

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**DISEÑO MECANICO DE COLUMNAS DE DESTILACION**

**IGNACIO OREJEL AMEZCUA**

**INGENIERIA QUIMICA**

**1 9 8 0**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## I N D I C E

	pág.
<b>ANTECEDENTE</b>	<b>1</b>
<b>I. ASPECTOS GENERALES DE DESTILACION</b>	
1. Métodos de fraccionación	5
<b>II. TORRES</b>	
1. Consideraciones básicas	22
2. Equipos de platos	
2.1 Datos para el diseño	66
2.2 Procedimiento de cálculo	69
2.3 Aproximación del diámetro de columna	76
3. Equipos empacados	
3.1 Altura de la unidad de transferencia	118
3.2 Platos de soporte y distribución	121
<b>III. MATERIALES DE CONSTRUCCION</b>	
1. En presencia de compuestos inorgánicos	128
2. En presencia de compuestos orgánicos	130
3. En presencia de derivados del petróleo	130
<b>IV. DISEÑO MECANICO DE TORRES ELEVADAS</b>	
1. Tapa superior, envolvente, tapa inferior	138

	pág.
2. Cargas por viento	159
3. Fuerzas sísmicas	162
<b>V. DISEÑO DE CIMENTACIONES</b>	<b>176</b>
1. Tamaño de la zapata	196
1.1 Diseño de la zapata	198
<b>VI. COSTOS</b>	
1. Factor e índice de costos	201
2. Amortización	205
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>210</b>

\*

En la industria química la torre de destilación forma parte integral del diseño para un proceso industrial; en muchos casos, la integración a la totalidad de la operación es como una -- parte auxiliar dentro del proceso mismo, pero, en otras, como en el caso de la industria petrolera, es parte fundamental en las operaciones de refinación y transformación de los derivados primarios básicos del petróleo.

La operación específica que el equipo puede realizar será toda aquella que dependa del contacto de un gas con un líquido en un número de etapas, variables, para lograr una separación deseada.

Al desarrollar el tema dentro del campo específico del diseño se busca presentar soluciones prácticas a un problema -- que, como en este caso, es general: el cálculo de un equipo de esta naturaleza.

Primeramente se incluye una descripción de la operación de destilación, con objeto de relacionar el tamaño que pueden tener los equipos con la aplicación y método de separación que se emplee.

En la parte referente a los equipos se enumeran las principales partes que constituyen una torre, ya que la especificación de los materiales de construcción de cada una de ellas y el peso que presentan, en el cálculo de la torre, será básica para llevar a cabo un diseño económico y útil. En relación a los dos tipos

\*\*

principales de torres, platos y empacadas, se incluyen sus características, ventajas y limitaciones.

Debido a que en la literatura especializada existe mayor información respecto de los equipos de platos, se tratarán en primer término, lo mismo que la especificación del diámetro de columna y espesor de plato, puesto que el número de estos significará un factor determinante en las condiciones de peso del equipo, al variar la clase de accesorios que requiera la operación como: balastras, perforaciones, cachuchas, etc. Asimismo se presenta la forma en que un cálculo de altura de unidad de transferencia aplicaría para un equipo empacado.

Como parte complementaria de este estudio y consecuencia de él se incluye un capítulo referente a los materiales de construcción, debido a que la gran mayoría de las torres que operan en instalaciones industriales se fabrican con placas metálicas. El propósito ha sido dar una información general sobre el tema y no aportar una visión exhaustiva de las particularidades y aplicación específica de cada uno de los materiales en la construcción de un determinado equipo.

Tomando en cuenta que gran parte de las torres de destilación son equipos de altura considerable, para poder realizar la separación, se incluyen las necesidades derivadas de la construcción de una torre con estas características, especificando la influencia que en cada una de las secciones tiene la presión de operación y los esfuerzos; se incluye, también, la estimación de la cimen-

\*\*\*

tación como parte integrante de un buen diseño.

Factor importante dentro de la planificación de instalaciones industriales es la consideración de los métodos, generales, para realizar aproximaciones de costos que el equipo tiene como parte integrante del proyecto mismo.

Por último, debo advertir que no pretendo haber agotado las formas de presentar y resolver este planteamiento. Al contrario, la extensión y complejidad de la operación, así como las -- particularidades de los distintos métodos y equipos han hecho necesaria la generalización en el tratamiento de los capítulos. No obstante, estoy convencido de la validez de mi punto de vista como una aportación al conocimiento del tema. Y si más adelante, alguien encuentra ideas útiles o referencias bibliográficas que le sirvan en su proceso de investigación me daré por satisfecho.

## ANTECEDENTE <sup>1</sup>

Cuando el término destilación fraccionada se usó originalmente, fué con el objeto de describir un proceso de separación, hasta donde fuese factible, de dos o más sustancias líquidas ( volátiles ) en sus componentes, haciendo que la mezcla se evaporase por medio de la aplicación de temperatura; posteriormente se condensaban los vapores de tal forma que se tuviesen fracciones con un punto de ebullición diferente, evaporando nuevamente esta mezcla para posteriormente separar y condensar de nueva cuenta los vapores con punto de ebullición similar; esta operación se repetía sucesivamente hasta el momento en que se obtenía el grado de separación deseado.

Un procedimiento como el anteriormente descrito se desarrolla ocasionalmente en el laboratorio, sin embargo es tedioso y representa una operación laboriosa cuya finalidad, en última instancia, es la de familiarizar al estudiante con características y propiedades de las sustancias volátiles. Para realizar este tipo de operación a nivel industrial se debe utilizar un equipo que elimine el trabajo y acorte el tiempo en que se realice la operación, permitiendo no solo la separación que se tiene por el método repetitivo, sino que obteniendo también rendimientos y pureza mayores de los esperados por el método iterativo.

Como cualquier otro tipo de industria rudimentaria la destilación fraccionada es un arte que se originó en el pasado

y como todo arte, se desarrolló por la gradual acumulación de conocimientos empíricos; es muy probable que el crecimiento de éste haya estado ligado a la destilación de bebidas alcohólicas, aún en la actualidad la palabra alambique, para muchos, es sinónimo del aparato empleado para la fabricación de ron, brandy u otro licor destilado. Se debe a Francia, como gran productor de brandy, el crédito por el desarrollo inicial de las modernas columnas de destilación.

La destilación fraccionada trabajó bajo el mismo peso y problemas que toda industria nacida de esta manera; más aún, el conocimiento empírico lleva a una industria hasta un punto después del cual los avances son muy pequeños y espaciados, la ciencia viene en auxilio de este tipo de arte industrial para llevarlo adelante permitiéndole un avance mayor, teniendo así un máximo aprovechamiento y utilidad como operación industrial; ha sido la física química quien ha llevado desde el empirismo hasta las bases teóricas necesarias para que el estudio de los problemas de fraccionación sean algo relativamente simple.

Será posible separar una mezcla de líquidos volátiles por medio de destilación fraccionada, cuando la composición del vapor que proviene de la mezcla sea distinta a la de la mezcla misma, la separación es mucho más fácil a medida que las diferencias, antes descritas, entre las composiciones del vapor y el líquido sean mayores; aún cuando éstas sean pequeñas, las separaciones son factibles.

Para poder desarrollar los cálculos de destilación fraccionada, debe conocerse la relación entre las composiciones del vapor y líquido, en la mayoría de los casos, estas relaciones se obtienen de los datos concernientes a la composición del vapor que se encuentra en equilibrio con el líquido; tomando en cuenta esto deberá contarse con el suficiente conocimiento de las composiciones vapor-líquido en el equilibrio, para poder resolver el diseño de una torre de destilación en forma aceptable.

En la mayoría de los casos los estudios que llevan a la obtención de información, se basan en la composición del vapor en equilibrio con el líquido, sin embargo no es ésta una situación obligada, cualquier método que permita la producción de vapor, de composición distinta a la de la fase condensada, exista o no el equilibrio, puede ser utilizado para la separación. La mayor parte del equipo que existe basa su funcionamiento en el uso de la operación de evaporación y el equilibrio del vapor con el líquido es un buen criterio para obtener la separación.

Para obtener las composiciones vapor-líquido en el equilibrio, existen dos métodos:

- a) La determinación experimental de las composiciones en el equilibrio
- b) Las relaciones teóricas

R E F E R E N C I A S

1. Gilliland, Edwin R. *Elements of Fractional Distillation*, Mc Graw Hill, New York, 1959. Introducción.

## I. ASPECTOS GENERALES DE DESTILACIÓN

### 1. METODOS DE FRACCIONACION<sup>1</sup>

Existen varias formas en las que se puede llevar a cabo la fraccionación y como las más importantes se tienen:

- Destilación sucesiva de destilado y condensado
- Condensación fraccionada
- Rectificación

#### DESTILACION SUCESIVA

Una mezcla original se divide en destilado y residuo por medio de evaporación y estos, destilado y residuo, se destilan por separado produciendo a su vez destilado y residuo; las dos primeras fracciones se combinan nuevamente para continuar la destilación y separación. Repeticiones sucesivas de las operaciones descritas se efectúan hasta lograr, prácticamente, la separación total.

Este resulta ser un procedimiento excesivamente tedioso y cuyo resultado puede lograrse por otro método.

#### CONDENSACION FRACCIONADA

En lugar de realizar destilaciones parciales de un líquido para tener un destilado y residuo, el vapor puede condensar

se parcialmente obteniéndose un condensado y vapor residual. El resultado es similar al de la operación anterior y se puede tener una separación análoga efectuando una serie de evaporaciones y condensaciones parciales; de aquí que si ambas operaciones se combinan, destilación sucesiva y condensación fraccionada, la eficiencia se verá incrementada considerablemente.

### RECTIFICACION

Un equipo en el que pueda llevarse a cabo un intercambio directo de calor, condensación y evaporación se denomina torre rectificadora y al proceso rectificación.

El sistema que se muestra en la figura 1.1 reposa directamente sobre el cuerpo del rehervidor, la columna se divide en compartimientos por medio de platos perforados ( usando cachuchas o balastras ) con barrenos; cada uno de éstos cuenta con un tubo -- vertedor que descarga sobre una acumulación de líquido en el plato inferior, la capa de líquido está impedida de pasar a través de las perforaciones por el vapor que sube del compartimiento inferior; cualquier exceso de líquido fluye hacia abajo por medio del vertedor.

Cada uno de los compartimientos en este tipo de torres pueden ser considerados pequeños alambiques, en los que la -- fuente de calor es el vapor proveniente del plato inferior y el elemento de enfriamiento es el líquido que se encuentra en el plato superior; el intercambio de calor entre las burbujas de vapor y el lí

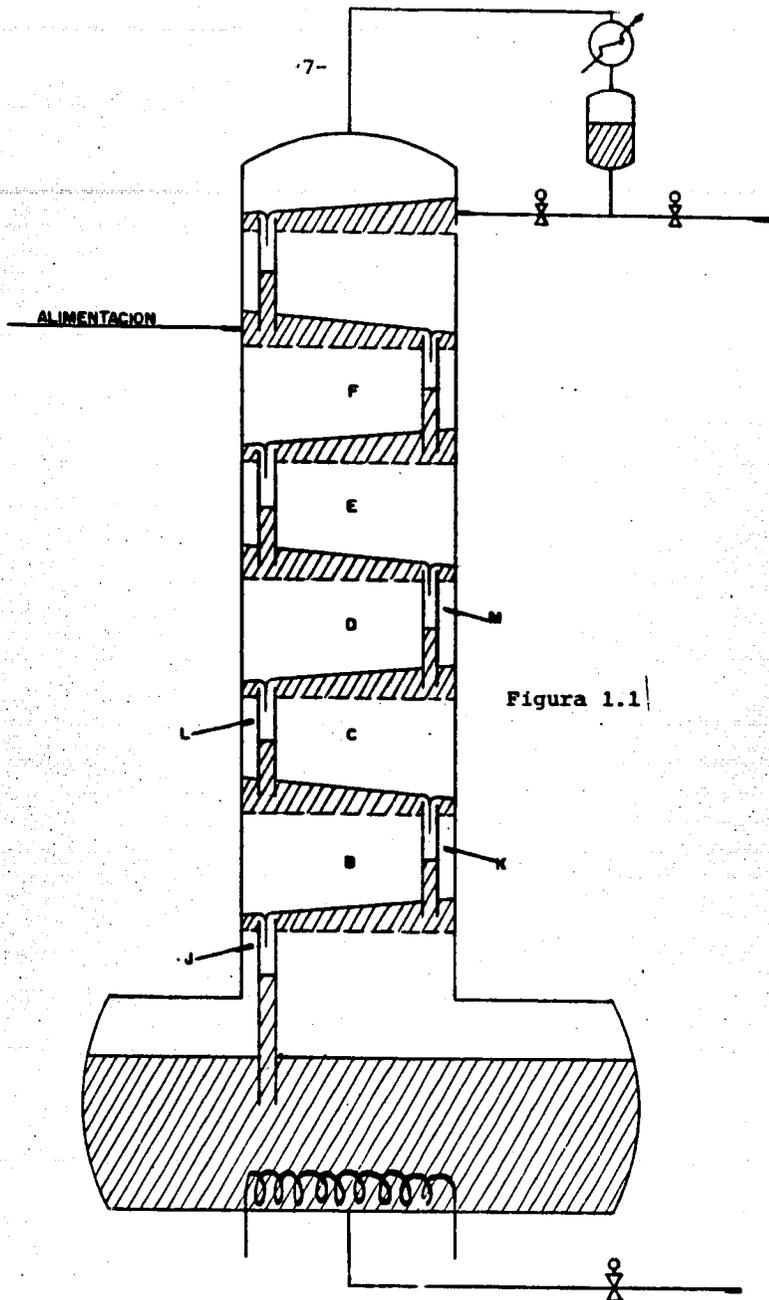


Figura 1.1

quido en el plato resulta del hecho que ambos no se encuentran en equilibrio, este intercambio se encuentra gobernado por los parámetros del mecanismo, común, de transferencia de masa; la velocidad de transferencia aumenta con la cantidad de área interfacial y de la turbulencia.

En estos casos se desea aproximarse lo más posible al equilibrio y los diseños del equipo para realizar una operación de esta naturaleza se efectúan de tal forma que ambas fases se encuentren en contacto íntimo, aún cuando se tiene presente el fenómeno de burbujeo; este procedimiento genera una gran cantidad de rocío y el intercambio existirá entre las pequeñas gotas que se forman y el vapor sobre el nivel del líquido, con la existencia de este fenómeno se tiene una mayor aproximación a la condición de equilibrio.

El procedimiento anteriormente descrito de contacto entre vapor y líquido a contracorriente, que se ha producido por condensación parcial del vapor, se le denomina rectificación; el resultado es comparable a una serie de redestilaciones sucesivas sin tener un consumo extra de energía, de aquí que exista analogía entre este método y la evaporación de efecto múltiple, sin embargo el resultado es únicamente el similar y no así el mecanismo por medio del cual se obtiene.

La totalidad de las columnas rectificadoras serán, por tanto, equipos de gran altura ya que a medida que el número de etapas, de intercambio, se incrementa se obtiene una separación mayor de los componentes que se desean aprovechar.

## DESTILACION EN LOTES

Cuando se tiene una cantidad considerable de material para proceso y su composición así como disponibilidad son razonablemente uniformes, se utilizará la operación continua; en estas condiciones el costo es menor que el de la destilación en lotes, hay casos en que debido a las características particulares se requiere del uso de una operación en lotes.

La operación por lotes, con rectificación implica:

- El cargar el rehervidor con el material a procesarse y su destilación hasta tener la cantidad requerida - del componente deseado, la composición de la fracción superior variará durante la operación y en forma usual se efectuarán un número de "cortes".
- Los "cortes" serán en algunos casos productos deseados, mientras que en otros serán fracciones intermedias que se reciclarán para su uso posterior en operaciones subsecuentes, sobre todo en el caso de querer obtener una mayor pureza en el producto y en el grado de separación

El equipo y método de operación serán similares para ambas formas de operar, ya sea por lotes o proceso continuo; sin embargo, las bases de cálculo varían y en el caso de lotes se tienen diseños específicos para casos simples o muy particulares.

## MEZCLAS BINARIAS

La manera en que estas mezclas pueden procesarse, en

la operación, puede ser:

- Sin rectificación
- Rectificación sin residencia
- Rectificación con residencia

#### RECTIFICACION CON RESIDENCIA

En general, un líquido al tener residencia en una columna rectificadora, cuando la destilación se realiza por lotes, no es recomendable; existe cierta ventaja cuando la columna opera a reflujo total ya que los platos de la parte superior se llenan de líquido rico en componentes más volátiles, de esta forma se extrae producto útil a una mayor velocidad, por un período de tiempo corto, posteriormente la columna se opera a reflujo total para reestablecer el gradiente de concentración.

Si este tipo de operación se lleva a cabo con mezclas multicomponentes, se tendrán resultados menos satisfactorios que los que se obtienen con mezclas binarias.

La figura 1.2 muestra esquemáticamente un equipo de esta naturaleza; en la práctica las torres utilizadas en esta operación serán de tamaño reducido, ya que no se requiere de numerosas tapas de contacto y su aplicación se reduce a mezclas muy particulares.

#### MEZCLAS MULTICOMPONENTES

Como mezclas que se pueden clasificar dentro de este

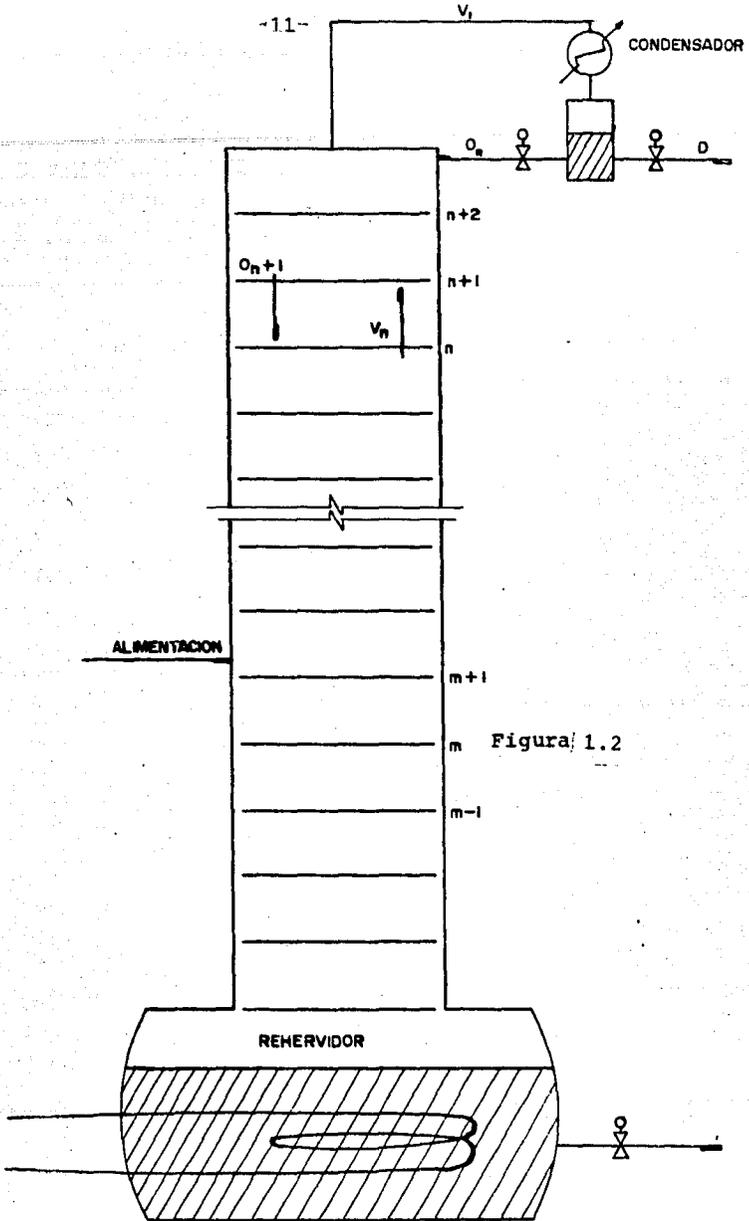


Figura 1.2

COLUMNA DE DESTILACION CONTINUA

grupo se encuentran las que contienen más de dos componentes en -- cantidades apreciables y su ocurrencia, dentro de la industria, es mayor que la de las mezclas puramente binarias; de la misma forma - que se destila una mezcla binaria puede hacerse con una multicomponentes, esto es, en operación continua o por lotes, en equipos empa<sub>ca</sub>dos o de platos.

#### DESTILACION AL VACIO

Con objeto de reducir la temperatura requerida para una operación de destilación se utilizan temperaturas reducidas ( resultado de la utilización del vacío ), este fenómeno se aprovecha - en la destilación de compuestos orgánicos, que normalmente sufrirían degradación térmica si fuesen tratados a presiones y temperatu--ras normales, al disminuir la descomposición térmica la baja temperatura modificará la volatilidad relativa o grado de separación.

Normalmente y con propósitos de diseño se usa como criterio básico el equilibrio vapor-líquido, la condición de equili<sub>br</sub>io entre ambos es una dinámica de cada sistema en particular.

#### DESTILACION AL VACIO CON VAPOR

Para presiones en el rango de 1 mm. de mercurio abso<sub>luto</sub>, la destilación se lleva a cabo de la misma manera que se realiza a presiones superiores y el problema se reduce a disminuir la caída de presión para el flujo del vapor a través del equipo; de es<sub>ta</sub> forma se pueden obtener temperaturas de destilación menores.

En este caso el vapor no condensa normalmente en los

y estos tienen únicamente el material orgánico de mayor punto de ebullición, el vapor actúa como vehículo inerte siendo fácilmente condensable y no necesitando pasar a través de la bomba de vacío; - en algunos casos el gradiente de temperatura, durante la operación, es tal que el vapor condensará en la parte superior, debiendo eliminarse ya que si éste se acumula en el plato interferirá con la fraccionación, o bien, si el agua recircula torre abajo, se evaporará - en los platos inferiores generando un ciclo de vapor, en la torre, que puede sobrecargar la unidad dificultando la operación.

#### DESTILACION AZEOTROPICA<sup>2</sup>

En la práctica se tienen mezclas que requieren separarse por razones de proceso y para las que los métodos de destilación normales no resultan efectivos debido a que:

- Se forman azeótropos
- La mezcla cuenta con una volatilidad relativamente excesivamente baja a lo largo de un amplio rango de concentraciones

En el primer caso la separación resulta imposible a menos que se encuentre la forma de evitar el azeótropo, en el segundo caso se tiene un consumo excesivo de calor y se requiere, además, de equipo especial.

Para un número considerable de estas mezclas ha sido posible modificar la volatilidad relativa de los componentes originales, agregando otro(s), y esta técnica puede resumirse en dos -

categorias:

- Destilación extractiva
- Destilación azeotrópica

Prácticamente la adición del componente que hace posible este tipo de separación se realiza en fase líquida, aún cuando es posible lograr esta modificación en fase vapor, principalmente cuando los equipos operan a elevadas presiones. Este componente por encontrarse en fase líquida altera el coeficiente de actividad de los diferentes componentes y al menos que éstos sean idénticos - en propiedades físicas y químicas, el porcentaje de cambio en los coeficientes de actividad será distinto para cada componente alterando así su volatilidad relativa.

Esta técnica es efectiva solamente cuando los componentes en la mezcla original no obedecen la ley de Raoult. En cualquier caso particular existen compuestos que resultan efectivos como agentes azeotrópicos o de destilación extractiva, la elección de alguno de estos dependerá de:

- La efectividad en modificar la volatilidad normal
- Las relaciones de solubilidad con el sistema
- El costo
- Estabilidad, volatilidad, corrosividad
- Facilidad de separarse de los componentes originales

En algunos casos es posible tener separación entre

dos componentes que formen un azeótropo heterogéneo sin necesidad de adicionar agente alguno, por medio de un sistema de dos columnas, como el mostrado en la figura 1.3.

El sistema que se encuentra frecuentemente en la industria es básicamente: el agente adicionado forma un azeótropo con uno de los componentes de la alimentación y la separación se realiza entre el azeótropo, como domos, y los otros componentes de la alimentación, como fondos; la fracción obtenida como domos debe tratarse posteriormente para así tener un producto puro, esta operación no resultará difícil si el azeótropo es heterogéneo y forma dos capas líquidas al condensarse, o si puede ser arrastrado con agua o un agente polar derivado de los hidrocarburos.

En algunos casos existe la posibilidad de que el producto de domos sea un azeótropo ternario y en otras el agente puede formar azeótropos binarios con ambos componentes de la alimentación.

La aplicación de estos sistemas se efectúa en las operaciones que aprovechando la posibilidad de incremento en la volatilidad relativa compensan el costo extra, incurrido, de los agentes adicionados así como de su recicló a través de todo el proceso. La diferencia básica que tiene este tipo de operación, respecto del procedimiento extractivo, se encuentra en el comportamiento del agente adicionado, ya que las concentraciones de él variarán, prácticamente, de cero en el rehervidor, hasta una muy elevada en la parte superior de la torre.

SEPARACION DE nBUTANOL Y AGUA  
POR SISTEMA DE DOS COLUMNAS

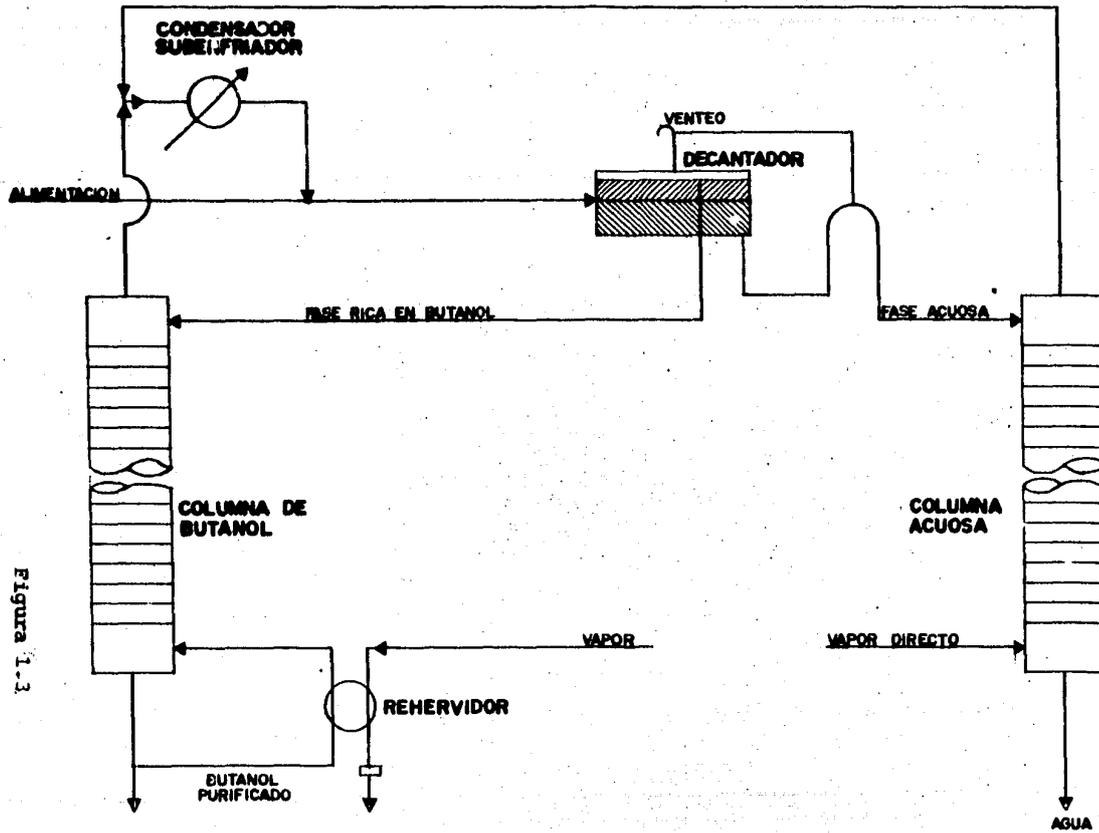


Figura 1-3

La forma usual en que se realiza este tipo de destilación, empleando un agente separador ( formador de azeótropo o solvente ), origina los métodos siguientes:

- 1° el solvente forma un azeótropo binario mínimo con u no solo de los componentes
- 2° el solvente forma azeótropos, mínimos, con cada uno de los componentes, pero solo uno de ellos es el más bajo en comparación con los demás
- 3° el solvente forma azeótropos ternarios mínimos, menores que cualquier binario y la relación entre los compuestos originales, en el terciario, debe ser distinta de la relación antes de la adición del solvente

Los anteriores métodos reciben el nombre genérico, como operación, de azeótropos máximos.

