:

$$P_a = \frac{2AE}{3(d/t)} \text{ ----- (3.10)}$$

Siendo A , la deformación unitaria y E el módulo de elasticidad a la temperatura de diseño.

De esta manera, los factores A y B serán obtenidos de las Figuras. UGO-28.0 y UCS - 28.2, Apéndice V del Código A. S. M. E. En la fig. UGO-28.0 se muestran las deformaciones máximas permisibles, A , del equipo en función de las relaciones d/t y L/d . Mientras que en la Fig. UCS-28.2, se obtiene el factor B en función del factor A y la temperatura de diseño.

Para nuestro caso se hará uso de los valores tabulares de estas gráficas, que se presentan en el mismo Código.

Concluyendo, el diseño por presión exterior consiste en suponer un espesor, por lo general se toma el calculado por - por presión interior, y determinar la presión exterior admisible para dicho espesor. De tal manera que pueda ser comparada con la presión exterior de diseño. Así, la presión admisible deberá ser mayor a la de diseño; en caso contrario se incrementará el espesor, o bien se colocarán aros atesadores. El criterio que se seguirá en esta tesis, será aumentar el espesor, ya que como se verá en los dos capítulos posteriores, con este espesor, generalmente, el equipo no es capaz de resistir los esfuerzos - producidos por el viento o por sismo. En los casos en donde, - aún incrementando el espesor, la presión admisible siga siendo menor a la presión de diseño, se colocará un aro atesador. De - manera general, se hará una combinación de ambas opciones.

3.2.2. Diseño de Atesadores Circunferenciales

En el diseño de aros atesadores circunferenciales en - recipientes sujetos a presión exterior, el atesador se considera para resistir una carga externa sobre una distancia $L/2$ en cada del anillo (L es el espaciamento entre atesadores). Así, la carga por unidad de longitud a la cual el anillo fallará es igual a $(L)P_{teórica}$. Donde la carga teórica o crítica por uni-dad de longitud, puede ser determinada por:

$$P = L(P_{teórica}) = \frac{3EI}{r_o^3} = \frac{24EI}{d^3} \text{ ----- (3.11)}$$

De esta manera la ec. (3.11) puede ser escrita como:

$$I = \frac{P_{teórica} d^3 L}{24EI} = \left(\frac{d^2 L t}{12E} \right) \left(\frac{P_{teórica} d}{2t} \right)$$

Sustituyendo $f = pd/2t$, y $\epsilon = f/E$, tenemos:

$$I = \left(\frac{d^2Lt}{12} \right) (f) = \frac{d^2Lt}{12} \text{ ----- (3.12)}$$

El momento de inercia del aro atesador y el cascarón - actuando juntos, puede ser considerado equivalente al de un - cascarón de espesor,

$$t_y = t + \frac{A_s}{L} \text{ ----- (3.13)}$$

donde: t_y = espesor equivalente del cascarón

A_s = área de la sección transversal de un aro atesador

L = distancia entre atesadores circunferenciales

Sustituyendo la ec.(3.13) en (3.12), tenemos:

$$I = \frac{d^2L}{12} \left(t + \frac{A_s}{L} \right) \epsilon \text{ ----- (3.14)}$$

donde I es el momento de inercia requerida de un aro atesador.

La ec.(3.14), es la misma que la especificada en el Código A. S. M. E. para aros atesadores para recipiente bajo presión - externa, excepto que el denominador es 14 en la ecuación del - Código. Así, la ecuación que utilizaremos será:

$$I = \frac{d^2L}{14} \left(t + \frac{A_s}{L} \right) A \text{ ----- (3.15)}$$

siendo A la deformación unitaria (ϵ en la ec. 3.14)

El procedimiento, sugerido por el Código, consiste en deter^uminar el factor B y en base a este determinar el valor de A . El factor B puede ser determinado por la ec.(3.9), esto es:

$$B = \frac{3}{4} \frac{Pd}{t}$$

Utilizando el espesor equivalente del cascarón, ec.(3.13), la ecuación puede ser escrita como:

$$B = \frac{3}{4} \left[\frac{Pd}{t + \frac{As}{L}} \right] \text{-----} (3.16)$$

siendo P la presión exterior de diseño.

Después de haber determinado, el factor A , se sustituye en la ec.(3.15) para calcular el momento de inercia requerido - del aro atesador. El cual deberá ser menor que el momento de inercia proporcionado por el aro. De no ser así, se buscará una sección transversal de mayor momento de inercia.

3.2.3. Diseño de Cabezas por Presión Exterior

Las cabezas sujetas a presión exterior pueden fallar por inestabilidad elástica como sucede en los cascarones. El procedimiento de diseño usado es similar al diseño de cascarones, sólo que en este caso la deformación unitaria se determina en función de un radio de curvatura, el cual va a depender de la geometría de la cabeza (ó bien, del tipo de cabeza). Esto es,

$$A = \frac{0.125}{(R/t)} \text{-----} (3.17)$$

con este valor de A determinamos el factor B , así la presión admisible será dada por:

$$Pa = \frac{B}{(R/t)}$$

donde: R = Radio esférico equivalente, depende de la relación de eje, así

= 0.5 d , para cabezas Hemisféricas.

= 0.9 d, para cabezas elípticas

De manera similar al diseño de cascarones, la presión deberá ser mayor a la presión exterior de seguridad, en caso contrario se deberá aumentar el espesor.

En el caso de cabezas cónicas, en donde el ángulo del cono es menor que 60°, éstas se comportan de manera similar a un cascarón cilíndrico. Y por lo tanto el procedimiento de diseño será el mismo que el seguido para el diseño del cascarón, a - excepción que los parámetros t y L serán para este caso, como se definen a continuación :

$$L = \frac{H}{2} (1 + D_s/D_L) \text{ -----(3.19)}$$

y

$$t = (t \text{ cono}) \cos \alpha \text{ -----(3.20)}$$

donde: H = la altura del cono

D_s = diámetro exterior del extremo menor del cono

D_L = diámetro exterior del extremo mayor del cono

3.2.4. NOMENCLATURA

La nomenclatura seguida en este capítulo, se muestra a continuación y es referida a la fig. 3.1.

A = Factor determinado de la Fig. 5. UGO-28.0, Apéndice V del Código A. S. N. E.

B = Factor determinado de la Fig. UCS-28.2, Apéndice V del Código A. S. N. E.

D_o = Diámetro exterior del recipiente

E= Módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño. Su valor puede obtenerse de la Fig.- UCS-28.2, Apéndice V del Código A. S. M. E.

L= Longitud total o longitud de diseño de una sección del recipiente. Se tomará el mayor de los siguientes:

- (1) La distancia entre líneas de tangencia más dos tercios de la profundidad de la cabeza, cuando no haya aros atesadores.
- (2) La mayor distancia de centro a centro entre dos aros atesadores.
- (3) La distancia del centro del primer aro atesador a la línea de tangencia más un tercio de la profundidad de la cabeza.

P= Presión exterior permisible para el valor del espesor asumido.

P_a= Presión exterior permisible para el valor del espesor asumido.

D_o= Diámetro exterior del recipiente, en las condiciones corroidas

h= Profundidad de la cabeza

L_T-T= Longitud entre línea de tangencia.

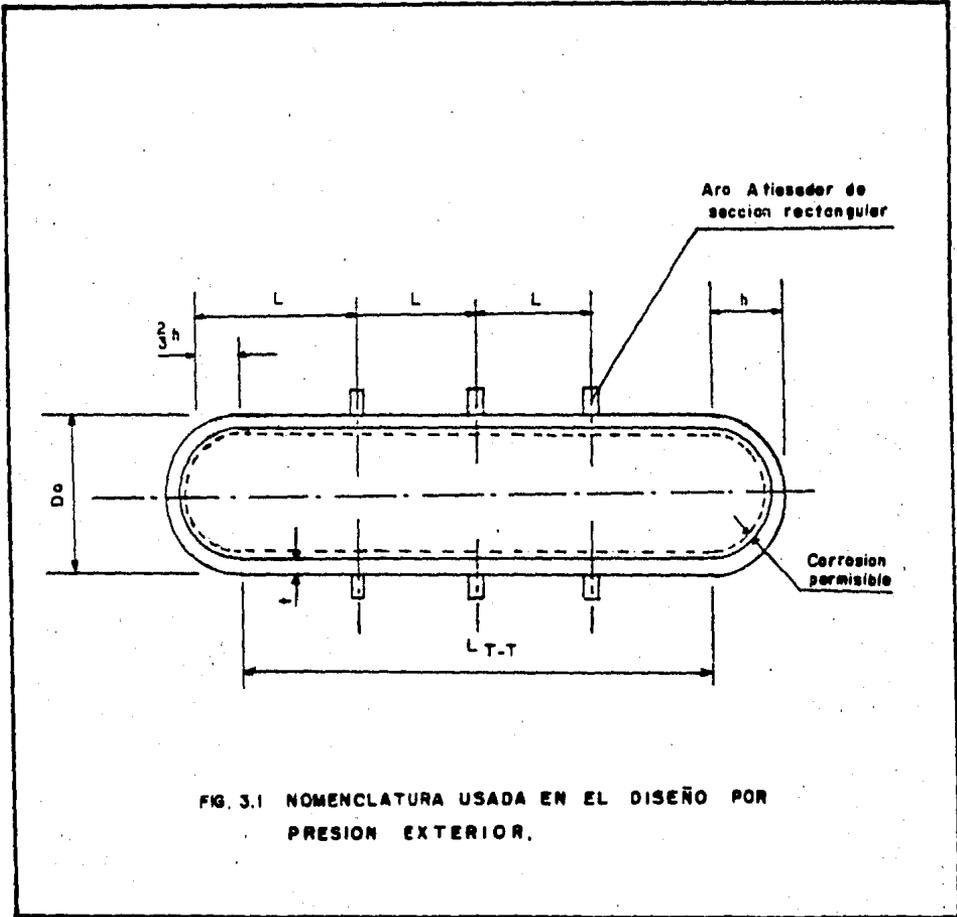


FIG. 3.1 NOMENCLATURA USADA EN EL DISEÑO POR PRESION EXTERIOR.

3.3. PROGRAMA PARA EL DISEÑO POR PRESION EXTERIOR

Para la realización del diseño por presión exterior, se hace necesaria la siguiente información: la gráfica mostrada en la Fig. UGO-28.0 y la mostrada en la Fig. UCS-28.2 del Apéndice V, del Código A. S. M. E.

La información obtenida de estas gráficas, será distribuida en la forma siguiente :

- a) En la matriz A, se agruparán los factores "A", obtenidos de la Fig. UGO-28.0, para diferentes relaciones de L/Do y Do/t .
- b) En la matriz B, se agruparán los factores "B" obtenidos de la Fig. UCS-28.2, para diferentes valores de "A" y diferentes temperaturas.
- c) En el vector DOT, se agruparán las relaciones Do/t , para los cuales fueron determinados los factores "A".
- d) En el vector LDO, se agruparán las relaciones L/Do , para los cuales fueron determinados los factores "A".
- e) En el vector FA, se agruparán los factores "A" para los cuales se determinarán los valores de "B", en la Fig. UCS-28.2.
- f) Finalmente en el vector TD, se agruparán las temperaturas de las curvas mostradas en la Fig. UCS-28.2.

Además de la información antes mencionada, proporcionaremos a la máquina los datos de diseño siguiente: Presión Exterior de Seguridad, P. E. S., el diámetro del recipiente, la longitud del recipiente y un espesor supuesto, para el cual queremos conocer la presión admisible del recipiente.

El programa para el diseño por presión exterior, estará constituido por un programa principal, PEX y cuatro subrutina, las cuales son:

- 1.- SUBRUTINA PEXA. Esta subrutina determina el factor B y en los casos de que el factor A caiga en la izquierda de la línea material-temperatura (Fig. UCS-28.2), se indicará a la máquina, por medio del factor $FPA = 1.0$, que la presión exterior admisible deberá colocarse en función del módulo de elasticidad, E, el factor A y la relación Do/t , esto es:

$$P_o = \frac{2AE}{3(Do/t)}$$

donde: A = factor obtenido de la fig. UGO-28.0

E = Módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño.

Do = diámetro exterior del recipiente

t = espesor del recipiente, excluyendo la corrosión

El diagrama de flujo correspondiente se muestra en la Fig. 3.3

- 2.- SUBRUTINA PEXB. Esta subrutina determina el factor A, usado en determinación del momento de inercia requerida. Es llamada por PEX cuando son requeridas aros atesadores. Ver fig. 3.4.

- 3.- SUBRUTINA ARO. Esta subrutina determina las dimensiones - del aro atesador, en primera instancia calcula una sección rectangular, en el caso de que el momento de inercia - proporcionado por ésta no sea adecuado, se calcula una - sección "T", con mayor momento de inercia, y si aun ésta - no es adecuada se elige una sección "I", si esta sección tampoco es adecuada se incrementará el espesor del casco rón y volverá a iniciarse el cálculo. Ver fig. 3.5.

4.- *SUBROUTINA MODÉ.* Esta subrutina determina el módulo de elasticidad a la temperatura de diseño. Ver fig.3.6.

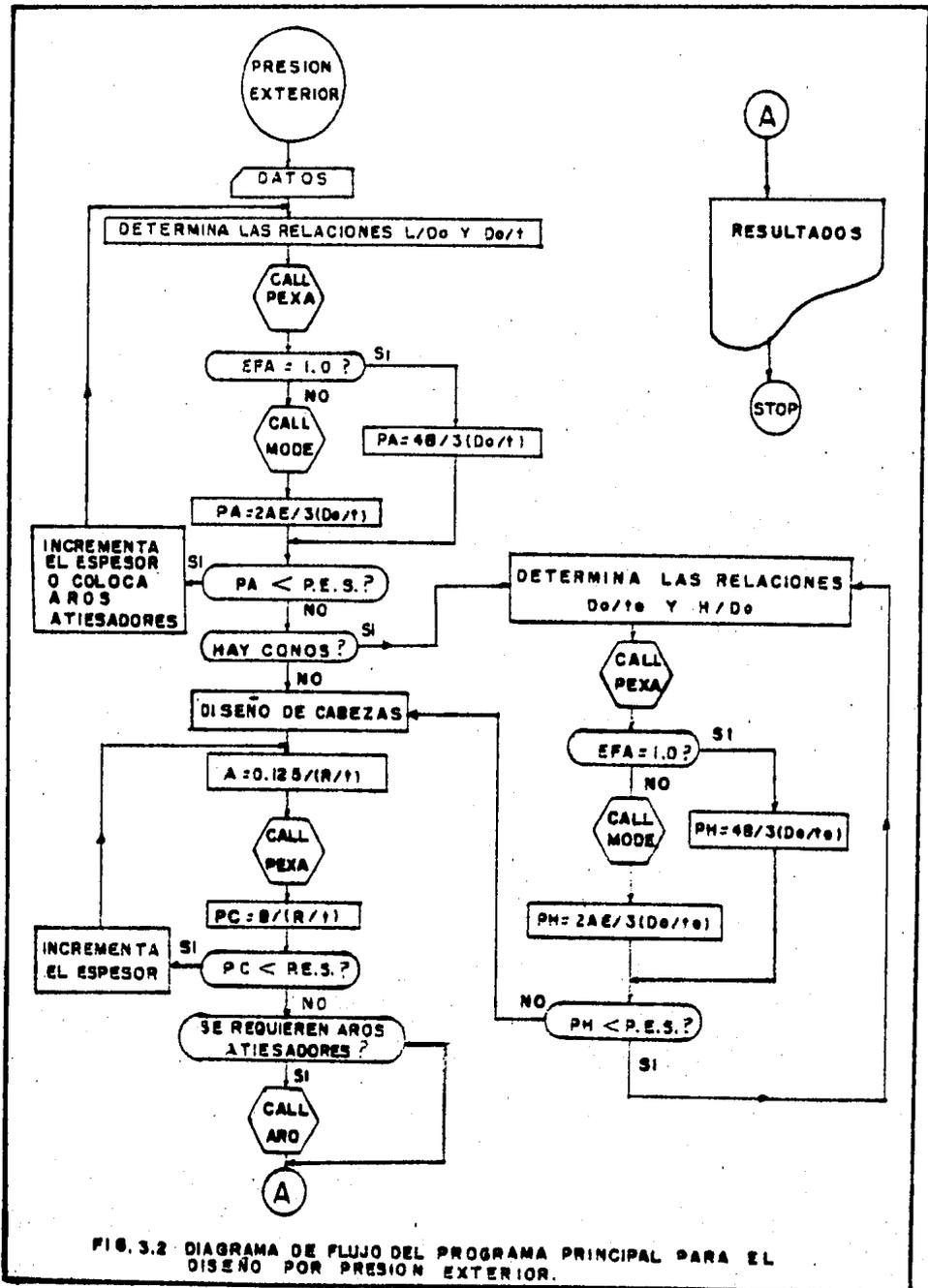
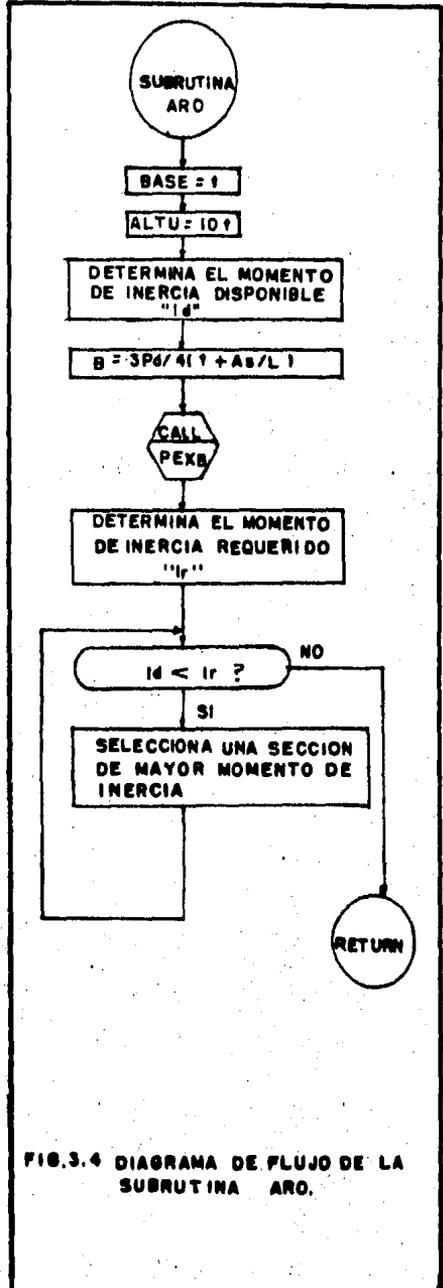
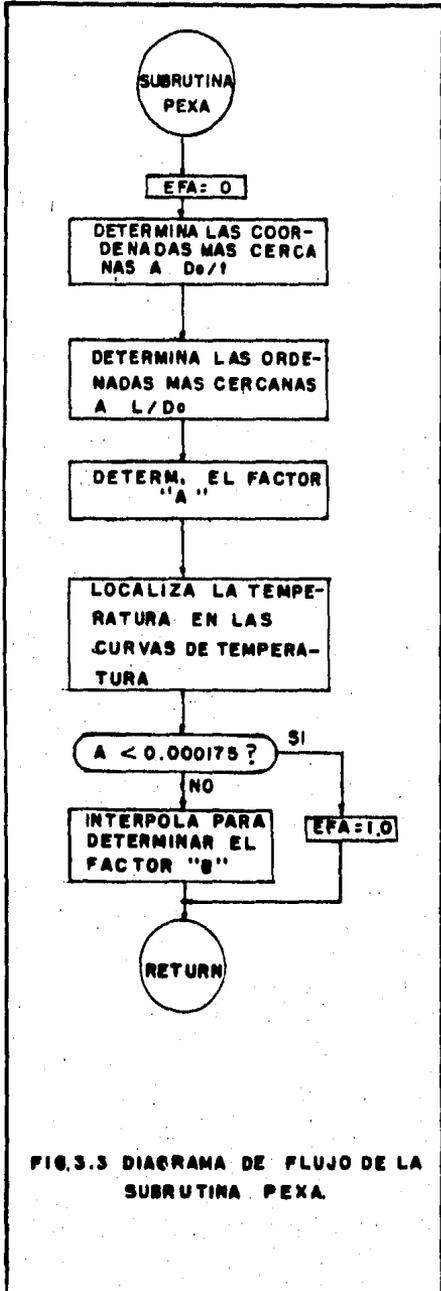
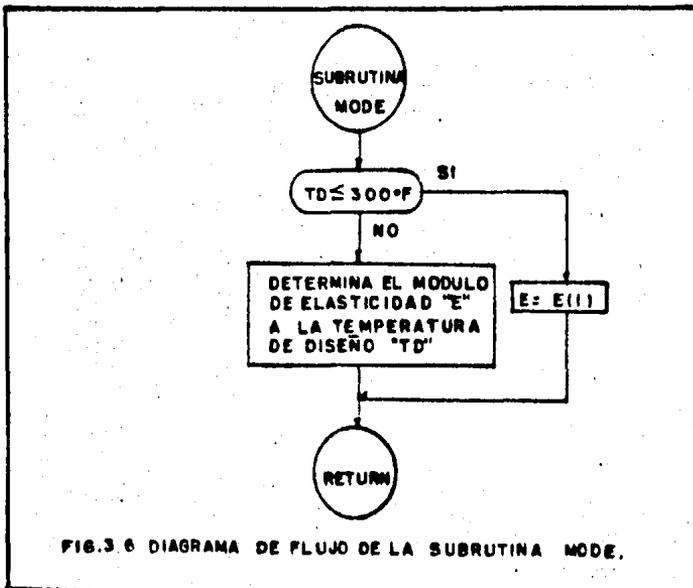
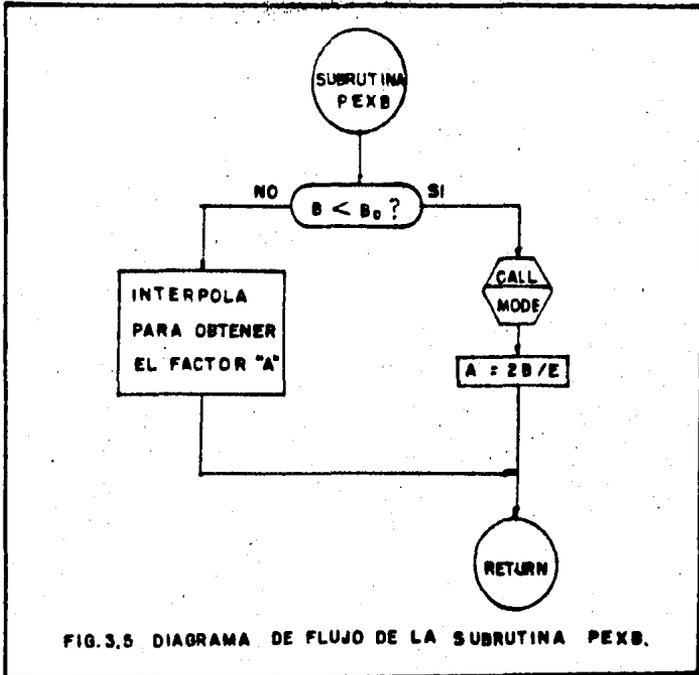