Para separar azeótropos mínimos se procede:

- 1° el solvente forma un azeótropo mínimo con un componente y éste es menor que el mínimo original
- 2° el solvente forma azeótropos ternarios mínimos, que son menores a cualquier otro binario mínimo y en el que la relación de componentes originales es diferente de la existente en el binario mínimo

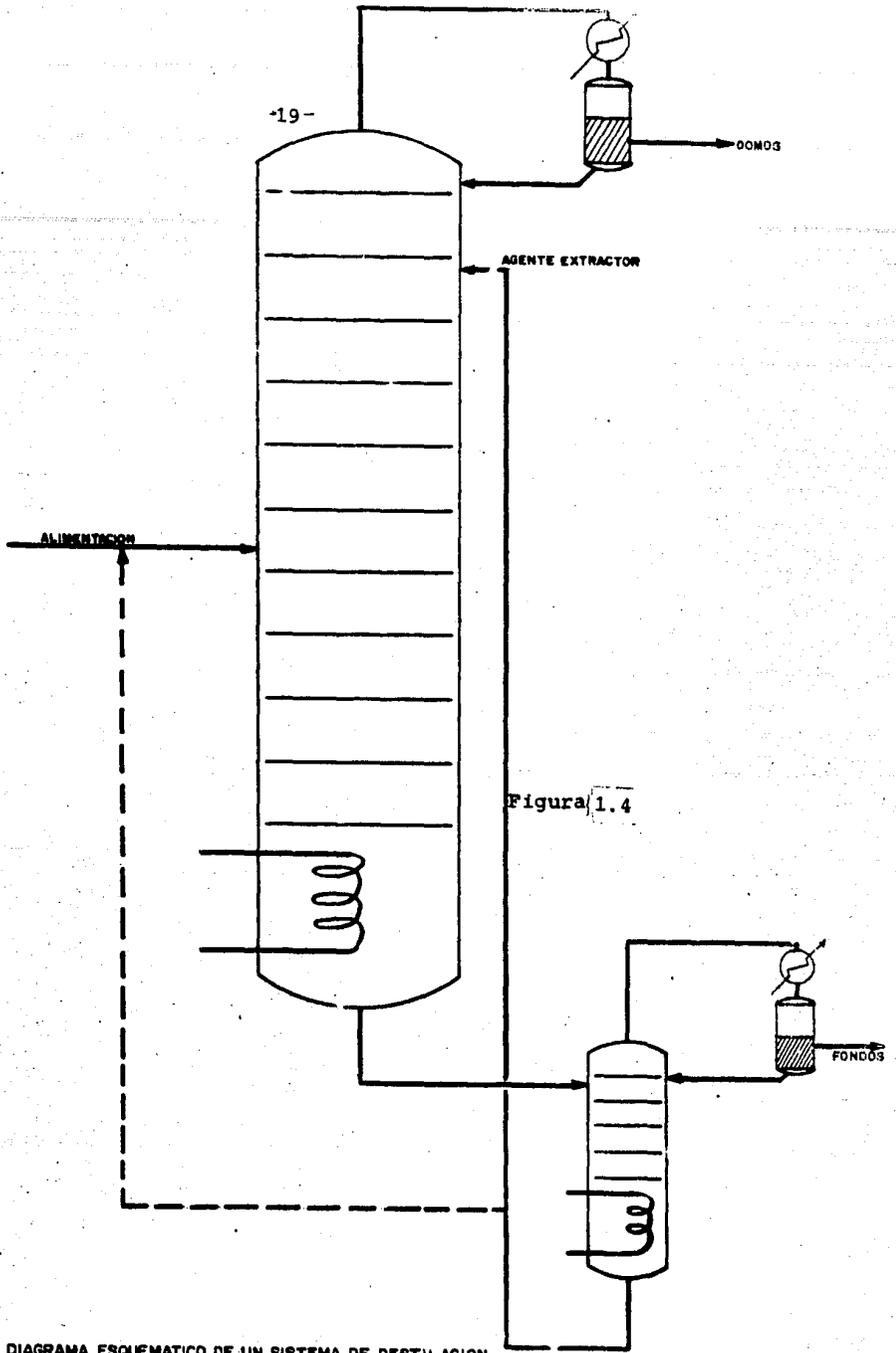
#### DESTILACION EXTRACTIVA<sup>1</sup>

Este tipo de operación se ha utilizado en diferentes separaciones importantes y es por tanto una de las técnicas más valiosas en destilación fraccionada; su primera aplicación fué, proba

blemente, la destilación de ácido nítrico y clorhídrico, usando ácido sulfúrico como agente adicionado para ayudar a la separación. Su utilización es general y algunas de las separaciones que se llevan a cabo industrialmente son:

SISTEMA	AGENTE EXTRACTOR
HCl - H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Etanol - H <sub>2</sub> O	Glicerina
Buteno - Butano	Acetona - Furfural
Butadieno - Buteno	Acetona - Furfural
Isopreno - Penteno	Acetona
Tolueno - Hidrocarburos parafínicos	Fenol
Acetona - Metanol	Agua

La distribución general de un equipo para realizar esta separación se muestra en la figura 1.4 , primeramente se introduce la alimentación en la torre principal, el agente extractor se introduce unos platos abajo del domo superior, los platos restantes servirán para retener al agente adicionado separándolo del producto ligero; en la parte inferior, o fondo de la torre, se realiza un tratamiento para eliminar de esta zona al agente adicionado. Ocasionalmente se agrega el agente a la alimentación para mantener, básicamente su concentración igual en la parte superior e inferior de la alimentación.



-19-

Figura 1.4

DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA DE DESTILACION  
EXTRACTIVA

Los cálculos que se efectúan para diseñar sistemas de esta índole son bastante simples, más aún, si se cuenta con la información de propiedades físico-químicas del sistema, en un caso límite cuando se tiene un agente extractor no-volátil el problema se simplificará reduciéndose a una operación de tipo binario o multi componente; dependiendo de la cantidad de agente que se alimente al equipo, la modificación que sufrirá el sistema dependerá únicamente del cambio en volatilidades, aún cuando la volatilidad del agente en particular complique el cálculo, este problema puede solucionarse por medio de métodos análogos a los utilizados en destilación normal.

#### COMPARACION ENTRE DESTILACION EXTRACTIVA Y AZEOTROPICA<sup>2</sup>

Respecto a los agentes extractores, se pueden encontrar una gran variedad de solventes ya que la volatilidad de éstos no deberá ser idéntica a la de los componentes; sin embargo, en destilación azeotrópica para que se tenga una buena operación el solvente deberá tener un punto de ebullición entre 10° y 40° del punto de ebullición de alguno de los componentes, de tal forma que se pueda formar el azeótropo.

Existe una amplia gama de torres y diseños para separaciones específicas por medio de destilación extractiva, ya que la concentración del solvente en el equipo se controla por medio de la alimentación de materiales y calor; el diseño de una columna azeotrópica se encuentra regido por la composición del azeótropo que se forma con el solvente específico.

La cantidad de calor que se requiere para efectuar una destilación azeotrópica es mayor debido a que gran parte del -- solvente debe ser evaporado y llevado hasta el domo de la torre; -- únicamente en el caso de tener como producto de domos una fracción pequeña de los componentes de la alimentación resultará, en términos de requerimientos de calor, conveniente el uso de destilación azeotrópica en lugar del proceso extractivo. En términos de adaptabilidad un proceso azeotrópico tiene mayores posibilidades de utilización en la operación por lotes, que lo que puede ser un método extractivo.

#### R E F E R E N C I A S

1. Gilliland, Edwin R. *Elements of Fractional Distillation*, Mc Graw Hill, New York, 1959. Capítulos 1,2,3,4
2. Perry, John H. ( editor ) *Chemical Engineer's Handbook ( Fourth Edition )*, Mc Graw Hill, New York, 1965. pág 13-49.

## II. TORRES

### 1. CONSIDERACIONES BASICAS<sup>1</sup>

Previamente a la iniciación de secciones especializadas en el tratamiento detallado de cada uno de los equipos, sean éstos torres de platos o empacadas, se necesita contar con información pertinente que puede ser útil; por ejemplo: diámetro de la columna, espesor del material de construcción, altura, arreglo interno ( en el caso de equipos de platos ), accesorios requeridos por la operación, etc.; aparte de los aspectos ya mencionados hay algunos a los que, por ser esenciales, se les proporciona mayor atención, ya que su influencia es definitiva en la realización del diseño.

#### PRACTICA DE DISEÑO

El diseñador se tiene que encontrar familiarizado con los principios mecánicos y estructurales, así como en la forma de trabajo, maquinado y soldado de los materiales para poder adecuar estos, en forma óptima, a cada caso en particular. Un nuevo diseño requiere de conocimientos e imaginación para realizarse, -- así como de un método de construcción acorde.

#### FACTOR DE TEMPERATURA

Se requiere que las temperaturas de entrada y salida de los fluidos sean especificadas, ya que estas sirven de base para la selección del material y los esfuerzos a que éste se verá sometido a las temperaturas establecidas. La corrosividad es un factor que puede determinarse por medio de la temperatura y por la importancia que reviste en la selección del material es que ésta debe fijarse o conocerse, para tener una idea clara sobre la efectividad en operación del equipo.

#### FACTOR DE PRESION

Conocer la presión a la que una torre opera, o cantidad de vacío, es condición básica para la determinación de espesores; éste factor sumado al de corrosión y a un factor de seguridad llevan a la obtención de un espesor final; el tener espesores con un excedente, como lo es el factor de seguridad, prevee la posibilidad de variaciones en la presión de operación durante periodos cortos de tiempo.

#### CONTROL

La variación de cargas en la alimentación a una torre puede reflejarse en la eficiencia del proceso del cual forma parte; la velocidad de arranque o paro, cantidad producida y estabilidad de operación se verán afectadas por las variaciones de operación que un equipo, como la torre de destilación, sufra durante el lapso de tiempo que opere; de aquí que los factores que influyen directamente las variaciones deben estudiarse para implementar un -

buen sistema de control.

#### CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

Se denominará sistema, al conjunto de fluidos que - la torre contendrá durante la operación y las características de -- los mismos como: tendencia a la formación de espuma, sólidos o lodos en suspensión, etc. que determinarán la rapidéz con que cada -- plato, en el caso de equipos de este tipo, puedan obstruccionarse o funcionar con baja eficiencia por la falta de líquido y acarrear co mo consecuencia una transferencia pobre de masa; es por ello, que - debe proveerse tubería interna con diámetros amplios, así como distancia suficiente entre ellos para obtener una operación aceptable.

#### UTILIDAD DEL USO DE FORMATOS PARA EL DISEÑO DE TORRES<sup>2</sup>

El uso de formatos puede ayudar a diseñar un recipiente a presión, ahorrando tiempo en forma considerable y sistematizando los procedimientos para el diseño mecánico, pudiendo evitar se así las omisiones y costosos errores. La mayoría de los contra- tistas han desarrollado sus formatos, similares entre sí, y que pue den correlacionarse fácilmente con las normas de diseño e inclusive con aquellos no cubiertos por las normas, como es el caso de cargas por viento en recipientes elevados.

#### PROCEDIMIENTO

He aquí la forma usual de cálculo para un nuevo diseño y su secuencia de formatos:

- Separación de la información relativa a fabricación y diseño
- Cálculo preliminar de espesores para la envolvente y tapa, estimación del peso de la envolvente, peso de operación y peso de prueba
- Cálculo de momentos debidos a la presión del viento, en la línea de tangente inferior, base y lugar en el que se tenga un cambio de sección en los platos o -- diámetro del equipo
- Determinación de esfuerzos en la envolvente y tapa. Si se encuentra que el esfuerzo unitario excede o es inferior al permisible se realiza un ajuste en el es pesor, verificando los esfuerzos, nuevamente, con los valores corregidos de peso y espesor de placa
- Cálculo del espesor para el faldón de soporte
- Diseño del anillo base y distribución de los pernos de anclaje
- Resumen de esfuerzos

Esta secuencia y formato de cálculo puede utilizarse para el diseño de recipientes horizontales si se utilizan los es esfuerzos flexionantes de viga en lugar de los debidos al viento; su uso puede extenderse, inclusive, a recipientes remachados si se utilizan los valores apropiados de eficiencia de junta.

#### PROBLEMA ILUSTRATIVO

Con objeto de aplicar la secuencia que se ha sugerido se realizará un cálculo para un reabsorbedor con los siguientes datos:

Diámetro: 36" (D.I)

Longitud del recipiente: entre tangentes: 70'-6"

base tangente superior: 76'3"

entre costuras: 70'-0"

Material de construcción: acero al carbón SA-285 grado 'C' espesor mínimo 3/8"

Tapas: elipsoidales, relación 2:1

material de construcción: acero SA-285 grado 'C'

Presión (diseño): 120 psi

Temperatura (diseño): 150°F

Espesor del aislamiento: 2"

Eficiencia de junta: 85%

Plataforma: una de 28' rectangular

Escaleras: una, con jaula.

Platos: 24 con 2 cachuchas por plato

presión: 7.65 lb/ft<sup>2</sup>

Presión del viento en el área proyectada: 32 lb/ft<sup>2</sup>

En este caso no se consideran:

- relevado de esfuerzos
- espesor por corrosión

Las soldaduras se radiografiarán por zonas de acuerdo al código ASME.

#### I. CALCULO PRELIMINAR DEL ESPESOR DE PLACA

Para tensión circunferencial el espesor de placa ( $t_h$ ) se define por medio de la relación:

$$t = \frac{(P)(R)}{(S)(E) - (0.6)(P)} \quad (2.1)^4$$

donde: P = presión de diseño, lb/in<sup>2</sup>  
R = radio de la envolvente, in  
S = esfuerzo permisible máximo, lb/in<sup>2</sup>  
E = eficiencia de junta

substituyendo en 2.1 los valores:

$$(S)(E) = (13,750)(0.85) = 11,687.5 \text{ psi}$$

$$(0.6)(P) = 72.0 \text{ psi}$$

$$t = \frac{(120)(18)}{(11,687.5) - (72.0)} = 0.1860 \text{ in}$$

Quando el diámetro de la torre es constante se considera:

si  $(2)(PR) > 32(H)(t)$  calcular tensión axial } 5

si  $(2)(PR) < 32(H)(t)$  calcular compresión axial

donde: H = altura entre tangentes, ft  
t = espesor, in  
D = 2(R)

Para este caso:

$$(P)(D) = 4,320 \text{ y } 32(H)(t) = 846$$

Aquí  $2(PR) > 32(H)(t)$  por lo que se calcula tensión axial, principiando en la línea de tangente inferior.

El esfuerzo axial unitario (f) se define como:

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I} \quad (2.2)^6$$

donde:  $\frac{P}{A}$  = relación entre la compresión debida al peso y la tensión debida a la presión interna; esta relación es igual a:

$$\frac{P}{A} = \frac{W}{(C)t} + \frac{(P)(D)}{(4)(t)}$$

donde: W = peso, lb  
C = circunferencia ( $\pi$ )

$\frac{Mc}{I}$  = tensión debida al momento de viento, ft.lb

Usando (A)(t) como la aproximación del módulo de -  
sección de un cilindro de pared delgada; donde: A = área compren-  
dida dentro del diámetro exterior de la envolvente y substituyendo  
valores en 2.2 se tiene:

$$f = - \frac{W}{(C)(t)} + \frac{(P)(D)}{(4)(t)} + \frac{M}{(A)(t)} \quad (2.3)^7$$

El peso de la envolvente (W), por sí misma, en tér-  
minos de la altura, en pies, es igual a:

$$W \text{ (lb)} = (C)(t)(H)(12)(0.283)^8$$

utilizando un valor de (0.333) en lugar de (0.283) como una mejor  
aproximación, se tiene:

$$\frac{W}{(C)(t)} = 4(H) \text{ psi}^9$$

El momento (M) en términos de altura y diámetro, -  
cuando (w) se iguala a la presión equivalente del viento en el área  
proyectada de la torre, es igual a:

$$(w)(D/12)(H^2/2) = M \text{ (ft.lb)}^{10}$$

si se considera a  $w = WL$  (carga por viento) únicamente para torres  
(o torres con escaleras simples) y  $w = \frac{WL(D+17)}{D}$ , para torres con  
escaleras provistas de jaulas, la relación  $M/(A)(t)$  de la ecuación  
2.3 se iguala a:

$$\frac{M}{(A)(t)} = \frac{(w DH)(12)(4)}{(24)(\pi)(D^2)t} = \frac{2(w H^2)}{(\pi)(D)(t)} \text{ (psi)}^{12}$$

Substituyendo en la ecuación 2.3 las equivalencias de las relaciones, se tiene:

$$f = -4(H) + \frac{(P)(D)}{(4)(t)} + \frac{2(w H^2)}{(\pi)(D)(t)} \quad (2.4)^{13}$$

y resolviendo para el valor de (t):

$$t = \frac{\frac{2(w H^2)}{(\pi)(D)} + \frac{(P)(D)}{4}}{f + 4(H)} \quad (2.5)^{14}$$

Para calcular la tensión axial en la línea de tangente inferior, se considera:

$$w = \frac{p(D + 17)}{D} \quad (2.6)^{15}$$

donde:  $p = P$

Substituyendo valores en la ecuación 2.5 (igualando  $t = t_a$ ) y 2.6, se tiene:

$$\begin{aligned} w &= \frac{(32)(36 + 17)}{36} = 47.1 \text{ lb/ft} \\ t_a &= \frac{(2)\{(47.1)(70.5)^2\}/(\pi)(36) + (120)(36)}{11,987.5 + 4(70.5)} \\ &= \frac{4,140 + 1080}{11,987.5 + 4(70.5)} = 0.43 = 7/16" \end{aligned}$$

ya que 7/16" es un espesor que los fabricantes no proveen normalmente y considerando un factor, extra, de seguridad, se opta por utilizar placa con un espesor de 1/2".

Cuando el espesor de placa se fija, como en este caso, y resulta, además, ser mayor que el valor requerido para tensión circunferencial ( por lo que el valor de (t) que se usa en la ecuación 2.7 será  $3/8" = 0.375$  ) y se desea conocer la distancia, aproximada, desde la línea de tangente superior hasta la zona en que este puede ser útil, se resuelve la ecuación 2.4 para el valor de (H) teniendo:

$$H = \frac{4(t) + \sqrt{16(t^2) - 4(2w/\pi)(D)(PD/4 - tF)}}{4w/(\pi)(D)}^{16}$$

el término  $16(t^2)$  será un valor pequeño que puede ignorarse y la anterior ecuación queda:

$$H = \frac{4(t) + \sqrt{(2.55(w)/D)(tF - (P)(D)/4)}}{1.28(w)/D} \quad (2.7)^{17}$$

substituyendo valores, se tiene:

$$\begin{aligned} H &= \frac{4(0.375) + \sqrt{(2.55(47.1)/36)(0.375)(11,687.5 - 1080)}}{1.28(47.1)/36} \\ &= \frac{1.5 + 115.26}{1.67} = 69.9 \text{ ft} \end{aligned}$$

Por lo que para cubrir una distancia, desde la tangente superior, de 69.9 ft se utilizarán 8 placas de 8' de longitud ( tamaño comercial ), teniéndose un total de 64' de longitud cubierta.

## II. CALCULO PRELIMINAR DEL ESPESOR DE LA TAPA SUPERIOR

Para tapas semi-elípticas ( sin costura ) la relación para el cálculo del espesor es:

$$t = \frac{(P)(D)}{2(S)(E) - (0.2)(P)} \quad (2.8)^{18}$$

substituyendo valores:

$$t = \frac{(120)(36)}{2(13,750)(1) - (0.2)(120)} = \frac{4320}{27476} = 0.16$$

se utilizará material de 5/16" de espesor.

### III. ESPESOR PRELIMINAR DE LA TAPA INFERIOR

Para este caso se comparan los resultados obtenidos del espesor calculado, cuando se determinó la tensión axial, en la línea de tangente inferior y el valor obtenido con la relación 2.8, aplicando para el caso el mayor valor; de aquí que se considere un espesor preliminar de 1/2".

### IV. PESO DEL RECIPIENTE

Envólvente:

Parte superior

$$\text{placa } 3/8"; (64)(\pi(36.38)/12)(15.3) = 9,326 \text{ lb}$$

Parte inferior

$$\text{placa } 1/2"; (6)(\pi(36.5)/12)(20.4) = 1,154 \text{ lb}$$

Tapas:

Superior

$$5/16" = 167 \text{ lb}$$

Inferior

1/2" = 267 lb

Faldón:

placa 3/4";  $(5.7)(\pi(37.7)/12)(30.6)$  = 1,722 lb

24 platos = 1,610 lb

23 bajantes = 740 lb

Partes internas = 621 lb

Soportes de platos = 56 lb

Anillo base = 585 lb

Anillos soporte aislamiento = 150 lb  
16,398 lb

+ 6% 17,382 lb

Entrada de hombre = 312 lb

+ 6% = 330 lb

Peso total de la envolvente = 17,712 lb

V. PESO DEL EQUIPO

Aislamiento ( 40 lb/ft<sup>3</sup>) = 3,500 lb

Plataformas ( 33 lb/ft<sup>2</sup>) = 930 lb

Escaleras ( 25 lb/ft. lineal, con jaula) = 1,830 lb  
6,260 lb

+ peso envolvente 17,712 lb

W<sub>1</sub> = peso de erección (desmantelamiento) 23,972 lb

Platos removibles = 432 lb

Líquido (durante  
operación) = 1,858 lb  
2,288 lb

2,288 lb  
26,260 lb

$W_2$ = peso de operación	26,260 lb
Peso del agua (prueba hidrostática)	= $\frac{31,240 \text{ lb}}{57,500 \text{ lb}}$
$W_3$ = peso de prueba	= 57,500 lb

Para calcular la compresión axial en el lado, de la torre, que no se encuentra expuesto a la presión del viento, se considera que la relación  $P/A$ , de la ecuación 2.2, será el esfuerzo debido únicamente al peso ya que la tensión debida a la presión interna no se utiliza; de lo anterior se deduce que la presión, debida solamente al peso de la torre, deberá ser cero cuando la carga por viento sea máxima, por lo tanto la relación 2.4 se reduce a:

$$f = 4(H) + \frac{2(\omega H^2)}{(\pi)(D)(t)} \quad (2.9)^{19}$$

y el valor de  $(t)$  será:

$$t = \frac{0.637(\omega H^2)}{D(f - 4H)} \quad (2.10)^{20}$$

Si se quiere determinar el punto donde el esfuerzo crítico cambia de tensión, en el lado de presión del viento, a compresión, en el lado no expuesto a la presión de viento, se tiene:

$$\text{esfuerzo a la tensión} = -\frac{W}{(C)(t)} + \frac{(P)(D)}{4(t)} + \frac{M}{(A)(t)} \quad (2.3)^7$$

$$\text{esfuerzo a la compresión} = \frac{W}{(C)(t)} + \frac{M}{(A)(t)} \quad (2.11)^{21}$$

En el punto donde se igualan los esfuerzos:

$$-\frac{W}{(C)(t)} + \frac{(P)(D)}{4(t)} + \frac{M}{(A)(t)} = \frac{W}{(C)(t)} + \frac{M}{(A)(t)}$$

simplificando:

$$\frac{(P)(D)}{4(t)} = \frac{2(W)}{(C)(t)}$$

y puesto que:

$$\frac{W}{(C)(t)} = 4(H)$$

se tiene que:

$$(P)(D) = 32 \{ (H)(t) \} \quad (2.12)^{22}$$

## VI. MOMENTOS DEBIDOS A LA PRESION DEL VIENTO

La figura 2.1 servirá como referencia para la determinación de estos momentos.

Procedimiento:

$P$  = carga de viento por  $\text{ft}^2$  de superficie plana =  $45.7 \text{ lb/ft}^2$

$p = 0.7(P)$  = presión sobre la proyección del cilindro =  $32.0 \text{ lb/ft}^2$

$D_1^t$  o  $D_2^t$  ( fig.2.1 a, b, c ) = ancho real envolvente + aislamiento + boquillas

$$D_1^t = (36 + 4)(1/12) = 3.33 \text{ ft}$$

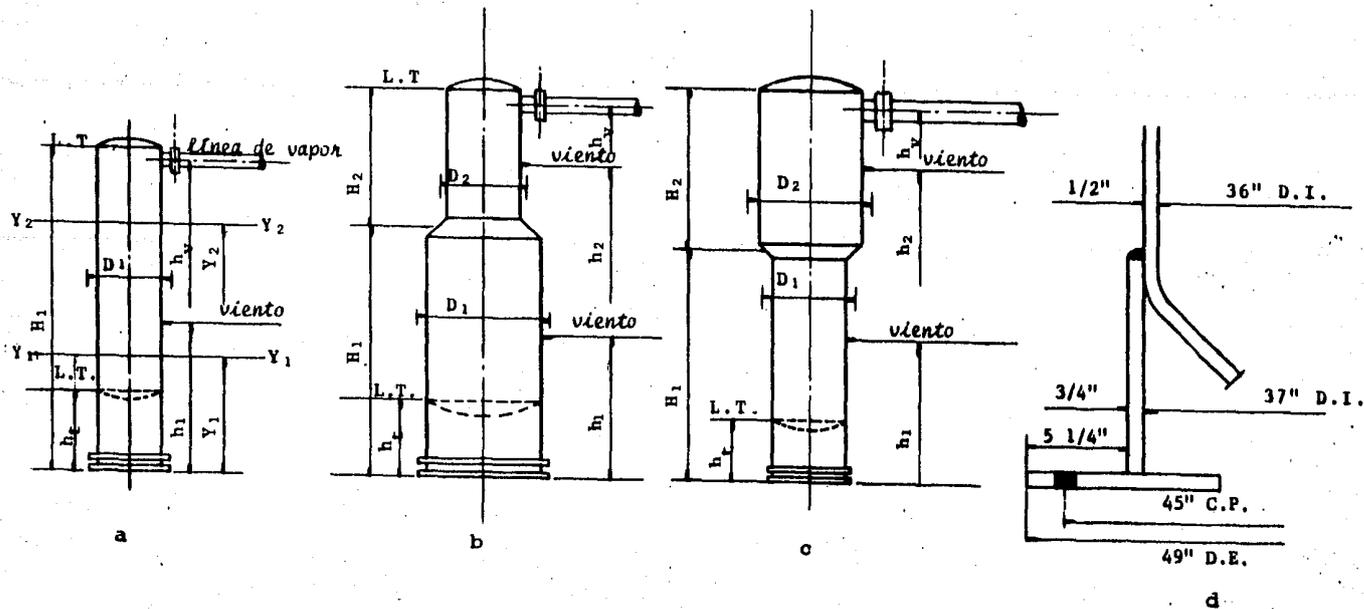
esfuerzo cortante

momento

$$\text{Envolvente} = (D_{1,2})(p)(H_{1,2}) \quad (h_{1,2})$$

$$= (3.33)(32)(76.25) = (8.125) \quad (38.1) = 309,570$$

$(H_{1,2}), (h_{1,2})$  figura 2.1 b, c



Alternativas para el cálculo de cargas por viento

Figura 2.1

Plataformas. (P) (lb/ft. lineal)

$$(45.7)(6) = (274) \quad (73) = 20,000$$

Escaleras. (P) (lb/ft. lineal con jaula)

$$(45.7)(76) = \frac{(3473)}{11,872 \text{ lb/in}^2} \quad (38) = \frac{131,981}{461,551 \text{ ft.lb}}$$

$M^b$  = momento total en la base = 461,551 ft.lb

$V$  = esfuerzo cortante total = 11,872 lb/in<sup>2</sup>

El momento en la línea de tangente inferior se encuentra, directamente, aplicando la condición de equilibrio a los momentos que se generan en el plano de la línea de tangente:

$$\sum M = M^b - (V)(h) + \frac{(Wh^2)}{2} - M^t = 0$$

$$\begin{aligned} M^t &= M^b + (Wh^2)/2 - (V)(h) \\ &= M^b + \{(Wh)/2 - V\} h \end{aligned}$$

rearrreglando:

$$M^b - h(V - 0.5 Wh)$$

(W) es igual a la carga total, debida al viento, por pie de altura y utilizando la nomenclatura de esta sección, para efecto de congruencia, se tiene:

$$W = w(D^t)$$

por lo que:

$$M^t = M^b - h(V - 0.5 wD^t h)^2 \quad (2.13)$$

en este caso:  $h = h_c$  de la figura 2.1 a, b, c

Substituyendo valores en la ecuación 2.13 se tiene:

$$= 461,551 - 5.75 ( 11,872 - 0.5(47.1)(3.33)(5.75) )$$

$$= 395,880 \text{ ft.lb}$$

Cálculo del peso en la zona Y-Y (fig.2.1 a) correspondiente a una distancia igual a 56'-0" de la tangente superior:

Envolvente		9,326 lb
Tapa superior		167 lb
21 platos y soportes		2,161 lb
entrada de hombre		<u>312 lb</u>
		11,966 lb
	+ 6X	12,684 lb
Peso del equipo	= (6260)(56/70.5)	= 4,970 lb
Platos removibles y liquido	=	<u>2,288 lb</u>
		7,258 lb
		<u>7,258 lb</u>
		20,122 lb

momento

Envolvente	(3.33)(32)(56)(28)	= 167,000 ft.lb
Plataforma	(274)(53)	= 14,500 ft.lb
Escalera	(45.7)(56)(28)	= <u>71,600 ft.lb</u>
		253,100 ft.lb

$$M^y = 253,100 \text{ ft.lb}$$

$$W_3^c = W_3 - \{ \text{peso faldón} + \text{anillo inferior} + \text{tapa inferior} \}$$

$$= 57,500 - (1,722 + 585 + 267)$$

$$= 54,926 \text{ lb}$$

VII. ESFUERZOS SOBRE LA ENVOLVENTE EN LA LINEA DE TANGENTE INFERIOR

$A_1^t$  = área comprendida en el diámetro exterior de la envolvente, en la línea de tangente inferior =  $1,075 \text{ in}^2$

$C_1^t$  = perímetro comprendido en el diámetro exterior de la envolvente en la línea de tangente inferior =  $116.2 \text{ in}$

$W_2^t$  = peso de operación en la línea de tangente inferior, lb  
 =  $26,260 - (267 + 1722 + 738) = 23,533 \text{ lb}$

$$\frac{(P)(D)}{4} = \frac{(120)(36)}{4} = 1,080 \quad 1,080$$

$$\frac{12(M^t)}{A_1^t} = \frac{(12)(395,880)}{1,075} = 4,420 \quad \frac{4,420}{5,500}$$

$$\frac{W_2^t}{C_1^t} = \frac{23,533}{116.2} = 203 \quad T_a = \frac{203}{5,297} \text{ lb/in. lineal}$$

$$\frac{12(M^t)}{A_1^t} = 4,420$$

$$\frac{W_2^t}{C_1^t} = \frac{203}{4,623} \quad C_a = 4,623 \text{ lb/in. lineal}$$

$$T_h = (P)(D_m)/2^{2.4} = 2,190 \text{ lb/in. lineal}$$

$$\text{Esfuerzo unitario máximo} = \frac{T_a \cdot C_a \cdot \delta \cdot T_h}{t} = \frac{5,297}{0.5} =$$

$$= 10,590 \text{ psi}$$

VIII. ESFUERZOS SOBRE LA ENVOLVENTE EN EL CAMBIO DE SECCION DE PLATO, O DIAMETRO. ( 56' de la tangente superior )

$A_1^y$  = área comprendida en el diámetro exterior de la envolvente, en la zona Y (fig.2.1 a) =  $1,061 \text{ in}^2$

$C_1^y$  = perímetro comprendido en el diámetro exterior de la envolvente, en la zona Y (fig.2.1 a) =  $115.5 \text{ in}^2$

$W_2^y$  = peso de operación en la zona Y =  $12,684 \text{ lb}$

$M^y$  = momento, debido al viento, en la zona Y = 253,100 ft.lb

$$\frac{(P)(D^y)}{4} = \frac{(120)(36)}{4} = 1,080 \quad 1,080$$

$$\frac{12(M^y)}{A_1^y} = \frac{(12)(253,100)}{1,061} = 2,863 \quad \frac{2,863}{3,943}$$

$$\frac{W_2^y}{C_1^y} = \frac{12,684}{115.5} = 110 \quad \frac{-110}{3,833}$$

$$T_a = 3,833 \text{ lb/in. lineal}$$

$$\frac{12(M^y)}{A_1^y} = 2,863$$

$$\frac{W_2^y}{C_1^y} = \frac{110}{2,973} \quad C_a = 2,973 \text{ lb/in. lineal}$$

$$T_h = \frac{(P)(D_m)}{2} = 2,180 \quad = 2,180 \text{ lb/in. lineal}$$

$$\text{Esfuerzo unitario máximo} = \frac{T_a + C_a \cdot \sigma T_h}{t} = \frac{3,833}{0.375} = 10,220 \text{ psi}$$

*Nota: si los esfuerzos calculados en VII y VIII exceden por amplio margen o son excesivamente pequeños, respecto del valor obtenido en I ( relación 2.1 ) el espesor de placa debe ajustarse y se realizará la verificación de esfuerzos de nueva cuenta, hasta obtener un valor que varíe razonablemente.*

#### IX. VERIFICACIÓN EN LA TAPA INFERIOR

Quando el esfuerzo crítico es axial, la sección de la tangente de la tapa inferior deberá tener el mismo espesor que el requerido para la envolvente en la zona de soldadura, ya que el esfuerzo unitario permisible se ha calculado a partir de una eficiencia de soldadura.

Espeor mínimo en la sección de tangente:

$$T_a / f^{2.5}$$

los valores de  $T_a$ , de la sección VII y de (f) de la relación 2.1 (S)(E); substituyendo:

$$\frac{T_a}{f} = \frac{5,297}{11,687.5} = 0.45" = 0.5"$$

Esfuerzo en la tapa debido a tensión axial:

$$\frac{T_a^{2.6}}{t} = \frac{5,297}{0.5} = 10,590 \text{ psi}$$

#### X. DISEÑO DEL FALDON

La carga sobre el faldón se calcula considerando: peso de operación y presión de viento total, peso de prueba y presión de viento total; cuando el faldón es cilíndrico y se encuentra soldado a la tapa inferior, el esfuerzo crítico es, normalmente, el valor del esfuerzo cortante de la soldadura. La tabla (UW-12)<sup>27</sup> del código ASME permite un esfuerzo cortante igual al 45% del esfuerzo que se tiene a la tensión, por lo que el esfuerzo permisible para una soldadura realizada sobre placa de acero SA-283 grado 'C' será:

$$(12,650)(0.45) = 5,693 \text{ psi}$$

De manera general las formas de cálculo utilizan este valor para condiciones de operación y un valor 50% mayor para condiciones de prueba. La carga por pulgada lineal, en cualquier parte del faldón, será:

$$(M/A) + (W/C)^{2.8}$$

el valor del momento y peso se consideran en el plano que se investiga para poder determinar la magnitud de este valor.

Cálculo:

los números representan condiciones: (2) para operación y (3) para prueba

las literales planos: (b) para el anillo base y (t) para la tangente

A = área comprendida en el diámetro exterior de la envolvente

C = perímetro comprendido en el diámetro exterior de la envolvente

*Operación*

$$\frac{12(M^b)}{A} = \frac{(12)(461,551)}{1,164} = 4,760$$

$$\frac{W_2^b}{C} = \frac{26,260}{121} = \frac{217}{4,977}$$

$$C_2^b = 4,977 \text{ lb/in. lineal}$$

$$\frac{12(M^t)}{A} = \frac{(12)(395,880)}{1,164} = 4,080$$

$$\frac{W_2^t}{C} = \frac{23,533}{121} = \frac{195}{4,275}$$

$$C_2^t = 4,275 \text{ lb/in. lineal}$$

*Prueba*

$$\frac{12(M^b)}{A} = 4,760 \quad 4,760$$

$$\frac{W_3^b}{C} = \frac{57,500}{121} = 475 \quad \frac{475}{5,235}$$

$$C_3^b = 5,235 \text{ lb/in. lineal}$$

$$\frac{12(M^t)}{A} = 4,080 \quad 4,080$$

$$\frac{W_3^t}{C} = \frac{34,926}{121} = 454 \quad \frac{454}{4,534}$$

$$C_3^E = 4,534 \text{ lb/in. lineal}$$

Espe<sup>s</sup>or

$$t = \frac{C_2^b}{13,750} = 0.36" ; t = \frac{C_3^b}{20,625} = 0.25"$$
$$t = \frac{C_1^E}{5,950} = 0.718" ; t = \frac{C_2^E}{8,925} = 0.508"$$

En este caso se utiliza el mayor valor de (t) = 0.718";  
o sea placa de 3/4" de espesor.

*Esfuerzo unitario máximo en la placa del faldón:*

$$\text{operación} = \frac{C_2^b}{t} = \frac{4,977}{0.75} = 6636 \text{ psi}$$

$$\text{prueba} = \frac{C_3^b}{t} = \frac{5,235}{0.75} = 6980 \text{ psi}$$

#### XI. DISEÑO DEL ANILLO BASE

Se supone que el esfuerzo cortante total, en la base del faldón, se distribuye uniformemente sobre el anillo base y este, a su vez, lo hace sobre la cimentación; por tanto, la carga soportada será el esfuerzo cortante total dividido entre el área del anillo.

Para desarrollar un cálculo preliminar del "ancho del anillo" el área se tomará como el perímetro del faldón multiplicado por el ancho:

$$Aa = (C_F)(w)^{33}$$

donde: Aa = área aproximada, in<sup>2</sup>

w = ancho, in

$$E_c = \frac{W}{C_f} + \frac{M}{A}^{34}$$

donde:  $E_c$  = esfuerzo cortante, vertical, por pulgada de perímetro de lo anterior el ancho aproximado será igual a:

$$\frac{W/C + M/A}^{35} \text{ en } \frac{\text{pulgadas}}{\text{pulgadas de perímetro}}$$

donde:  $b$  = momento flexionante permisible

Los valores de  $B_2$  y  $B_3$  (iguales a  $C_2^b$  y  $C_3^b$  de la sección X) serán los que se utilicen para las condiciones de operación y prueba respectivamente; además si se utiliza un valor de carga igual a 500 psi para operación y 625 psi para prueba se tiene:

$$AA = \frac{B_2}{500} \text{ ó } \frac{B_3}{625}^{36} \text{ ( aplica el mayor valor )}$$

donde:  $AA$  = ancho aproximado

Para el cálculo preliminar del espesor del anillo se utilizará un valor de carga igual a 500 psi y un esfuerzo permisible de flexión igual a 15,000 psi, junto con la distancia en voladizo (cantiliver) interior o exterior que sea mayor.

Si se usa (L) para la distancia en voladizo mayor y se considera una placa con un ancho de 2.5cm (1"), se tiene:

$$M_f = 500(L^2)/2^{37}$$

$$m_g = t^2/6^{38} \text{ ( utilizando 15,000 psi como esfuerzo permisible )}$$

$$15,000 = \left\{ \frac{500(L^2)}{2} \right\} \left\{ \frac{6}{t^2} \right\}; t = 0.316 (L)^{39}$$

deberá realizarse una verificación del esfuerzo cortante vertical en el anillo, sin embargo ocasionalmente será, éste, un factor limitante.

La carga real determinada una vez que el anillo base se ha definido será:

$$\text{durante operación } S_2 = \frac{(B_2)(C_f)^{40}}{A_{de} - A_{di}}$$

$$\text{durante prueba } S_3 = \frac{(B_3)(C_f)^{41}}{A_{de} - A_{di}}$$

donde:  $A_{de}$  = área comprendida en el diámetro exterior del anillo base

$A_{di}$  = área comprendida en el diámetro interior del anillo base

El esfuerzo a la flexión debe verificarse para ambos casos, prueba y operación, utilizando los valores de 15,000 psi para el esfuerzo permisible durante la operación y 18,750 psi para el caso de prueba, de aquí que:

$$f_2 = \frac{3(S_2)(L^2)}{t^2} \quad \text{y} \quad f_3 = \frac{3(S_3)(L^2)}{t^2}$$

donde:  $f_2$  y  $f_3$  = esfuerzo a la flexión

*Cálculo:*

$$B_2 = 4,977 \text{ lb/in. lineal}$$

$$B_3 = 5,235 \text{ lb/in. lineal}$$

*ancho aproximado:*

$$\frac{B_2}{500} \text{ ó } \frac{B_3}{625} \text{ (el mayor valor)} \frac{4,977}{500} = 9.95'' \text{ utilizar } 10''$$

*espesor aproximado:*

( voladizo interior o exterior, el mayor valor )

$$t_b = (0.32)(L) = (0.32)(5.75) = 1.84'' \text{ utilizar } 1\ 7/8''$$

verificación de esfuerzos:

$$\text{Carga}_{(\text{operación})} \quad S_2 = \frac{(4,977)(121)}{1,247} = 482 \text{ psi}$$

$$\text{Carga}_{(\text{prueba})} \quad S_3 = \frac{(5,235)(121)}{1,247} = 508 \text{ psi.}$$

$$\text{Flexión}_{(\text{operación})} = \frac{(3)(481)(5.75)^2}{(1.88)^2} = 13,498 \text{ psi}$$

$$\text{Flexión}_{(\text{prueba})} = \frac{(3)(508)(5.75)^2}{(1.88)^2} = 14,256 \text{ psi}$$

Aun cuando se efectúan cálculos para la obtención de datos tales como número de platos teóricos o unidades de transferencia, velocidades de vapor-líquido, etc. existen otros que deben ser tomados en cuenta para la realización del diseño, helos -- aquí:

- Interrelación de la columna con el resto de la planta, desde el punto de vista de máxima capacidad y - flexibilidad
- Determinación del nivel de presión de operación
- Clase de columna ( platos, empacada ) tipo de plato o empaque, según el caso, material de construcción, clase de rehervidor y condensador
- Forma de introducir la alimentación al equipo, desde el punto de vista condiciones térmicas
- Determinación del diámetro del equipo y en el caso de equipos de platos, selección del espaciamiento - entre ellos y diámetro de tubería interna

## 2. EQUIPOS DE PLATOS

Para una columna de platos es básico definir las dimensiones que éstos tendrán ya que su distribución, dentro de la torre, cantidad y características de construcción influyen directamente en:

- el diámetro de la torre
- el espesor del material de construcción del equipo

El diámetro del plato es función del área, que se requiere en la operación, para realizar el contacto entre el vapor y líquido, por tanto el diámetro de la torre es, a su vez, consecuencia del diámetro del plato; sus características de construcción, así como el espesor del material empleado y número total de platos que se tengan, representan peso que hay que considerar al evaluar el espesor de placa en los cálculos preliminares para determinar los esfuerzos a que se verá sometido el equipo.

Por lo anterior y como se hizo notar al principio de este trabajo, en la literatura especializada y práctica industrial se cuenta con mayor información concerniente a los equipos de platos, por lo que el análisis se amplía en esta parte de la exposición.

Las principales ventajas que estos equipos ofrecen se pueden resumir en las siguientes:

- En un proceso que requiere de la limpieza periódica del equipo, por la naturaleza de los depósitos que se presenten, utilizará este tipo de torre ya que estas pueden tener entradas para hombre y contar -- con el espaciamiento suficiente, entre los platos, para permitir la limpieza
- Cuando la operación es intermitente y las temperaturas a las que se lleva a cabo son mayores o menores que la ambiente conviene el uso de torres de platos, debido a que las expansiones y contracciones sucesivas de la envolvente, durante la operación, causará un pulverización del empaque
- Cuando el calor interno de la solución hace necesario el uso de sinfines de enfriamiento, éstos se instalan con mayor facilidad en las torres de platos
- Teniendo un número elevado de unidades de transferencia, o platos teóricos, se prefieren los equipos de platos ya que los empacados tienden a "canalizar" las corrientes de vapor y líquido limitando la transferencia de masa
- Cuando los volúmenes de líquido que se manejan en la operación sean de gran magnitud, la operación será más efectiva en un equipo de esta naturaleza, -- puesto que el recorrido que el líquido debe efectuar es de solo unos metros

De acuerdo al tipo de plato que se escoja para un diseño específico, los equipos pueden clasificarse:<sup>4 3</sup>

- |             |                    |
|-------------|--------------------|
| - Burbujeo  | - Válvula flotante |
| - Perforado | - Uniflux          |
| - Flexitray | - Turbogrid        |

- Balastras
- Plato de escurrimiento perforado
- Kaskada

la especificación que se realice de cualquiera de ellos dependerá de:

- Sólidos en suspensión o productos corrosivos
- Caída de presión y tiempo de residencia
- Materiales de construcción especiales
- Eficiencia en un amplio rango de condiciones de operación

En la mayoría de los casos las torres emplean condensadores totales, que a su vez sub-enfrían el condensado con el fin de bombearlo y fácilmente medirlo; los condensadores parciales se utilizan en caso de tener vapores, en el domo, que contengan componentes difícilmente licuables.

#### DIAMETRO DE COLUMNA, ESPACIAMIENTO DE PLATOS Y TUBERIA INTERNA

Cada uno de estos factores debe tener la flexibilidad suficiente para poder anticipar incrementos en las cargas de vapor y líquido, sin que a consecuencia de los cambios el equipo llegue a inundarse. La determinación de estas variables de diseño se basa, principalmente, en el conocimiento de las propiedades de las corrientes de vapor y líquido que se encuentran dentro del equipo.

La sección 2.2 de este capítulo detalla el cálculo de cada uno de estos factores. Las consideraciones de tipo hidráulico no son las únicas directrices en la consecución de un diseño

final, se debe considerar también:

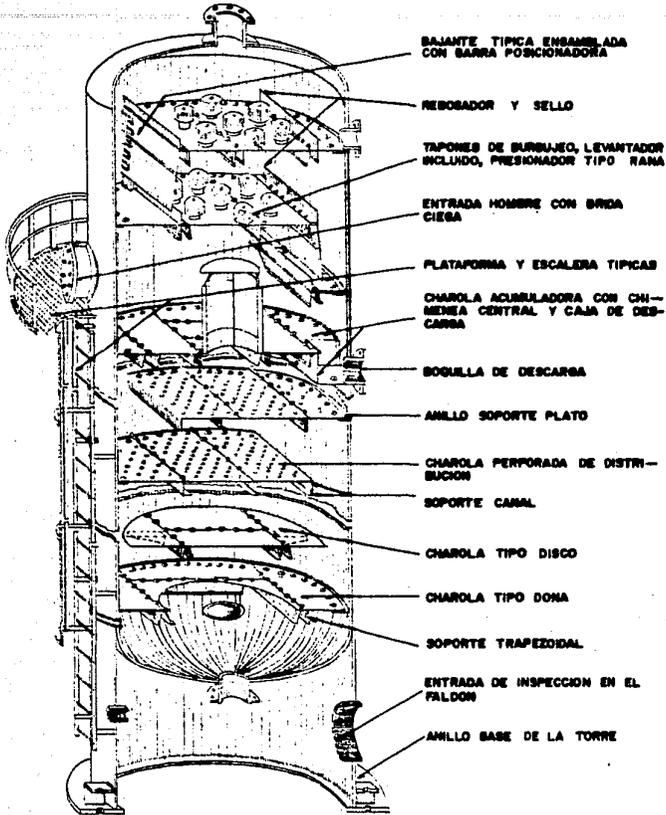
- Diámetro de la columna, espaciamiento entre platos y su influencia en la eficiencia del equipo
- Acceso interno a la columna, cuya influencia es directa en la selección del espaciamiento entre platos

La figura 2.2 muestra las partes internas con que cuenta un equipo de esta naturaleza.

#### DISEÑO PARA RENDIMIENTO

La determinación del número de platos, en una columna de destilación, es solo parte del diseño para asegurar el rendimiento del equipo. La interpretación de los requerimientos de la operación de destilación, absorción o fraccionación en un equipo mecánico con componentes internos (platos) para realizar la operación, requiere del uso de información teórica y empírica (práctica); de lo anterior que los costos de fabricación de una torre se encuentran afectados por:

- El diámetro que tenga la columna
- Características del plato: cachuchas, bajantes, rebosadores, perforaciones, balastras



ENSAMBLE COMPUESTO DE UNA TORRE, CON PLATOS, MOSTRANDO ALGUNOS DE ESTOS Y SUS CORRESPONDIENTES BOQUILLAS.

Figura 2.2

## TIPOS DE PLATOS Y SUS APLICACIONES\*

En esta sección se describen las características más importantes de cada uno de los platos frecuentemente utilizados en aplicaciones industriales; se hace énfasis en el hecho de que los que se describen y la descripción no son ni los únicos ni la más amplia posible, debido a las particularidades específicas de cada aplicación y proceso.

En forma general puede decirse que los tipos de platos que se encuentran en la industria se clasifican en dos amplias gamas:

- Los perforados, con o sin bajantes, cuyo patrón de flujo es indefinido
- Los que utilizan cachuchas o "balastras", que pueden contar con un patrón de flujo, aproximadamente, constante

### BALASTRAS DE BURBUJEO

El vapor que se eleva a través de los levantadores o tomas, choca con la cachucha y sale por las aberturas laterales como burbujas en el líquido circundante; el burbujeo efectúa la acción de contacto forzando al líquido a desplazarse por sobre las cachuchas, rebosador y bajante hacia el plato inferior.

Sus principales características son:

**Capacidad:** moderada alta, manteniendo eficiencia

**Eficiencia:** superior al promedio ( la mayor parte de -  
la información con que se cuenta, es res-  
pecto de este tipo de plato )

**Residencia:** el triple de la de un plato perforado. El  
burbujeo es acompañado de escapes rápidos  
de vapor

**Flexibilidad:** la más amplia de todos los diseños para ve-  
locidades de vapor y/o líquido altas o ba-  
jas; permite drenaje positivo del líquido,  
manteniendo la cabeza de éste por medio de  
rebosadores

**Aplicación:** para todos los servicios, excepto aquellos  
altamente polimerizables o incrustantes, -  
con flujos extremadamente bajos en los que  
se tiene nivel de líquido mínimo y sello -  
de vapor

**Espaciamiento:** promedio 45cm (18"); 60cm (24") a 90cm (36")  
en operación al vacío

La figura 2.3 muestra estas "cachuchas" con sus --  
principales características.

#### PLATOS PERFORADOS CON BAJANTE

El vapor se desliza a través de perforaciones rea-  
lizadas en el piso del plato, con un diámetro que va desde 3.2 a -  
25.4mm (1/8" a 1"), burbujeando directamente en el líquido de ma-  
nera uniforme; el líquido se desliza a lo largo del plato sobre -  
el rebosador, si éste es usado, cayendo por sobre la bajante al --  
plato inferior. Características principales:

# "BALASTRAS"

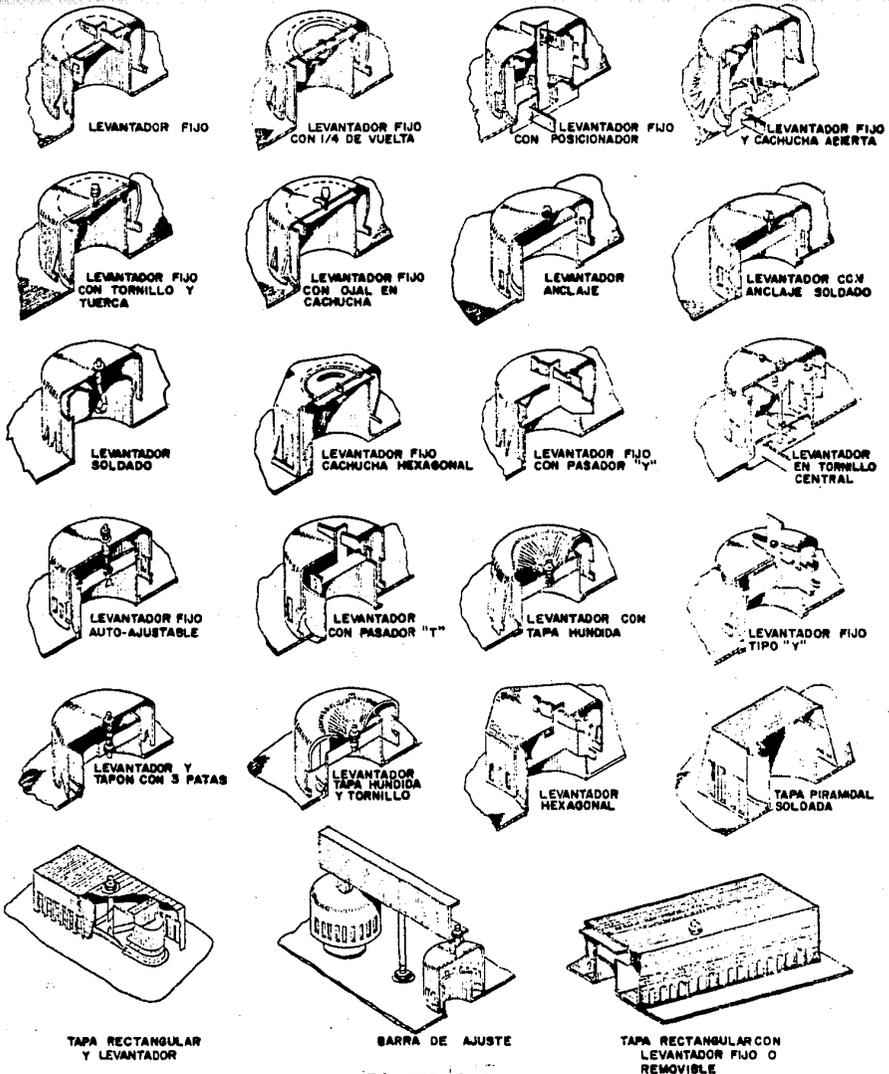


Figura 2.3

**Capacidad:** moderada

**Eficiencia:** dentro de límites de diseño

**Residencia:** una tercera parte de la de platos de "balas tras"

**Flexibilidad:** no recomendables para equipos que operen - con carga variable menor al 60% del valor de carga de diseño; cuando la velocidad de vapor es baja el plato muestra tendencia a "gotear"

**Aplicación:** sistemas que deberán trabajar a gran capacidad, velocidades cercanas a las de diseño y en operación ininterrumpida; puede manejar sólidos en suspensión, si embargo si éstos bajan de plato en plato ( como sucede ) las perforaciones pueden obstruirse, en el caso de sistemas con elevadas concentraciones de sólidos, sobre calentando al líquido y secando el plato ( sobre todo a los que se localizan en la parte inferior )

**Espaciamiento:** este valor disminuye en comparación con los de "balastras", debido a un mayor tiempo de residencia; los promedios se encuentran entre: 23,24,30 y 38cm (9",10",12",15") usados comúnmente en la práctica; para operación al vacío de 50cm (20") a 75cm (30")

#### PLATOS PERFORADOS SIN BAJANTES

El diámetro de las perforaciones que se usa en este tipo de plato es igual a la utilizada en los platos con bajante; aquí también el gas burbujea a través del líquido, pero en este caso la cabeza del líquido fuerza a éste a través de las mismas per-

foraciones, hacia el plato inferior; el patrón de flujo del líquido es aleatorio, al drenarse, y no forma corrientes continuas en cada una de las perforaciones. Sus principales características son:

**Capacidad:** idéntica a la del plato anterior; sin embargo, la velocidad de diseño, comparada con la de balastras, puede llegar a ser desde un 50% hasta un 100% ( dependiendo del sistema y criterio de diseño ). A bajas velocidades la capacidad específica decae rápidamente

**Eficiencia:** no tan elevada como la de balastras; dentro de los valores de diseño cuando el porcentaje de velocidad baja del 60%, éstos resultan inoperantes

**Residencia:** un tercio de la de unidades de balastras

**Aplicación:** sistemas que requieren de elevada capacidad a velocidades cercanas a las de diseño y operación continua; puede manejar cristales en suspensión y sólidos de tamaño reducido, así como generadores de polímeros; - pueden tenerse obstrucciones en las perforaciones cuando los sistemas forman sales

**Espaciamiento:** menor que el de platos con balastras, por el acentuado incremento en la residencia; promedio 30cm (12"), aceptable 23,46cm (9", 18"); operación al vacío 16 a 76cm (18", 30")

#### PLATOS ESPECIALES

Existen diseños particulares que van a resolver -- problemas específicos; éstos, por lo regular, exceden la capacidad

de los platos convencionales; seguidamente se enumeran algunos de éstos, las características que se anotan son las que los fabricantes especifican para cada uno de los diseños:

PLATO	CARACTERISTICAS
Flexitray tipo T	baja caída de presión, alta capacidad, eficiencia y flexibilidad
Flexitray tipo A	mínima caída de presión, corto espaciamiento entre unidades, elevada capacidad
Válvula flotante Nutter	baja caída de presión, elevada eficiencia y capacidad
Balastra tipo V-1	alta capacidad, amplia flexibilidad para cualquier rango de operación, elevada eficiencia
Balastra tipo A-1	mayor capacidad que la anterior, alta eficiencia
Turbogrid	baja caída de presión, elevada capacidad
Escurrecimiento	flexibilidad, alta capacidad baja caída de presión

La selección de un plato particular y su diseño -- pueden afectar el rendimiento de un sistema de destilación. Cada uno de estos debe diseñarse de tal forma que el contacto entre vapor y líquido sea lo más eficiente posible, dentro de límites económicos.