FIG. 3.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL PARA EL DISEÑO POR PRESION EXTERIOR.





4. DISEÑO POR VIENTO

4.1. INTRODUCCION

Los efectos del viento en las estructuras pueden, en ocasiones, ser importantes y hacer que se violen los requisitos de seguridad y servicio establecidos para ellas. De esta manera, el diseño por viento para recipientes a presión y en especial para una torre de proceso, se hace necesario desde el punto de vista estructural.

Esencialmente el viento es aire en movimiento, y al igual que cualquier otro fluido, produce distintos efectos sobre los objetos que se interponen. Todas las fuerzas debidas al viento son dinámicas, en el sentido de que son producidas por un fluido en movimiento, sin embargo, bajo determinadas circunstancias es válido tratar estas cargas como si fueran estáticas. Esta aproximación resulta satisfactoria, dado que en general la relación entre la variación del viento en el tiempo y la frecuencia natural de la estructura, es tal, que se genera básicamente una respuesta estática. De cualquier manera, aún en estos casos, es necesario estar consciente del carácter dinámico del problema.

En el presente capítulo se considerarán los principales efectos del viento sobre las estructuras de forma cilíndrica, como son el caso de las torres de proceso, para lo cual haremos uso del Manual de Diseño de Obras Civiles de la C. F. S. en su sección correspondiente, ya que en éste, se presentan los efectos del viento a estructuras, criterios para cuantificar dichos efectos, lineamientos de cálculo, coeficiente y gráficas sobre las características del viento en diversos tipos de estructuras.

4.1.1. Requisitos Míminos para Diseño

En el manual de la C.F.E., también se enumerán una serie de requisitos generales aplicables al diseño de estructuras sujetas a la acción del viento. Por lo cual, es necesario hacer mención de éstos. Ya que el cumplimiento de estos requisitos serán el objetivo del diseño por viento expuesto en esta sección.

Los requisitos mínimos para diseño son:

- a) *Direcciones de análisis.* Las estructuras se analizarán suponiendo que el viento puede actuar por lo menos en dos direcciones perpendiculares entre sí.
- b) *Seguridad contra volteo.* En este punto se pide revisar la estabilidad de las estructuras ante la condición de volteo. La anterior condición debe analizarse suponiendo - nulas las cargas vivas y los valores mínimos de diseño para la carga muerta. Lo cual se logra con la construcción de un sistema de anclas debidamente diseñado.
- c) *Seguridad contra deslizamiento.* Cuando la fuerza total resistente debida a la fricción sea insuficiente para prevenir el deslizamiento con la seguridad adecuada, la estructura deberá sujetarse mediante anclas que tomen el exceso de la fuerza de deslizamiento por viento. Las anclas proporcionadas para resistir el momento de volteo podrán también proporcionar resistencia al deslizamiento.
- d) *Protección contra otras construcciones.* Se considerará en todos los casos que la estructura se encuentra aislada, sin la protección que otras estructuras u obstáculos pudieran proporcionar durante la acción del viento.

4.2. VELOCIDADES DE DISEÑO

En los siguientes incisos se presentan los principales parámetros que determinan la velocidad de diseño del viento. Esta velocidad como se explicará posteriormente, es función de:

- a) Localización geográfica
- b) Probabilidad de excedencia
- c) Topografía en la vecindad de la estructura
- d) Características de la estructura.

Las siguientes definiciones de velocidades de viento, serán adoptadas en el presente capítulo.

V_R . velocidad regional. Es la velocidad máxima probable en una zona o región determinada para un cierto período de recurrencia.

V_B . velocidad básica. Es la velocidad que a una altura de 10 metros sobre el terreno, se presenta en el lugar de desplante de la estructura.

V_Z . velocidad del viento a una altura Z sobre el terreno.

V_D . velocidad de diseño a partir de la cual se evalúan los efectos del viento en la estructura.

4.2.1. Regionalización Eólica de la República Mexicana

Para fines de diseño de viento, la República Mexicana se ha dividido en varias zonas, según se muestra en la Fig. 4.1.

4.1.

En la Tabla IV.1 se indican, para cada una de estas zonas, las velocidades regionales, V_R , para períodos de recurrencia de 200 años; con probabilidades asociadas de excedencia

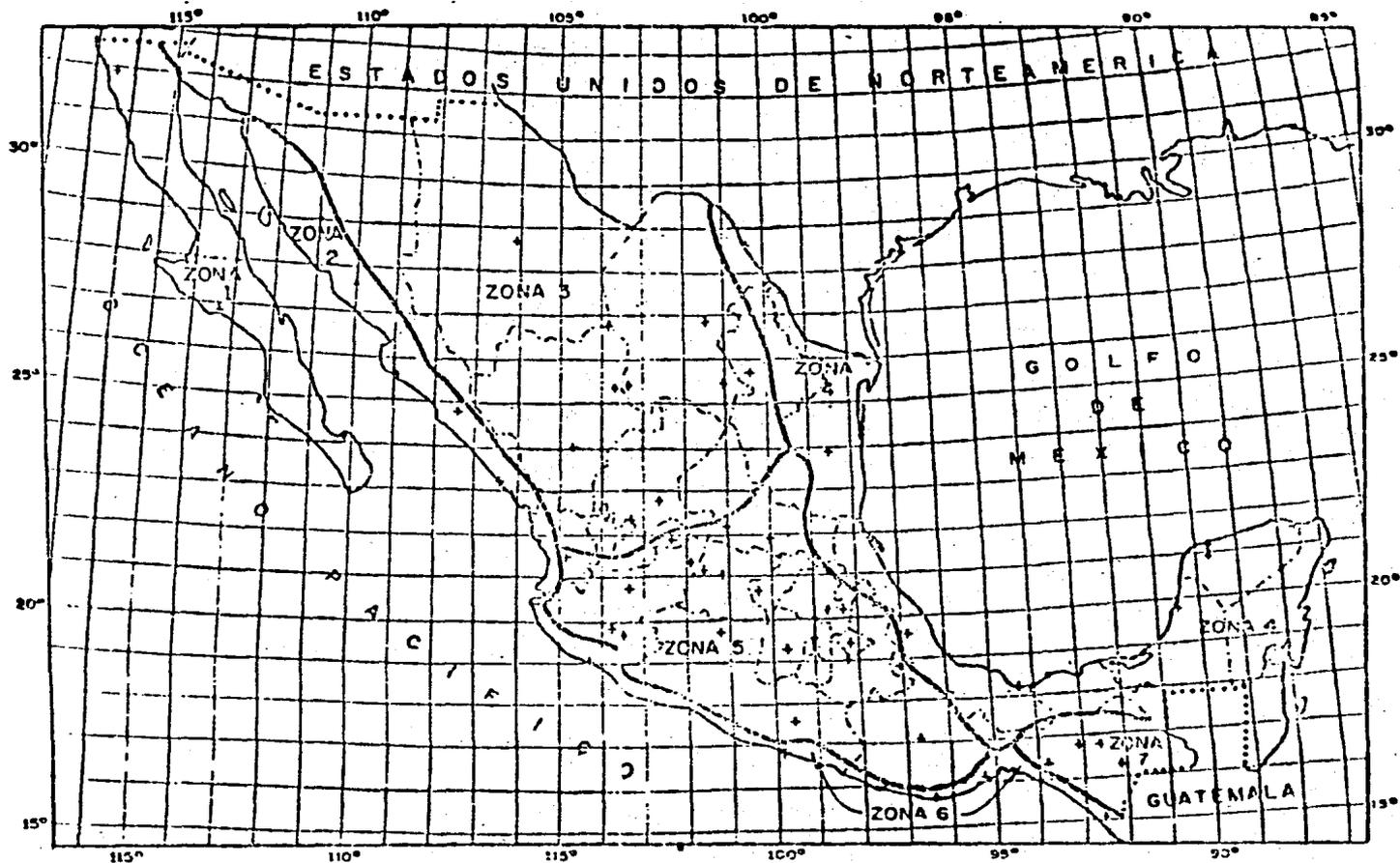


Fig. 4.1 Regionalización Eólica de la República Mexicana

de 5%. Estos valores son referidos a estructuras del Grupo A, a la cuales, según el Manual de Diseño de Obras Civiles de la C. F. E., pertenecen las torres de proceso.

Las velocidades regionales que aquí se establecen son representativas de una zona y pueden no ser aplicables en localidades específicas dentro de ellas. Dichas velocidades, entonces deberán considerarse como mínimas.

TABLA IV.1 VELOCIDADES REGIONALES V_R

ZONA EOLICA	VELOCIDAD REGIONAL (KM/H) ESTRUCTURAS DEL GRUPO A
1	105
2	150
3	125
4	185
5	90
6	170
7	95

4.2.2. Velocidad Básica

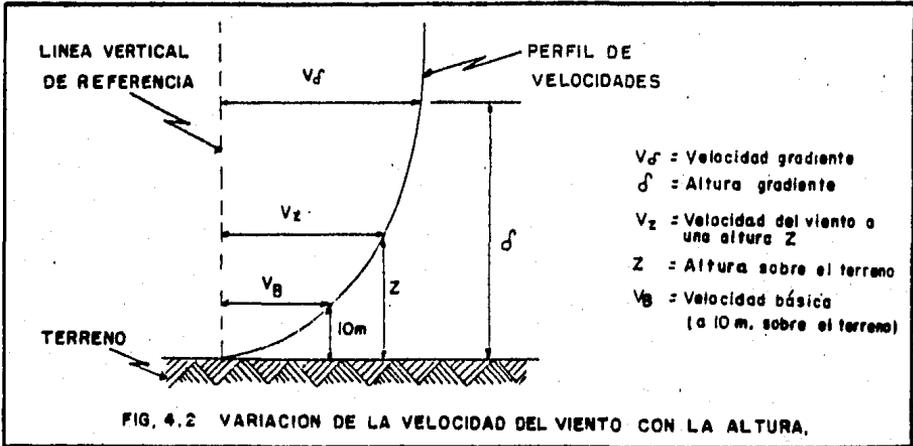
La velocidad básica del viento, V_B , se obtiene de acuerdo a la velocidad regional, y en base a la expresión siguiente

$$V_B = K V_R \text{ ----- (4.1)}$$

donde K es un factor que depende de la topografía del sitio y se tomará conforme a la Tabla IV.2.

4.2.3. Variación de la Velocidad con la Altura

La velocidad del viento varía según la altura al terreno según se muestra esquemáticamente en la fig.4.2.



Para fines de diseño, se supondrá que la velocidad del viento a la altura Z , V_z , está dada por las expresiones:

$$V_z = V_b \left(\frac{Z}{10}\right)^\alpha \quad \text{para } 10 < Z < \delta$$

$$V_z = V_b \quad \text{para } Z \leq 10 \text{ m.}$$

$$V_z = V_\delta \quad \text{para } Z \geq \delta$$

Las unidades de Z y δ son metros, y Km/h las velocidades. V_δ es la velocidad que se obtiene al hacer $Z = \delta$.

Los valores de α y δ son función de la topografía del lugar y se tomarán de la Tabla IV.3.

TABLA IV.2 FACTOR DE TOPOGRAFIA

TOPOGRAFIA	FACTOR K
a). Muy accidentada, como en el centro de ciudades importantes	0.7 0
b). Zonas arboladas, lomerios, barrios residenciales o industriales	0.8 0
c). Campo abierto, terreno plano	1.0 0
d). Promotorios	1.2 0

TABLA IV.3 VALORES DE α Y d .

TIPO DE TERRENO	α	ALTURA GRADIENTE d (Metros)
a). Litoral	0.14	200
b). Campo abierto (interior)	0.14	275
c). Terrenos suburbanos	0.22	400
d). Centro de grandes ciudades	0.33	460

4.2.4. Velocidad de Diseño. Factor de Ráfaga

Para obtener la velocidad de diseño, V_D , se tomará en cuenta el factor ráfaga en la estructura, multiplicando la velocidad de viento, V_Z , obtenida en el inciso anterior por un factor ráfaga F_R ; esto es:

$$V_D = F_R \cdot V_Z \text{ -----(4.2)}$$

Donde el manual de la C.F.E. estipula que para estructuras del tipo 3, dentro de las cuales se encuentran las torres de proceso, el factor de ráfaga será de 1.3.

Así también el manual recomienda que en el caso de estructuras del tipo 3, dicho factor se aplicará sólo en el cálculo de la velocidad de diseño para el análisis estático; para el análisis de los efectos dinámicos no será necesario aplicar dicho factor.

4.3. DETERMINACION DE LOS EFECTOS DEL VIENTO

Para el diseño de estructuras sometidas a la acción del viento, el Manual recomienda tomar en cuenta los efectos más importantes en función del tipo de la estructura. Así, las torres de proceso deberán diseñarse tomando en cuenta los empujes estáticos y además, deberá revisarse el comportamiento de éstas ante los efectos dinámicos producidos por los empujes transversales ocasionados por la generación de vórtices alternantes.

A continuación presentaremos el análisis sugerido en el manual de la C.F.E. para la evaluación de dichos efectos.

4.3.1. Empujes Estáticos

Los efectos del viento se tomarán equivalentes a los de una fuerza distribuida sobre el área expuesta. Dicha fuerza se supondrá perpendicular a la superficie en que actúa y su valor por unidad de área se calculará de acuerdo a la expresión:

$$P = 0.0048 GC V_D^2 \quad \text{-----}(4.3)$$

donde:

C= Coeficiente de empuje (sin dimensiones) = 0.7 para chimeneas y torres.

P= Presión debida al viento, en Kg/m²

V_D= Velocidad de diseño del viento, en Km/hr.

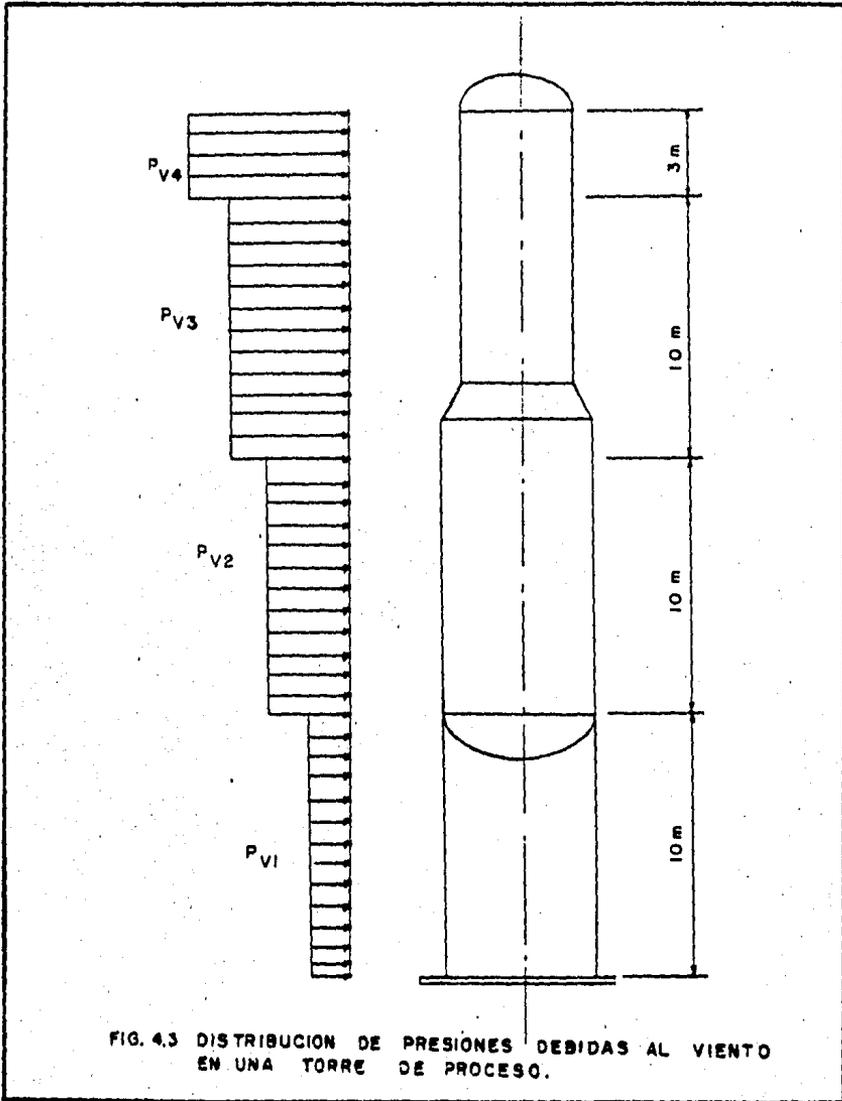
G= $\frac{\rho + h}{\rho + 2h}$. factor de corrección de densidad de la atmósfera, a la altura h (en Km) sobre el nivel del mar.