En la mayoría de los casos no resulta conveniente cambiar el diseño de los platos para llenar las condiciones y requerimientos del cálculo; es por ello que un mismo diseño se utiliza a lo largo de toda la columna o bien, en caso necesario, la sección superior contará con uno particular y la inferior con otro. Sin embargo, mientras el número de diseños particulares que se incluyan en un equipo sea múltiple, mayor será el costo de construcción.

Cada uno de los diferentes diseños de platos debe resolver y lograr:

**Capacidad:** tendrá que ser elevada para las cargas de vapor y/o líquido, ya que de esta forma se generan diámetros menores de columna al fijarse la magnitud de este valor; debe considerarse, también, la adaptación a las fluctuaciones en las velocidades de vapor o líquido

**Caída de presión:** se requiere que este valor sea una cantidad mínima para así reducir los gradientes de temperatura entre el fondo y domo de la torre; cuando este valor es elevado se tiene, casi siempre, un diseño poco económico. Dentro de límites razonables, algunos sistemas no pueden tomar a la caída de presión como una variable de control

**Eficiencia:** un valor máximo de ésta es el objetivo del rendimiento de un plato; a medida que se tiene un mejor contacto, en un rango de capacidades amplio, mayor será la eficiencia

en ese rango

**Costos de instalación**

**y fabricación:** los detalles deben mantenerse en un mínimo para que esta variable pueda reducirse en forma apreciable

**Costos de operación y**

**mantenimiento:** las peculiaridades mecánicas deben considerar las particularidades del sistema ( sólidos en suspensión, flúidos inmiscibles, etc. ) y proveer los espacios para drenaje y limpieza eficientes ( química y mecánica ) así como consideraciones de espesor, extra, por efectos de corrosión. Con el fin de mantener los costos diarios de operación y -- tiempos muertos en un mínimo aceptable, pudiendo lograr un máximo aprovechamiento del equipo

La figura 2.4 muestra la forma en que los platos - se clasifican dependiendo de la forma en que el flujo se desplaza a través de ellos.

A continuación se enumeran una serie de consideraciones, generales, respecto de la selección de un tipo y arreglo - específico de los platos en una torre:<sup>45</sup>

*Materiales de construcción*

tipo

placa metálica

materiales

determinado por las condiciones de corrosión

*Tipo de plato*



uso general	flujo cruzado
relación (L/V) muy baja	flujo contracorriente
relación (L/V) alta o	
columnas grandes	dobles pasos
relación (L/V) extremada	
mente elevada	dobles pasos, cascada
columnas excesivamente	
elevadas	3 ó 4 pasos

#### *Bajantes y rebosadores*

tipo de bajante	segmentada
downflow apron	vertical
rebosadores (carga normal)	rectos
rebosadores (carga baja)	perforados (notched)

#### *Cachuchas de burbujeo*

diámetro nominal para:	
torres de 0.8m (2.5')	
a 1.5m (5')	7.5cm (3")
torres de 1.5m (5')	
en adelante	10cm (4")
arreglo	triangular, equilátero, hilera
	en dirección del flujo
espaciamiento	2.5cm (1") a 7.5cm (3")
tolerancia del faldón	1.3cm (.5") a 3.8cm (1.5")
montaje	diseño desmontable

#### *Tolerancias*

pared de torre a cachucha	3.8cm (1.5") mínimo
cachucha a rebosador	7.5cm (3") mínimo
cachucha a downflow apron	7.5cm (3") mínimo

#### *Dinámica del plato*

aproximación al punto de inundación	de un 80% a un 85%
-------------------------------------	--------------------

abertura promedio de

muecas:

máxima

mayor del 100% de la altura  
de muesca, sin sobrecarga

mínima

1.3cm (.5")

inmersión dinámica pro

medio (muecas):

operación al vacío

1.3 a 3.8cm (.5" a 1.5")

operación atmosférica

2.5 a 5cm (1" a 2.5")

3.5 a 7kg/cm<sup>2</sup> (50-100 psig)

3.8 a 7.5cm (1.5" a 3")

14 a 35kg/cm<sup>2</sup> (200-500 psig)

5 a 10cm (2" a 4")

relación vapor-distribución

0.5 máxima

*Altura de la masa aerada en las*

*bajantes*

100% de la altura del flujo  
que cae, máximo

*Tiempo de residencia, caída de*

*flujo (real)*

todos los sistemas menos

los excesivamente espuman

tes

3 segundos mínimo

sistemas altamente espuman

tes

5 segundos mínimo

relación de residencia  $\psi$

0.15 máximo

caída de presión

limitada por el proceso

*Espaciamiento entre platos*

para torres con diámetro:

de 0.7 a 1.2m (2.5' a 4')

45cm (18") §

de 1.5 a 6m (5' a 20')

60cm (24") §

*Factores varios de diseño*

rebosadores en la entrada

no recomendables

§ generalmente recomendable, pero posible de modificar a condiciones específicas.

reosadores intermedios

cuando la altura mínima es mayor que la altura del líquido, en la corriente de bajada

baffles de flujo contra corriente

altura mínima, el doble de la altura del líquido refinado

*Baffles redistribuidores*

localización

en las hileras cuyo espaciamiento extremo es 2.5cm (1") mayor que el espaciamiento entre cachuchas

tolerancia a las cachuchas

igual al espaciamiento entre ellas

altura

el doble de la del líquido refinado

*Sello downflow apron*

reosador a baffle, menor de 15cm (6")

1.3cm (.5")

reosador a baffle, de 15 a 30cm (6" a 12")

2.5cm (1")

reosador a baffle mayor a 30cm (12")

3.8cm (1.5")

deflexión del plato bajo carga

0.3cm (.125")

*Drenes*

tamaño

0.9 a 1.5cm (.375" a .625")

área

26cm<sup>2</sup> por cada 9.29m<sup>2</sup> de área del plato (4in<sup>2</sup> por cada 100ft<sup>2</sup>)

### Tolerancias de construcción

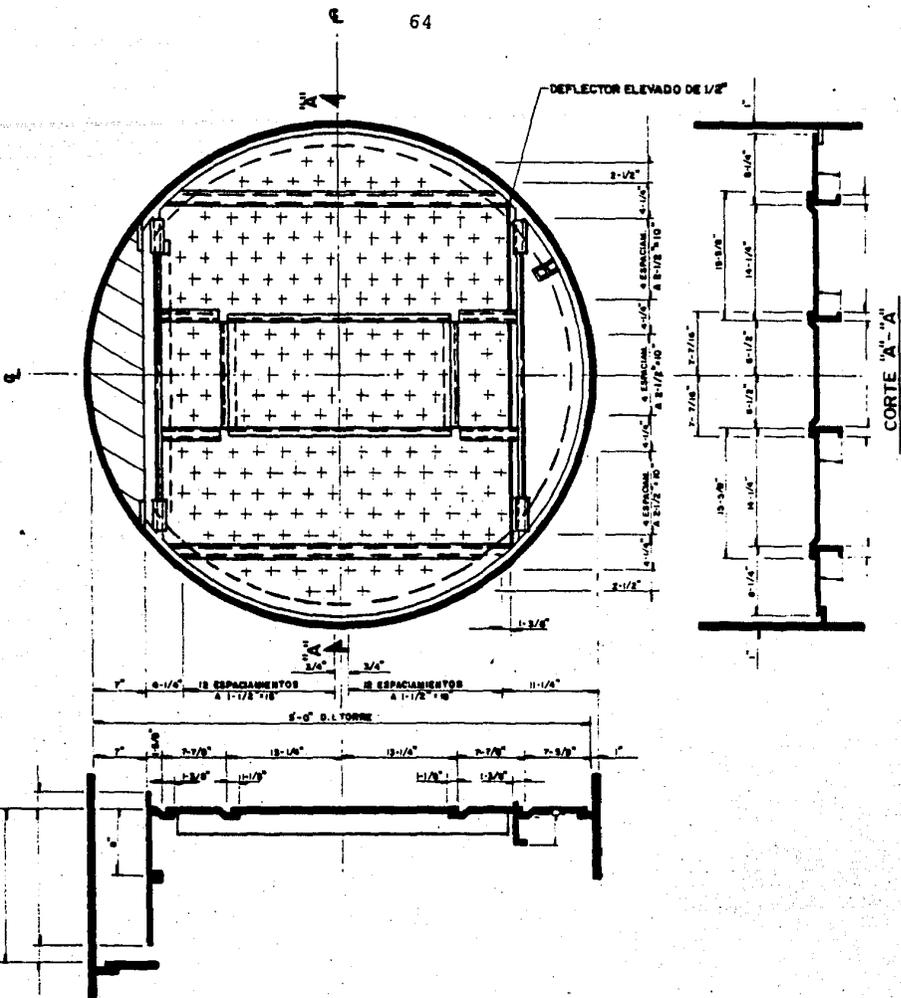
desnivel del plato	0.6cm (.25")
desnivel de la bajante	0.3cm (.125")

La figura 2.5 muestra un plato típico, que utiliza rá balastras, con las tolerancias y dimensiones de fabricación pro puestas por el constructor.

Considerando que el diseño de un plato es factor - determinante para fijar el diámetro de columna ya que el peso que la envolvente debe soportar, dependiendo de el número de éstos, es una variable que influye en la determinación de los esfuerzos, que a su vez fijan las condiciones de espesor de placa, se realizan -- los cálculos y consideraciones necesarias para fijar las dimensiones reales para construcción.

En la práctica existen una serie de factores que - van a afectar, directamente, la óptima operación de los platos y - son:<sup>46</sup>

- los requerimientos de espacio adicional en los platos de transición, lo mismo que cuando se tiene un cambio en la distribución del número de pasos; cuando la torre es un equipo de gran altura se prefiere una distancia igual a 1.2m (4')
- cuando la alimentación que se introduce es en forma de vapor se debe contar con espacio extra
- al existir cargas elevadas en el punto de alimentación, hay que considerar espacio para tuberías de -



PLATO TIPICO (5'-0") DE "BALASTRAS"  
PASO SENCILLO

Figura 2.5

alimentación interna, estas últimas se colocan de preferencia en un punto, inferior, a los armazones de soporte del plato superior

en caso de presentarse un fenómeno de inundaciones prematuras, estas pueden deberse a:

- obstrucciones en la línea de alimentación al rehervidor debidas a diámetros incorrectos de tubería y a residuos; cualesquiera de estas causas provocarán un acumulamiento de líquido en el fondo de la columna pudiendo darse el caso de que éste cubra la línea de vapor proveniente del rehervidor
- corrientes de vapor provenientes del rehervidor que chocan con la pared del sello de inundación, provocando un entreteneamiento excesivo en el plato inferior
- restricciones en el flujo del líquido, por la bajante, debidas a la incorrecta instalación de los platos o a la presencia de residuos
- localización errónea de la alimentación del vapor proveniente del rehervidor
- evaporación o exceso de espuma del líquido al pasar por las bajantes
- cargas internas mayores que las consideradas en el diseño debidas a un valor de calor latente erróneo, cambios en la presión de operación, balances de materia y energía incorrectos
- agua, hidruros o trazas de compuestos tales como glicoles, que acumulados durante la operación llegan a formar una tercera fase. Así también con una presión de operación cercana a la presión crítica

## 2.1 DATOS PARA EL DISEÑO <sup>47</sup>

Aun cuando el diseño de platos puede basarse exclusivamente en las relaciones vapor-líquido y densidades, se tendrá uno mejor y con posibilidades de óptima operación si se cuenta con información relativa a:

- Servicio
- Diámetro interno de la torre ( preliminar )
- Espaciamiento entre platos (in)
- Número de platos por sección
- Caída de presión máxima (mm de mercurio)
- Condiciones en el plato de alimentación

Vapor que llega al plato °F

Presión, compresibilidad

Densidad lb/ft<sup>3</sup>

ft<sup>3</sup>/seg = c.f.s

{c.f.s}{  $\sqrt{D_v / (D_1 - D_v)}$  }

D<sub>v</sub> = densidad del vapor

D<sub>1</sub> = densidad del líquido

Líquido proveniente del plato °F

Tensión superficial

Viscosidad cp

Densidad lb/ft<sup>3</sup>

Velocidad lb/hr

G.P.M (galones por minuto) de líquido caliente

- Tendencia a generar espuma

Resulta, además, conveniente contar con la información referente a cargas de líquido y vapor en diferentes platos y si estas varían considerablemente de plato en plato; en el caso de que la misma columna se utilice para diferentes servicios, las cargas deberán calcularse para cada caso, debe hacerse una estimación anticipada de un mínimo de cargas para que, de ser así, estos valores puedan presentarse como una proporción del porcentaje de cargas de diseño.

Hay que incluir el o los tipos de servicio, ya que los deshidratadores de glicoles y absorbedores de aminas no pueden diseñarse por el mismo método, así como otros servicios en los que las densidades y relación de flujos resulten casi idénticos. Tam--bién debe conocerse si el sistema tiende a generar espuma o cuenta con características particulares; si se dispone del dato de tensión superficial, deberá tomarse en cuenta

La caída de presión no debe restringirse más de lo necesario, puesto que los platos que cuentan con balastras se dise--ñan para valores de ésta considerablemente bajos; si esta condición es llevada al extremo puede llegarse a un punto en el que la disminución del número de platos sea tal que se requieran dos o más torres en serie para lograr la separación deseada.

Normalmente un diámetro especificado o existente - es mayor que el requerido por la operación; en caso de no conside-

rar un incremento en la capacidad, se puede lograr un diseño económico usando bajantes de mayor tamaño o reduciendo el área activa; en muchas ocasiones se utiliza el exceso de capacidad para lograr un incremento de esta con una relación de vapor constante; la relación entre el área de la bajante y el área activa se mantiene constante, por condiciones de diseño, para así proporcionar áreas convenientes para futuros incrementos de las cargas en el equipo. En la mayoría de los casos se busca, preferentemente, un diseño de -- plato óptimo para máxima capacidad y no para costo mínimo.

En la mayoría de las aplicaciones los vertedores de tipo ajustable son poco utilizados y solo cuando el proceso lo requiere, o existen condiciones especiales dentro del mismo, se usarán, esto se debe a los problemas que las operaciones de mantenimiento de este tipo de vertedor llegan a generar.

## 2.2 PROCEDIMIENTO DE CALCULO\*

Como punto de partida se supone el diámetro de plato y el espaciamiento entre ellos, la capacidad y caída de presión de este sistema modular se compara con las especificaciones requeridas; de ser necesario se ajustarán diámetro, dimensión de bajantes y área activa o espaciamiento entre platos, para así coincidir con los requerimientos ya sean para costo mínimo o diseño óptimo (máximas capacidad y eficiencia).

### BASE DE DISEÑO

Aun cuando sea posible operar columnas en condiciones cercanas a la inundación, no se recomienda un diseño que cuente con un factor de seguridad reducido y suponer que siempre se tendrán la capacidad y eficiencia requeridas, ni aún cuando esto se pudiese garantizar.

Normalmente se acostumbra reducir la capacidad de inundación calculada para un sistema en particular, como ejemplo se tiene el caso de dos etanizadores operando a presiones elevadas, por experiencia se sabe que éstos se inundan a un 60% de la capacidad calculada para una columna atmosférica.

Este método de cálculo toma en consideración los efectos causados por una elevada densidad del vapor y formación de espuma. Por ello si se calcula un 100% de inundación, esto signifi

cará que la torre se inunde tal como lo preveen los cálculos.

#### FACTOR DE INUNDACION

En columnas que van a ser diseñadas es recomendable el uso de factores de diseño no mayores al 82% de la capacidad de inundación; en ocasiones se prefiere un diseño más libre con el fin de poder hacer frente a los cambios imprevistos en las corrientes del proceso. Existe la posibilidad de que se especifique una columna para que opere al 125% de su capacidad de diseño, esto significa un diseño de  $0.82 \div 1.25 = 0.66$  o sea el 66% de inundación como máximo; una alternativa sería resultado del aumento de capacidad en un factor de 1.25 que generaría una nueva base de diseño.

El término factor de inundación ( F.F ) es utilizado en las ecuaciones con el propósito de estimar el tamaño de una columna; este valor es el "porciento de inundación de diseño", expresado como una fracción. Un valor de 0.77 es usado normalmente para torres que operen al vacío y un valor no mayor de 0.82 para los otros tipos de servicio, estos valores sirven de orientación para obtener un valor de tiempo de residencia no mayor al 10%; factores más elevados traen como consecuencia tiempos de residencia excesivos y/o un tamaño de columna tal que su operación sería en extremo ineficiente. Generalmente se utilizarán factores entre 0.65 y 0.75 para columnas cuyo diámetro no exceda de 0.9m ( 36" ).

VELOCIDAD DE DISEÑO PARA BAJANTES  $VD_{ds}$

Entre los diferentes métodos que existen para el cálculo

de las dimensiones de éstas se tiene una variación de 2 unidades en factor; algunos de estos abordan el problema utilizando el factor - tiempo, otros usan la "velocidad máxima permisible". Ahora bien las columnas pueden operarse con velocidades, en las bajantes, de una magnitud de hasta 3 ft/seg, considerando que se tienen velocidades suficientemente bajas para el vapor; esta consideración es casi 5% mayor que el "máximo permisible" usado por cualquier método, por lo que ese término, en la mayoría de las ocasiones, puede resultar demasiado vago.

La forma en que se establecerá el área de la bajante se basa en una velocidad de diseño representada por las ecuaciones 2.14, 15, 16 o en forma gráfica por medio de la figura 2.6.

$$VD_{dsg} = (250) (\text{Factor del sistema}) \quad (2.14)$$

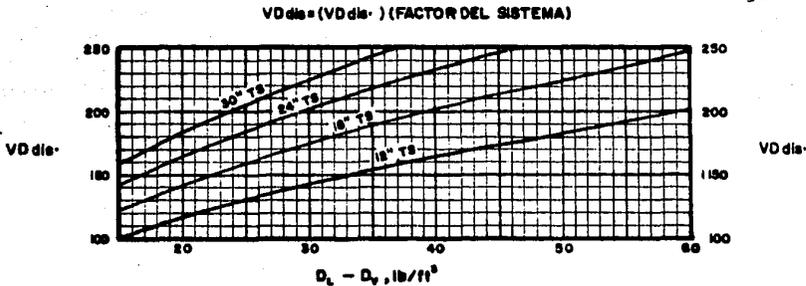
$$VD_{dsg} = (41) (\sqrt{D_\ell - D_v}) (\text{Factor del sistema}) \quad (2.15)$$

$$VD_{dsg} = (7.5) (\sqrt{TS}) (\sqrt{D_\ell - D_v}) (\text{Factor del sistema}) \quad (2.16)$$

donde:  $VD_{dsg}$  = velocidad de diseño  $\text{gpm/ft}^2$

TS = espaciamiento entre platos, in  
**VELOCIDAD DE DISEÑO, BAJANTES**

Figura 2.6



TS=ESPACIAMIENTO DE PLATOS

De las soluciones obtenidas en las ecuaciones antes -  
descritas se utilizará el menor valor; el "factor del sistema" usa-  
do en las ecuaciones cuenta con una tolerancia que incluye el factor  
debido a la formación de espuma. En caso de tener la certeza de que  
el sistema tiende a formar espuma se deberá escoger un factor apro-  
piado para ser aplicado. A continuación se enumeran algunos factores  
de aplicación típica en la industria:

TABLA 2.1

SERVICIO	FACTOR DEL SISTEMA
Sistemas regulares; no espumantes	1.00
Sistemas fluorados; BF <sub>3</sub> , Freón	0.90
Espumantes regulares; absorbedores, regenera- dores glicol-amina	0.85
Espumantes densos; ab- sorbedores de aminas y glicoles	0.73
Fuertemente espumantes; unidades metil-etil-cetona	0.60
Sistemas espumantes esta- bles; regeneradores caústicos	0.30 - 0.60

FACTOR DE CAPACIDAD DE VAPOR CAF

El nomograma de la figura 2.7 muestra este factor que

### CAPACIDAD DE INUNDACION DE PLATO DE "BALASTRAS"

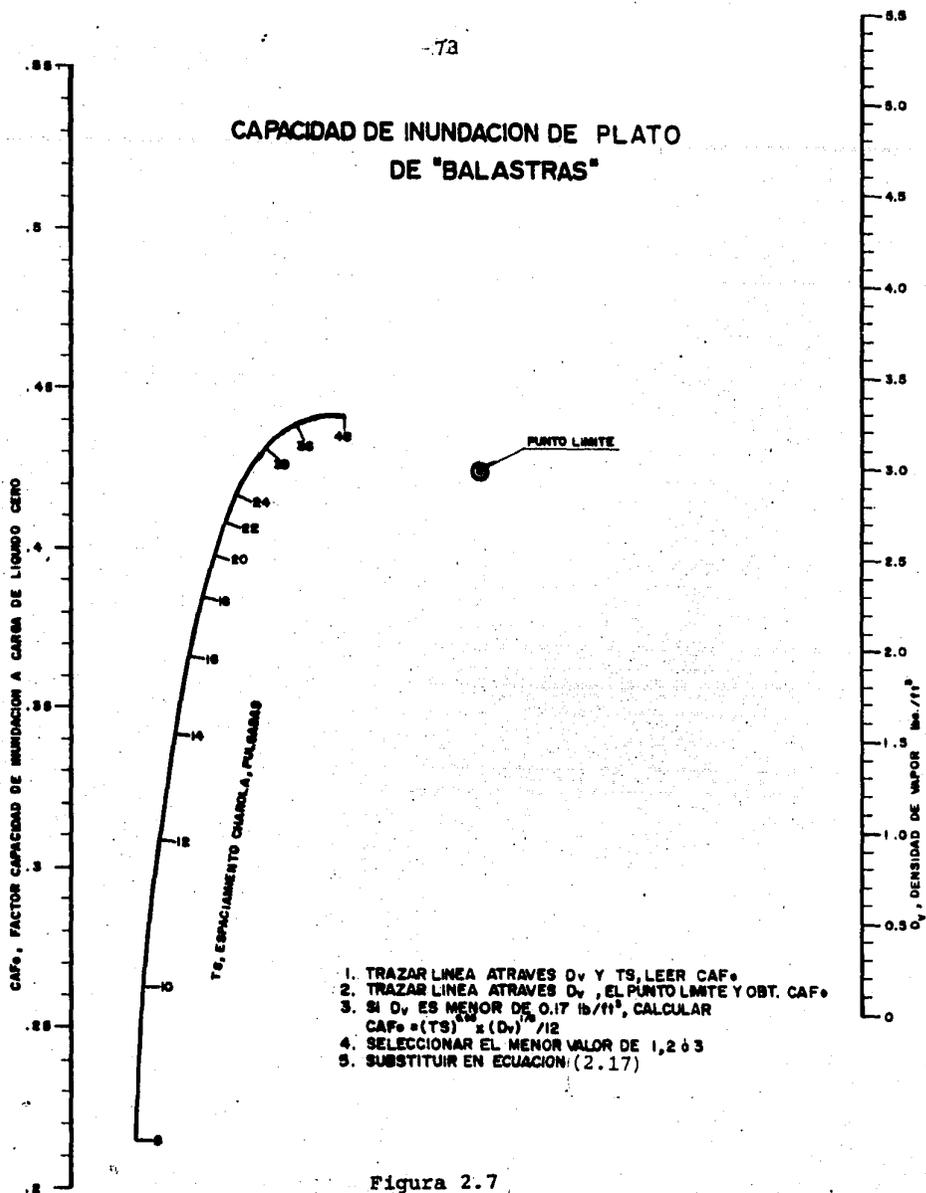


Figura 2.7

se utilizará en el cálculo de platos con 'balastras'; el valor así obtenido ( $CAF_0$ ) se multiplica por el 'factor del sistema' obtenido con anterioridad, resultando así un valor corregido por formación de espuma:

$$CAF = (CAF_0)(\text{Factor del sistema}) \quad (2.17)$$

La capacidad de los platos de 'balastras' aumenta a medida que el espaciamiento entre ellos se incrementa hasta un valor límite que se encuentra, prácticamente, en 1.2m (48") cuando la densidad del vapor es menor a 2 lb/ft<sup>3</sup>; una densidad mayor de vapor limita este espacio a un valor menor a 1.2m.

En términos generales, la energía disipada por el flujo de vapor a través de un plato y el tiempo de residencia aumentan al disminuir la densidad del vapor; en columnas operadas al vacío, el tiempo de residencia que se genera causa una reducción en el factor de capacidad que puede ser calculado con densidades de vapor elevadas. La descripción de este fenómeno es la ecuación en la nota 3 de la figura 2.7.

El punto límite que se muestra en la figura 2.7 puede sobrepasarse si se tienen densidades de vapor elevadas, como las que se tienen en absorbedores de alta presión donde el líquido no se encuentra a su temperatura de ebullición y su densidad es independiente de la presión del sistema; no se recomienda la extrapolación de los valores de capacidad para densidades de líquidos mayores a un rango de 35 lb/ft<sup>3</sup>.

$$V_{\text{carga}} = (\sqrt{D_v / (D_L - D_v)}) (CFS) \quad (2.18)$$

Este último término se utiliza para determinar dimensiones y calcular los porcentajes del diámetro para una columna determinada.

### 2.3 APROXIMACION DEL DIAMETRO DE COLUMNA<sup>49</sup>

#### LONGITUD DEL PATRON DE FLUJO FPL

Una aproximación de este valor puede ser útil en la determinación del diámetro mínimo de la torre. La figura 2.8 es de considerable ayuda en el cálculo inicial, ya que esta se basa en la ecuación:

$$FPL = (9) (DT/NP) \quad (2.19)$$

donde: FPL = longitud del patrón de flujo, in

DT = diámetro de la torre, ft

NP = número de patrones de flujo o pasos

#### AREA ACTIVA AAM

El valor mínimo de ésta es función de las cargas de vapor y líquido, propiedades del sistema, factor de inundación y patrón de flujo; la determinación de las cargas en el plato indicará cuál de estos tiene una mayor área efectiva, a saber:

$$AAM = \frac{V_{carga} + (GPM)(FPL/1300)}{(CAF)(FF)} \quad (2.20)$$

donde:  $V_{carga}$  = carga de vapor en cualquier plato de la sección

GPM = carga del líquido en el mismo plato

AAM = área mínima activa, ft<sup>2</sup>

CAF = factor de capacidad de la ecuación 2.17

FF = factor de inundación, o % de diseño, fracción

# DIAMETRO DE PLATO "BALASTRAS"

(UNICAMENTE APROXIMACION)

BASEADO EN ESPESAMIENTO DE 20" A 30% DE HUMEDAD

PARA CHAROLAS PASO CUADRUPLE

- (1) DIVIDIR CARGA ENTRE 2
- (2) DIVIDIR GPM ENTRE 2
- (3) OBTENER DIAMETRO DE LINEA PASO DOBLE
- (4) MULTIPLICAR EL DIAMETRO POR  $\sqrt{2.0}$

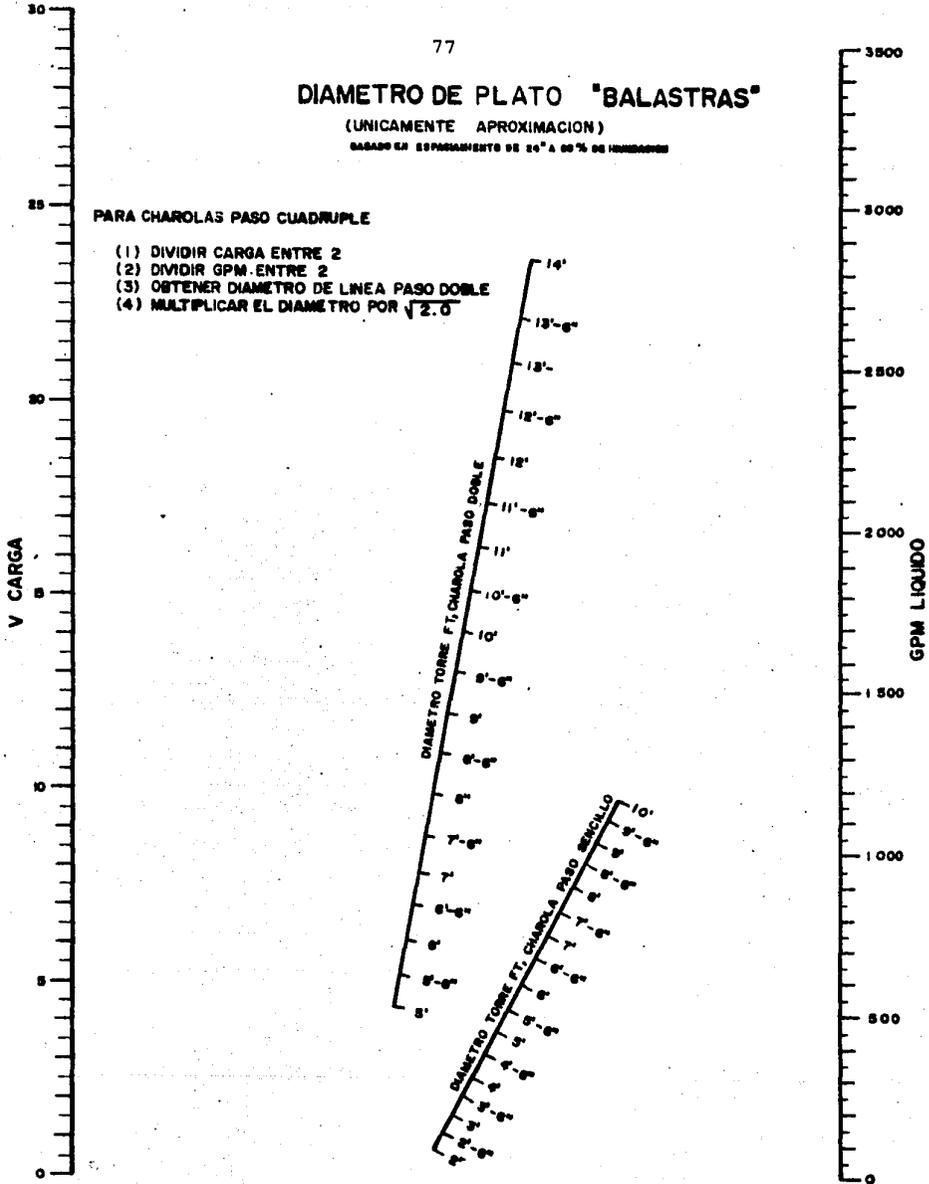


Figura 2.8

### AREA DE LA BAJANTE ADM

El área mínima de esta se encuentra en función de: la velocidad del líquido, diseño de la bajante y factor de inundación; como en el caso anterior al determinar las cargas del líquido, es este valor suficiente para definir el plato que requiere mayor área, sin embargo, el plato con mayor carga líquida no es el que necesariamente requiere mayor área.

$$ADM = ( GPM ) ( VD_{dis} ) ( FF ) \quad (2.21)$$

donde:  $VD_{dis}$  = velocidad en la bajante para propósitos de diseño, gpm/ft<sup>2</sup>

ADM = área mínima de la bajante, ft<sup>2</sup>

Si el área de la bajante así calculada es menor al 11% del área activa, puede optarse por:

ADM = 11% del área activa o bien

ADM = el doble de lo calculado con la ecuación (2.21)

### AREA DE LA COLUMNA

El área seccional transversal se calcula utilizando cualquiera de las ecuaciones 2.22 ó 2.23, considerando el mayor valor que resulte; el valor de diámetro de torre basado en uno de área aproximada de columna puede usarse como referencia para un cálculo posterior más detallado y que posteriormente podrá ser modificado.

$$ATM = ( AAM + 2 ) ( ADM ) \quad (2.22)$$

$$ATM = \frac{V_{carga}}{(0.78) (CAF) (FF)} \quad (2.23)$$

$$DT = \sqrt{ATM/0.7854} \quad (2.24)$$

donde: ATM = área mínima seccional de columna, ft<sup>2</sup>

#### DISTRIBUCION DE AREAS PARA UN DIAMETRO DE COLUMNA FIJO

El diámetro de una columna puede estimarse con la ecuación 2.25 o ser un valor como: una columna existente, un valor preestablecido, etc...; en cualquier caso el área seccional transversal del diámetro que va a utilizarse, no será igual al mínimo aproximado que se obtiene con la ecuación 2.24.

Si el área seccional de la torre es menor que el área mínima calculada, deberá utilizarse un diseño para máxima capacidad; en caso contrario el diseño podrá realizarse para mínimo costo o para máxima capacidad.

##### *Diseño para costo mínimo*

Este se obtiene al reducir el área activa a un mínimo. En el caso de columnas que están operando puede usarse, con fines de ahorro, las bajantes existentes siempre que el área activa o área de bajante no sea muy pequeña.

##### *Diseño para máxima capacidad*

O en otras palabras el que genera una máxima eficiencia; se obtiene cuando se logra una proporción entre el área activa

y el área de la bajante, de tal modo que el porcentaje de inundación, para una carga de vapor, sea igual al porcentaje de inundación para una carga de líquido.

Este tipo de diseño es el mas frecuentemente utilizado y si no se tienen especificaciones o restricciones se aplicará en el caso de diseño para columnas nuevas. En un diseño de esta naturaleza el área total de la bajante se calcula:

$$AD = ( AT ) ( ADM/ATM ) \quad (2.25)$$

donde: AD = área total de la bajante, ft<sup>2</sup>

AT = área real de la torre, ft<sup>2</sup>

ADM = área mínima de la bajante de la ecuación 2.21

ATM = área mínima de la torre de la ecuación 2.24

El área de la bajante no deberá ser menor al 10% del área de la columna; en caso de tenerse velocidades extremadamente bajas pueden usarse bajantes con superficie menor al 10% del área de columna, siempre que ésta sea por lo menos el doble del área mínima de la bajante.

#### ARREGLO DE LOS PLATOS

Cuando se ha establecido el diámetro de la torre y el área de las bajantes, el realizar un dibujo del plato ayuda a fijar el resto de las dimensiones necesarias. La figura 2.9 muestra los arreglos típicos para platos desde uno a cinco pasos.

#### ANCHO DE LAS BAJANTES

81

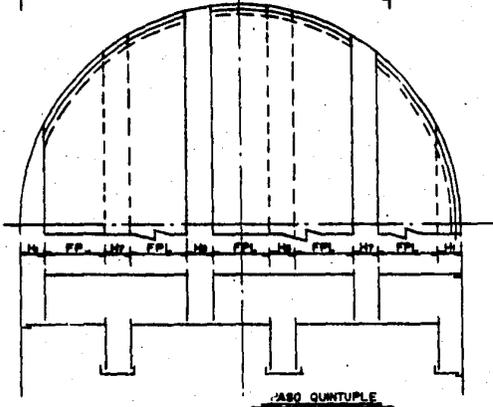
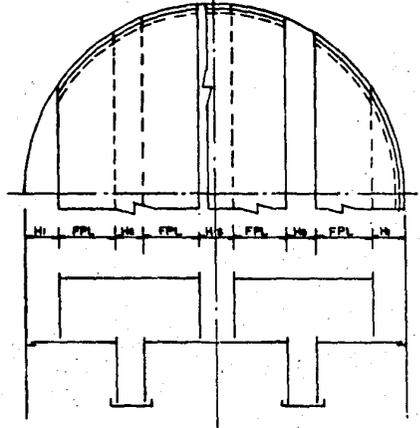
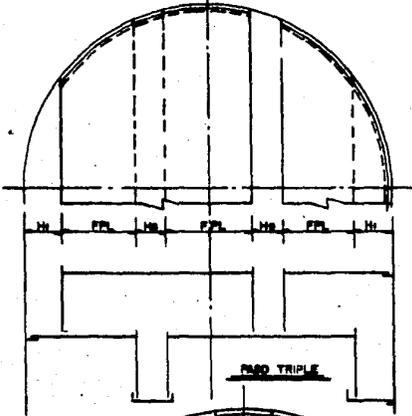
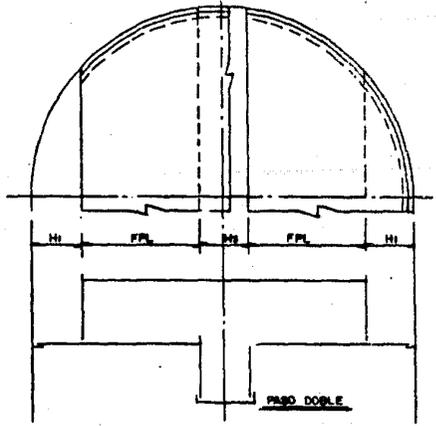
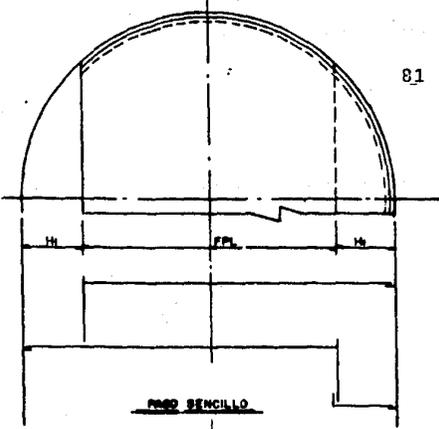


Figura 2.9:

ARREGLO DE PASOS EN  
LOS PLATOS

Los términos  $H_1$ ,  $H_3$ ,  $H_5$ ,  $H_7$  son empleados para identificar el ancho ( en in. ) del corrimiento centrado, descentrado y excentricidad que pudiesen tener las bajantes; las áreas correspondientes en la parte superior de las bajantes se denominan  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_7$ . El área total de la bajante deberá dividirse entre entre las diferentes bajantes, para el caso de platos multipaso, en una proporción aproximada al área activa que cada una de estas sirve. La tabla 2.2 que a continuación se presenta es de gran ayuda para localizar el área de acuerdo con el concepto antes expresado.

Como una referencia: cada una de las bajantes laterales de un plato de paso cuádruple tendrá una área de, aproximadamente, el 21% del total de área de la bajante.

TABLA 2.2

LOCALIZACION DEL AREA DE LA BAJANTE Y FACTORES DE ANCHURA

PASOS	FRACCION TOTAL DEL AREA DE BAJANTE				$w_0$ FACTOR DE ANCHURA		
	$AD_1$	$AD_3$	$AD_5$	$AD_7$	$H_3$	$H_5$	$H_7$
2	0.5 c/u	1.0	—	—	12.0	-	-
3	0.31-0.34	—	0.69-0.66	—	-	8.63	-
4	0.21-0.25	0.58-0.5	0.5 c/u	—	6.9	6.78 c/u	-
5	0.16-0.2	—	0.46-0.4	0.38	-	5.66	5.5

Una estimación más aproximada de ancho, distinta a la de una bajante lateral, puede obtenerse substituyendo los factores de la tabla anterior en la ecuación 2.26:

$$H_i = (W_f)(AD/DT) \quad (2.26)$$

donde:  $H_i$  = ancho de la bajante individual, in

AD = área total de la bajante,  $ft^2$

DT = diámetro de la torre, ft

$W_f$  = factor de anchura ( de la tabla )

Los anchos de las bajantes se ajustan para tener una longitud de flujo como un patrón modular; con propósitos preliminares éste puede hacerse igual a 21cm ( 8.5" ) mas un múltiplo de 3.8 cm ( 1.5" ); la longitud de este patrón se calcula con la ecuación 2.27 y la anchura de la bajante se ajusta, para así obtener la longitud del patrón de flujo modular ( FPL ).

$$FPL = \frac{(12)(DT) - (2H_1 + H_3 + 2H_5 + 2H_7)}{NP} \quad (2.27)$$

donde: NP = número de pasos

Un valor menor de 40cm ( 16" ), como solución de esta ecuación, no resulta factible si se desean entradas de hombre. Algunos casos específicos puede tener una carga de líquido elevada en relación a la carga de vapor requiriendo, por tanto, un patrón de flujo mínimo de 40cm ( 16" ) y un diámetro mayor que el calculado -- por la ecuación 2.24; en este caso el área mínima de bajante requerida y el patrón de flujo se establecen en el ámbito de un diseño para costo mínimo.

AREA DE BAJANTE AD

Una vez que se ha ajustado el ancho de las bajantes a dimensiones modulares o se han establecido de antemano, se puede -- calcular, con bastante aproximación, el área de corrimiento, centrado, descentrado y excentricidad de las mismas en forma preliminar y para este objeto se utiliza la ecuación:

$$AD_i = (H_i)(SF)(DT/12) \quad (2.28)$$

donde:  $AD_i$  = área de la bajante individual,  $ft^2$

$H_i$  = ancho de la bajante individual, in

SF = factor par, fracción

DT = diámetro de la torre, ft

El factor par utilizado en la ecuación 2.28 es la distancia en el punto medio de la longitud entre paredes, expresada como una fracción del diámetro de la torre; la tabla 2.3 enumera estos factores y sirve para verificar así como estimar el área de la bajante y longitud del rebosador.

TABLA 2.3

FACTORES PARES DE LAS BAJANTES SF ( APROXIMADOS )

PASOS	FRACCION DEL DIAMETRO DE TORRE		
	$H_3$	$H_5$	$H_7$
2	1.0	-	-
3	--	0.95	-
4	1.0	0.885	-
5	--	0.98	0.88

Cuando el arreglo en los platos es doble paso o paso cuádruple el área que se tiene para un número par de platos, puede ser diferente cuando al número de estos sea non, un valor promedio puede utilizarse para los cálculos posteriores.

#### AREA ACTIVA

Esta área disponible para platos de 'balastras' es el área útil que se localiza entre la entrada y salida del plato; de las ecuaciones que a continuación se enumeran se aplicará una o ambas, para bajantes rectas o inclinadas con acceso reticular:

$$AA = (AT) - (2AD_1 + AD_3 + 2AD_5 + 2AD_2) \quad (2.29)$$

$$AA = (AT) - (2) (AD_{prom}) \quad (2.30)$$

En este caso  $AD_{prom}$  es el promedio del área de las bajantes de los platos, sean estos un número non o par, las bajantes inclinadas se utilizan, comúnmente, con secciones de acceso reticular o sumideros de extracción; las dimensiones, ancho y área de los accesos reticulares son las mismas que las de la parte superior de las bajantes. En caso de que se requiera una disminución en la caída de presión, se incrementará el número de 'balastras' y para ello se usarán bajantes inclinadas con superficies de sello planas en el fondo, el área activa extra, así obtenida, resulta ser no mayor del 50% del área de la bajante.

#### PORCIENTO DE INUNDACION CON RELACION V/L FIJA

Una vez que se han determinado las diferentes áreas -

se calcula el porcentaje de inundación, esto es  $V_{carga}$  de diseño, expresado como el porcentaje de inundación de  $V_{carga}$  que puede obtenerse a partir de las ecuaciones 2.31 y 2.32, de cualesquiera valor -- que se obtenga se utilizará el mayor:

$$\% \text{ inundación} = \frac{V_{carga} + (GPM) (FPL/1300)}{(AA) (CAF)} \quad (2.31)$$

$$\% \text{ inundación} = \frac{V_{carga}}{(AT) (CAF) (0.78)} * \quad (2.32)$$

\* ( esta ecuación aplica cuando las velocidades del líquido son menores a 0.5 gpm )

Las ecuaciones que se presentan a continuación, se emplearán en columnas cuya área de bajantes es demasiado pequeña, en relación a la requerida; este es el caso del reacondicionamiento de una columna que se encuentra en operación:

$$\% \text{ inundación} = \left\{ \frac{V_{carga}}{(AA) (CAF) - \left\{ \frac{(AD) (VDdis) (FPL)}{13,000} \right\} (DLF)} \right\}^5 \quad (2.33)$$

$$5 = 0.523$$

donde:

$$DLF = \left\{ \frac{(AD) (VDdis)}{GPM} \right\}^{0.6} \quad (2.34)$$

En la ecuación 2.33 se tiene el término 'DLF', "factor de carga de la bajante", el cual será menor a la unidad si el área de la bajante es, en sí misma, menor a la nominal requerida. La ecuación 2.33 se aplica en casos donde el área de la bajante es mayor a la nominal requerida, sin embargo el valor máximo del término 'DLF' es 1.2; normalmente se utilizan las ecuaciones 2.31 y 32 -

La capacidad de los platos de 'balastras' es función de la caída de presión que estos tienen cuando se encuentran totalmente secos, es así que si se tienen columnas con longitud de patrón de flujo corto, diámetro reducido u obstrucciones en el área activa, se tendrá un número de 'balastras' menor por pié cuadrado de área activa, que en aquellos platos que no cuentan con estas limitaciones. El número de 'balastras' puede reducirse de un máximo, potencial, para tener diseños de costo mínimo, o por razones de proceso u operación eficiente a velocidades reducidas. La siguiente ecuación es resúmen de este criterio:

$$(\Delta P_{seca})_{inund} = (TS)(0.2) \quad (2.35)$$

donde:  $\Delta P_{seca}$  = caída de presión seca, de la tabla 2.4 para unidades tipo V - 1

TS = espaciamiento entre platos, in

La figura 2.10 muestra diferentes tipos de bajantes - usados con frecuencia en torres de proceso.

#### $V_{carga}$ DE INUNDACION

Este término es el resultado de una relación cuando - el valor vapor-líquido es constante y resulta de dividir  $V_{carga}$  entre el porcentaje de inundación.

#### CAIDA DE PRESION

Esta es función de las velocidades del vapor y líqui-

TIPOS DE BAJANTES

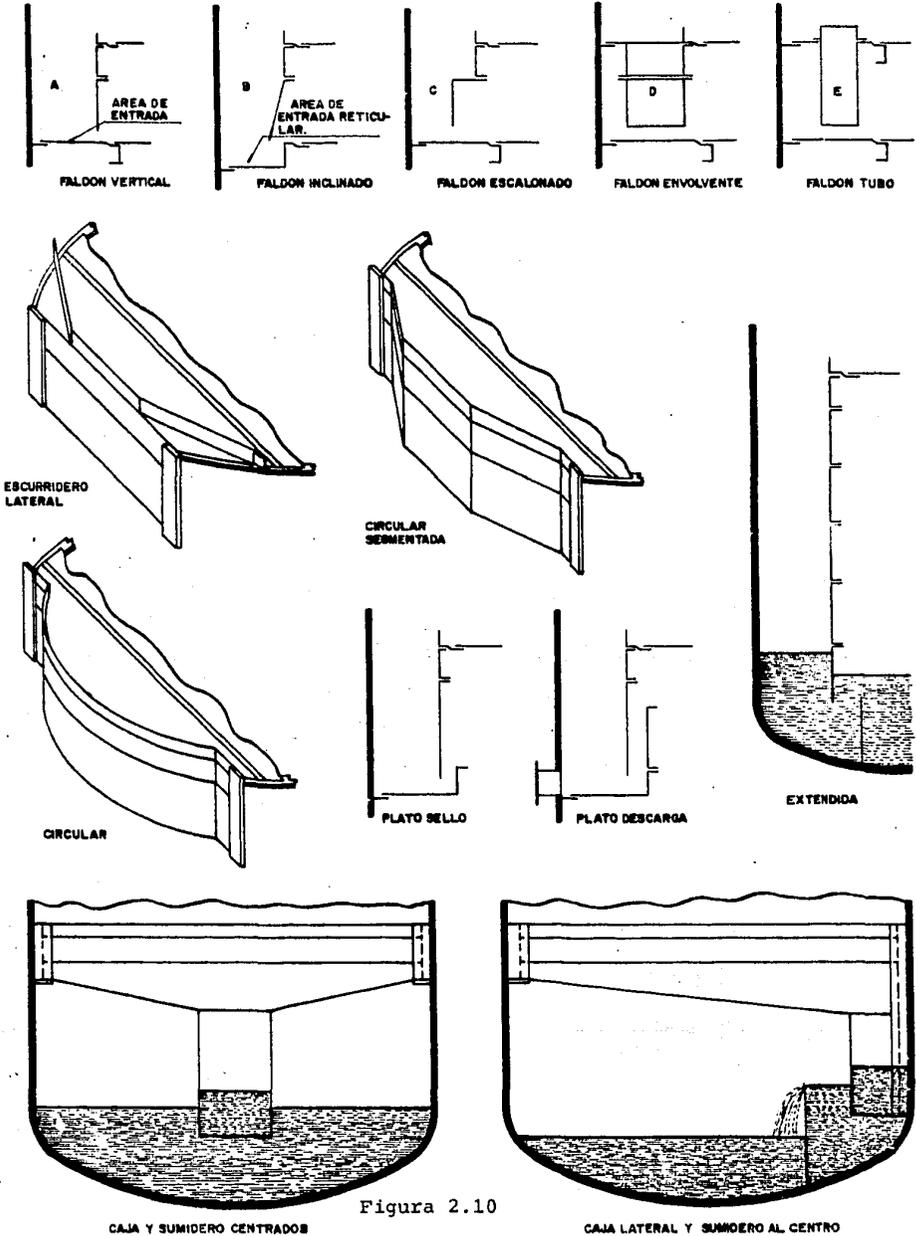


Figura 2.10

CAJA Y SUMIDERO CENTRADOS

CAJA LATERAL Y SUMIDERO AL CENTRO

do, número de platos, tipo y densidad del metal así como espesor de las válvulas, altura y longitud del vertedor.

Cuando las velocidades de vapor se encuentran en el rango de bajas a moderadas y cuando las 'balastras' se encuentran parcialmente abiertas, la caída de presión del plato seco es proporcional al peso de la válvula independientemente de la velocidad del vapor; cuando esta es lo suficientemente elevada para abrir totalmente las válvulas ('balastras') la presión del plato seco será proporcional al cuadrado de la velocidad del vapor a través del orificio.

#### CAIDA DE PRESION DEL PLATO SECO

La magnitud de este valor para platos equipados con 'balastras' tipo V - 1 y V - 4 ( las más frecuentemente utilizadas ) se obtiene del nomograma figura 2.11, que se basa en una densidad de material igual a 510 lb/ft<sup>3</sup>. Las ecuaciones que se muestran a continuación se utilizan para condiciones no consideradas en la figura, debe considerarse, además, que el mayor valor que se obtenga será siempre el que aplique:

*Unidades parcialmente abiertas:*

$$\Delta P_{seca} = (1.35) (t_m) (D_m/D_\ell) + (K_1) (V_h) (D_v/D_\ell) \quad (2.36)$$

*Unidades totalmente abiertas:*

$$\Delta P_{seca} = (K_2) (V_h) (D_v/D_\ell) \quad (2.37)$$

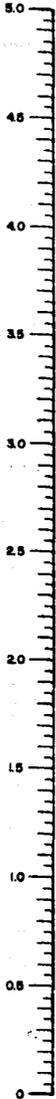
donde:  $\Delta P_{seca}$  = in. de líquido

$t_m$  = espesor de la válvula 'balastra', in

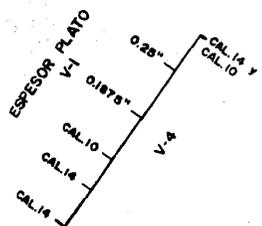
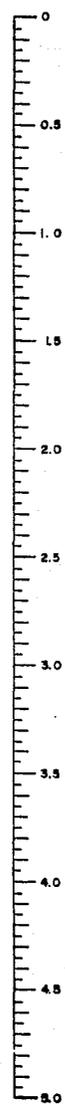
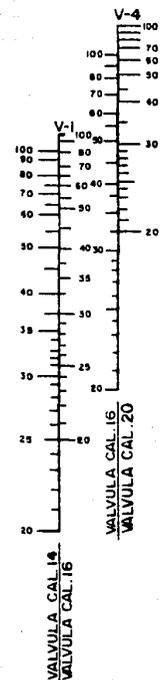
**$\Delta P_0$  DE PLATO SECO  
BALASTRAS  
TIPO: V y V<sub>2</sub>**

$V^2 D_v/D_L$

$\Delta P_0$  LIQUIDO



DENSIDAD DEL LIQUIDO lb/ft<sup>3</sup>



TOTALMENTE ABIERTAS  
( $\Delta P_0 = K_z V^2 D_v/D_L$ )  
 $K_z$  Varía con el espesor del plato

PARCIALMENTE ABIERTAS

OBTENER  $\Delta P_0$  CORRESPONDIENTE A:  
(a) UNIDADES PARCIALMENTE ABIERTAS  
(b) UNIDADES TOTALMENTE ABIERTAS  
EL VALOR MAYOR SE UTILIZA.

$$(\Delta P_0 = \frac{1.35 \text{ tmdn}}{D_L} + K_1 V^2 D_v/D_L)$$

DENSIDAD DEL MATERIAL = 510 lb/ft<sup>3</sup>

Figura 2.11

- $D_m$  = densidad del material, lb/ft<sup>3</sup>  
 $K_1, K_2$  = coeficientes de caída de presión  
 $V_h$  = velocidad anular, ft/seg

La tabla 2.4 proporciona los valores de  $K_1$  y  $K_2$  así como las densidades de los metales que se utilizan con más frecuencia en la construcción de platos.

TABLA 2.4  
 COEFICIENTES DE CAIDA DE PRESION

Unidad tipo	$K_1$	$K_2$ para espesores de plato en calibres:			
		14	12	10	0.25"
V - 1	0.2	0.074"	0.104"	0.134"	0.58
V - 2	0.1	0.50	0.50	0.50	no disp.

MATERIAL DE LA VALVULA ('BALASTRA')

Metal	densidad lb/ft <sup>3</sup>	Metal	densidad lb/ft <sup>3</sup>
A.C.	480	Titanio	283
A.I.	510	Hastelloy	560
Níquel	553	Aluminio	168
Monel	550	Cobre	560
		Plomo	708

VELOCIDAD ANULAR

Este valor se utiliza como término en las ecuaciones

2.36 y 2.37, se obtiene por medio de la relación:

$$A_h = (NV)/78.5 \quad (2.38)$$

donde : NV = número total de unidades 'balastras'

$$A_h = \text{área anular, ft}^2 = V_h$$

#### CAIDA DE PRESION TOTAL DEL PLATO

Este valor se calcula por medio de la ecuación:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{deca}} + (0.4) (\text{gpm}/L_{w\ell}) + (0.4) (H_w) \quad (2.39)$$

donde:  $\Delta P$  = caída de presión total, in. de líquido

$H_w$  = altura del rebosador, in

$L_{w\ell}$  = largo del rebosador, in

la equivalencia del valor de la caída de presión puede convertirse a lb/in<sup>2</sup> o mm de mercurio por medio de las relaciones siguientes:

$$\Delta P, \text{ lb/in}^2 = (\Delta P, \text{ in. líquido}) (D_\ell) / 1728 \quad (2.40)$$

$$\Delta P, \text{ mm Hg} = (\Delta P, \text{ in. líquido}) (D_\ell) / 33.3 \quad (2.41)$$

#### FLEXIBILIDAD

La velocidad de vapor, estimada, a la que no ocurre 'goteo' en un plato convencional de paso simple, se expresa por los valores de  $V_h \sqrt{D_v / D_\ell}$  comparados con el nivel del líquido en el plato, de aquí que:

Nivel de líquido	1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
V - 1	0.35	0.45	0.53	0.59	0.69	0.75
V - 4	0.63	0.81	0.97	1.11	1.24	1.36

Las velocidades antes mostradas representan el punto de 'goteo' cuando se usa un diseño normal y pueden reducirse o aumentarse por el tipo de 'balastras' que se utilicen; estos valores son únicamente referencias ya que una relación de 'goteo' del 25%, del líquido en el plato, representa un 10% de pérdida en la eficiencia.

Si no puede obtenerse una flexibilidad adecuada usando un máximo de unidades complementarias, puede optarse por:

- Incrementar el espaciamiento entre cachuchas para reducir el número de unidades u omitir hileras de unidades en la entrada o salida del plato
- Utilizar unidades más pesadas, con aberutra inicial cero, en hileras escogidas, si los requerimientos de cada de presión lo permiten; estas unidades se considerarán inactivas

En caso de que se opte por la segunda proposición, se podrán emplear unidades del tipo A-1 ó V-2, o cuando las velocidades del líquido sean muy bajas o se desee obturación completa.

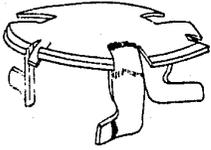
La figura 2.12 muestra los diferentes tipos de 'balastras', muchos de los cuales han sido mencionados en párrafos anteriores.