Así, una vez determinada la presión del viento sobre cada sección de la torre, bastará multiplicar ésta por el área expuesta correspondiente para obtener la fuerza, que actúa en esa sección, la cual a su vez nos servirá para obtener el momento de volteo sobre la base del equipo.

Como área expuesta se considerará, la proyección vertical de la torre, esto es:

$$A_{exp.} = DH. \quad \text{-----}(4.4)$$

Aquí, determinaremos la presión de viento a cada 10 metros a partir de la base de la torre, y se considerará constante en esa sección. (Ver fig.4.3).



Así la fuerza estática por viento podrá ser determinada por:

$$F_e = 0.0048 G C V_D^2 D H \text{ -----(4.5)}$$

4.3.2. Efectos Dinámicos

En estructuras prismáticas del tipo 3 ó para el diseño local de elementos de sección transversal pequeña comparada con su longitud, deberá tomarse en cuenta tanto las vibraciones generales causadas por fuerzas periódicas, y las vibraciones locales de la sección transversal de las estructuras, originadas por dichas fuerzas periódicas.

Los efectos de las vibraciones generales se pueden presentar como fuerzas perpendiculares a la dirección del viento, cuyo periodo es T_k y cuya amplitud máxima por unidad de longitud referida al eje de la estructura es w_k , la cual puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$w_k = 0.0048 G C_k d V_D^2 \text{ -----(4.6)}$$

donde: C_k = Coeficiente de empuje por vorticidad y depende de la geometría de la estructura. Así para secciones circulares:

$$C_k = \begin{cases} 1.0 & \text{para } V_D d \leq 50 \\ 0.2 + \frac{40}{V_D d} & \text{para } V_D d > 50 \end{cases}$$

d = Ancho de la sección perpendicular al flujo de aire, en m.

S = Coeficiente adimensional = 0.056 para secciones circulares.

V_D = Velocidad de diseño, en Km/hr.

w_k = Aplitud máxima de la fuerza por unidad de longitud referida al eje de la pieza, en Kg/m.

De esta manera, la fuerza dinámica se obtendrá multiplicando la mplitud máxima, w_k , por la longitud de la sección considerada, esto es:

$$F_d = w_k H = 0.0048 GCK V_D^2 dH \quad (4.7)$$

Comparando la fuerza dinámica, F_d , y la fuerza estática, F_e , se puede observar que ambas difieren únicamente en los coeficientes C_k y C , y como puede observarse la fuerza dinámica será de menor magnitud que la fuerza estática para valores de $V_{Dd} > 50$, lo cual indica que los efectos dinámicos serán más importantes conforme la estructura sea más esbelta, de otra manera los empujes estáticos serán de mayor consideración.

De lo anterior podemos concluir que en el caso de que $V_{Dd} \leq 50$, la fuerza dinámica podrá determinarse en función de la fuerza estática, de acuerdo a la expresión siguiente:

$$F_d = 1.427 F_e \quad (4.8)$$

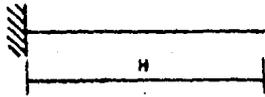
4.4. PROGRAMA PARA EL DISEÑO POR VIENTO

El diseño por viento consiste en determinar el momento de volteo producido por los efectos del viento, con el fin de proporcionar el anclaje necesario del equipo, otro aspecto importante que debemos considerar es la deflexión máxima del equipo, la cual según los criterios de diseño del Departamento de Recipientes no deberá de exceder de 6 pulg. por cada 100 pies de altura del equipo.

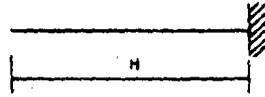
El cálculo de las deflexiones de la torre se hará en base al Método Numérico de Newmark. Este método consiste en determinar el diagrama M/EI (siendo M el momento flexionante, I el momento de inercia de la sección transversal y E el módulo de elasticidad del material) de la viga real y considerar este diagrama como una carga distribuida, con la cual se carga una viga ficticia, denominada viga conjugada. La viga conjugada, de una viga en voladizo, se obtiene transformando el apoyo fijo en un apoyo libre y el apoyo libre en un apoyo fijo, como se muestra en la fig. 4.4. Así los cortantes y momentos flexionantes de la viga conjugada corresponderán a los giros y deflexiones de la viga real, respectivamente.

El programa para el diseño por viento, estará constituido por un programa principal y dos subrutinas, las cuales son:

- 1.- SUBROUTINA VIENTO. En ésta se determina las fuerzas de viento en el nivel i en la torre y el momento de volteo en la base del equipo (Ver fig. 4.7).
- 2.- SUBROUTINA DEFLX. La cual determina las deflexiones de la torre, en base al Método Numérico de Newmark (Ver Fig. 4.8).



a) Viga real



b) Viga conjugada

FIG. 4.4 REPRESENTACION GRAFICA DE UNA VIGA EN VOLADIZO Y SU VIGA CONJUGADA

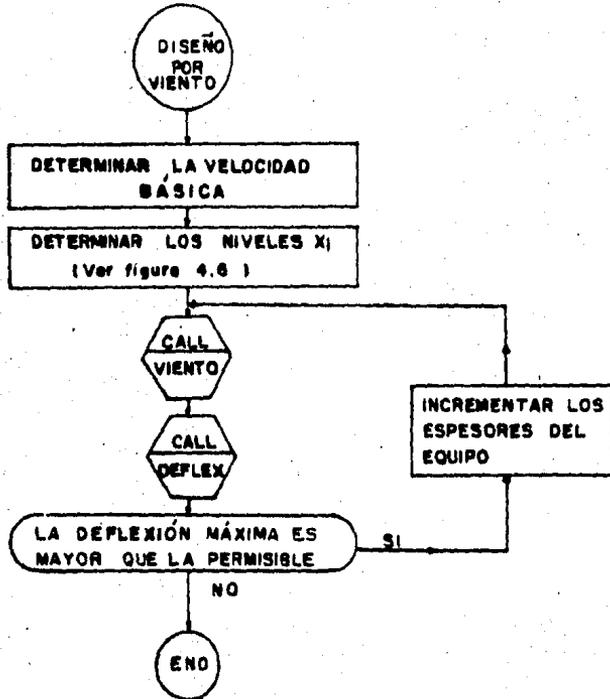
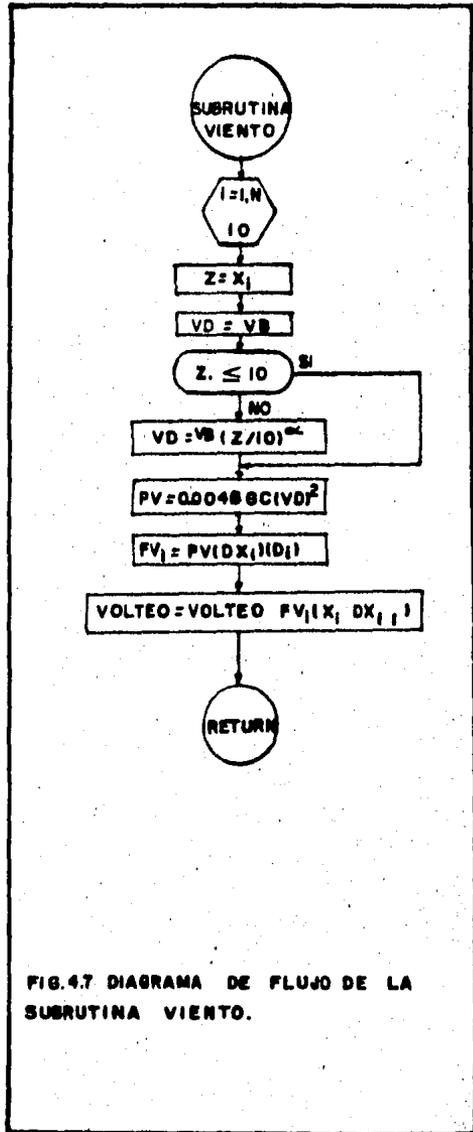
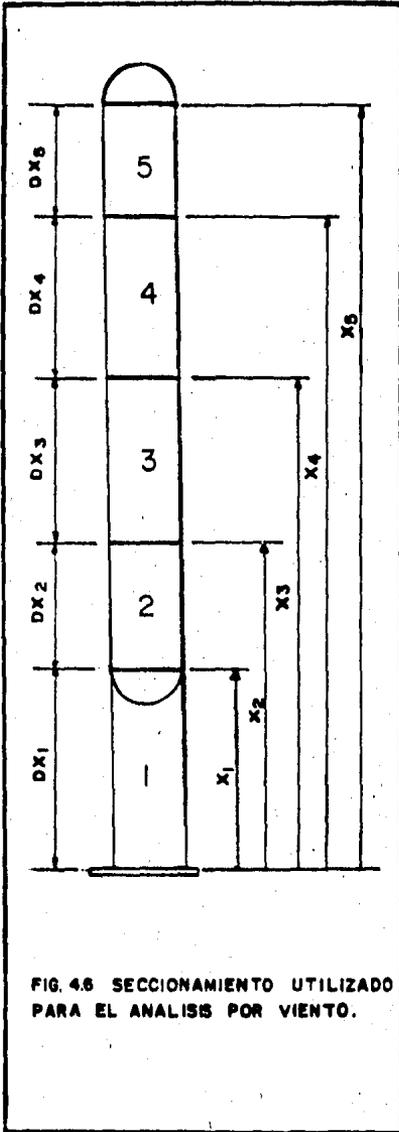


FIG. 4.5 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL PARA EL DISEÑO POR VIENTO.



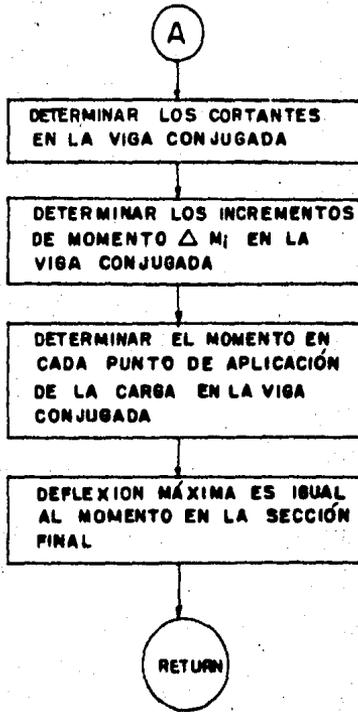


FIG.4.8 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA DEFLEX (CONTINUACION)

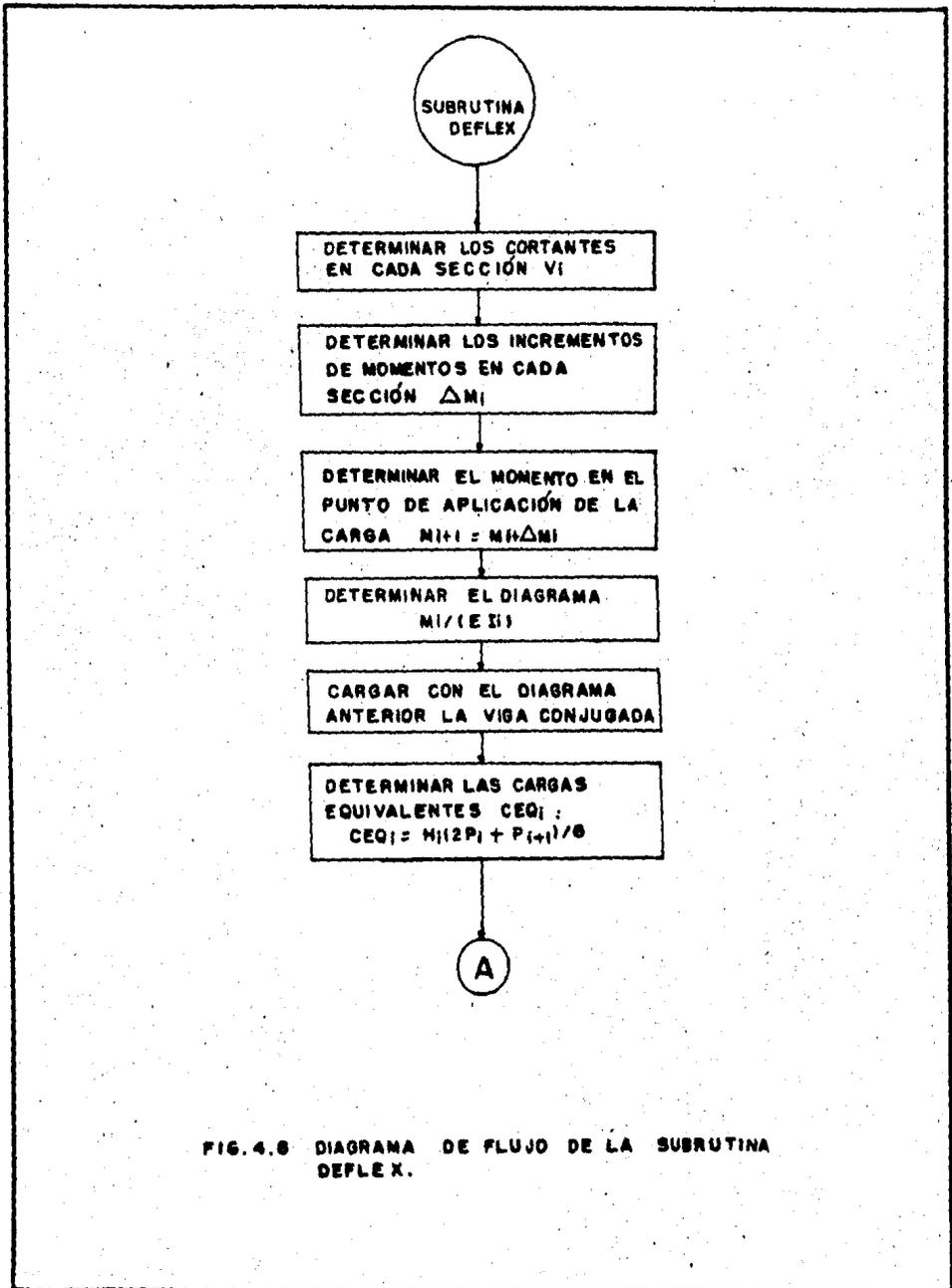


FIG. 4.6 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA DEFLEX.

¹ Para una amplia explicación de este método ver la -
biultografía No. 3.

5. DISEÑO POR SISMO

5.1 INTRODUCCION

Las grandes incertidumbres en la estimación tanto de las características de movimientos sísmicos, como del comportamiento de elementos estructurales ante ellos, hacen que no sea posible establecer, dentro de los límites racionales económicos, criterios de diseño que garanticen la ausencia de daños en una estructura ante la acción de cualquier temblor.

El objeto del diseño por sismo es, esencialmente, minimizar daños y preservar la vida humana, aún en los casos más severos. Específicamente, mediante las recomendaciones de diseño, se pretende que la mayoría de las estructuras:

- a) Resistan temblores ligeros sin daño alguno
- b) Resistan temblores moderados con daño estructural insignificante y con cierto daño no estructural
- c) No fallen ante la acción de sismos severos

El desarrollo que a continuación se menciona es aplicado a estructuras del Grupo A y del Tipo 1, esta clasificación es de acuerdo al Manual de Diseño de Obras Civiles de la C.F.S., en el cual se basará este capítulo. A continuación se mencionará el procedimiento de diseño estipulado en este Manual.

5.1.1. Procedimiento de Diseño por Sismo

El diseño por sismo de una estructura puede efectuarse siguiendo el procedimiento siguiente:

1.- Establecer la seguridad requerida.

La seguridad requerida se establece mediante un análisis económico de diferentes alternativas de diseño, en las que se -

considera su costo inicial, el costo y consecuencia de una falla eventual y la relación entre ambos.

En el Manual de la C.F.E., las torres de proceso están comprendidas dentro de las estructuras del Grupo A, en las cuales, los costos que causaría una falla de la misma serían muy elevados, en comparación a los costos en que se incurrirían para aumentar la seguridad de la misma.

Es por esta razón, que las torres de proceso se consideran permanentes al Grupo A.

2.- Definir las características propias de la estructura.

La respuesta ante sismo, y por tanto los criterios de análisis dependen considerablemente de las características de la estructura para resistir fuerzas laterales y de su capacidad para disipar energía mediante deformación.

Así las torres de proceso son agrupados dentro de las estructuras del Tipo 1.

3.- Determinar la intensidad sísmica.

Refiriéndose ésta a la aceleración y la velocidad máximas esperadas en el terreno firme de ese lugar. La intensidad sísmica para estructuras convencionales puede determinarse en base a la regionalización sísmica, presentada en el Manual.

4.- Determinar las características del terreno de cimentación

Los movimientos sísmicos son función, entre otras, de las características del terreno. Así, atendiendo a su rigidez, el manual considera tres tipos de terrenos, los cuales son:

- a) Terrenos Tipo I. Terreno firme.
- b) Terrenos Tipo II. Suelo de baja rigidez
- c) Terrenos Tipo III. Arcillas blandas muy comprensibles.

Asimismo, en el Manual se muestra el procedimiento que se debe llevar a cabo, para efectuar dicha clasificación. Además, los terrenos, cuya propiedades se descoacan se supondrán pertenecientes al tipo III.

5.- Estimar la sollicitación sísmica en la base de la estructura.

La sollicitación sísmica en la base de la estructura, puede ser estimada, mediante las siguientes alternativas: Fuerzas horizontales estáticas equivalentes; Historia de aceleraciones de sismos reales; Historia de aceleraciones de sismos simulados.

Aquí, será determinada en base a considerar fuerzas horizontales. La fuerza sísmica horizontal en la base se obtiene multiplicando el peso de la estructura por un coeficiente sísmico, que es función de las características antes definidas en pasos anteriores, y del período fundamental de vibración de la estructura.

6.- Definir criterios de análisis y diseño

Toda estructura que deba diseñarse por sismo, se analizará bajo la acción de dos componentes horizontales ortogonales del movimiento del terreno. Adicionalmente, en construcciones localizadas en las zonas sísmicas C y D, se considerará la acción de una componente vertical. Ésta se tomará como una fracción del mayor considerando, igual a 0.5 en la zona C, y 0.75 en la D.

7.- Evaluar fuerza y desplazamientos sísmicos

Las fuerzas y desplazamientos para diseño se obtienen mediante el análisis sísmico. El manual propone varias alternativas para realizarlo, así como también el alcance de las mismas, la cuales son:

- a) Análisis estático simplificado
- b) Análisis estático
- c) Análisis dinámico modal
- d) Análisis dinámico paso a paso

En las torres de proceso, el método de análisis estático es adecuado. Y será éste, el método de análisis que aquí se describirá.

- 8.- Obtener elementos mecánicos debidos a sismo.
- 9.- Dimensionar y detallar elementos estructurales.
- 10.- Revisar estados límites de servicio.

5.2 SOLICITACION SISMICA EN LA BASE

En este capítulo se considerará que la sollicitación sísmica en la base de la estructura está dada por una o varias fuerzas cortantes horizontales. La magnitud de esta fuerza se obtendrá multiplicando el peso total de la estructura por un coeficiente sísmico que, como ya se mencionó anteriormente, es función de:

- a) Importancia de la estructura
- b) Intensidad sísmica en el sitio de la construcción
- c) Características del terreno de cimentación
- d) Características de resistencia y ductilidad de la estructura.
- e) Período de vibración de la estructura.

5.2.1. Regionalización Sísmica de la República Mexicana

Para fines de diseño sísmico, la República Mexicana se considera dividida en cuatro zonas, según se indica en la Fig. 5.1. La zona A es la de menor intensidad sísmica, mientras que la de mayor intensidad es la zona D.

En los casos en que existan estudios específicos de riesgo sísmico de la estructura, se tomará como intensidad de diseño para construcciones del tipo A, a la aceleración y velocidad máxima del terreno que tengan una probabilidad de ser excedidos del 0.5 por ciento.

5.2.2. Coeficiente Sísmico y Espectro de Diseño

El coeficiente sísmico es el factor que multiplicado por el peso total de una estructura, proporciona la fuerza cortante horizontal en la base debido a la acción de un sismo; es decir

$$F_B = cW \text{ -----(5.1)}$$

donde:

F_B = Fuerza cortante horizontal en la base

c = Coeficiente sísmico

W = Peso total de la estructura

El coeficiente sísmico expresado como función del período de vibración de la estructura es el espectro de diseño de aceleraciones.

En la tabla V.1 se presentan los valores y formas que debe tomar el espectro de diseño para construcciones del Grupo A, tomando en cuenta la región sísmica y el tipo de terreno de cimentación.

El coeficiente sísmico básico, c , es la mayor ordenada - espectral que debe emplearse para el análisis, cuando no se calcula el período de la estructura.

En las zonas sísmicas C y D (Fig. 5.1) se debe considerar para el diseño aceleraciones verticales, iguales a 0.5 y 0.75 veces, respectivamente a las aceleraciones c especificadas en la Tabla V.1.

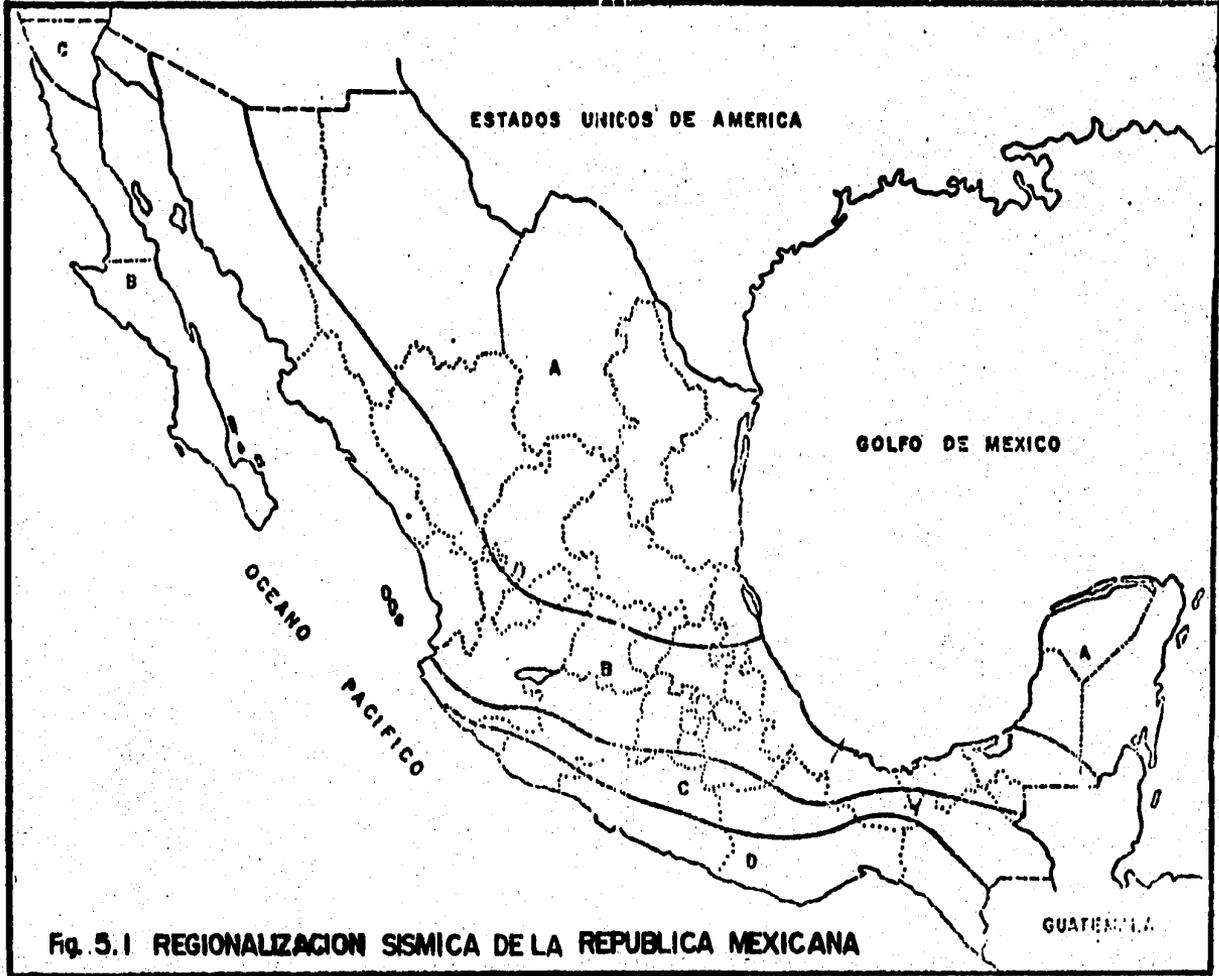
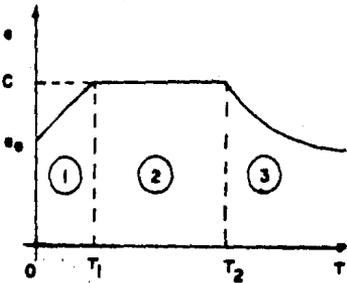


Fig. 5.1 REGIONALIZACION SISMICA DE LA REPUBLICA MEXICANA

5.2.3. Factor de Ductilidad

Para el cálculo de fuerzas sísmicas, las ordenadas del espectro de diseño pueden reducirse dividiéndolas entre un factor Q . Este factor es llamado factor de ductilidad que como su nombre lo indica se refiere a la ductilidad de la estructura. Esto es, una estructura, o la mayoría, presentan ciertas características de ductilidad, o sea, que antes de fallar presentan cierta deformación, la cual será mayor entre más dúctil sea la estructura. De manera contraria entre más frágil sea, menos energía absorberá en la deformación y por consiguiente fallará más rápidamente.

Es por esta razón, que el Manual de la C. F. E. hace una estratificación de las estructuras en función de la ductilidad de las mismas. Así, las torres de proceso son tratadas en el caso 3 y por tal razón se les asigna un valor al factor de ductilidad de $Q = 2$, para el caso de que no se conozca el período de vibración de la estructura. En el caso, de ser conocido éste, el factor Q se determinará en base a la fig. V.2, en la cual se muestra el factor de ductilidad en función del período de vibración de la torre.



① $0 < T < T_1 : s = s_0 + \frac{C - s_0}{T_1} T$

② $T_1 \leq T \leq T_2 : s = C$

③ $T > T_2 : s = C \left(\frac{T_2}{T} \right)^r$

NOTA : EN CASO DE NO CONOCER EL PERIODO DE VIBRACION, T, TOMAR LA MÁXIMA ORDENADA ESPECTRAL.

donde: s = ordenada espectral
 s_0 = ordenada espectral para $T=0$

C = coeficiente sísmico básico

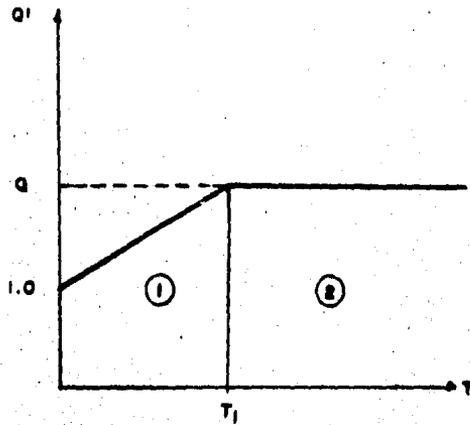
r = exponente adimensional

T = período fundamental de la estructura, en segundos

T_1 y T_2 = períodos naturales que definen la forma del espectro, en segundos

ZONA SISMICA	TIPO DE SUELO	C	s_0	T_1	T_2	r
A	I	0.104	0.0390	0.30	0.8	1/2
	II	0.156	0.0585	0.55	2.0	2/3
	III	0.208	0.0780	0.75	3.3	1
B	I	0.208	0.0390	0.30	0.8	1/2
	II	0.260	0.0585	0.50	2.0	2/3
	III	0.312	0.0780	0.80	3.3	1
C	I	0.312	0.0650	0.25	0.67	1/2
	II	0.390	0.1040	0.45	1.60	2/3
	III	0.468	0.1300	0.60	2.90	1
D	I	0.624	0.1170	0.15	0.55	1/2
	II	0.728	0.1820	0.30	1.40	2/3
	III	0.832	0.2340	0.45	2.70	1

TABLA V.1 ESPECTRO DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS DEL GRUPO A.



$$\textcircled{1} \quad Q' = 1 + (Q - 1) \frac{T}{T_1}$$

$$\textcircled{2} \quad Q' = Q$$

donde :

Q' y Q Factor de ductilidad
 T Periodo de vibración considerado
 T_1 Periodo de vibración obtenido de la Tabla V.1

NOTA : Para estructuras pertenecientes al Caso 3, el factor de ductilidad $Q = 2$.

FIG. V. 2. FACTOR DE DUCTILIDAD

5.3. METODO DE ANALISIS ESTATICO

El método de análisis estático, consiste en considerar - fuerzas sísmicas a diferentes niveles de la estructura, cuya magnitud dependerá del peso de la sección considerada y la - altura de la misma. Una vez determinada la magnitud de estas - fuerzas, podemos calcular el momento flexionante en la base - del equipo y en la línea de tangencia, para con esto diseñar el anclaje del equipo y evaluar los esfuerzos en la línea de tangencia, de tal manera que puedan reducirse éstos en caso - de que tengan valores muy altos (mayores que el esfuerzo de - tensión permisible del material por la eficiencia de la junta). Estos esfuerzos, en la línea de tangencia, son reducidos - incrementando el espesor del recipiente en esta sección.

La magnitud de las fuerzas sísmicas, se determinará en - base al procedimiento siguiente, estipulado en el Manual de - la C.F.E.

5.3.1. Magnitud de las fuerzas Sísmicas sin Considerar el Período de Vibración de la Torre.

Se considera que las fuerzas cortantes a diferentes niveles de la estructura forman un conjunto de fuerzas horizontales actuando sobre cada uno de los puntos donde se consideran concentradas las masas, como se indica en la fig. 5.2.

Cada una de estas fuerzas se toma igual al peso de la - masa que corresponde multiplicado por un coeficiente proporcional a la altura de la masa en cuestión sobre la base de la torre. Esto es

$$F_i = \alpha_i W_i \text{ -----(5.2)}$$

donde: F_i = Fuerza sísmica en el i -ésimo nivel
 α_i = coeficiente para el nivel i , que se describirá más adelante.
 W_i = peso de la masa del nivel i

El coeficiente α_i se toma de tal manera que la fuerza cortante total en la base de la estructura se igual al peso total de ésta multiplicado por el coeficiente sísmico básico, c , de la Tabla V.1.

El coeficiente sísmico básico, c , puede reducirse por ductilidad dividiendo entre el factor Q , que como se menciona anteriormente tiene un valor de dos, pero en ningún caso se tendrá un coeficiente sísmico reducido menor que el valor de c_0 , dado en la Tabla V.1.

Para cumplir con estos requisitos, α_i se toma como

$$\alpha_i = h_i \frac{\sum W_i}{\sum W_i h_i} \left(\frac{c}{Q} \right); \frac{c}{Q} > c_0 \text{ -----(5.3)}$$

donde: h_i = altura del nivel i sobre la base (véase fig. 5.2)

$\sum W_i$ = peso total de la estructura, incluyendo apéndices

c_0 = ordenada del espectro de diseño para $T=0$ (Tabla V.1)

c = coeficiente sísmico básico (Tabla V.1)

Q = factor de ductilidad = 2 en este caso

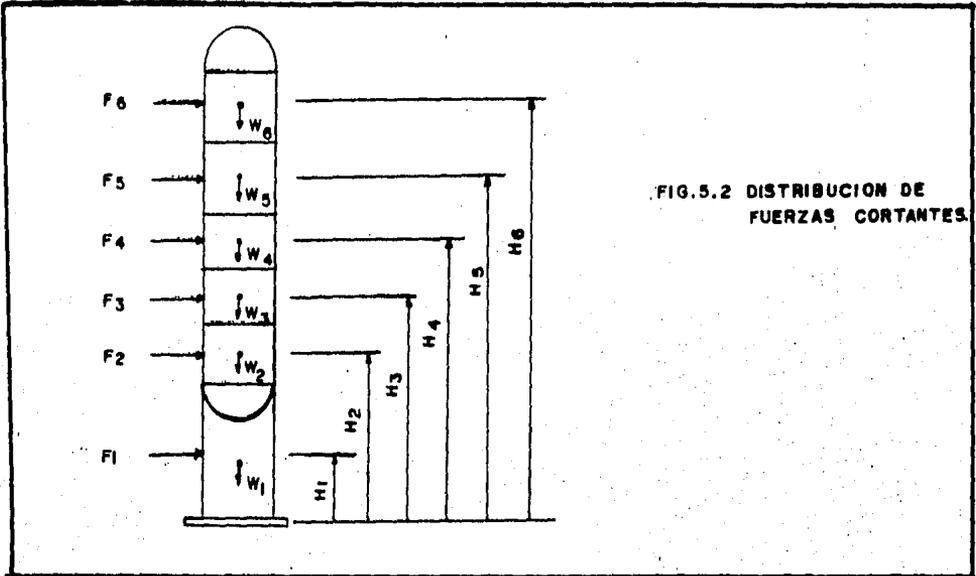


FIG.5.2 DISTRIBUCION DE FUERZAS CORTANTES.

5.3.2. Magnitud de las Fuerzas Sísmicas Considerando el Período de Vibración de la Torre

Se pueden considerar fuerzas cortantes menores que las calculadas en el inciso anterior si se toma en cuenta el valor aproximado del período fundamental de vibración de la estructura, de acuerdo con lo siguiente:

a) El período fundamental de vibración, T , se calculará como

$$T = 6.3 \left(\frac{1}{g} \frac{\sum F_i X_i^2}{\sum F_i X_i} \right)^{1/2} \quad (5.4)$$

donde:

X_i = desplazamiento del nivel i en la dirección de la fuerza F_i

g = aceleración de la gravedad

b) Con el valor de T así obtenido, se determina el coeficiente sísmico, a , y el factor de reducción, Q , en la Tabla V.1 y la Fig. 5.2, respectivamente. Si T es menor que el valor de T_1 , dado en la Tabla V.1. para encontrar las fuerzas cortantes reducidas bastará sustituir en la expresión (5.3) el coeficiente c/Q . Esto es:

$$\alpha_i = h_i \frac{\sum W_i l_i}{\sum W_i h_i} \left(\frac{a}{Q} \right) \quad \frac{a}{Q} > a_0 \quad \text{----- (5.5)}$$

Si T está comprendido entre T_1 y T_2 (Tabla V.1) no podrá hacerse reducción alguna, ya que en este caso $a=c$ y $Q=Q$. Y por tanto la magnitud de las fuerzas sísmicas serán iguales a las calculadas en el inciso anterior. Si T es mayor que T_2 se empleará para α_i la siguiente expresión

$$\alpha_i = (K_1 h_i + K_2 h_i^2) \left(\frac{a}{Q} \right) \quad \text{----- (5.6)}$$

donde:

$$K_1 = (1 - r(1 - q)) \frac{\sum W_i l_i}{\sum W_i h_i}$$

$$K_2 = 1.5r(1 - q) \frac{\sum W_i l_i}{\sum W_i h_i}$$

$$q = \frac{a}{c} \quad a \text{ y } c \text{ dados en la Tabla V.1}$$

r = exponente dado en la Tabla V.1

Para este caso se toman los valores de a y Q estipulados en la Tabla V.1 y la Fig. V.2, respectivamente.

5.4. ANALISIS DE ESFUERZOS EN EL CASCARON DEL RECIPIENTE

Las torres y tanques verticales que están sometidos a la acción de carga vertical (peso propio), viento, sismo y presión interior, y que están soportadas por una estructura tipo faldón, se comportan como una viga en cantiliver empotrada en su base. Por esta razón, aparte del diseño por presión interior, se debe efectuar una revisión debido a su comportamiento estructural. Esta revisión se realiza haciendo un análisis de esfuerzos en partículas opuestas en la línea de tangencia inferior como se muestra en la fig. 5.4.

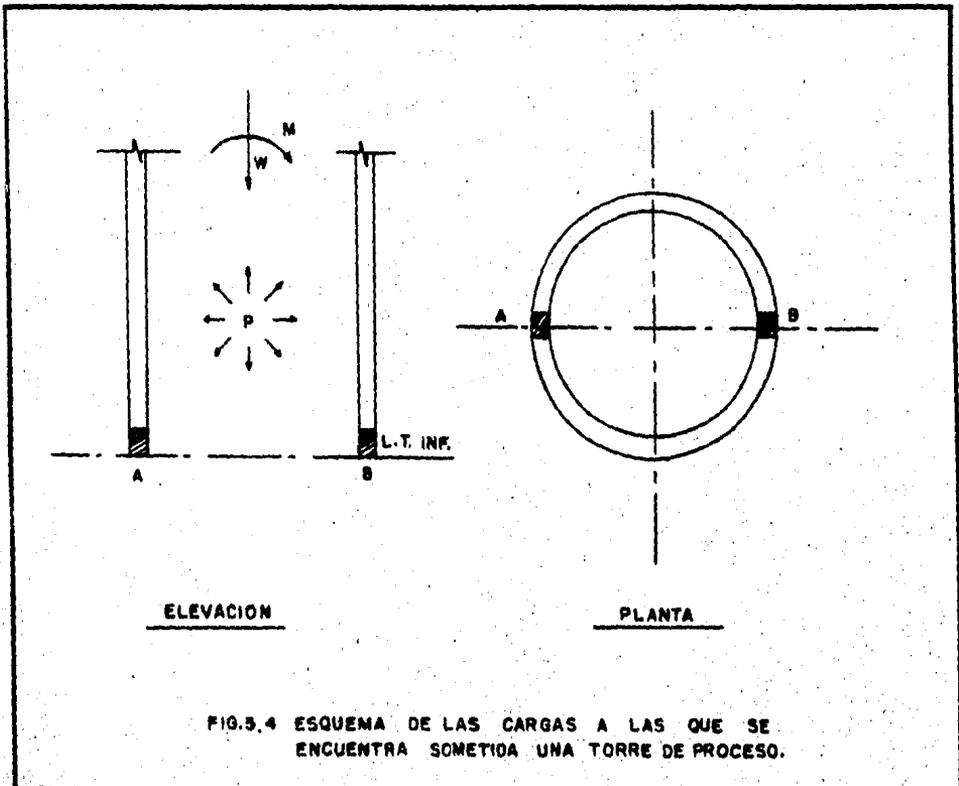
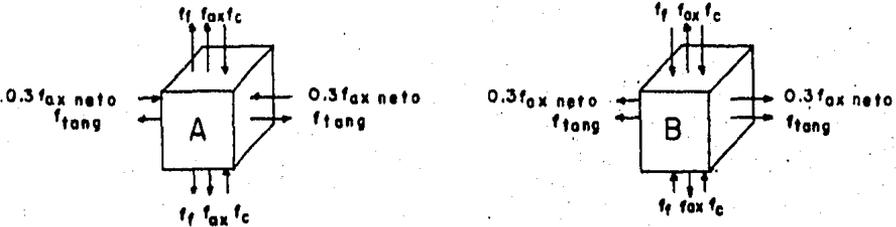


FIG. 5.4 ESQUEMA DE LAS CARGAS A LAS QUE SE ENCUENTRA SOMETIDA UNA TORRE DE PROCESO.