#### ANCHO DEL PATRÓN DE FLUJO WFP

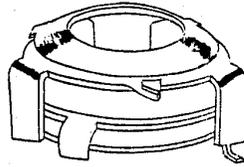
Esta dimensión se define como el área activa (  $in^2$  ) dividida entre la longitud del patrón de flujo; este término se utiliza en la determinación del número de 'balastras'

$$WFP = ( AA ) ( 144/FPL ) \quad (2.42)$$

94  
TIPOS DE BALASTRAS



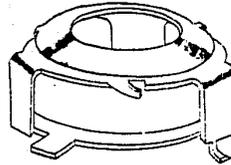
V-1, V-4



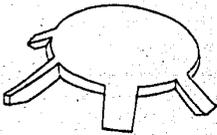
A-1, A-4



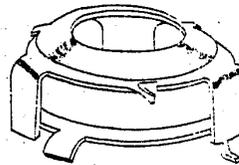
V-1, V-4



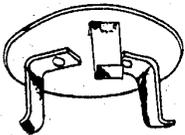
A-2, A-5



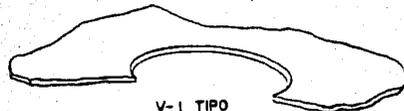
V



A-2, A-5



V-2



V-1 TIPO  
(ORIFICIO PLANO)



V-4 TIPO  
(ORIFICIO EXTRUIDO)

Figura 2.12

### NUMERO APROXIMADO DE UNIDADES

El número de 'balastras' que cabrán dentro del área activa, es el número de unidades multiplicadas por el promedio de unidades por hilera, con correcciones por pérdidas en el área activa debidas a la instalación de secciones pasahombre, y se puede calcular:

Con líneas de refuerzo paralelas al flujo del líquido

$$\text{hileras} = \left\{ \frac{(\text{FPL}) - (8.5)}{(0.5)(\text{BASE})} + 1 \right\} \{ \text{NP} \} \quad (2.43)$$

$$\text{Unidades/hilera} = \frac{\text{WFP}}{(5.75)(\text{NP})} - (0.8) \left( \begin{array}{l} \text{n}^{\circ} \text{ de vigas} \\ \text{principales} \end{array} + 1 \right) \quad (2.44)$$

Con líneas de refuerzo perpendiculares al flujo del líquido

$$\text{hileras} = \left\{ \frac{(\text{FPL} - 1.75)(\text{n}^{\circ} \text{ refuerzos}) - 6.0}{2.5} \right\} \{ \text{NP} \} \quad (2.45)$$

$$\text{Unidades/hilera} = \frac{\text{WFP}}{(\text{BASE})(\text{NP})} - (2) \left( \begin{array}{l} \text{n}^{\circ} \text{ de vigas} \\ \text{principales} \end{array} + 1 \right) \quad (2.46)$$

donde: FPL = longitud del patrón de flujo, in

WFP = ancho del patrón de flujo, in

NP = número de pasos

BASE = espaciamiento entre unidades, normalmente: 3", 3.5"

4", 4.5" 6 6"

Aproximadamente se tendrán de 12 a 14 unidades por ft<sup>2</sup> de área activa utilizando un valor de BASE igual a 3", el número puede reducirse si: se omiten hileras o se cambia la BASE. Las líneas de refuerzos son generalmente paralelas al flujo del líquido,

cuando las columnas no cuentan con vigas principales; conviene, dentro de las consideraciones principales, restar 12 unidades por concepto de pasahombre cuando la longitud del patrón de flujo es mayor a 43", de manera general cuando las columnas cuentan con viga principal las líneas de refuerzo serán verticales al patrón de flujo ( en este caso se restarán únicamente 6 unidades ).

#### BAFFLE RÓMPEOLAS

Al operar columnas a velocidades elevadas se requiere de la adición de esta clase de aditamento, ya sea al centro ( entre ) de las bajantes o lateralmente; puesto que se ha observado que el vapor al expanderse en el rebosador de salida 'bombea' al líquido por sobre el rebosador y cuando su velocidad es suficientemente alta, la trayectoria de impulso arroja al líquido sobre la bajante -- hasta el lado opuesto del plato, causando consecuentemente una inundación prematura del plato, incrementando la residencia del líquido causada por este 'reciclado' de la fase líquida de un lado al otro del plato. El porcentaje de inundación a partir del cual se recomienda el uso de estos baffles es de 1.10 a 1.67 veces el espaciamiento entre platos ( en in. ).

#### BAFFLE DISTRIBUIDOR

Su instalación se requiere cuando la operación de la columna se lleva a cabo con velocidades de vapor muy elevadas y flujos de líquido bajos, su principal función es la de incrementar la residencia del líquido en el plato, evitando así que éste llegue a

quedar 'seco' o sea perder la totalidad del líquido.

La figura 2.13 muestra los dos tipos de accesorios antes mencionados, la utilización de ambos puede tener efecto en columnas que cuenten con platos de tipo: perforado, cachuchas de burbujeo, etc.

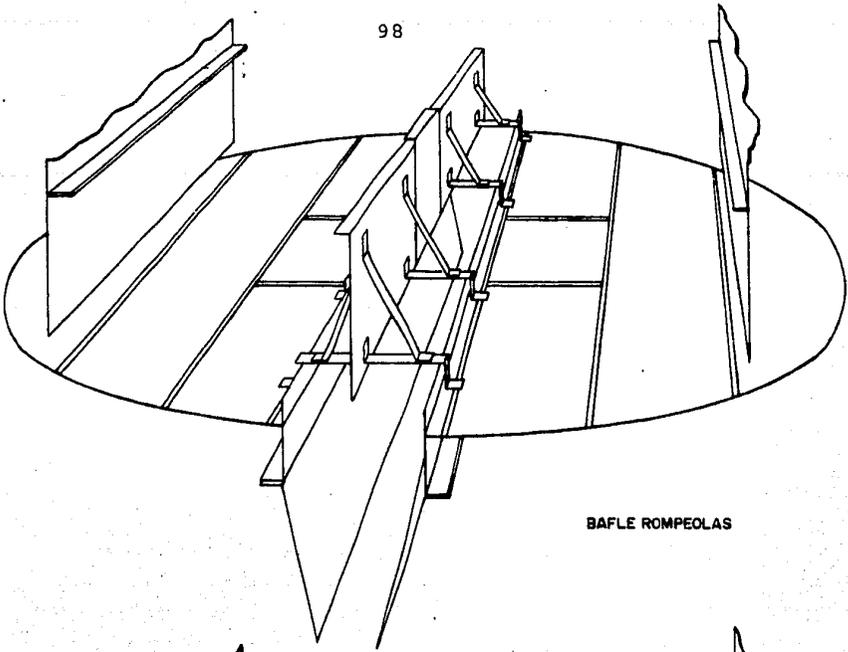
#### NUMERO DE PASOS

Es una práctica normal en la industria que para reducir el diámetro de una torre, se usen platos multipasos ya que así se mantiene la velocidad del líquido abajo de un valor de 8 gpm/WFP; a medida que el número de pasos se incrementa, la cantidad de balastras que pueden colocarse en el área del plato disminuye. Como resultado directo de un mayor número de pasos, se incrementará la caída de presión y disminuirá la eficiencia del plato (debida a una disminución en la longitud del patrón de flujo); el diámetro práctico y preferible para columnas con platos multipasos se muestra a continuación:

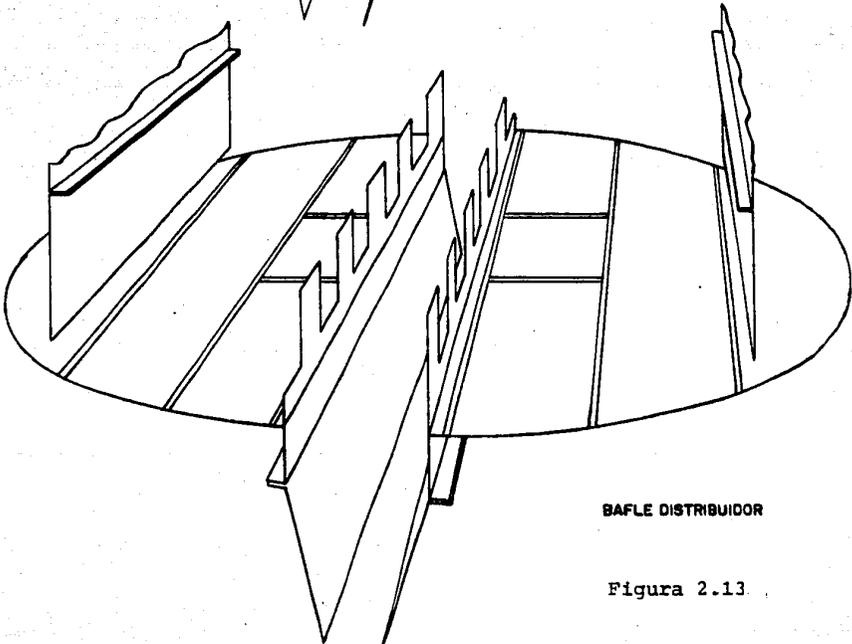
Número de pasos	Diámetro mínimo ft.	Diámetro preferido ft.
2	5	6
3	8	9
4	10	12
5	13	15

La práctica de proceso industrial así como la experiencia de operación, han determinado los límites recomendables para las

98



**BAFLE ROMPEOLAS**



**BAFLE DISTRIBUIDOR**

**Figura 2.13**

relaciones de flujo entre el vapor y líquido, dentro de una columna; es por esto y como un corolario al análisis efectuado en la sección anterior que se incluye la figura 2.14, donde se muestran los rangos recomendables para la operación del equipo.

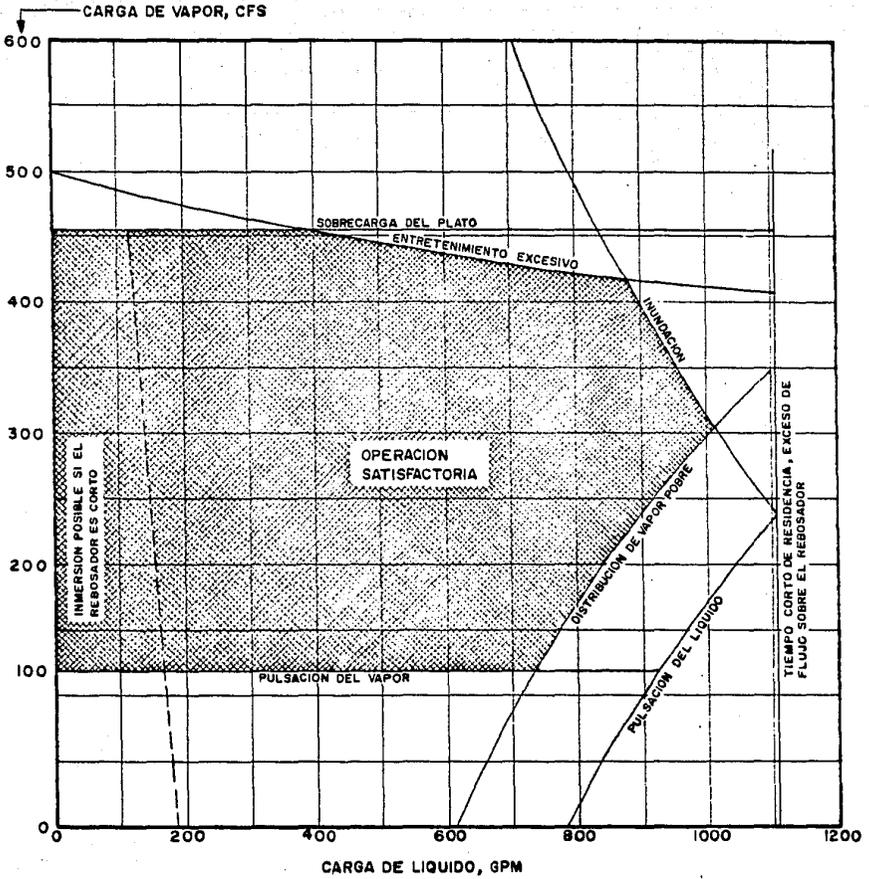


Figura 2.14

PROBLEMA ILUSTRATIVO

Como ejemplo de diseño y aplicación de conceptos así como de ecuaciones mencionadas, se plantea el cálculo del diámetro de una torre con las siguientes especificaciones:

- Características del vapor

Velocidad lb/hr	271,500
c.f.s. $\text{ft}^3/\text{seg}$	27.52
$D_v$ $\text{lb}/\text{ft}^3$	2.75

- Características del líquido

Velocidad lb/hr	259,100
G.P.M.	1,100
$D_l$ $\text{lb}/\text{ft}^3$	29.33

- Porcentaje de inundación, no mayor al 70% ( factor de inundación 0.70 )
- Espaciamiento entre platos 50cm ( 20" )
- Platos tipo doble paso
- Sistema no-espumante ( factor del sistema 1.0 )

Con el fin de realizar una exposición ágil de la solución del problema, se hace únicamente referencia al número por medio del cual las ecuaciones fueron identificadas, en los párrafos respectivos:

Ecuación 2.16

$$\begin{aligned} VD_{dis} &= (7.5)(\sqrt{20})(\sqrt{29.33 - 2.75})(1.0) \\ &= 170 \text{ gpm/ft}^2 \end{aligned}$$

Ecuación 2.17

$$CAF = (0.395)(1.0) = 0.395 \text{ ft/seg}$$

el valor de 0.395 se obtiene de la figura 2.7

Diámetro aproximado de la torre ( basado en un espaciamiento de 24" TS =  
24 y un 80% de inundación )

$$DT = 7' - 6'' \text{ obtenido de la figura 2.8}$$

Longitud del patrón de flujo ( aproximado ) de la ecuación 2.19

$$FPL = ( 9 )( 7.5/2 ) = 33.7''$$

Ecuación 2.20

$$\begin{aligned} AAM &= (8.86 + 1100)(33.7/13,000)/(0.395)(0.70) \\ &= 42.5 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

Ecuación 2.21

$$ADM = 1100/( 170 )( 0.70 ) = 9.25 \text{ ft}^2$$

Ecuación 2.22

$$ATM = ( 42.5 + 2 )( 9.25 ) = 61.0 \text{ ft}^2$$

Ecuación 2.24

$$\begin{aligned} DT &= \sqrt{61.0/0.7854} = 8.8' \text{ utilizar } 9' - 0'' \\ AT &= ( 0.785 )( 9.0 ) = 63.62 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

Ecuación 2.25

$$AD = (63.62)(9.25/61.0) = 9.9 \text{ ft}^2$$

En este caso el valor que se obtiene para AD es superior al 10% del área de la columna, por lo que este se considera aceptable

Para utilizar la ecuación 2.26 se usará un valor de  $H_3$ , puesto que se utilizará un plato de doble paso ( ver fig. 2.9 )

$$H_3 = ( 12 ) ( 9.9/9.0 ) = 13.2''$$

$$AD_1 = 9.9/2 = 4.95$$

$$AD_1/AT = 4.95/63.62 = 0.0777$$

$$H_1/D = 0.1315$$

$$H_1 = ( 0.1315 ) ( 108'' ) = 14.2''$$

Ecuación 2.27

$$FPL = (12)(9) - (2)(14.2) + 13.2/2 = 33.2''$$

Con el fin de aproximar el valor de FPL modular que se encuentra en el rango de 32.5" ó 34", se usará el valor de 32.5" - por ser el más cercano

$$H_1 = 14.5'' , H_3 = 14'' \quad ( \text{redondeando valores} )$$

$$AD_1 = 5.09 \text{ ft}^2 \text{ c/u} \quad ( 2 ) ( AD_1 ) = 10.18$$

$$AD_3 = 10.5 \text{ ft}^2 \quad AD_{\text{promedio}} = 10.34 \text{ ft}^2$$

Ecuación 2.30

$$AA = 63.62 - 20.68 = 42.94 \text{ ft}^2$$

Ecuación 2.31

$$\begin{aligned} \% \text{ inundación} &= \frac{(100)(8.86 + 1100)(32.5/13,000)}{(42.94)(.395)} = \\ &= 68.6 \end{aligned}$$

Ecuación 2.32

$$\% \text{ inundación} = \frac{(100)(8.86)}{(63.62)(.395)(.78)} = 45.2$$

Al realizar una comparación de los valores obtenidos por medio de las ecuaciones 2.31 y 2.32, se utilizará el mayor valor ( 68.6 en este caso ) para posteriormente elegir el tipo de válvula ('ba lastra') que se usará en la construcción del equipo.

R E F E R E N C I A S

1. Ludwig, Ernst E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, Gulf Publishing Co., tomo II pág. 135
2. *Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner*, Junio - 1963, pág. 119
3. ASME sección VIII div. 2 AD-104, pág. 106
4. ASME sección VIII div. 1 UG-27, pág. 14
- 5,14. *Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner*, Junio 1963, pág. 120
- 6,7,8,9,10,11,12,13,15,16,17,19,20,21,22. *Ibidem* pág. 125
18. ASME sección VIII div. 1 UG-32, pág. 21
- 23,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41. *Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner*, Junio -- 1963, pág. 126
- 24,25,26. *Ibidem* pág. 123
27. ASME sección VIII div. 1, pág. 74
- 42,43. Ludwig, Ernst E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, Gulf Publishing Co., - tomo II pág. 190
44. *Ibidem* pág. 146

LAS REFERENCIAS CONTINUAN EN LA PAGINA 127

### 3. EQUIPOS EMPACADOS<sup>50</sup>

Con el fin de representar gráficamente la distribución general de un equipo de esta naturaleza, la figura 3.1 -- ilustra un corte en sección transversal de una torre empacada.

Estos equipos cuentan entre sus ventajas, principales, el poseer una caída de presión baja y un costo inicial reducido. Tratándose de equipos de diámetro corto y fabricación en materiales resistentes a la corrosión, la restricción del diámetro se limita a valores menores a 0.9m ( 3' ), ya que desde el punto de -- vista de destilación existe una dificultad que radica en la uniformización en la distribución del líquido sobre el empaque; en el caso de equipos de esta naturaleza cuya elevación resulte ser considerable, se deberá de contar con platos redistribuidores del líquido con una separación entre sí de 1.8 a 6m ( 6' a 20' ), así como -- de una base especial para soportar el empaque, que evite inundaciones en el fondo y garantice la correcta operación del equipo.

Recientemente se ha logrado solucionar un problema que hacía a estos equipos desventajosos en relación a los de platos, por medio del uso de empaques a base de materiales plásticos cuyas ventajas de menor peso, bajo costo y fácil manejo reducen la carga en forma considerable que una gran cantidad de empaque ten -- dría, así como los problemas y restricciones que en función de la -

# TORRES EMPACADAS

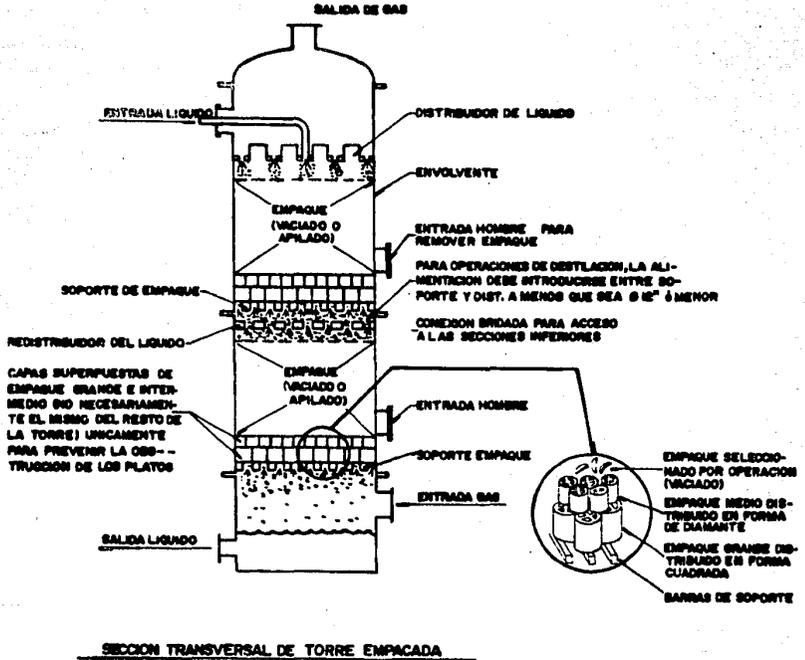


Figura 3.1

altura tendría una torre empacada; no obstante existe una limitante con respecto al material, ya que este cuenta aún con la restricción de temperatura que condiciona el uso hasta un máximo de 121 °C ( -- 250 °F ). Existe en el mercado un tipo de empaque que mantiene la - uniformidad en la distribución del líquido y puede usarse en equi-- pos de amplio diámetro.

De manera general se enumerarán otras de las - ventajas con que cuentan estos equipos, aparte de las ya menciona-- das, que son:

- Cuando los líquidos que se introducen en la columna tienden a generar espuma, se prefieren torres empacadas
- Menor tiempo de residencia
- En un diseño para desempeñar igual trabajo, el peso de un equipo de platos es menor al de un equipo empacado; aquí la limitante se encuentra en el esfuerzo a la pulverización con que cuenta el empaque, ya que éste puede llegar a ser de tal magnitud que un plato soporte no resista el peso del empaque, si el equipo de que se trata cuenta con dimensiones elevadas
- Al manejar sustancias corrosivas estos equipos son ideales para esta clase de operación, puesto que su construcción es simple y económica
- En el caso particular de la absorción, y considerando que muchos de los factores pueden llegar a ser -- aproximadamente iguales, desde el punto de vista económico es recomendable el uso de columnas empacadas en lugar de las de platos, siempre y cuando el diá--

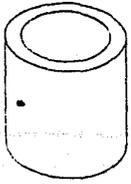
metro de la columna sea menor a 60cm ( 2' )

En la industria cuando se utilizan estas columnas para operaciones de destilación se tendrán equipos pequeños, -- con diámetros no mayores a 0.6m ( 2' ) ó 0.8m ( 30" ); los equipos -- destinados a servir de absorbedores tendrán diámetros en el rango - 0.10m ( 4" ) hasta aproximadamente 6.1m ( 20' ) y alturas de empaque . entre 0.9m ( 3' ) a 24.4m ( 80' ) o más. A medida que el tamaño de -- estos equipos tiende a aumentar la efectividad decrece, es también notoria la necesidad de evaluar el uso de torres sean de platos o - empacadas cuando las velocidades de gas y líquido, dentro del proceso, tienden a ser muy elevadas.

Como se ha expuesto con anterioridad y resu--- miendo, la elección entre las dos clases de torres se podrá hacer, únicamente, después de haber considerado minuciosamente costos, con fiabilidad y facilidad de operación así como mantenimiento.

Los empaques que se utilizan en este tipo de - equipos pueden dividirse en dos clasificaciones generales:

- a) Aquellos que son vaciados, dentro del equipo, en forma aleatoria y su diámetro, por unidad, se encuentra en el rango de 0.625cm ( 0.25" ) a 5cm ( 2" ); el uso principal de éstos se li mita a columnas de diámetro pequeño; ejemplo de este tipo de empaques se muestra en la -- figura 3.2
- b) Los que deberán ser colocados a mano, siguien do un patrón predeterminado, y su rango de -



ANILLO RASCHIG

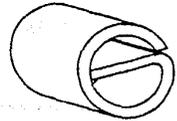


ANILLO LESSING

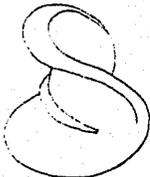
-110-



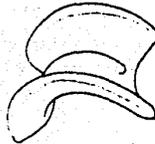
ANILLO DIVIDIDO EN CRUZ



ANILLO LESSING ABIERTO



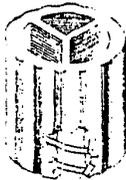
SILLA BERL



SILLA INTALOX



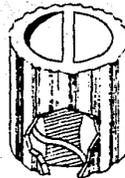
ANILLO DE ESPIRAL SIMPLE



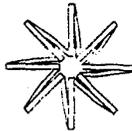
ANILLO TRIPLE ESPIRAL



ANILLO PALL



ANILLO DOBLE ESPIRAL



TELLERETE

Figura 3.2.

### TIPOS DE EMPAQUE

dimensiones va de 5cm ( 2") a 20cm ( 8"); su uso preferencial es el de columnas con mayor diámetro. En algunos casos se tendrán anillos Raschig de 5cm ( 2") a 7.5cm ( 3") que se incluyen en esta clasificación, así como empaques tipo rejilla ( compuestos de un bloque, en forma de ladrillo, acanalado usado básicamente como soporte en el fondo de la torre ).

En el diseño de equipos de esta naturaleza se deben establecer dos dimensiones primeramente, a saber: diámetro de la torre y altura de la sección que contiene el empaque; posteriormente se podrá determinar la altura total del equipo una vez que se hayan considerado secciones para entrada y salida del gas, distribuidores del líquido en la parte superior, soportes de empaque y descarga del líquido en el fondo. El diámetro, que es una consecuencia -- del área seccional transversal de la torre, dependerá de las velocidades de flujo del gas y líquido.

Este tipo de equipos puede utilizarse en operaciones de destilación fraccionada en la misma forma que los equipos de platos de burbujeo, ya que, en lugar de burbujear vapor a través de una cantidad de líquido en la superficie de un plato, se obtiene una interacción entre el vapor y líquido haciendo que el reflujo se desparrame sobre la superficie del material que sirve de empaque. - El vapor fluirá hacia arriba a través de los espacios libres con -- que cuenta el empaque.

La aplicación industrial de este equipo se limita a torres cuyo diámetro es pequeño o a operaciones como la concentración de ácido nítrico; en trabajos de laboratorio y en escala de planta piloto, las unidades empacadas resultan más económicas, - para una separación particular, que las de platos de burbujeo; en caso de contarse con condiciones inversas los diámetros mayores y - las unidades de platos serán convenientes.

Al margen de las consideraciones puramente --- económicas, la construcción de estos equipos es simple. Los materiales que pueden emplearse en la fabricación son: porcelana anticorrosiva y refractaria, vidrio, carbón y los metales que normalmente se utilizan en la construcción de equipos de platos. La desventaja que estas unidades presentan es en lo relativo a la operación de -- limpieza, ya que no puede realizarse un buen trabajo sin tener que desmantelar por completo la unidad; existe otro fenómeno que requiere atención y se le denomina "canalización", consistente en una separación o apartamiento entre líquido y vapor, llevando como consecuencia una baja en la eficiencia del contacto entre ambas fases.

Si se comparan los dos equipos, platos y empacadas, en condiciones similares, los últimos cuentan con ventajas - en lo referente a caídas de presión, ya que ésta es menor en las -- empacadas que en su contraparte de platos.

La aplicación más amplia que han encontrado, - en los sistemas de contacto líquido-gas, ha sido en operaciones de absorción. También en destilación, cuando se requiere de una área -

de sección transversal pequeña que imposibilitaría la operación eficiente de una unidad de platos. Generalmente la inversión inicial, comparativamente, es menor y durante la operación estos equipos proporcionan una turbulencia en fase gaseosa que da como resultado una eficiencia bastante aceptable, en transferencia de masa, en los sistemas cuya operación se encuentra controlada por la fase gaseosa.

Con el uso reciente de materiales de construcción, plástico y de otros tipos, para los empaques, se ha logrado anular una de las desventajas que el exceso de peso representaba cuando se realizaba una comparación entre unidades de platos y empacadas. La construcción de éstas es simple y las partes principales de que se componen son:

- Una envolvente cilíndrica que contiene platos de soporte y redistribución para retener el empaque
- Un distribuidor del líquido colocado en la parte superior del total de la altura del empaque, diseñado para proporcionar irrigación efectiva al total de éste

En el mercado existen diferentes clases de empaque, cada uno con ventajas específicas para operaciones de contacto líquido-gas desde los siguientes puntos de vista:

- |                                   |                              |
|-----------------------------------|------------------------------|
| - Costo                           | - Caída de presión           |
| - Area disponible                 | - Peso                       |
| - Regeneración líquido-superficie | - Resistencia a la corrosión |

Las características generales a las que deberá ajustarse un material para poder utilizarse como empaque son:<sup>51</sup>

- Debe presentar una superficie factible de humidificarse bastante amplia, por unidad de volumen de espacio empaquetado, como para que su área interfacial en el contacto sea potencialmente extensa
- Los espacios o volúmenes vacíos tienen que ser amplios, para que exista posibilidad de paso a volúmenes razonables de ambas fases sin el inconveniente de elevadas caídas de presión
- Sus características de retención de humedad en la superficie deben ser aceptables
- Resistencia a la corrosión
- Su densidad bruta debe ser baja, ya que en columnas empacadas de gran altura el peso del empaque puede ser -- considerable, generando problemas de soporte en la base sustentadora del mismo
- Costo relativamente bajo

El efecto de "canalización" es un fenómeno que se muestra de manera notoria en torres cuyo empaque se coloca de acuerdo a un patrón predeterminado, disminuye al utilizar, como empaque, sólidos disgregados y es menos notorio cuando el empaque cuenta con superficies unitarias regulares y ha sido vaciado; en equipos de tamaño considerable se minimiza este efecto al guardar una relación de diámetro de torres que sea, por lo menos, ocho veces en diámetro

mayor al diámetro correspondiente del empaque, si esta relación es menor de 8:1 el líquido tiende a fluir fuera del empaque y a lo largo de las paredes de la torre. Con lo anteriormente expuesto se deduce que estos equipos requieren de una distribución de líquido óptima para evitar que la eficiencia total se vea seriamente afectada.