Aislando las partículas A y B y representando en ellas los esfuerzos que se presentan en condiciones de operación -- tenemos



Así el esfuerzo axial neto para la partícula A, en condiciones de operación, será

$$f_{ax \text{ neto}} = f_t - f_c + f_{ax} \text{ ----- (5.7)}$$

el cual deberá ser menor que el esfuerzo permisible del material. Y el esfuerzo axial neto para la partícula B, será

$$f_{ax \text{ neto}} = f_{ax} - f_t - f_c \text{ ----- (5.8)}$$

en donde:

$$f_t = \text{Esfuerzo de Flexión} = \frac{M}{S_c} = \frac{\text{Momento flexionante (aislo o sismo)}}{\text{Modulo de sección corroído}}$$

$$f_c = \text{Esfuerzo de Compresión} = \frac{W_{op}}{A_c} = \frac{\text{Peso de operación}}{\text{Área corroída}}$$

$$f_{ax} = \text{Esfuerzo de Presión Axial} = \frac{P D_m}{4 t_c} = \frac{(\text{Presión interior})(\text{Diámetro medio})}{4(\text{Espesor corroído})}$$

Además de estos esfuerzos se producen otros dos, perpendiculares a los mismos. Uno el esfuerzo de presión tangencial, el cual como se vió en el capítulo 2 es el doble del esfuerzo de presión axial, y el otro es el esfuerzo de compresión o tensión generado por el efecto de Poisson.

Esto es, dependiendo de la dirección del esfuerzo axial, existirá una contracción o expansión, como puede observarse en la Fig. 5.5.

Este esfuerzo, es determinado mediante expresión siguiente:

$$f = r f_{ax \text{ neto}} \text{ ----- (5.9)}$$

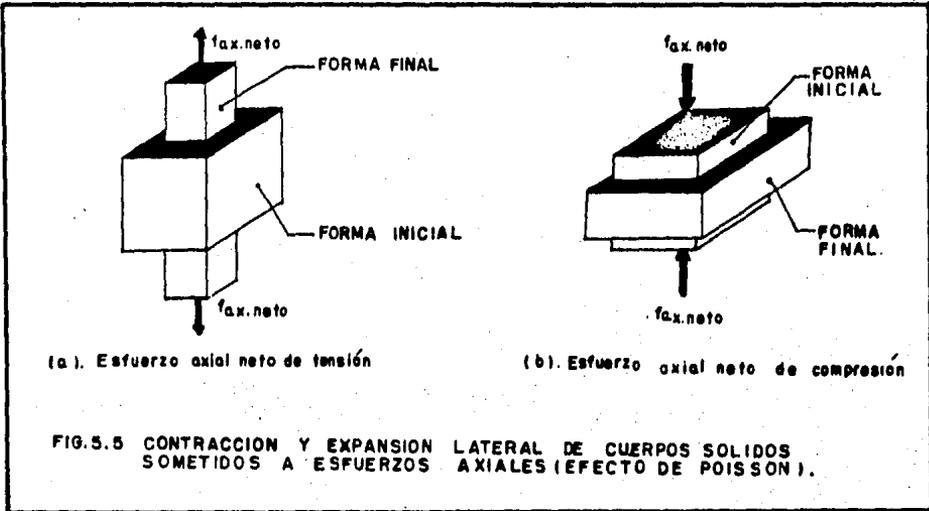
donde:

f = es el esfuerzo, debido al efecto de Poisson, perpendicular al esfuerzo axial neto y de signo contrario.

r = modulo de Poisson = 0.3 para el acero.

$f_{ax \text{ neto}}$ = esfuerzo axial neto.

Así, el esfuerzo debido al efecto de Poisson, y el esfuerzo tangencial debido a la presión interior en el recipiente, combinados, no deberían ser mayor o igual al esfuerzo a tensión permisible del material multiplicado por la eficiencia de la junta.



5.5 PROGRAMA PARA EL DISEÑO POR SISMO

Como se puede observar, en el desarrollo anterior, el análisis estático requiere del conocimiento de los pesos de operación de cada sección, para ser llevado a cabo. El peso de operación de una torre, o una sección de la misma consta del peso de montaje, el peso de accesorios y del peso del líquido.

El peso de montaje, como su nombre lo indica, es el peso del equipo en su condición de montaje, y consta de los conceptos siguientes: cascarón cilíndrico, cabezas, faldón, aro base, silletas, registros, boquillas, soportes de platos, anillos interiores o exteriores (aros atesadores), ángulos de soporte de aislamientos y miscelaneos. Como peso de miscelaneos es conveniente tomar un 3% del peso debido a la suma de los conceptos anteriores.

Mientras que el peso de los accesorios está constituido, generalmente, por el peso del aislamiento, de platos, empaquetadura, protección contra incendios del faldón (la cual consta de una capa de cemento de 51mm, tanto en el interior como en el exterior del faldón) y peso de plataformas y escaleras, el cual puede tomarse como un porcentaje (generalmente del 7%) de los pesos de montaje, de accesorios y del líquido.

Finalmente, el peso del líquido está constituido por el peso del líquido contenido en el cascarón, la cabezas y en los platos.

La determinación de los pesos del cascarón, cabezas, faldón, aislamiento, platos, protección contra incendio y del líquido se hará en base al cálculo del volumen y se multiplicará por la densidad del material. Mientras que la determinación de los pesos de registros, bocanillas, soporte de platos y soportes de ángulos de aislamiento se harán en base a datos proporcionados por el fabricante.

Así el programa, estará constituido por un programa principal y tres subrutinas. Los cuales serán descritos a continuación.

5.5.1. Función del Programa Principal y Subrutinas

El programa estará constituido por un programa principal, en el cual se determinarán las fuerzas sísmicas, a distintos niveles de la torre (el seccionamiento de la torre será el mismo, que el utilizado en el diseño por viento). Para la determinación de las fuerzas se requerirá de los pesos de operación de cada sección, los cuales serán determinados en la subrutina PESOS. Estas fuerzas serán calculadas en primera instancia utilizando el coeficiente sísmico básico y posteriormente, en el caso de que los esfuerzos, generados en la línea de tangen

cia, sean mayores al esfuerzo máximo permisible del material, se determinarán en base al espectro de diseño, para lo cual se requiere conocer el período fundamental de vibración del equipo y la determinación de éste, a su vez, requiere del conocimiento de los desplazamientos X_1 de la torre en la dirección de las fuerzas sísmicas. El cálculo de las deflexiones se llevará a cabo en la subrutina DEFLEX, la cual ya ha sido utilizada en el capítulo anterior (en la determinación de la deflexión máxima permisible de la torre). El coeficiente sísmico en base al período de vibración se determinará en la subrutina REDSIS.

Resumiendo, la función general de cada subrutina y del programa principal, es la siguiente:

PROGRAMA PRINCIPAL. Determinación de las fuerzas sísmicas, momentos a la línea de base y a la línea de tangencia. Y revisión de esfuerzos en la línea de tangencia del equipo.

SUBROUTINA PESOS. Determinación de los pesos parciales de operación, de los pesos totales de operación, montaje, líquido, platos, aislamiento y protección contra incendio.

SUBROUTINA DEFLEX. Determinación de las deflexiones, o desplazamientos, X_1 de la torre, debido a las fuerzas sísmicas. Se hará uso del Método Numérico de Newmark, en la determinación de las deflexiones.

SUBROUTINA REDSIS. Determinación del período fundamental de vibración y del coeficiente sísmico en base al espectro de diseño.

Los diagramas de flujo correspondientes se presentan en las Figs. (5.6), (5.7), (4.8) y (5.8).

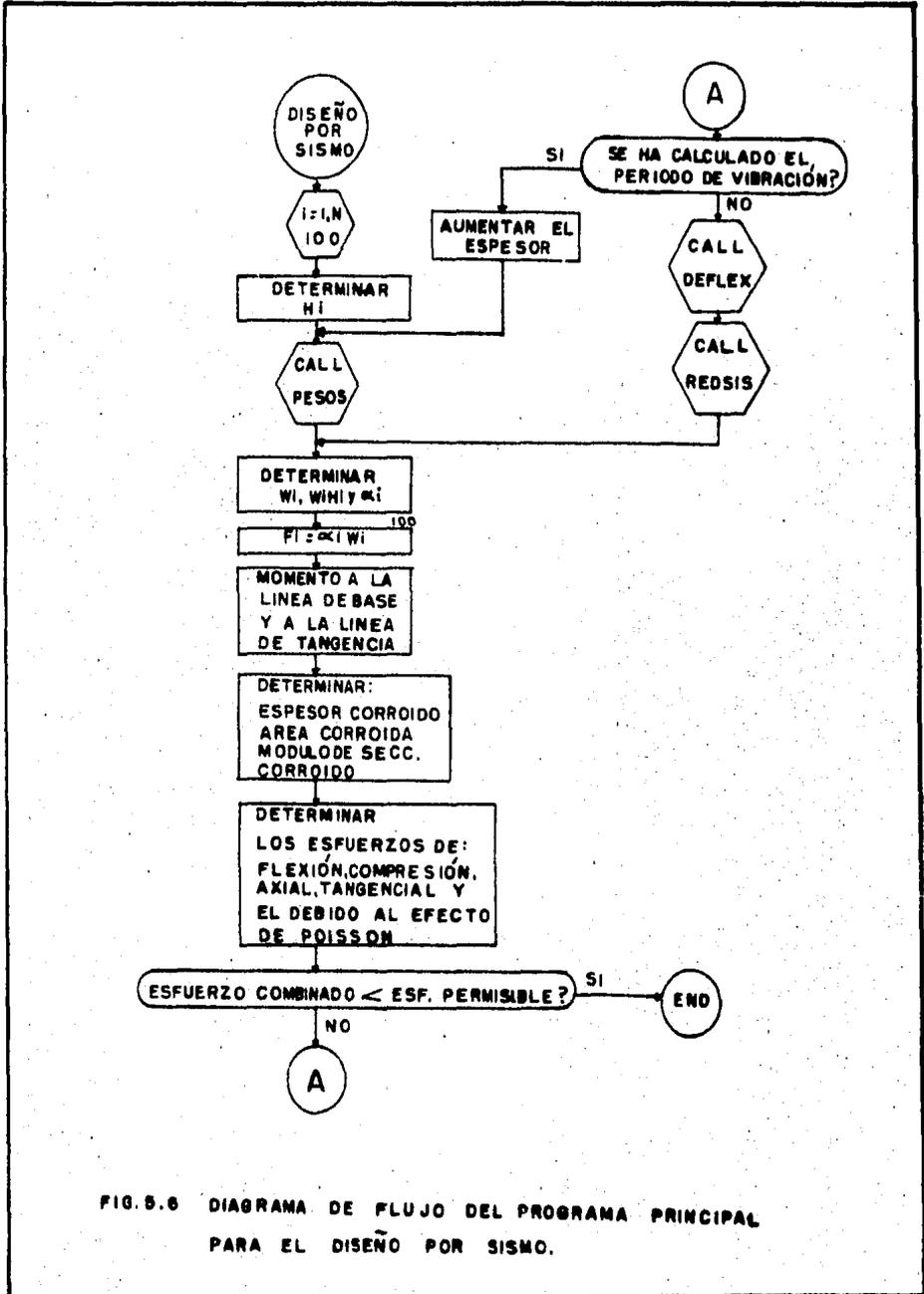


FIG. 5.6 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL PARA EL DISEÑO POR SISMO.

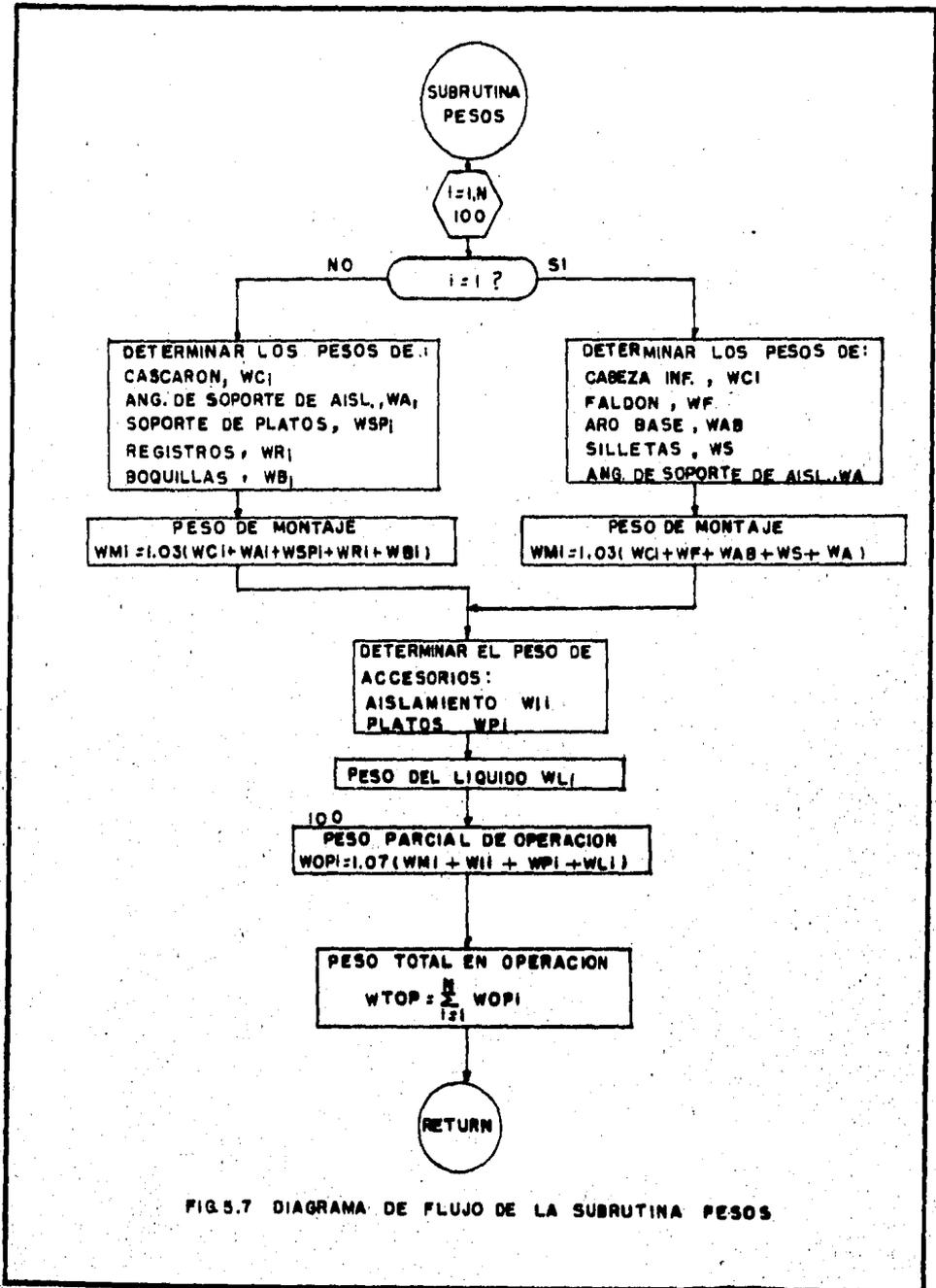


FIG.5.7 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA PESOS

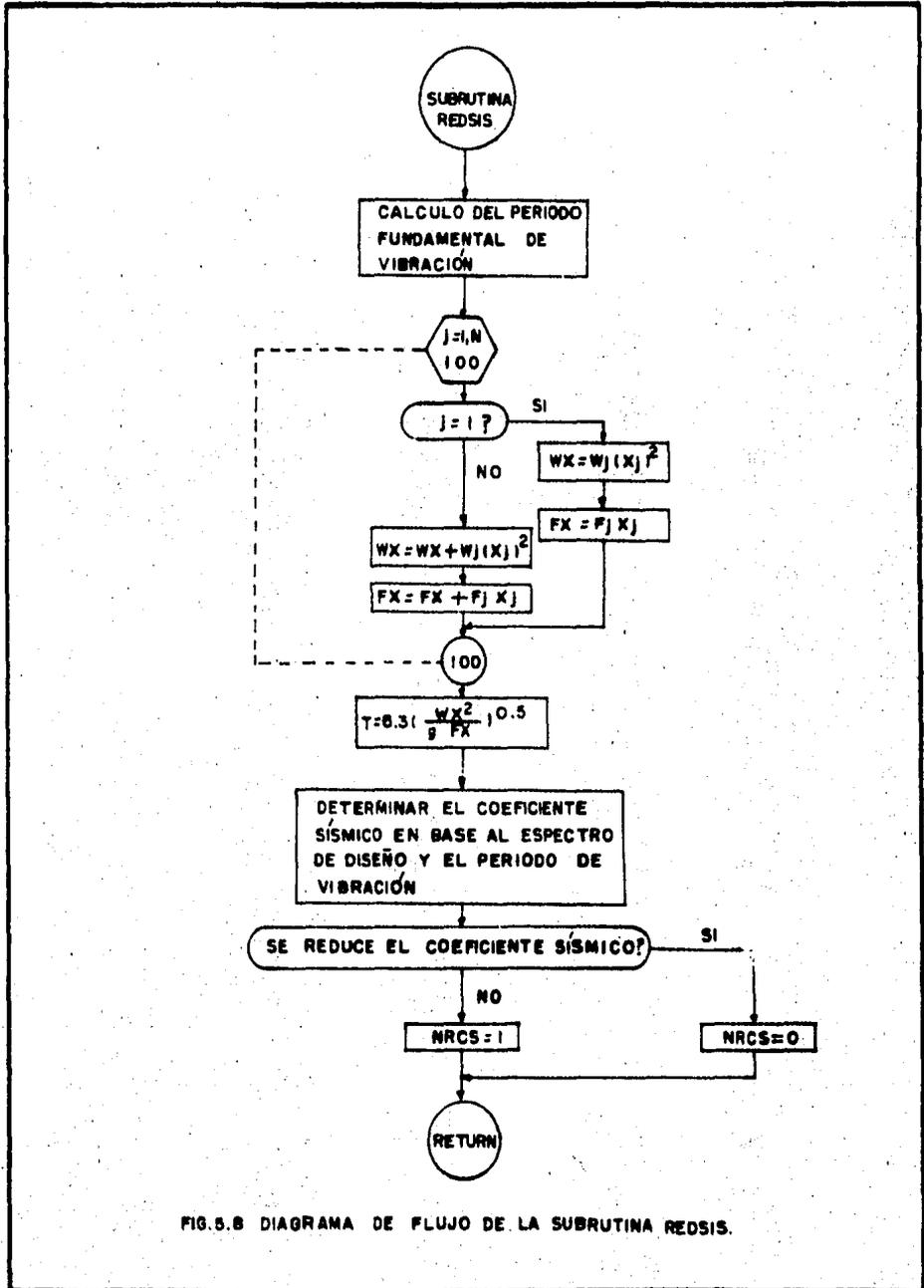


FIG. 5.8 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA REDSIS.

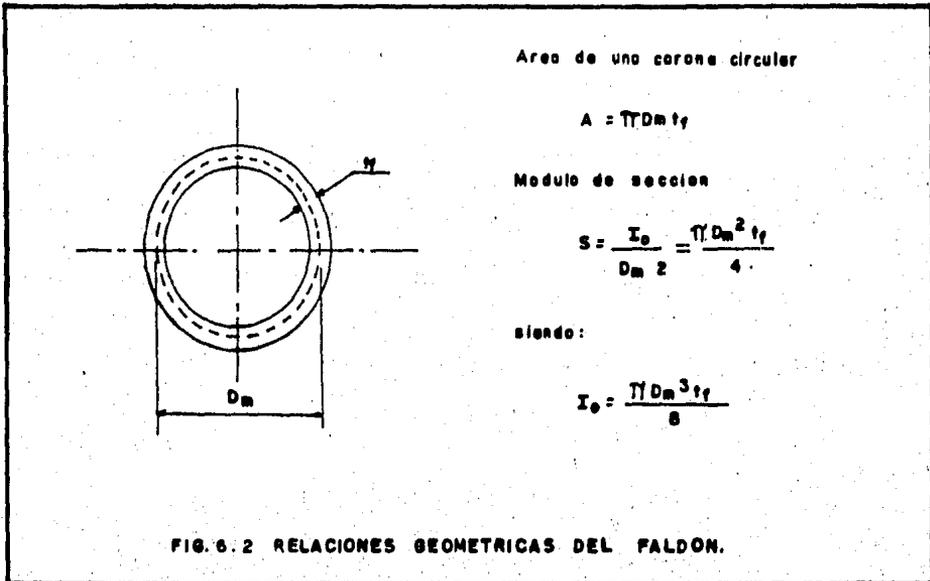
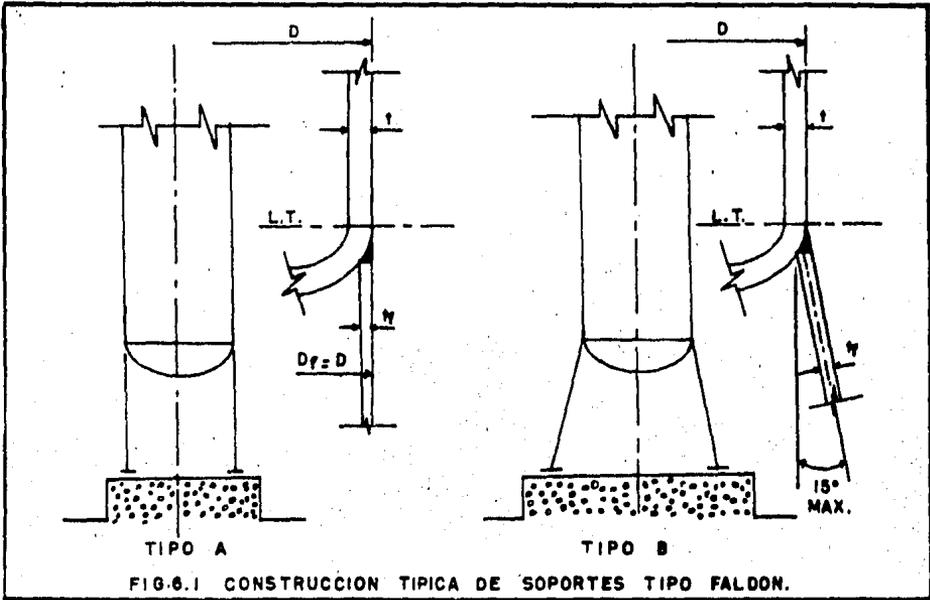
6. DISEÑO DEL FALDON

6.1 INTRODUCCION

Las torres de proceso construidas hoy en día son del tipo autosoportadas, y están unidas a un cascarón cilíndrico o cónico, con un aro base descansando sobre una cimentación de concreto, y fijadas firmemente a la cimentación por ancladas en concreto. Básicamente, las torres de proceso son diseñadas como vigas en cantiliver.

En la fig. 6.1, se muestra una construcción típica de soportes tipo faldón, soldados al cascarón. El soporte tipo A es el más usado en recipientes de gran altura. Si el espesor del faldón es menor que el espesor del cascarón, el diámetro exterior del faldón se hace igual al diámetro exterior del cascarón. El soporte tipo B es usado en los casos en que el momento externo (viento ó sismo) llegue a tener valores muy altos y el espaciamento entre anclas llegue a ser muy pequeño (menor de 305 mm) para el tamaño de anclas requerido.

Así, el diseño del faldón consiste en determinar los espesores del faldón, t_f , del aro base, t_{ab} , del aro de compresión, t_{ac} , y el número y diámetro de las anclas.



6.2 DISEÑO DE LA ENVOLVENTE DEL FALDON

Los esfuerzos a los que está sometido el faldón son, el esfuerzo de compresión debido al peso propio del equipo y el esfuerzo de flexión debido a la acción del viento ó de un sismo. La combinación de ambos esfuerzos deberá hacerse para el caso más desfavorable, es decir, cuando ambos esfuerzos se suman, y comparando el esfuerzo resultante de esta combinación con el esfuerzo permisible del material del faldón. Así, tenemos que:

$$f_c + f_{fle} = f_{permisible} \text{ ----- (6.1)}$$

Estos esfuerzos serán determinados de la manera siguiente :

a) Esfuerzo de Compresión, f_c

Este esfuerzo es producido por el peso de operación del equipo, y es determinado por la expresión siguiente:

$$f_c = \frac{W_{op}}{A} \text{ ----- (6.2)}$$

donde:

W_{op} = Peso total del equipo en operación

A = Area de la sección transversal del faldón, ver --
fig. 6.2

$$A = D_m t_f$$

de esta manera,

$$f_c = \frac{W_{op}}{\pi D_m t_f} \text{ ----- (6.3)}$$

b) Esfuerzo de Flexión, f_{fle}

Este esfuerzo es debido al momento externo, producido - por efecto de viento ó sismo, tomándose el más desfavorable de de los dos. Este esfuerzo puede ser determinado por:

$$f_{fle} = \frac{M}{S} \text{ ----- (6.3)}$$

donde:

M = Momento por viento o sismo en la base del equipo

S = Módulo de sección, ver fig. 6.2

$$S = \pi (D_m)^2 t_f / 4$$

de esta manera,

$$f_{fle} = \frac{4M}{\pi (D_m)^2 t_f} \text{ ----- (6.3.a)}$$

c) Esfuerzo Permisible del Material a Compresión, $f_{permisible}$

Este esfuerzo es igual al esfuerzo permisible a la tensión, multiplicado por un factor de eficiencia de la soldadura y un factor debido a las cargas accidentales, así, tenemos que:

$$f_{permisible} = E f_t \alpha \text{ ----- (6.4)}$$

donde:

E = Eficiencia de la soldadura al corte en la unión del cascarón y el faldón, que de acuerdo al Código ASME es igual a 0.6

f_t = Esfuerzo permisible del material a la tensión, -- obtenido de la Tabla UG-23 del Código ASME, Sección VIII, División 1.

α = Factor debido a cargas accidentales, generalmente - es igual a 1.33

Como lo que se requiere es la determinación del espesor del faldón, sustituyendo las ecuaciones (6.2) y (6.3) en la ec. (6.1) y despejando el espesor del faldón, queda finalmente

$$t_f = \frac{\left(\frac{W_{OR}}{\pi D_m} + \frac{4M}{\pi D_m^2} \right)}{f_{\text{permisible}}} \quad \text{-----} \quad (6.5)$$

Esta expresión es la que se tomará en cuenta en la determinación del espesor del faldón.

6.2.1 Diseño del Aro Base

Para distribuir la carga vertical sobre una área suficiente de la cimentación de concreto se usa un aro base, además, éste sirve para acomodar los pernos de las anclas. La carga es considerada uniformemente distribuida sobre todo lo ancho del aro base (ver fig. 6.3). El efecto de los agujeros de los pernos y los reforzamientos de los atiesadores verticales se desprecian.

De esta manera, el ancho del aro base, b , deberá ser tal que el esfuerzo combinado de flexión y compresión sea menor que el esfuerzo de compresión permisible sobre el concreto, esto es

$$b = \frac{f_c' + f_f'}{f_{\text{conc}}} \quad \text{-----} \quad (6.6)$$

siendo:

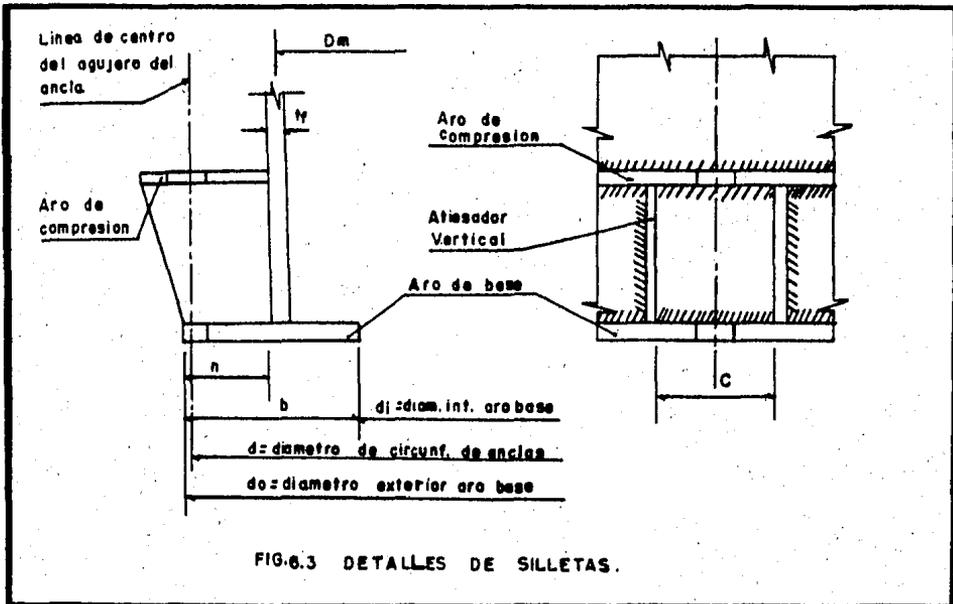
b = Ancho del aro base, ver fig. 6.3

f_c' = Esfuerzo de compresión por unidad de longitud

$$= W_{op} / (\pi D_m)$$

$$f_f' = \text{Esfuerzo de flexión por unidad de espesor} \\ = 4M / (\pi D_m^2)$$

$$f_{conc} = \text{Esfuerzo de compresión permisible sobre el} \\ \text{concreto} \\ = 52.7 \text{ Kg/cm}^2$$



Con el ancho del aro base, b , podemos calcular el — esfuerzo de aplastamiento real sobre el concreto, de la manera siguiente:

$$f_{comp} = \frac{f_c' + f_f'}{b} \quad \text{-----} \quad (6.7)$$

Para determinar el espesor del aro base, consideremos - la fig.6.4 en la cual se muestra una sección del aro base de longitud unitaria y espesor t_{ab} . La sección de longitud n , del aro base, se comporta como una viga en cantiliver, uniformemente cargada, por lo que el esfuerzo de flexión máximo será:

$$f_b = \frac{M_{max}}{S} \text{ ----- (6.8)}$$

donde:

M_{max} = Momento de flexión máximo

$$= f_{comp} n^2 / 2$$

S = Módulo de sección = $(t_{ab})^2 / 6$

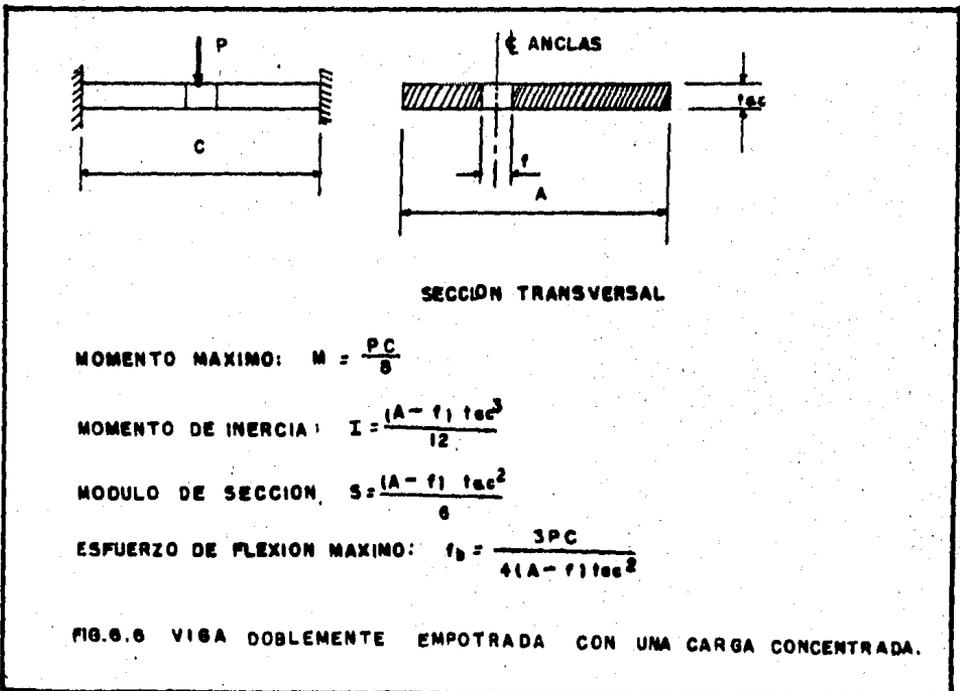
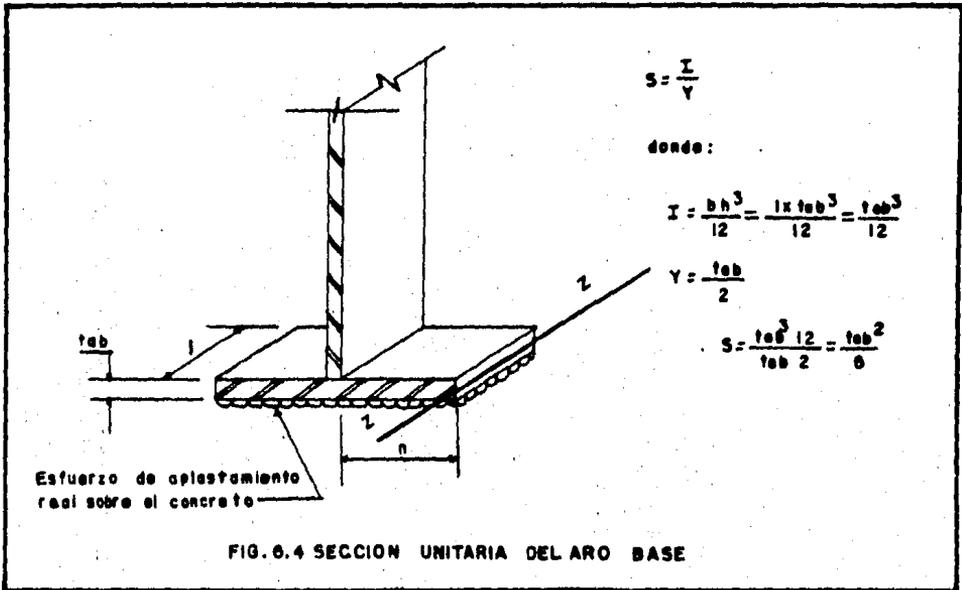
Por lo tanto,

$$f_b = \frac{3 f_{comp} n^2}{(t_{ab})^2} \text{ ----- (6.8.a)}$$

y el espesor requerido del aro base es

$$t_{ab} = \left(\frac{3 f_{comp} n^2}{f_b} \right)^{1/2} \text{ ----- (6.9)}$$

donde n es la dimensión mostrada en la fig.6.4 y f_b es el - esfuerzo a flexión permisible del material del aro base.



6.2.2. Diseño del Aro de Compresión

El aro de compresión con los agujeros para las anclas y soldado al cascarón del faldón, como se muestra en la fig.6.3, ayuda a distribuir las reacciones de los pernos de las anclas más uniformemente hacia el faldón.

Para determinar el espesor requerido, t_{ac} , se requerirá involucrar un análisis de esfuerzos incluyendo el aro base, los atiesadores verticales y la sección del faldón correspondiente. Así, el espesor t_{ac} puede ser calculado en base a las cargas -- concentradas en el filo de los agujeros de los pernos. Un plato rectangular con dimensiones A y C , puede ser aproximado por una viga con los extremos mayores fijos, la carga sobre el plato y un módulo de sección mínimo, $S = (t_{ac})^2(A - d)/6$. Basándonos en las simplificaciones de arriba, el espesor t_{ac} puede ser determinado por

$$t_{ac} = \left(\frac{3 P C}{4(A-d)f_b} \right)^{1/2} \text{-----} (6.10)$$

donde:

P = Carga por ancla, su cálculo se verá más adelante

C = Espaciamiento entre atiesadores verticales,
ver fig.6.3

A = Ancho del aro de compresión, ver fig.6.6

d = Diámetro del agujero de la ancla

f_b = Esfuerzo permisible a flexión del material del
aro de compresión

6.2.3. Cálculo del Número y Diámetro de las Anclas

Para estimar el número máximo de anclas que podemos -- colocar, debemos tomar en cuenta dos condiciones:

- 1). El espaciamiento mínimo que debe haber entre anclas deberá ser de 305 mm (12 ").
- 2). El número de anclas deberá ser siempre múltiplo de 4, esto -- es con el fin de que siempre se tengan trabajando a las -- anclas por pares.

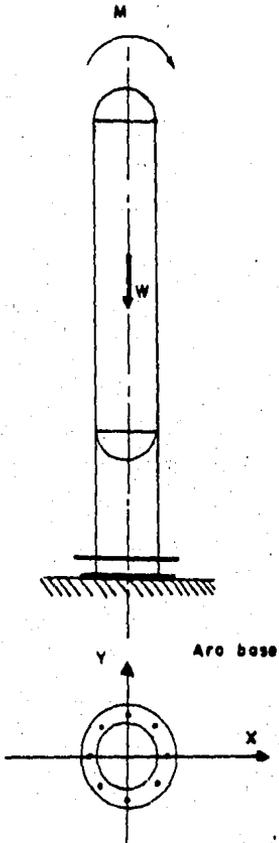
De esta manera, en el cálculo del diámetro de las anclas, podemos considerar una cantidad N de anclas y dependiendo del -- diámetro requerido de éstas, disminuir o aumentar el número de -- anclas, en cuyo caso habrá la necesidad de usar un faldón cónico, con el fin de poder alojar a las anclas con un espaciamiento -- adecuado.

Para determinar el diámetro requerido de las anclas, -- considerémos que las fuerzas y momentos actúan según se muestra en la fig. 6.7. Considerémos, también, que la torre rotará sobre el eje Y , en la misma figura. La máxima fuerza por ancla debida al -- momento exterior y al peso del equipo, es determinada como se -- muestra a continuación.

La tensión máxima, sobre la circunferencia de anclas por -- unidad de longitud, está dada por

$$T = \frac{M}{Z} - \frac{W}{c} = \frac{4M}{\pi d^2} - \frac{W}{\pi d} \text{ ----- (6.11)}$$

Si $4M/\pi d^2$ es mayor que $W/\pi d$ hay una fuerza inducida por el esfuerzo de tensión, cuya magnitud depende de la distancia X , medida al centro de la ancla. La fuerza máxima P sobre la ancla a la distancia $X/2$ del eje Y es



A = área de la ancla

M = momento externo a la base del equipo debido a viento o sismo.

W = peso del recipiente

d = diámetro de la circunferencia de anclas

N = número total de anclas en múltiplos de 4

Z = módulo de sección lineal del círculo de anclas
 $= \pi d^2 / 4$

C = perímetro de la circunferencia de anclas
 $= \pi d$

X = distancia del centro del ancla al eje neutro

S_b = esfuerzo permisible del material de las anclas

FIG.6.7 FUERZAS Y MOMENTOS QUE ACTUAN SOBRE UN RECIPIENTE VERTICAL.

$$P = T \left[\frac{\pi d}{N} \right] = \frac{4 M - W d}{N d} \text{ ----- (6.12)}$$

De esta manera, el área requerida de las anclas será

$$A = \frac{P}{S_a} \text{ ----- (6.13)}$$

donde:

S_a = Esfuerzo permisible del material de las anclas.

El diámetro de la ancla será :

$$d = \left(\frac{4 P}{\pi S_a} \right)^{1/2} \text{ ----- (6.14)}$$

Los diámetros mínimos y máximos, usados en el Departamento de Ingeniería de recipientes del I.M. P., son de 32 mm y 64 mm, respectivamente. Por tal motivo, en el caso de que el diámetro de anclas calculado sea menor de 32 mm, se procederá a reducir el número de las mismas, y en el caso contrario, diámetro de anclas mayor de 64 mm, se aumentará la cantidad de las anclas.

6.3. PROGRAMA PARA EL DISEÑO DEL FALDON

Del desarrollo anterior, podemos observar que los parámetros requeridos para el diseño del faldón son: el peso de operación, o de montaje si la sollicitación por viento, en el equipo, es más severa que la ocasionada por sismo; el momento a la base del equipo y; el diámetro y altura del faldón.