Al tenerse equipos con dimensiones elevadas y llenos con empaque cuya superficie es considerable, el efecto de "canalización" será mucho más pronunciado y los coeficientes de transferencia extremadamente bajos, aun cuando se cuente con una buena distribución inicial del líquido y platos redistribuidores localizados cada 3.5 m ( 10' ) ó 4.5 m ( 15' ) dentro de la sección empacada.

#### INUNDACION Y CARGA

El fenómeno de inundación, o inversión de fase, es el resultado directo de la oclusión de los espacios existentes entre unidades de empaque a lo largo de la sección transversal de la torre, ha sido correlacionado empíricamente para varios empaques comerciales; como se supone, y lo verifica la práctica, el fenómeno de inundación se lleva a cabo por medio de un mecanismo idéntico para los diferentes tipos de empaques y la caída de presión en la inundación es independiente de la relación gas-líquido, siendo lo únicamente de los propiedades físicas del sistema.

Sherwood y Hollaway desarrollaron diferentes correla

ciones para distintos empaques basándose en la ecuación:

$$\frac{U^2}{g F_d^3} \frac{\rho_v}{\rho_l} \mu^{0.2} = f \frac{L}{G} \left[ \frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

- donde:
- U = velocidad superficial del gas en inundación ft/seg
  - $F_d$  = espacios libres, fraccionarios, en el empaque seco  $\text{ft}^3/\text{ft}^3$  del volumen de la torre
  - a = área total del empaque  $\text{ft}^2/\text{ft}^3$  de empaque
  - G = velocidad del gas lb/hr  $\text{ft}^2$
  - g = 32.2 (lb. masa)(ft)/(lb. fuerza)(seg<sup>2</sup>)
  - L = velocidad del líquido lb/(hr)(ft<sup>2</sup>)
  - $\rho_v, \rho_l$  = densidades de gas y líquido lb/ft<sup>3</sup>
  - $\mu$  = viscosidad del líquido en centipoises

Puesto que a y  $F_d$  no caracterizan la geometría del empaque, esta relación puede ser más aplicable si se utiliza un factor de caracterización  $C_f$  en lugar del término  $a/F_d^3$ . La tabla 2.1 muestra estos valores para distintos empaques.

TABLA 2.1

FACTORES DE CARACTERIZACION  $C_f$

Empaque	Tamaño (nominal)	Volume libre	Peso lb/ft <sup>3</sup>	Factor $C_f$
Anillos Raschig	3/4"	67	46	182
	1"	68	45	155

	1 1/2"	68	45	97
	2"	75	24	75
<b>Anillos Raschig metal (1/16" esp.)</b>	1"	92	73	115
	2"	92	38.7	75
<b>Sillas Berl</b>	3/4"	65	48	138
	1"	69	45	82.5
	1 1/2"	70	38	76
<b>Sillas Intalox</b>	1"	70	34	77
	1 1/2"	81	30	81
<b>Tellerettes polietileno AD</b>	1"	87	10	57
<b>polietileno BD</b>	1"	83	10	65
<b>Anillos Pall, acero al carbón</b>	2"(cal. 20)	94	28	17
	1"(cal.24)	93	33	45

Si el fenómeno de inundación, al que anteriormente se hizo referencia, presenta dificultades en su interpretación y análisis, el concepto de punto de carga puede ser aún más complejo ya que existen dos formas de describirlo:

- a) Una velocidad del gas a la que existe una discontinuidad en la pendiente de la relación  $(d \Delta P/dG)_c$   
 $= G_c$

- b) Una velocidad del gas más allá de la cual se tiene un aumento acelerado del entretenimiento del líquido, o la condición a la que el líquido acumulado, por entretenimiento excesivo, principia a rebosar el límite superior del empaque

Asimismo, y debido a que la transición que existe entre las condiciones de pre-carga y carga total puede ser gradual, por lo que la condición de carga es una función que solo puede estimarse.

### 3.1 DETERMINACION DEL NUMERO Y ALTURA DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA<sup>52</sup>

Si se considera una área interfacial de transferencia asociada a una diferencial de longitud de torre (  $dA$  ) y se intenta determinar este factor en un equipo, se encontrará que existen muchos factores que impiden esta determinación, por lo que resulta conveniente expresarla como:

$$dA = a S dz \quad (3.2)$$

donde:  $a$  = área interfacial por unidad de volumen de empaque  
 $ft^2/ft^3$

$S$  = área de sección transversal de torre vacía  $ft^2$

$z$  = altura de una sección empacada

El término  $a$  es una función con características combinadas del empaque y líquido retenido en él, dependiendo de la velocidad de flujo de ambas fases; debido a que este factor es una incógnita en las torres empacadas, se combinará con el coeficien

te compuesto  $k'_y$  con unidades: *cantidad transferida por unidad de tiempo y volumen de empaque*. Si se toma en cuenta que la velocidad de cambio de un componente dentro de una fase debe ser igual a la velocidad de transferencia, hacia la fase, se tendrá que para la fase de vapor en una difusión equimolecular a contracorriente es:

$$d(V_y) = k'_y (y_i - y) dA = K'_y (y^* - y) dA \quad (3.3)$$

si se combinan las ecuaciones 3.2 y 3.3 se tiene:

$$d(V_y) = k'_y a(y_i - y) S dz = K'_y a(y^* - y) S dz \quad (3.4)$$

Integrando la ecuación 3.4 para obtener la altura de torre, y realizándola en el rango total de concentraciones entre la parte superior e inferior del equipo, se tiene:

*Fase vapor*

$$\int_0^z dz = \int_{y_1}^{y_2} \frac{d(V_y)}{k'_y a S (y_i - y)} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{d(V_y)}{K'_y a S (y^* - y)} \quad (3.5)$$

*Fase líquida*

$$\int_0^z d = \int_{x_1}^{x_2} \frac{d(L_x)}{k'_x a S (x - x_i)} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{d(L_x)}{K'_x a S (x - x^*)} \quad (3.6)$$

Si se quiere utilizar la ecuación 3.5 ó 3.6 -- para un cálculo se deberá conocer lo siguiente:

- 1° Los valores de  $k'_x a$ ,  $k'_y a$ ,  $K'_x a$ ,  $K'_y a$  como función de las velocidades de flujo de vapor (gas) líquido y las propiedades de ambas fases
- 2° La relación entre las composiciones puntuales en cualquier fase

Al suponer que existe un intercambio ( entre - fases ) de los compuestos más y menos volátiles implica que la velocidad de flujo del gas (V) es constante, lo mismo que la del líquido (L) y puesto que los coeficientes de transferencia total de masa son función de estas velocidades, también deberán ser constantes; suponiendo, ahora, que las propiedades físicas no cambian de manera considerable se tiene:

$$\int_0^z dz = \frac{V}{k'_y aS} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y_i - y)} = \frac{V}{K'_y aS} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y^* - y)} \quad (3.7)$$

$$\int_0^z dz = \frac{V}{k'_x aS} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{(x - x_i)} = \frac{V}{K'_x aS} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{(x - x^*)} \quad (3.8)$$

Los términos incluidos en las integrales representan los cambios totales en composición de la fase especificada V o L, éstos términos, que son la medida de la dificultad de separación de cada uno de ellos, generan un valor que Chilton y Colburn - definen como el número de unidades de transferencia (N); la cantidad fuera del signo de integral se le denomina altura de la unidad de transferen

cia (H), por lo que la altura total de la torre se obtendrá de multiplicar el número de unidades de transferencia por la altura de ellas, de acuerdo a la relación:

$$z = H_G N_G = H_{OG} N_{OG} = H_L N_L = H_{OL} N_{OL} \quad (3.9)$$

### 3.2 PLATOS DE SOPORTE Y DISTRIBUCION

El factor más importante en una columna empacada es su baja caída de presión. Esta se verá afectada por el diseño de los platos de soporte así como, consecuentemente, los rangos de operación estable del equipo; la totalidad del área abierta con que cuenta un plato de soporte es el resultado de sustraer, del espacio inherente al diseño del plato, el área abierta obstruida por el empaque; de aquí que el plato de soporte deba tener una área abierta disponible mayor que la obtenida con el empaque que se especifica, para evitar que el área de soporte se transforme en una región crítica al generar inundación.

En la industria se tienen dos tipos básicos de platos soporte:

- a) Tipo contracorriente
- b) Con pasajes de flujo, separados, para líquido y gas

Las figuras 3.3, 3.4, 3.5 son las que ilustran los tipos de platos que más se utilizan en la industria; dentro de

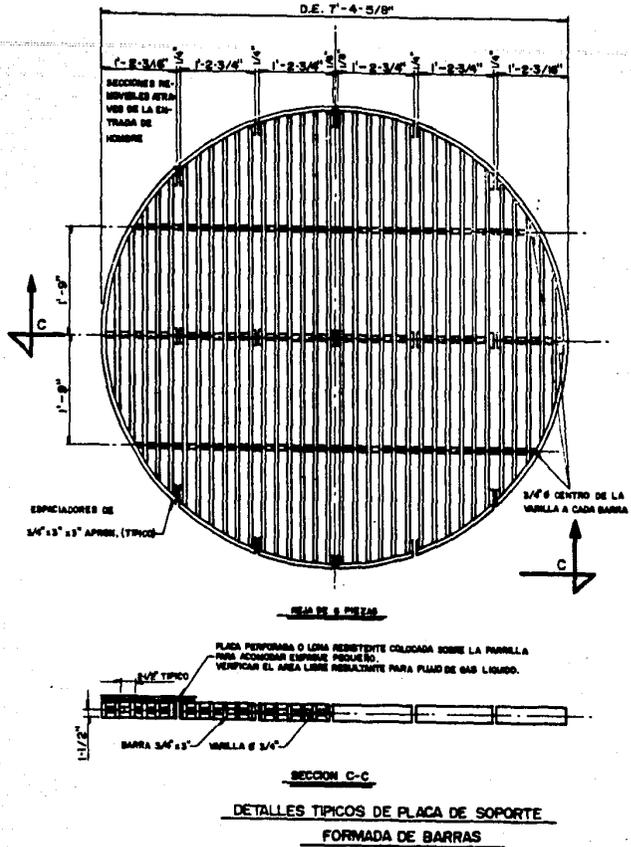
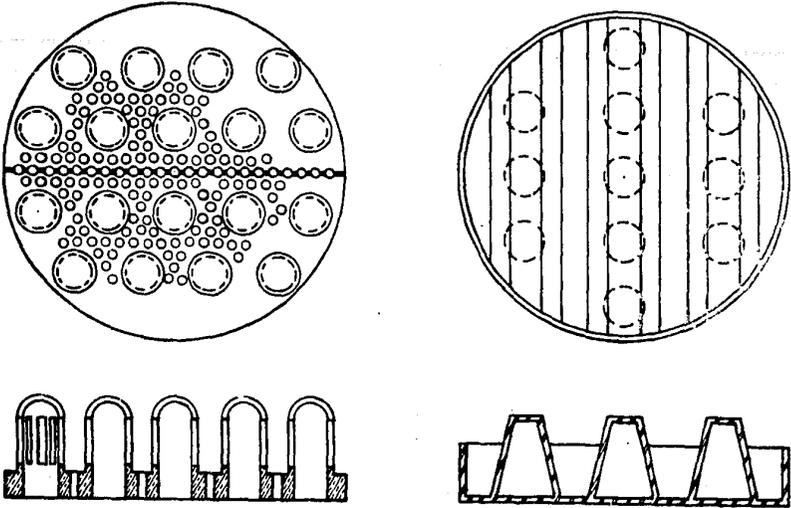


Figura 3.3

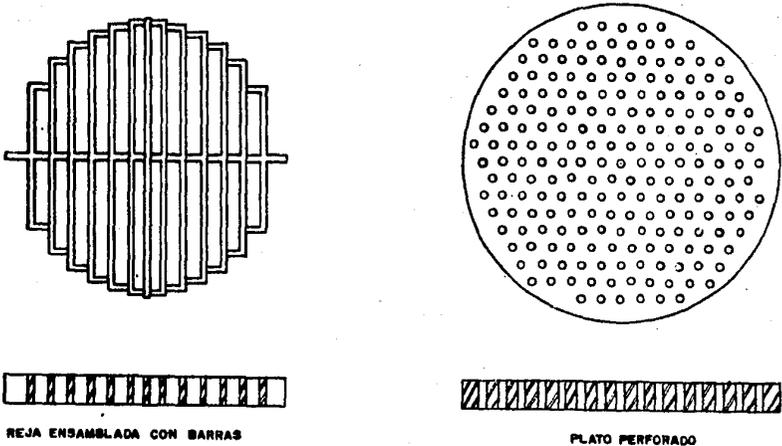
PLATOS DE SOPORTE

EN PORCELANA



INYECTORES DE GAS, SOPORTES Y DISTRIBUIDORES

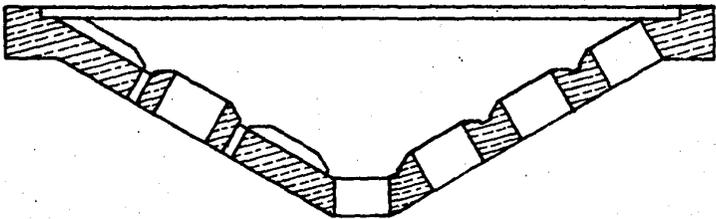
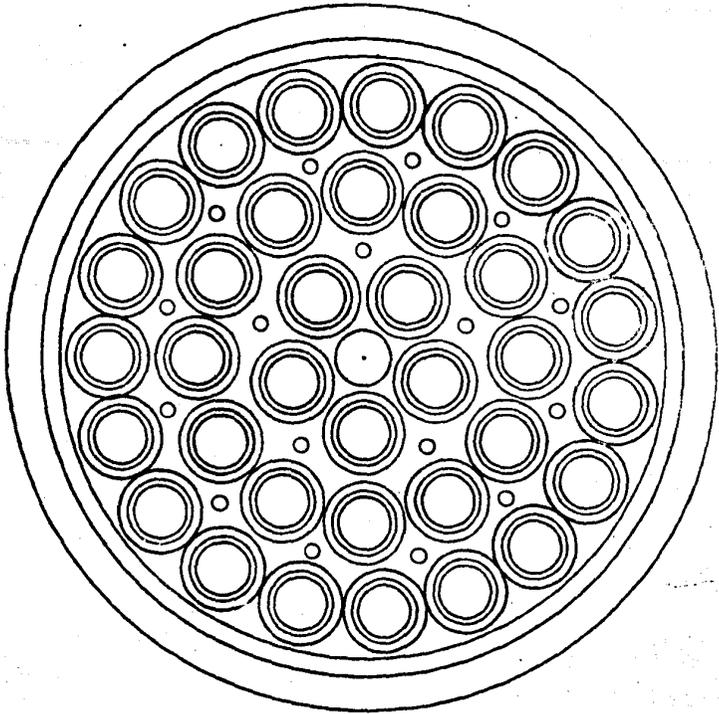
EN PLASTICO



REJA ENSAMBLADA CON BARRAS

PLATO PERFORADO

Figura 3.4



SOORTE Y DISTRIBUIDOR CONICO

Figura 3.5

éstos y como características específicas del plato contracorriente, se tiene:

- Porcentaje de abertura presentada antes de obstrucción total debida a inundación 90%

Para un plato de pasajes de flujo separado las característica principal es:

- Porcentaje de abertura de pasajes o áreas libres antes de oclusión total es del orden del 200%, lo que proporciona un rango de operación más estable

#### ENTRETENIMIENTO

Este fenómeno es de importancia considerable, ya que es un factor que influye directamente en la operación satisfactoria del equipo y se puede presentar en dos formas, a saber:

- a) Dinámico
- b) Estático

El primero es responsable de generar una cinética efectiva de transferencia de masa, puesto que proporciona una superficie para que esta se lleve a cabo y también una superficie para que se efectúe la regeneración; ésta se lleva a cabo por medio de fenómenos de aglomeración y dispersión. De forma contraria el --

fenómeno estático contribuye de manera muy limitada a la velocidad de transferencia de masa.

Si en algún caso se tiene que considerar la existencia de regiones con flujo laminar el entretenimiento es un fenómeno indeseable, ya que la eficiencia en la separación se ve disminuida en su volumen; la determinación cuantitativa de los entretenimientos dinámico y estático no es posible realizarla, al no presentarse éstos como fenómenos separados y debido a que se encuentran ligados al comportamiento total del fenómeno de entretenimiento; sin embargo, se han llevado a cabo determinaciones experimentales de los fenómenos denominados: *entretenimiento operacional e inherente*; el primero consiste en una combinación del dinámico y el inherente, a su vez el inherente puede en ocasiones ( y en los intersticios del empaque ) estar constituido por el fenómeno dinámico y estático al mismo tiempo.

R E F E R E N C I A S

CONTINUACION

45. Smith, Bufford D., *Design of Equilibrium Stage Processes*, Mc. Graw Hill, New York 1963, pág. 144
- 46,47,48,49. *Ballast Tray Design Manual*, páginas 10,11,12 y 18
50. Ludwig, Ernst E., *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, Gulf Publishing Co., tomo II, pág. 194
51. Perry, John H. ( editor ) *Chemical Engineer's Handbook ( Fourth Edition )*, Mc. Graw Hill New York, 1965 pág. 18-26
52. Foust, Alan S. & Asociados, *Principles of Unit Operations*, John Wiley & Sons New York, 1960, pág. 272

### III. MATERIALES DE CONSTRUCCION <sup>1</sup>

Debido a que los fluidos que manejan las torres de destilación son, en mayor o menor escala, corrosivos se buscará evitar o disminuir este fenómeno para así reducir costos de fabricación al disminuir los espesores de placa. Si se consideran los materiales comunmente utilizados en la construcción de estos equipos se puede obtener, desde el punto de vista de corrosión, el material adecuado en función a los fluidos que se alimentan a la torre.

#### 1. EN PRESENCIA DE COMPUESTOS INORGANICOS.

##### ACIDOS.

La temperatura y concentración de las soluciones ácidas determinan, frecuentemente, el uso de un metal puro o aleación resistente a la corrosión; los metales o aleaciones considerados como adecuados para el manejo de ácidos son:

- Cobre
- Latón rojo
- Bronce fosforado
- Acero al carbón
- Aleaciones: cobre-níquel, aluminio-bronce y cobre-manganeso-silicio.

## BASES

Por experiencia se ha notado que la mayoría de las aleaciones de cobre resisten la acción de soluciones alcalinas ca---lientes, sin embargo, las de mejores resultados son las aleaciones cobre-níquel así como los distintos aceros al carbón que se pueden usar para todas las concentraciones de sosa, excepto para las cono---das como sosa rayón cuya concentración es del 50%.

## AMONIACO

Cuando se encuentra completamente seco no corroe al cobre o sus aleaciones; el hidróxido de amonio y el amoniaco, en -- presencia de humedad y aire, la atacan rápidamente; entre las alea---ciones de cobre más útiles se tienen:

- 68.9% Cobre, 30% Níquel, 0.6% Manganeso, 0.5% Fierro
- 64.16% Cobre, 30% Níquel, 0.6% Manganeso, 5.24% Fierro

(existe la posibilidad de usar acero al carbón en sus diferentes ti---pos).

## SÚLFUROS.

Los metales que cuentan con un gran contenido de ---han resultado ser los mejores para trabajar con este tipo de compues---tos. Las aleaciones más utilizadas son:

- Admiralty arseniado cuya composición es: 71% Cobre, 27.96% Zinc, 1% Estaño, 0.04% Arsénico.
- Muntz, con una composición de: 60% Cobre, 39.35% Zinc  
0.65% Plomo.
- Existe también otra aleación que se le conoce con el nombre de Latón amarillo.

## 2. EN PRESENCIA DE COMPUESTOS ORGANICOS

Los solventes y ácidos orgánicos deberán ser manejados en columnas que cuenten con recubrimientos de aleaciones de cobre. De entre éstas, las más resistentes son:

- Cobre-níquel, con una composición de: Cobre variable, Níquel 30%.

Por regla general, las aleaciones que tienen mayor aplicación para usarse en presencia de compuestos orgánicos son las mismas que se utilizan con el amoníaco.

## 3. EN PRESENCIA DE DERIVADOS DEL PETROLEO.

Debido a la amplia gama de éstos, existe asimismo una amplia gama de materiales de construcción, como un ejemplo:

- Aleaciones de Cobre y Admiralty en presencia de productos químicos corrosivos.

- Latón rojo, con crudos dulces
- Admiralty arseniado o Ambralloy ( Cobre-Zinc-Alumini--nio-Arsénico ), con crudos ácidos.
- Aleaciones de Cobre-Níquel al 30%, cuando existan en el proceso gases a una temperatura superior a 227°C ( 440°F ).

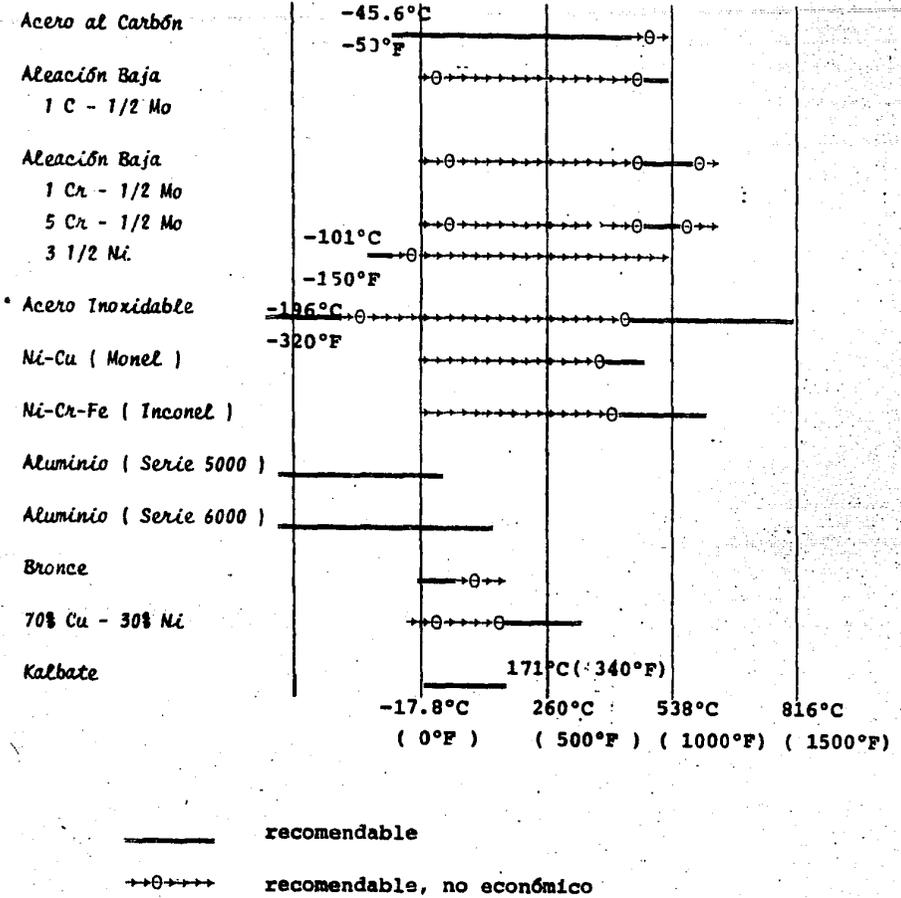
En este párrafo se han considerado únicamente las -- propiedades corrosivas de las sustancias que puedan encontrarse en una columna; sin embargo, no hay que dejar de tomar en consideración la temperatura de operación para lo cual la figura 3.1 puede servir de guía.

#### 4. DESCRIPCION.

Como propósito principal de esta sección se quiere -- dar una visión general de la información disponible, sin ser ésta -- una manera exhaustiva de abordar el tema y descripción de los mate--riales que se determinarán de acuerdo a los procesos de aplicación -- específicos.

#### PLACAS PARA ENVOLVENTE, PLATOS, TAPAS, JUNTAS Y CUBIERTAS

A continuación se describen algunas posibilidades -- que el diseñador tiene para especificar materiales de construcción, -- de acuerdo con el código ASME.



RANGOS DE TEMPERATURA PARA DETERMINADOS METALES

Figura 3.1

**PLACAS**

**- Aceros al carbón**

ASME SA-285 grado C, para placas hasta 1" espesor

SA-515

SA-516

**- Aceros de baja aleación**

ASME SA-204

SA-203 grado B, para placas hasta 6" espesor

SA-387

SA-357

**- Aceros de alta aleación**

ASME SA-240

**- Níquel y sus aleaciones**

ASME SB-162

SB-127

SB-168

**- Aluminio y sus aleaciones**

ASME SB-209

**- Cobre y sus aleaciones**

ASME SB-11

SB-96

SB-169

SB-171

SB-402

**PLACAS DE ACERO COLADO**

- Aceros al carbón
  - ASME SA-216
  - SA-352
- Aceros de baja aleación
  - ASME SA-217
  - SA-352
- Aceros de alta aleación
  - ASME SA-351
- Aleaciones de cobre
  - ASME SB-61
  - SB-62 bronce colado
- Fierro gris
  - ASME SA-278 clase 30
- .. Aluminio y sus aleaciones
  - ASME SB-26

**PLACAS FORJADAS**

- Aceros al carbón
  - ASME SA-105 grados 1 ó II.
  - SA-181 " " "
  - SA-266 clase 1 ó 2
- Aceros de alta y baja aleación
  - ASME SA-182

SA-336

- Níquel y sus aleaciones

ASME SB-160

SB-164

SB-166

- Aluminio y sus aleaciones

ASME SB-247

Para las siguientes partes deberá considerarse el uso de metal calidad comercial: placas de soporte, espaciadores y -- empaques.

PERNOS Y TUERCAS

- Aceros de aleación

ASME SA-193

- Níquel y sus aleaciones

ASME SB-160

SB-166

- Aluminio y sus aleaciones

ASME SB-211

TUERCAS

- Aceros al carbón

ASME SA-104 grado 2H, mínimo

- Aleaciones de acero

- ASME SA-194
- Níquel y sus aleaciones
- ASME SB-160  
SB-166
- Aluminio y sus aleaciones  
ASME SB-211

R E F E R E N C I A S

1. Chávez, Gamboa J.R. *Diseño Mecánico de Cambiadores de Calor*,  
Tesis Facultad de Química UNAM, 1972 pág 75.

#### IV. DISEÑO MECÁNICO DE TORRES ELEVADAS<sup>1</sup>

Recipientes de gran tamaño, como los usados en la separación de las fracciones de los hidrocarburos, requieren de consideraciones mecánicas especiales; éstas no se encuentran especificadas en su totalidad en la sección VIII del código ASME.

La separación de los diferentes hidrocarburos, componentes del petróleo, pudiera requerir de cientos de etapas de equilibrio teóricas; debido a que estas separaciones se efectúan a contracorriente, entre el líquido y el vapor, se requieren recipientes elevados. Estos recipientes se construyen generalmente de acero o aleaciones de éste y se diseñan para auto-soportarse.

El requerimiento de auto-soporte involucra consideraciones de diseño especiales para recipientes elevados, particularmente en los casos que se tienen vientos de alta velocidad y vibraciones sísmicas.

En la parte más elevada del recipiente no existen esfuerzos debidos a viento o cargas sísmicas; las únicas consideraciones serán su diseño funcional y el esfuerzo cuando el recipiente trabaja a vacío parcial, a una presión mayor que la atmosférica o cuando en la parte superior del recipiente se tiene una carga estática, muerta, despreciable, exceptuando los casos en que se tienen conden-

sadores, cambiadores u otro equipo auxiliar.

Los proceso petroquímicos varían y, por ejemplo, torres que inicialmente se diseñaron para operar al vacío podrán ser usadas posteriormente a presiones superiores a la atmosférica; es por esto que en ocasiones se diseñarán los recipientes para ambas condiciones; en el caso de recipientes diseñados para servicio pesado ( altas presiones ) no habrá necesidad de considerar ambas posibilidades.

#### 1. TAPA SUPERIOR, ENVOLVENTE, TAPA INFERIOR

*Hemisférica.* Al analizar las consideraciones teóricas básicas para recipientes de espesor reducido, el mínimo espesor de una tapa para una envolvente cilíndrica se logra cuando ésta es de tipo hemisférico; en este caso la teoría de membrana predice que el espesor necesario para tapas hemisféricas es solamente la mitad del requerido para el recipiente cilíndrico al que se encuentra unida, utilizando el mismo material de construcción y esfuerzos permisibles.

*Elipsoidal.* Si se considera únicamente la reducción de peso del material, la tapa hemisférica se preferirá a cualquier otra; sin embargo, la cantidad de material necesario para producir una forma hemisférica es considerable, aumentando así los costos de formado a medida que se incrementa el diámetro.