Una vez determinados estos parámetros, podemos iniciar el diseño del faldón. Así, como primera opción se considerará un faldón recto y en el caso de que el diámetro requerido de las anclas sea mayor de 64 mm se procederá a diseñar un faldón cónico, con un ángulo máximo del cono de 15°. Esto último traerá como consecuencia una modificación de los pesos, y por lo tanto, una modificación de los esfuerzos a los que está sometido el equipo.

De esta manera, el programa estará constituido por un programa principal y dos subrutinas. Una de las cuales, la subrutina ANCLA, determinará el número y diámetro de las anclas, el criterio a seguir es el de colocar el número máximo de anclas con un diámetro mínimo de 32 mm y un diámetro máximo de 64 mm. Mientras que la otra subrutina, APROX, sólo ajustará las dimensiones calculadas a la dimensión comercial inmediata superior.

6.3.1. Función del Programa Principal y Subrutinas

El programa principal para el diseño del faldón, determinará el espesor del faldón, las dimensiones del aro base y las dimensiones del aro de compresión. Mientras que la subrutina ANCLA determinará el número, espaciado y diámetro de las anclas. La subrutina APROX ajustará las dimensiones calculadas. Los diagramas de flujo correspondientes se muestran en las figuras (6.8), (6.9) y (6.10).

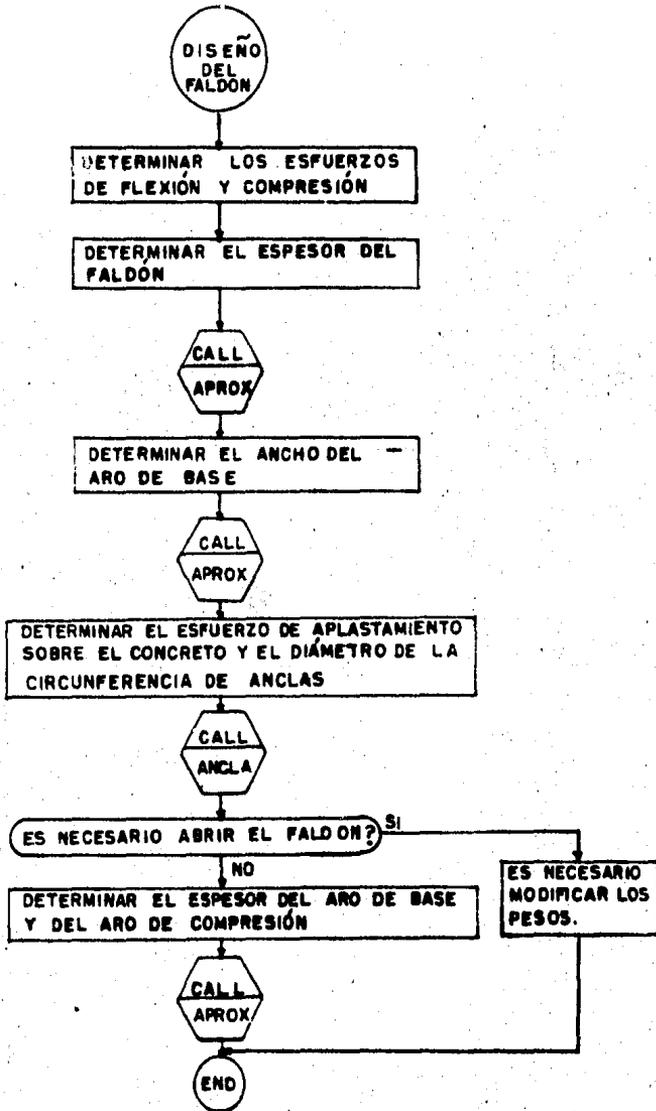


FIG. 6.8 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL PARA EL DISEÑO DEL FALDÓN

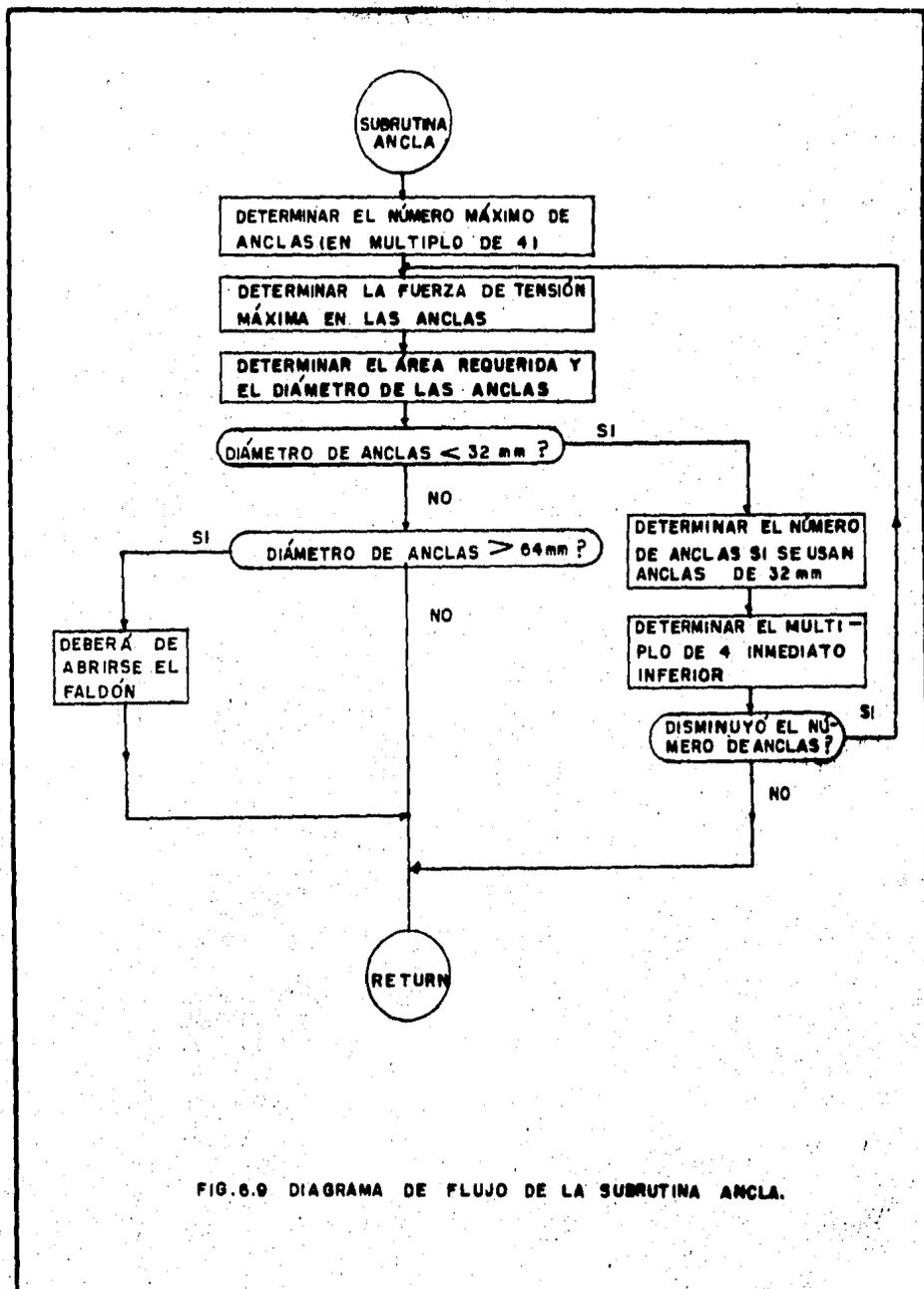


FIG. 6.9 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA ANCLA.

7. INTEGRACION DEL PROGRAMA Y ANALISIS DE RESULTADOS

7.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presenta la configuración final del programa, los alcances del programa, el análisis de resultados y finalmente un análisis económico del programa.

Para llevar a cabo el ensamble de los subprogramas, expuestos en los últimos cinco capítulos, se vio la necesidad de crear tres nuevas subrutinas: la subrutina *VERTI*, la subrutina *DIAMET* y la subrutina *CLASB*.

La subrutina *VERTI* tiene por objeto llevar a cabo la lectura de los datos requeridos del programa. La subrutina --- *DIAMET* determina el diámetro interior, el diámetro exterior y el diámetro con aislamiento de cada sección para llevar a cabo los análisis por viento y por sismo del equipo. Mientras que en la subrutina *CLASB* se determina la clase y rango de las boquillas y registros que deberán usarse en el equipo.

En la fig. 7.1, se muestra un macrodiagrama de flujo del programa, en el cual se muestra la configuración final del programa. En esta figura se señala únicamente la interrelación de los subprogramas y sus subrutinas correspondientes, para mayor detalle pueden consultarse los diagramas de flujo de cada subprograma expuestos anteriormente.

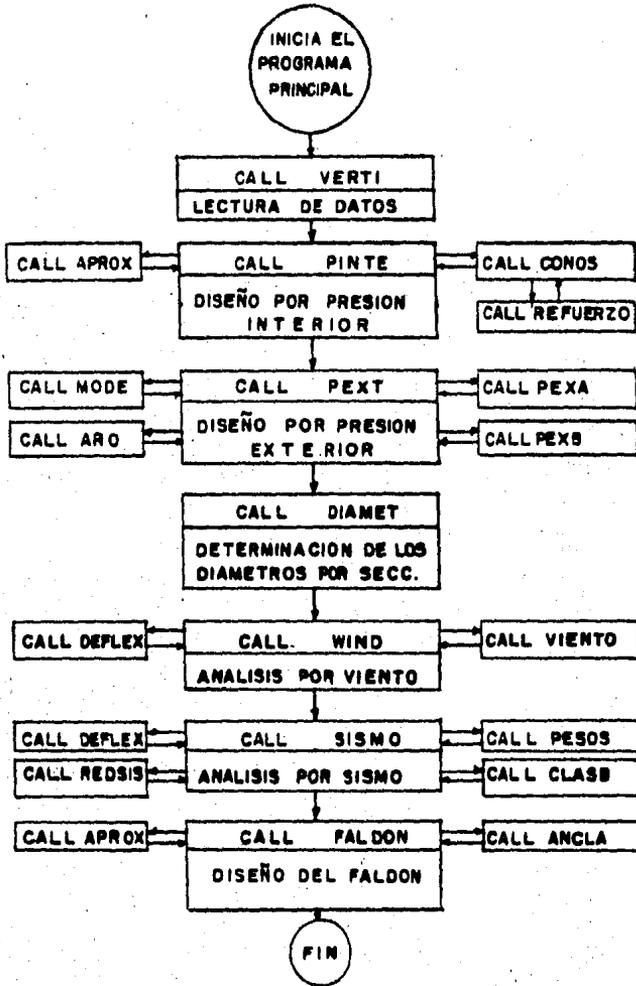


FIG. 7.1 MACRODIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PARA EL DISEÑO MECANICO DE TORRES DE PROCESO.

7.2 ALCANCES

Los alcances de este programa para el cálculo de una -- Torre de Proceso de una o dos secciones, con cabezas abombadas (torisféricas, elípticas o hemisféricas) y soportada con un faldón recto o cónico son:

- a). Espesores de las cabezas, cascarones, del cono y del faldón
- b). Presión máxima permisible de trabajo que soporta el equipo.
- c). Presión de la prueba hidrostática a que será sometido el equipo.
- d). Rango de presiones en boquillas y registros.
- e). Fuerzas por viento en cada sección.
- f). Fuerzas sísmicas en cada sección.
- g). Peso de operación a la línea de base y a la línea de tangencia inferior.
- h). Análisis estático por efecto de sismo a la línea de tangencia inferior y a la línea de base.
- i). Análisis estático por efectos de viento a la línea de tangencia y a la línea de base.
- j). Anclaje del equipo para resistir los efectos del viento o de un sismo (número y diámetro de las anclas, dimensiones del aro de base y del aro de compresión).
- k). Cálculo de deflexiones del equipo por efectos de sismo o de viento.

7.3 ANALISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados del programa, se llevó a cabo un análisis comparativo entre los resultados obtenidos haciendo uso del programa y los resultados obtenidos anteriormente en el Departamento de Ingeniería de Recipientes del I.M.P.

Para llevar a cabo este análisis, se probaron 4 equipos -- de diferentes características. Las principales variaciones entre los resultados obtenidos por ambas alternativas radican principalmente en el cálculo de pesos y del anclaje del equipo. En el cálculo de espesores por presión interior y por presión exterior no se encontraron variaciones apreciables, debido a que en el cálculo de éstos, en ambas alternativas, se hace uso de las mismas fórmulas.

En la Tabla VII.1, se muestran los pesos obtenidos en ambas alternativas, además se muestra el porcentaje de variación que existe entre ambas. Los porcentajes de diferencia, ya sean éstos positivos o negativos, se deben a:

1. Que el cálculo de pesos de cascarones y cabezas en el programa se lleva a cabo mediante el uso de fórmulas, mientras que en el cálculo manual se hace uso de tablas.
2. El programa fue realizado bajo un sólo criterio, mientras que los cálculos de los equipos, efectuados anteriormente, se llevaron a cabo bajo diferentes criterios.

En la Tabla VII.2, se muestran los resultados obtenidos en el diseño del soporte del equipo.

Como puede observarse, en la Tabla VII.2, existen algunas diferencias en el cálculo del diámetro y número de las anclas en ambas alternativas. Estas diferencias se deben fundamentalmente a los criterios de diseño utilizados. Esto es, el anclaje del equipo puede ser diseñado de acuerdo a dos criterios de diseño, completamente diferentes entre sí, los cuales son:

- 1). Colocar el menor número de anclas con un diámetro de anclas grande.
- 2). Colocar el mayor número de anclas para obtener el menor diámetro de anclas posible.

Siguiendo cualquiera de estos dos criterios podemos diseñar adecuadamente el anclaje del equipo, aunque sus soluciones sean completamente diferentes. De esta manera, como puede verse en la Tabla VII.2, el segundo criterio es el seguido por el programa.

Concluyendo, podemos decir que los resultados obtenidos haciendo uso del programa son adecuados y lo bastante confiables para poder ser usados en el Departamento de Ingeniería de Recipientes.

7.4 ANALISIS ECONOMICO

Para llevar a cabo el análisis económico de este programa, se hará un desglose de los costes en que se incurren para llevar a cabo el diseño de un equipo haciendo uso del programa y los costes de diseñar, el mismo equipo, manualmente.

TABLA VII.1. COMPARACION DE PESOS

EQUIPO	CONTRA.	ACERO AL CARB.			AISLAMIENTO			LIQUIDO			PLATOS			PROTECC. C. INCEN.			OPERACION		
		CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.
DA-305	1212	87.49	66.00	-2.25	3.8	2.43	-56.3	21.38	28.16	24.0	3.20	3.28	2.40	18.16	20.35	10.7	122.01	126.55	5.1
DA-301	1228	14.93	13.59	-9.86	0.27	0.22	-22.7	11.64	10.87	-7.0	0.50	0.51	1.90	11.56	12.24	5.5	41.62	40.07	-3.8
DA-405	1229	16.69	16.75	0.35	0.35	0.35	0.0	7.963	7.78	-2.3	1.18	1.33	11.2	8.25	8.30	0.6	36.83	36.94	0.26
DA-310	1228	17.44	17.05	-2.03	0.32	0.32	0.0	14.42	11.26	-26.0	1.42	0.58	14.40	12.98	13.74	5.6	49.80	45.97	-8.3

*NOTA : LOS PESOS ESTAN DADOS EN TONELADAS

TABLA VII.2. COMPARACION DE RESULTADOS DEL DISEÑO DEL SOPORTE DEL EQUIPO

EQUIPO	CONTRA.	ESPESOR DEL FALDON (MM.)		DIAMETRO DE ANCLAS (MM.)		NUMERO DE ANCLAS	
		CALCULO	PROGR.	CALCULO	PROGRAMA	CALCULO	PROGRAMA
DA-305	1212	25.4	31.75	57.5	51.0	40	52
DA-301	1228	9.52	9.52	38.0	38.0	12	8
DA-405	1229	9.52	9.52	51.0	38.0	12	20
DA-310	1228	9.52	9.52	44.0	38.0	16	16

TABLA VII.1. COMPARACION DE PESOS

EQUIPO	CONTRA.	ACERO AL CARB.			AISLAMIENTO			LIQUIDO			PLATOS			PROTECC. C. INCEN.			OPERACION		
		CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.	CALC.	PROG.	PORC.
DA-305	1212	67.49	66.00	-2.25	3.8	2.43	-56.3	21.38	26.16	24.0	3.20	3.28	2.40	16.16	20.35	10.7	122.01	128.65	6.1
DA-301	1228	14.93	13.59	-9.66	0.27	0.22	-22.7	11.64	10.67	-7.0	0.50	0.51	1.90	11.56	12.24	5.5	41.62	40.07	-3.8
DA-405	1229	16.69	16.75	0.35	0.35	0.35	0.0	7.963	7.78	-2.3	1.18	1.33	11.2	8.25	8.30	0.6	36.83	36.94	0.29
DA-310	1228	17.44	17.05	-2.03	0.32	0.32	0.0	14.42	11.26	-28.0	1.42	0.58	14.40	12.86	13.74	5.6	49.80	45.97	-8.3

* NOTA : LOS PESOS ESTAN DADOS EN TONELADAS

TABLA VII.2. COMPARACION DE RESULTADOS DEL DISEÑO DEL SOPORTE DEL EQUIPO

EQUIPO	CONTRA.	ESPOSOR DEL PALDON (MM.)		DIAMETRO DE ANCLAS (MM.)		NUMERO DE ANCLAS	
		CALCULO	PROGR.	CALCULO	PROGRAMA	CALCULO	PROGRAMA
DA-305	1212	25.4	31.75	57.5	51.0	40	52
DA-301	1228	9.52	9.52	38.0	38.0	12	8
DA-405	1229	9.52	9.52	51.0	38.0	12	20
DA-310	1228	9.52	9.52	44.0	38.0	16	16

7.4.1 Costo de Diseñar un Equipo por Computadora

Para diseñar un equipo mediante el uso del programa de computadora desarrollado en esta tesis, se deben considerar las siguientes etapas:

- a). Tiempo empleado por el ingeniero diseñador en
1. Analizar y codificar los datos requeridos. Tiempo promedio empleado 30 minutos.
 2. Perforación de datos requeridos del programa. Tiempo promedio empleado 10 minutos.
 3. Análisis de resultados. Tiempo promedio empleado 45 minutos.
- b). Tiempo de máquina empleado. Tiempo promedio empleado por la máquina en calcular un equipo, 8 segundos.

Así, el ingeniero diseñador empleará una hora y 25 minutos, lo cual a un sueldo anual de \$ 1,691,051.56, tendrá un costo aproximado de \$ 1,143.76. Mientras que el costo de máquina, para una Computadora UNIVAC 1100, es de \$ 110.00 por 8 segundos de proceso. Por lo tanto, el costo aproximado de diseñar un equipo es de \$ 1,253.76.

7.4.2 Costo de un Equipo Calculado Manualmente

Este costo estará constituido en su totalidad por el tiempo que emplea el ingeniero diseñador en el cálculo del equipo. Así, el tiempo promedio para diseñar un equipo es de 36 horas. Lo cual a un costo de \$ 1,006.51 por hora empleada por el ingeniero diseñador tendrá un costo por equipo de \$36234.67.

7.4.3 Comportamiento del Costo Inicial de las Dos Alternativas.

Como se puede observar, en los dos incisos anteriores, - existe un gran ahorro económico y de tiempo utilizando el -- programa de computadora. Sin embargo, existe otro factor muy -- importante el costo inicial.

El costo inicial al diseñar un equipo manualmente puede considerarse nulo, mientras que el costo inicial del programa, el cual consiste en el tiempo empleado en el desarrollo del - programa, es de alrededor de \$ 224,557.00. Esto quiere decir - que si sólo se hubiera hecho el programa para calcular un -- sólo equipo el costo sería excesivamente elevado, pero como el programa fue realizado con el propósito de calcular una gran - cantidad de equipos, todos aquellos que se encuentren dentro - de los alcances del programa, el costo por equipo se irá hacien - do menor conforme se vayan calculando mayor número de equipos.

El comportamiento de los costos por diseñar n equipos por ambas alternativas puede observarse en la fig.7.2. Debe - notarse que para un número muy elevado de equipos, el costo -- por equipo, estará únicamente constituido por el costo de má-- quina y el costo del ingeniero diseñador.

Concluyendo, aunque la inversión inicial, para llevar a cabo el programa, fue muy alta estará plenamente justificada -- si por lo menos se diseñan 3 equipos haciendo uso del programa. Ya que de esta manera se tendrá un ahorro de \$ 35,597.91 - al calcular 3 equipos por medio del programa, en relación al - cálculo manual. De esta forma, podemos decir que la inversión - inicial, efectuada para el desarrollo del programa, está plena - mente justificada.

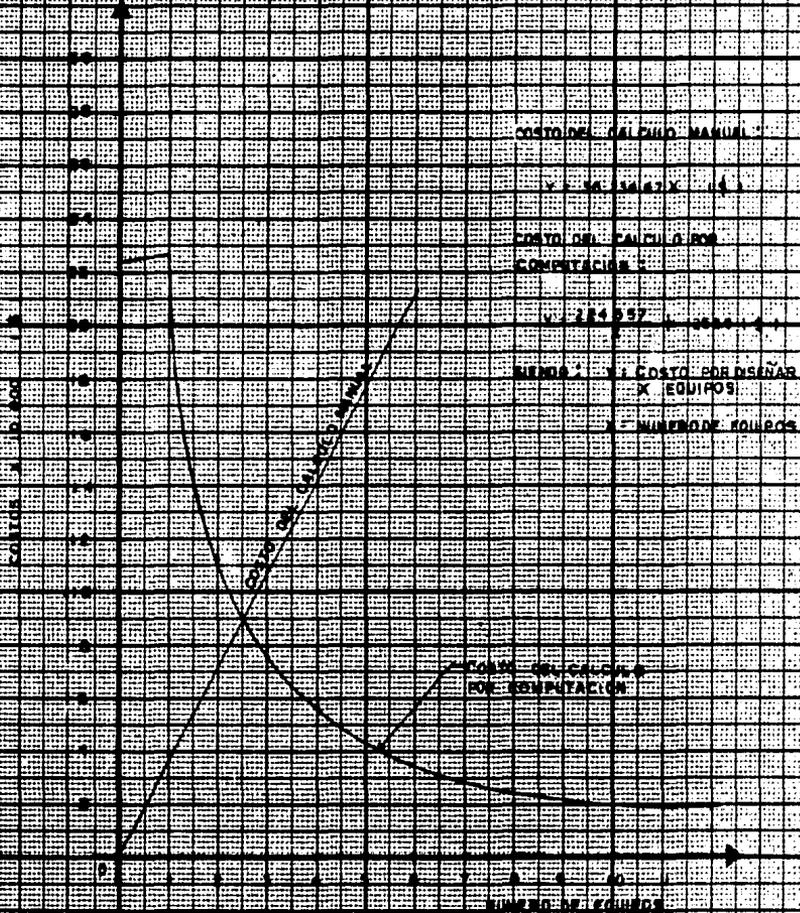


GRÁFICO COMPARATIVO DE COSTOS DEL CALCULO MANUAL Y CALCULO POR COMPUTACION

CONCLUSIONES

1. El uso del programa de computadora desarrollado en este trabajo, para el diseño mecánico de Torres de Proceso, traerá consigo un considerable ahorro económico, así como también un gran ahorro de tiempo. Ya que anteriormente se requería de aproximadamente de 36 horas para el diseño de un equipo. Actualmente, con la ayuda del programa de computadora, se estima que una torre será diseñada en aproximadamente una hora y 25 minutos.
2. Haciendo uso del programa, se tendrá la opción de diseñar un equipo con varias alternativas de material, presión y/o temperatura y poder seleccionar la mejor alternativa. Esto se debe al poco tiempo que tomaría el diseño del equipo.
3. El uso del programa traerá una gran homogenización y exactitud en los cálculos realizados. Lo cual se reflejará en una gran homogenización en los equipos diseñados.
4. Por la forma que fue escrito el programa se podrán hacer mejoras o modificaciones a los criterios de diseño seguidos en cada etapa. Este es, podrá modificarse cualquier etapa de diseño sin modificar en modo alguno a las demás.
5. El programa fue escrito en forma conversacional. Lo cual trae consigo la ventaja que la introducción de los datos requeridos del programa pueda efectuarse de manera sencilla.

lla y rápida, reduciendo de esta manera la posibilidad de cometer errores.

La introducción de datos en forma conversacional consiste en ir introduciendo los datos al programa conforme la máquina los va pidiendo. Las preguntas y datos requeridos por el programa pueden ser consultados en el Apéndice A.

6. El programa de computadora será de gran ayuda al Departamento de Ingeniería de Recipientes del I.H.P.

BIBLIOGRAFIA

1. **ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, UNFIRED PRESSURE VESSELS. SECCION VIII DE LOS CODIGOS DE LA SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIEROS MECANICOS.**
2. **COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA C.F.E., MEXICO D.F., 1981**
3. **I. ORGANICK, ELLIOT. FORTRAN IV. FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO. E. U. A., 1972**
4. **A. NASH, WILLIAM. THEORY AND PROBLEMS OF STRENGTH OF MATERIALS. Mc. GRAW-HILL, NEW YORK. 1957.**
5. **E. BROWNEL, LOYD AND H. YOUNG, EDWIN. EQUIPAMENT DESIGN. JOHN WILEY & SONS INC., NEW YORK, 1959.**
6. **H. HABIE, HAMILTON Y W. OCVIK, FRED. MECANISMOS Y DINAMICA DE MAQUINARIA. LINUSA, MEXICO, 1978.**

APENDICE A

BRUN DA-301, 19351/CA BREV. EABE, 1, 50
DE ILLIGAL CHARACTER

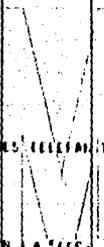
WKT LALCFCL, ID. LECTURA

.....
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
DIVISION INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE RECIPIENTES
DISEÑO DE TORRES DE PROCESO
.....

- RECIBIR LA FECHA
- RECIBIR LA CLAVE DEL LIQUIDO
- RECIBIR EL TIPO DE DEFECTO
- RECIBIR EL NUMERO DE COCHINATO
- RECIBIR EL NOMBRE DEL INGENIERO DISEÑADOR

-----NOTA TODAS LAS UNIDADES DEBEFAN TENERSE EN EL SISTEMA METRICO

- NUMERO DE SECCIONES (INCLUYA EL FALCON)
- DIAMETRO Y LONGITUD DE LA SECC. 1
- NUMERO DE BOCANAS Y NUMERO DE REGISTROS EN LA SECC. 1
- DIAMETRO DE LAS BOCANAS DE LA SECC. 1
- ESPESOR DE ASAMBLAJE DE LA SECC. 1
- DIAMETRO Y LONGITUD DE LA SECC. 2
- NUMERO DE BOCANAS Y NUMERO DE REGISTROS EN LA SECC. 2
- DIAMETRO DE LAS BOCANAS DE LA SECC. 2
- DIAMETRO DE LOS REGISTROS DE LA SECC. 2
- NUMERO DE PLATOS Y ALTURA DEL NIVEL NORMAL DEL LIQUIDO EN LA SECC. 2
- ESPESOR DE ASAMBLAJE DE LA SECC. 3
- DIAMETRO Y LONGITUD DE LA SECC. 3
- PRESENTE UNA REVELACION CONICA SI O NO
- CANTIDAD QUE SE CASCARA LA ALTURA DEL CONO
- RECIBIR LA ALTURA DEL CONO
- NUMERO DE BOCANAS Y NUMERO DE REGISTROS EN LA SECC. 3
- DIAMETRO DE LAS BOCANAS DE LA SECC. 3
- NUMERO DE PLATOS Y ALTURA DEL NIVEL NORMAL DEL LIQUIDO EN LA SECC. 3
- ESPESOR DE ASAMBLAJE DE LA SECC. 4
- DIAMETRO Y LONGITUD DE LA SECC. 4
- NUMERO DE BOCANAS Y NUMERO DE REGISTROS EN LA SECC. 4
- DIAMETRO DE LAS BOCANAS DE LA SECC. 4
- DIAMETRO DE LOS REGISTROS DE LA SECC. 4
- NUMERO DE PLATOS Y ALTURA DEL NIVEL NORMAL DEL LIQUIDO EN LA SECC. 4
- ESPESOR DE ASAMBLAJE DE LA SECC. 4
- PRESENTE, TEMPERATURA Y LONGITUD DEL CASCARON NO. 1 PARA EL DISEÑO DEL INSULACION INTERIOR Y PRESION EXTERIOR
- PRESENTE, TEMPERATURA Y LONGITUD DEL CASCARON NO. 2 PARA EL DISEÑO DEL INSULACION INTERIOR Y PRESION EXTERIOR
- PRESENTE, TEMPERATURA Y LONGITUD DEL CASCARON NO. 3 PARA EL DISEÑO DEL INSULACION INTERIOR Y PRESION EXTERIOR



- 1 SA-285-C 1 SA-304-GR.70 3 SA-516-GR.70
- CORROSION, EFIC. LONGITUDINAL Y EFIC. CIRCUNFERENCIAL
- PROTECCION EXTERIOR DE SEGURIDAD
- DENSIDAD DEL LIGAMIENTO Y DEL AISLAMIENTO (EN L.P./CM²)
- SELECCIONA EL TIPO DE CUBIERTAS
- 1 RECTANGULAR, 2 ELIPTICA, 3 SEMIESFERICA
- SELECCIONA EL TIPO DE FALDON
- 1 RECTO, 2 CONICO
- SELECCIONA LA ZONA SISMICA
- 1 ZONA A, 2 ZONA B, 3 ZONA C, 4 ZONA D
- SELECCIONA LA ZONA DEL CASO (SEGUN LA REGIONALIZACION LOCAL - ESTIPULADA EN EL MANUAL DE DISEÑO DE LA C.A.F.E.)
- SELECCIONA EL FACTOR DE TOPOGRAFIA
- 1 ZONA MUY ACCIDENTADA (EL CENTRO DE CIUDADES MUY IMPORTANTES)
- 2 ZONAS MUNICIPALES, URBES, BARRIOS RESIDENCIALES O INDUSTRIALES.
- 3 CAMPO ABIERTO, TERRENO PLANO
- 4 PROMONTORIOS
- ESPECIFICA EL ESPESOR MINIMO PERMITIDO EN EL CASERON Y PARTES DEL EQUIPO
- ESPECIFICA EL ESPESOR MINIMO PERMITIDO EN EL FALDON DEL EQUIPO

.....

INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
 DIVISION INGENIERIA
 DEPARTAMENTO DE DISEÑOS DE RECIPIENTES
 DISEÑO DE TORRE DE PROCESO

.....

CALCULO DE SIENGA PARA LUIS FOMUNDO
 EQUIPO DE SEPARADOR DE ACEITE DE CARBA
 CLAVE UA-21
 CONTRATO 1-12.8
 FECHA 23/11/68

DATOS DE DISEÑO

NO. SEC.	TIPO DE CUBIERTA	TIPO MATERIAL	ESPESOR PARED FIS.		TEM. DIS.	EAM. SEC.	CORR.	LONG.		A-17
			(INC./P.2)	(INC./P.2)				(MM)	(MM)	
1	ELIPTICA	SA-304-GR.70	1230.66	1.40	140.00	2430.00	3.0	85	3189.0	
2	ELIPTICA	SA-304-GR.70	1230.66	1.40	140.00	1224.00	3.0	85	756.0	

TALLERES
 DISEÑO Y CONSTRUCCION INDUSTRIAL

ESPEJOR DEL CONO 10. MM (.375")
ALTIMA DEL CONO 100. MM (3.9370")

ANGULO DEL CONO 25. GRADOS

SE FUEZIERE REFUERZO EN LA UNION CONO CILINDRO MENOR

IMENSION DEL REFUERZO 10. MM LOCALIZADO A 25. MM

SECC. INFERIOR SECC. SUPERIOR

ESPEJOR DE LA CASCARON 10. MM (.375") 10. MM (.375")

ESPEJOR DE LA CABEZA 10. MM (.375") 10. MM (.375")

•• FLEXION INTERNA DE DISEÑO $\sigma = 1.5 \cdot F = 3.05 \text{ N/CM}^2$ ••

•• RESULTADOS LÍMITE POR FLEXION INTERNA ••

SECCION NO. 1
CON UN AJO DE REFUERZO
DE LAS SIGUIENTES DIMENSIONES
BASE DEL AJO 10MM (5/8)"
ALTIMA DEL AJO 130MM (5.1181)"

SECCION NO. 2
CON UN AJO DE REFUERZO
DE LAS SIGUIENTES DIMENSIONES
BASE DEL AJO 10MM (5/8)"
ALTIMA DEL AJO 130MM (5.1181)"

SECCION 1

PRELISION EXT. ADMISIBIL 1.122MG/CM**2
 ESPESOR USACO 13. MM
 SE REQUIEREN APOD. ATRESADORES (ANT. 1.0
 ESPACIADOS A CADA 3752.65 MM. A PARTIR DE LA LINEA DE TANG.

** SE REQUIEREN SITUACIONES COMEAS **

DIMENSIONES DEL LOBO ESPESOR = 13.0
 ALTURA = 1000.0
 PRELISION EXTERIOR ADMISIBIL = 4.099 KG/CM**2

** NO SE REQUIEREN APOD. ATRESADORES EN EL LOBO **

SECCION 2
 PRELISION EXT. ADMISIBIL 1.950MG/CM**2
 ESPESOR USACO 13. MM
 SE REQUIEREN APOD. ATRESADORES (ANT. 1.0
 ESPACIADOS A CADA 3964.0 MM. A PARTIR DE LA LINEA DE TANG.
 PRELISION ADMISIBIL EN CARIZA INF. 3.21 KG/CM**2
 ESPESOR USACO 13.0 MM
 PRELISION ADMISIBIL EN CARIZA SUP. 7.3 KG/CM**2
 ESPESOR USACO 13.0 MM

RESUMEN ANALITICO POR VILDT

CALCULO DE DEPLECIONES EN UNA VIGA EN CANTILVER
 SUJETA A CARGAS CONCENTRADAS Y MOMENTO DE INERCIA VARIABLE
 (MUYODO NUMERICO DE NEMMP93)

SECCION	DEFLEXION MM
1	.1
2	.2
3	.4
4	.6
5	.7

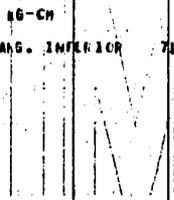
6 .6
 7 1.0
 8 1.3

*** RESUMEN DE RESULTADOS ***

SECCION NO.	ESPESOR (MM)	F. DE VIENTO (KG)
1	13.04	616.
2	13.06	547.
3	13.06	280.
4	13.06	494.

MOMENTO DE VULNER. 1095967.0 KG-CM

MOMENTO POR VIENTO A LÍNEA DE TANG. INFERIOR 706597.0 KG-CM



RESULTADOS DISEÑO POR VIENTO

PRESION DE TRABAJO PERMISIBLE Y PRESION DE LA FUERZA HIDROSTATICA

MAXIMA PRESION ADMISIBLE DE TRABAJO 116.39 PSI (8.11 KG/CM²) GOBIERNA CASCARON INFERIOR

PRESION DE LA FUERZA HIDROSTATICA 231.07 PSI (16.26 KG/CM²) GOBIERNA CASCARON SUPERIOR

PRESION DE TRABAJO PERMISIBLE DE EQUILLAS 17.947 KG/CM²

SE USARAN EQUILLAS DE CLASE 10.0 KG/CM²

•• EL ESPEJOR CALCULADO ES ADECUADO ••

 * 13. MM. SELL *

•• RESUMEN DE RESULTADOS ••

SECCION	MP (MG)	PS (MG)	MI (CM)
1	21221.8	1617.6	351.25
2	18585.3	2392.1	435.75
3	2553.9	609.3	1283.00
4	4594.0	1629.7	1679.40

PESO TOTAL DE OPERACION 40075.0MG
 MOMENTO A LA LINEA DE TANG. INF. 246775.16 MG-CM

PARAMETROS USADOS EN LA REVISION
 DE ESFUERZOS

DIAMETRO INTERIOR	243.01	CM
L. ENTRE L. DE TANG.	1243.36	CM
CASCARON USADO	.05	CM
DIAM. INT. CORN.	244.63	CM
DIAM. EXT. CORN.	246.34	CM
PESO L. DE TANG.	18773.19	MG
AREA CORN. HA	734.25	CM ²
ESF. DE COMPRESION	25.55	KG/CM ²
MOMENTO POR VUELTO	71656.95	MG-CM
MOMENTO POR DISPO	246775.16	MG-CM
MODULO DE BEND. CORN.	44884.22	CM ³

ANALISIS DE ESFUERZOS

		-118-	
EN LA LINEA DE TANGENCIA INTERIOR			
		LADO DE TENSION (MG/CM ²)	LADO DE COMPRESION (MG/CM ²)
1	ESFUERZO DE FLEXION	54.79	-54.79
2	ESFUERZO DE COMPRESION	-1.10	-1.10
3	ESF. DE COMP. Y FLEX.	53.69	-54.79
4	ESF. DE PRESION AXIAL	522.63	522.63
5	ESF. AXIAL NETO	522.67	442.16
6	ESF. TANGENCIAL	1045.25	1045.25
7	0.3 ESF. AXIAL NETO	-165.62	-132.45
8	ESFUERZO TANG. REAL	179.63	932.63
9	ESF. PERMISSIBLE	1046.66	1046.66
*** RESUMEN DE PESOS ***			
10	ACERO AL CARBONO	KG.	13390
11	ISOLAMIENTO	KG.	520
12	LICUADO	KG.	10670
13	PLATOS	KG.	510
14	PROTECCION CONTRA INCENDIOS	KG.	12240
15	OTROS	KG.	2640
16	TOTAL EN OPERACION	KG.	46070

CASO DEL FALLO			

17	PESO A LA LINEA DE LA E	KG.	46074.999
18	CIRCUNFERENCIA MEDIA	CM.	119.491
19	COMPRESION SOBRE EL FALLO	KG/CM	19.810
20	MANTIDO POR VIENTO A LOS	KG/CM	149517.844

MOMENTO POR SISMO A L.L.	63437.375	KG-LM
ANLA MEDIA	47292.610	CM ²
F. FLEXION EN FIN.	354.135	KG/CM
LUMBRACION SOBRE FIN.	59.660	KG/CM
F. Y U. SOBRE FIN.	214.695	KG/CM
ESF. PERMISIBLE FIN.	732.661	KG/CM ²
FALSO CALCULADO	.261	CM.
FALSO USADO	.952	CM.
ESF. EN COMP. EN EL CONC.	92.725	KG/CM ²
ARO BASE CALCULADO	12.710	CM.
ARO BASE USADO	12.710	CM.
ESF. DE APLASTAMIENTO	3.610	KG/CM ²
NO. DE ANCLAS	8.000	
ESFUERO PERM. ANCLAS	944.200	KG/CM ²
CARGA ANCLAS	7567.679	KG.
ANLA MEDIANA	7.380	CM ²
ANLA USADA	8.323	CM ²

SE USAN 8 ANCLAS DE 30.00 MM. DE DIAMETRO
 IGUALMENTE ESPACIADAS SOBRE LA CIRCUNFERENCIA DE ANCLAS DE 2500.0 MM DE DIAMETRO

DIMENSIONES DEL PLATO DE BASE 1.7 x 2.1 CM.

DIMENSIONES DEL PLATO DE COMPRESION 1.0 x 1.3 CM.

NOTA
 CONTROL MEDIO - IV CONTROL MEDIO