La tapa elipsoidal se usa por su bajo costo y menor trabajo de formado lo que la hace ser preferida para diseño y así en la mayoría de estos se especifica el uso de tapas con una relación -

entre ejes mayor y menor de 2:1. Aún cuando, teóricamente, el espesor de una tapa elipsoidal debería ser el doble de una hemisférica, con eje mayor y menor iguales, al utilizarse en un recipiente sometido a presión interna el espesor es el mismo que el de la sección cilíndrica del recipiente, considerando los esfuerzos permisibles y -- eficiencias iguales para ambas partes. El código ASME<sup>2</sup> presenta la siguiente ecuación para tapas elipsoidales con una relación de 2:1 entre el eje mayor y el menor:

$$t = \frac{(p)(d)}{(2)(f)(E) - (0.2)(p)} \quad (4.1)$$

donde: p = presión interna, psig  
f = esfuerzo circunferencial, psi  
d = diámetro del recipiente, in  
t = espesor de la envolvente, in  
E = eficiencia de junta

*Toriesféricas.* Esta tapa no se forma como un elipsoide sino que se trabaja en base a dos radios; el radio de la corona, que es el radio de la concavidad para la corona esférica que constituye la porción mayor de la tapa y el radio de la esquina ( o codo ), que es el radio de unión de la corona esférica y la envolvente cilíndrica. La teoría de recipientes de espesor mínimo predice que éste, para tapas toriesféricas, será mayor que el de la envolvente, usando - los mismos esfuerzos y eficiencias de junta. La ecuación que ASME<sup>3</sup> - recomienda para tapas toriesféricas de espesor reducido, con un ra--

dio de esquina equivalente al 6% del radio interno de la corona, es la siguiente:

$$t = \frac{(0.885)(p_r)}{(\bar{E})(E) - (0.1)(p)} \quad (4.2)$$

donde:  $r_c$  = radio interno de la corona, in

Si el espesor es pequeño, el ligero aumento, en costo, necesario para formar la tapa toriesférica será compensado por el bajo costo en su manufactura. Este tipo de tapas tiene más esfuerzos localizados debidos a las discontinuidades en la forma de unión de ambos radios, así como en la del codo con el lado recto; sometidas a un esfuerzo mayor que el permitido por su límite elástico, las tapas tienden a transformarse en elipsoidales, demostrándose así que esta tiene una geometría natural óptima.

La práctica recomienda el uso de tapas hemisféricas siempre que sea posible, ya que existe una ligera discontinuidad, en la distribución de los esfuerzos, en las uniones con los cuerpos. De no ser posible el uso de una tapa hemisférica, se recomienda la elipsoidal, aún sobre la toriesférica, para recipientes elevados, ya que el costo de la tapa superior respecto del total es mínimo. En el caso de una batería de tanques horizontales de almacenamiento o de recipientes de menor tamaño, la tapa toriesférica es la mejor elección desde el punto de vista económico.

Otros tipos de tapas como las cónicas, toricónicas, -bridadas cóncavas ( no ASME ) y planas, no se consideran en el dise-

ño de una torre vertical elevada, a menos que el proceso, por alguna razón particular, requiera de este tipo especial de formas.

### DISEÑO DE ELEMENTOS ENVOLVENTES

Utilizando las relaciones básicas para envolventes cilíndricas de pared delgada y sometidas a presión, se demuestra que el esfuerzo periférico inducido es igual al producto de la presión por el diámetro entre el doble del espesor:

$$f = \frac{(p)(d)}{(2)(t)} \quad \text{relación teórica} \quad (4.3)$$

*o también*

$$t = \frac{(p)(d)}{(2)(f)} \quad (4.4)$$

La anterior ecuación se aplica únicamente a membranas cuyos espesores principian a ser despreciables a medida que se incrementan por aumento en la presión interna. La distribución del esfuerzo a través del espesor ocurre en forma inconsistente, debiendo corregir la teoría de la membrana cuando la presión interna se encuentra en el rango de menos y hasta 3,000 psi. Esta corrección se ha realizado en forma empírica, para aproximar la teoría de Lamé a presiones hasta de 3,000 psi; la ecuación que muestra la sección VIII del código ASME<sup>4</sup> es:

$$t = \frac{(p)(r)}{(f)(E) - (0.6)(p)} \quad (4.5)$$

*o también*

$$\frac{(f)(E)}{t} = \frac{1}{K - 1} + 0.6 \quad (4.6)$$

En estas ecuaciones el esfuerzo permisible a la tensión  $f$  debe modificarse por el factor  $E$  ( eficiencia de junta );  $K$  es la relación  $d_o/d_i$  de los diámetros interno y externo.

El acero más comúnmente usado, recientemente, para la construcción de envolventes en recipientes elevados es el acero al carbón-silicio SA-212 grado B con un esfuerzo máximo a la tensión de 70,000 psi y esfuerzo permisible  $f$  de 17,500 psi para un rango de temperaturas entre  $-6.6^{\circ}\text{C}$  ( $20^{\circ}\text{F}$ ) a  $343^{\circ}\text{C}$  ( $650^{\circ}\text{F}$ ); este material, cuando se suelda con junta doble a tope siguiendo procedimientos ASME y radiografiándose totalmente, tiene una eficiencia de junta cuyo valor es igual a 1.0; si las juntas soldadas no se radiografían totalmente y solo se realiza en algunos puntos, la eficiencia tendrá un valor de 0.85.

#### DISEÑO DE LA SECCION INFERIOR

( DONDE CONTROLAN LOS ESFUERZOS AXIALES )

En el caso de recipientes elevados existen cuatro factores que contribuyen a los esfuerzos axiales y estos son:

- Cargas debidas al viento
- Sísmicos
- De peso muerto
- Vibración

que se suman a los producidos por la operación del equipo ya sea a -

presión o vacío. Los recipientes elevados auto-soportados se encuentran expuesto a la acción de los elementos por lo que las cargas debidas al viento tienen que ser, también, consideradas, el viento --- ejerce una fuerza sobre el recipiente elevado, haciendo que este se comporte como una viga en voladizo ( cantiliver ) en posición vertical y fijada a la base; en este caso el esfuerzo de flexión inducido por la acción de la viga en voladizo es cero en la parte superior de la torre y máximo en la base.

El esfuerzo de flexión produce otro esfuerzo axial a la compresión en la parte baja de la columna y otro correspondiente de tensión en la parte superior; de aquí que, no importando si el recipiente opera a vacío total o presión, siempre existirá una combinación de esfuerzos axiales de un lado y la substracción de los mismos en el lado opuesto. Tan pronto como esta combinación de esfuerzos -- iguala o sobrepasa la combinación de esfuerzos circulares, los esfuerzos axiales serán los predominantes en la consideración del espesor de la envolvente, en lugar de los anteriormente descritos.

Los esfuerzos debidos a movimientos sísmicos son factores que deben considerarse; el efecto de estas fuerzas es casi similar al debido a cargas de viento, en el que la torre se comporta nuevamente como una viga en cantiliver; sin embargo, existen diferencias en el comportamiento de la distribución de cargas, pero en ambos casos la columna está expuesta a flexión, que a su vez produce esfuerzos axiales a la tensión y, en el otro extremo, esfuerzos axiales a la compresión.

## OPERACION A PRESION Y VACIO

En recipientes elevados, sujetos a presión interna, - la envolvente es de forma cilíndrica con una tapa en la parte superior, ésta puede ser hemisférica, elipsoidal, toriesférica, toricónica, cónica o plana; la tapa que se prefiere, para recipientes de 1.8m ( 6') de diámetro y mayores, es de tipo elipsoidal; para los de menor diámetro generalmente se utilizan tapas hemisféricas.

Recipientes verticales elevados, con una altura de 24m ( 80') o más para operar a grandes presiones, se diseñan para trabajar a presiones menores de 3,000 psi; es por esto que su diseño no se considera dentro de la categoría de recipientes de alta presión - pared gruesa, sino de pared delgada presión media. Las ecuaciones -- fundamentales para el cálculo de recipientes de pared delgada, sometidos a presión interna, muestran que el esfuerzo radial en la envolvente puede despreciarse, ya que es pequeño, con un valor máximo en las fibras internas de la envolvente igual a la presión máxima de -- operación del recipiente; el máximo esfuerzo es el circunferencial o llamado esfuerzo "anular", con un valor en magnitud igual al doble - del esfuerzo axial.

Esfuerzos debidos al viento, sismo o vibración y las cargas a la compresión debidas al peso muerto acumulado, afectan los esfuerzos axiales en forma primaria, produciendo un efecto mínimo resultado de la relación de Poisson en el esfuerzo periférico; es por

ello que la parte superior de un recipiente elevado, diseñado para operar a presión interna o vacío, tiene un espesor de envoltente establecido por el esfuerzo periférico.

#### OPERACION AL VACIO

Existen dos tipos de fallas que pueden ocurrir cuando los recipientes se operan al vacío, comparadas con las que pueden -- ocurrir a elevadas presiones, a saber:

- En operación al vacío, el problema es la estabilidad elástica de la envoltente del recipiente, cuando ésta se encuentra bajo una carga de presión externa; en general, la inestabilidad elástica es un fenómeno que debe tomarse en cuenta para estructuras con rigidez limitada, cuando se les somete a cargas de torsión, compresión, flexión o combinaciones de ellas
- En el caso de una falla debida a inestabilidad elástica, se dice que la estructura se comba o aplasta de la misma forma que sucedería en un recipiente al vacío con una pared delgada

El aplastamiento de recipientes debido a presión externa excesiva se genera, casi siempre, por pequeñas irregularidades en las propiedades físicas del material o en la forma cilíndrica del -- cuerpo; pequeñas excentricidades en la redondez o irregularidades en la envoltente generarán esfuerzos flexionantes bajo una carga de presión externa que tiende a incrementar la excentricidad. Así considerado, se tiene un sistema inestable en el que cualquier irregularidad

o excentricidad produce momentos flexionantes con cargas externas, - lo que incrementa el defecto en la forma geométrica regular.

El fenómeno antes descrito se presenta en la flexión de una columna sometida a una carga axial; en este tipo de falla se llega a la carga crítica, después de la cual ocurre el aplastamiento como resultado de un rápido incremento en el esfuerzo, que resulta superior al esfuerzo mínimo de deformación permanente para el material. La presión crítica causante del aplastamiento no es una simple función del esfuerzo inducido, como lo es en las cargas de tensión, sino que es directamente proporcional al módulo de elasticidad del material, al momento de inercia de la envolvente e inversamente proporcional al cubo del radio de curvatura.

#### CALCULO DE LA PRESION DE DISEÑO <sup>5</sup>

( TORRES OPERANDO AL VACIO )

Debido a los requerimientos de los esfuerzos axiales a la compresión para recipientes elevados se necesita el uso de valores correspondientes a la presión de diseño superiores a 15 psi; el considerar vacío total no es suficiente, en el caso de recipientes elevados, ya que éstos deben diseñarse para una "presión externa equivalente de diseño" mayor de 15 psi, el uso de este valor se debe a que los esfuerzos axiales a la compresión sobre la envolvente, así como los debidos al viento, fuerzas sísmicas y peso del mismo recipiente, reducen las posibilidades de esta para poder operar a vacío total.

Bergman define a la "presión externa equivalente de diseño" por medio de la ecuación:

$$W'_d = \frac{(n^2 - 1) + (m) + (m^\alpha)}{(n^2 - 1) + (m)} \{W''_d\} \quad (4.7)$$

donde:  $W'_d$  = presión externa a la cual opera un recipiente según ASME, psi

$n$  = número de distorsiones que puede sufrir la envolvente

$\alpha$  = relación numérica de: esfuerzos axiales debidos a la aplicación de cargas externas y a la "presión externa equivalente de diseño"

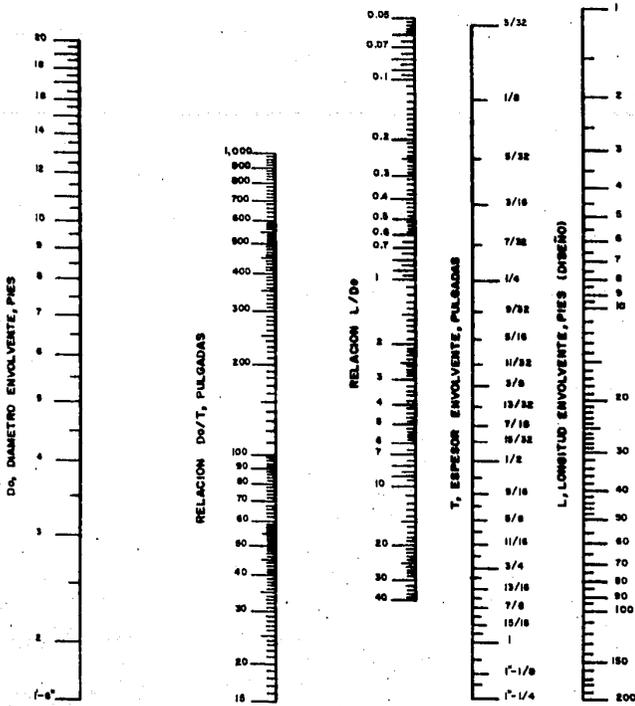
$W''_d$  = 15 psi, presión de diseño usada conjuntamente con la compresión axial

Como casi todas las otras fases del diseño de torres operando al vacío, la ecuación 4.7 puede resolverse por medio de métodos de prueba y error o bien si se desea acelerar el cálculo puede utilizarse la figura 4.1

DISEÑO DE PRUEBA: debido a que se requiere una presión externa superior a 15 psi la idea que aquí se usa es la de considerar como base del primer diseño, una presión externa ligeramente superior al vacío ( del orden de 1 ó 2 lb. ).

Para determinar los valores de  $L/D_o$  y  $D_o/t$  en el nomograma se procede:

- Encontrar en el lado izquierdo de la figura el valor correspondiente al diámetro exterior de -



$$W_0 = \frac{2(1+m)E}{\pi^2(1+m)} (W_0 L_0)$$

Figura 4.1

la torre

- Alinear el diámetro exterior: primero con el espesor de la envolvente ( corroída )  $t$ , posteriormente
- con la longitud de diseño de la envolvente  $L$  leer  $D_o/t$  y  $L/D_o$  en las escalas así marcadas

CARGAS A LA COMPRESION: antes de poder determinar la función  $\alpha$  deben calcularse las cargas debidas a la compresión, al peso y al momento para ello se utiliza la ecuación:

$$L_c = \frac{(4)M}{\pi D^2} + \frac{W}{\pi D} \quad (4.8)$$

donde:  $L_c$  = carga longitudinal a la compresión, lb/in.lineal de -  
circunferencia

$M$  = momento flexionante debido a fuerzas horizontales y -  
pesos localizados con excentricidad respecto del eje  
vertical de la torre, in-lb

$D$  = diámetro exterior de la envolvente, ft

$W$  = peso de la sección considerada, lbs

El nomograma que se utilizará para el cálculo y diseño de pernos de anclaje y anillo base, puede usarse para la determinación de este último valor ( Capitulo V ).

Una vez que se ha determinado el valor de  $L_c$ , el de  $\alpha$  puede encontrarse por definición:

$$\alpha = \frac{L_c}{W_d D_o} \quad (4.9)$$

La figura 4.2 es la solución a la ecuación 4.9 cuando  $W'_d$  es 15 psi; en el caso de requerir un valor más conservador hay necesidad de emplear un valor mayor a 15 psi. Para utilizar el nomograma:

- Con el valor del diámetro exterior, colocarse en el eje que se encuentra a la izquierda
- Desde este punto trazar una recta a través de la línea de cargas a la compresión prolongándola hasta que la intersección se logre con la escala marcada  $\alpha$ , en este punto se lee el valor de la variable

Debe considerarse que si en este punto el valor de  $\alpha$  es mayor a la unidad debe realizarse una verificación de "cantiliver" que por definición es:

$$m = \frac{1.23}{(L/D_o)^2} \quad (4.10)$$

Los valores de  $m$  y  $m_\alpha$  también se obtienen de la figura 4.2 y para localizarlos se procede:

- Del valor de  $\alpha$  obtenido anteriormente, trazar una línea hasta la relación  $L/D_o$  obteniendo  $m$  y  $m_\alpha$

El único valor que resta por calcular es el de  $(n^2-1)$ ; Windenburg y Trilling desarrollaron un nomograma que presenta a  $n$  como función de  $t/D_o$  y de  $L/D_o$ , la figura 4.3 es una adaptación que permite calcular los valores de  $(n^2-1)$  directamente y para ahorrar -

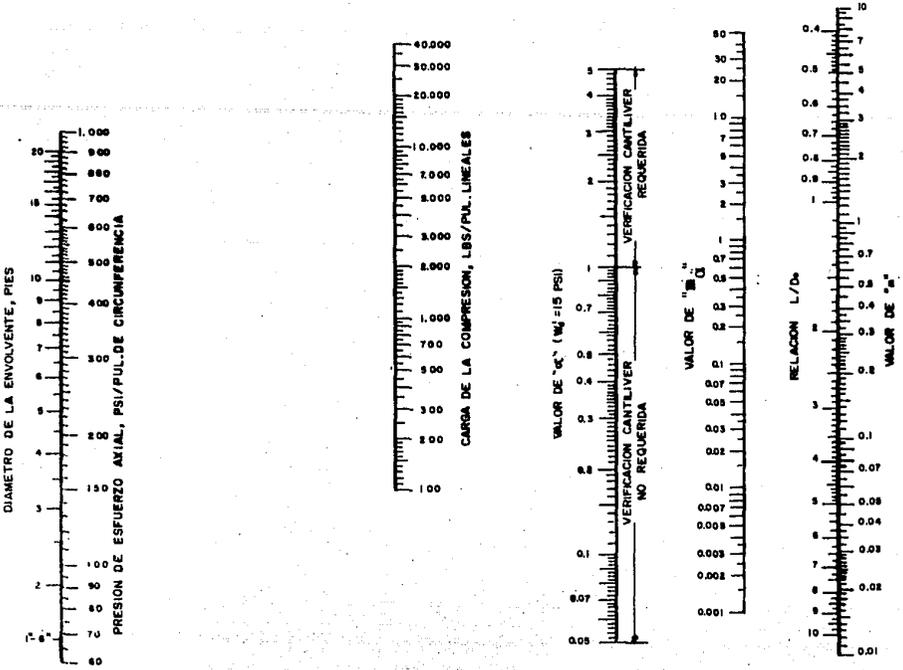


Figura 4.2

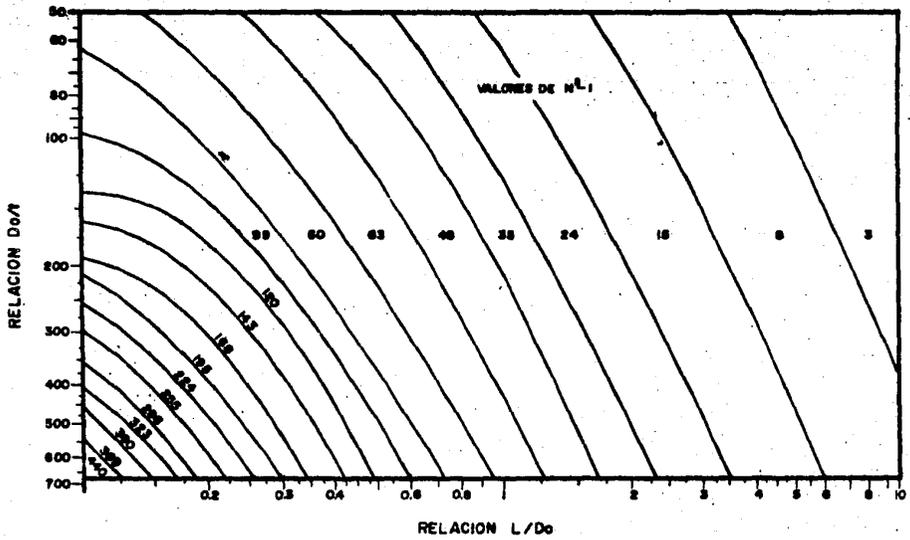


Figura 4.3

tiempo la escala de los valores de  $t/D_o$  se ha invertido y puesto en el diagrama como  $D_o/t$ .

PRESION EXTERNA EQUIVALENTE DE DISEÑO: una vez que todos los valores de diseño se hayan calculado, puede evaluarse la presión de diseño, la figura 4.4 es el medio para realizar este cálculo y se procede a:

- Sumar los valores de diseño para conocer el término  $(n^2-1) + m$
- Sumar al valor de  $m_a$  el resultado obtenido en el paso anterior y con este nuevo valor colocarse en la columna correspondiente
- Trazar desde este punto una recta a través del valor encontrado en el primer paso, la intersección de esta línea con la escala  $W'_d$  es la presión de diseño

Si la presión máxima externa calculada usando los procedimientos del código ASME es menor que  $W'_d$  puede optarse por:

- Incrementar el espesor de la envolvente
- Reducir el espaciamiento de los anillos de refuerzo

PRESION EXTERNA MAXIMA PERMISIBLE: este valor puede calcularse de acuerdo con los procedimientos del código ASME en una etapa inicial de diseño, de no ser así se consultará el código (sec. UG-28c ) y en el inciso 7. se reemplazará  $P_a$  por  $W'_d$ .

Para aceros al carbón incluidos en la figura UCS-28.2

**PRESION EXTERNA EQUIVALENTE DE DISEÑO**

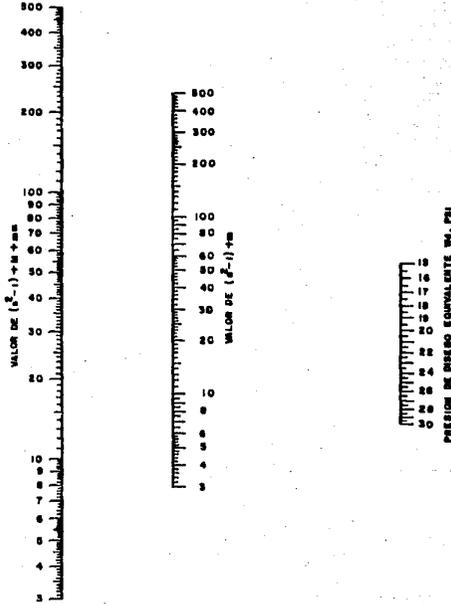


Figura 4.4

y para temperaturas no superiores a 149°C ( 300°F) puede utilizarse el nomograma ( *Scheiman A.D. Petro/chem Engineer 35,36 Mayo 1963* ) encontrando así el valor requerido.

VERIFICACION CANTILIVER: como se hizo notar anteriormente, esta deberá realizarse cuando el valor de  $\alpha$  es mayor a 1; para llevarla a cabo se necesita conocer la compresión total axial debida a la presión externa, momento y peso esto es:

$$L_{ex} = \frac{4M}{\pi D^2} + \frac{W}{\pi D} + \frac{PD}{4} = L_c + (3.75)(D) \quad (4.11)$$

donde:  $L_{ex}$  = compresión total lb/in

$P$  =  $W_d$  presión de diseño ( vacío total ) usada junto con la compresión axial

El valor  $L_{ex}$  se compara con los esfuerzos permisibles a la compresión definidos en el párrafo UG-23b del código ASME; debe considerarse que el valor  $PD/4$  puede obtenerse de la figura 4.2 y -- para cada diámetro leído se obtiene el esfuerzo correspondiente.

#### ESFUERZOS PERMISIBLES<sup>7</sup>

En la práctica se encuentran diseñadores muy familiarizados con el uso de la variable esfuerzos "permisibles" cuando se realizan diseños de piezas que, en muchas ocasiones, pasan por alto el hecho de que un criterio similar no puede aplicarse a partes sujetas a inestabilidad elástica; por lo tanto, si se intenta llevar a cabo el diseño de recipientes que trabajen a vacío con un esfuerzo "per

misible" de esta naturaleza, puede redundar en errores peligrosos. - Es por ello que el diseño tiene que basarse en una presión máxima -- permisible; el valor de ésta casi siempre se toma como 14.7 psia para equipos que operan al vacio.

Si se considera un recipiente cilíndrico de gran longitud sin anillos de refuerzo, la ecuación 4.12 genera el valor, teórico, para la máxima presión que puede existir sin aplastamiento del recipiente:

$$P_{teórica} = \left\{ \frac{(2)(E)}{1 - \mu^2} \right\} \left\{ \frac{t}{d} \right\}^3 \quad (4.12)$$

donde:  $P_{teórica}$  = presión externa, teórica, que causaría aplastamiento, psia

$E$  = módulo de elasticidad de la envolvente

$\mu$  = relación de Poisson (aprox. = 0.3 para el acero)

$t$  = espesor de la envolvente, in

$d$  = diámetro de la envolvente, in

En el caso de utilizar acero, donde la relación de Poisson es igual a 0.3, esta ecuación se reduce a:

$$P_{teórica} = (2.2)(E) \left\{ \frac{t}{d} \right\}^3 \quad (4.13)$$

Este tipo de valores teóricos para la presión de --- aplastamiento, se basa en consideraciones de geometría y uniformidad perfectas en el material de la envolvente; en un recipiente real esta condición idealizada no puede existir, por lo que Stewart encontró -

que el aplastamiento de tubería comercial ocurría a una presión crítica, aproximadamente un 27% menos que la presión teórica; utilizando un factor de seguridad igual a 4, en la anterior ecuación se tiene:

$$P_{\text{permisible}} = (0.55)(E) \{t/d\}^3 \quad (4.14)$$

donde:  $P_{\text{permisible}}$  = presión externa máxima permisible que no causa aplastamiento, psia

El valor de presión así obtenido podrá incrementarse usando anillos de refuerzo, colocados alrededor del recipiente y lo suficientemente juntos para poder crear un efecto de traslape; la relación para conocer la distancia crítica entre anillos fué desarrollada por Southwell y, considerando una relación de Poisson igual a 0.3, la ecuación 4.14 se reduce a:

$$l_c = (1.11)(d) \{\sqrt{d/E}\} \quad (4.15)$$

donde:  $l_c$  = espacio crítico entre anillos de refuerzo, in

Si una torre vertical cuenta con anillos de soporte circulares, para los platos, espaciados cada 0.45m (18") ó 0.6m (2'), como generalmente se encuentran en las torres fraccionadoras, éstos pueden considerarse como de refuerzo y, siendo su espaciamiento menor al crítico, se tendrá un incremento considerable en la presión máxima permisible; a este incremento se le denomina  $K$  y, para un determinado material de construcción, es una función de la relación distancia entre anillos de refuerzo y diámetro del recipiente ( $l/d$ ) así

como de la existente entre diámetro y espesor (  $d/t$  ). Prácticamente el valor máximo de  $K = 2.2$  es la distancia crítica entre anillos de refuerzo.

De las consideraciones de esfuerzos inducidos, ya sean a la compresión o a la tensión, para envolventes cilíndricas delgadas, se demuestra por medio de la ecuación 4.3 que  $f = (p)(D)/2t$ ; si se reacomoda esta ecuación, se resuelve para el valor de  $p$  y se hace igual a  $p_{\text{permisible}}$ , tenemos la relación:

$$p_{\text{permisible}} = (K/4)(E) \{t/d\}^3 = f \{2t/d\} \quad (4.16)$$

Ya que la tensión unitaria  $\epsilon = f/E$  si se substituye esta relación en la ecuación 4.16 se tiene:

$$\epsilon = (K/2) \{t/d\}^2 \quad (4.17)$$

Al realizar la substitución de relaciones que definen a  $E$  ( módulo de elasticidad ) y  $\epsilon$  ( esfuerzo unitario ) se eliminará  $\epsilon$  como variable para así tener un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas; estas relaciones pueden resolverse para un valor de  $p_{\text{permisible}}$ , para un recipiente determinado. La relación entre  $E$  y  $\epsilon$  se representa por la curva esfuerzo-tensión para cada material.

Con el fin de tener una solución en función de la relación  $E - \epsilon$  se requiere sobreimponer dos curvas, la que relaciona el módulo de elasticidad con la temperatura y la que relaciona esfuerzo con temperatura; esta combinación de curvas es la base de la

solución gráfica que recomienda el código ASME.

## 2. CARGAS POR VIENTO

La fuerza que produce flexión en una torre vertical elevada, como resultado de la carga de viento, es función, primeramente, de la velocidad de este y de la forma de la torre tomando en consideración la densidad del aire. La fuerza del viento sobre el área proyectada de la torre ( diámetro por altura ) se ha considerado como:

$$P_w = ( 0.004 ) ( B/30 ) ( V_w ) ( F_s ) \quad (4.18)$$

donde:  $P_w$  = presión del viento en superficies planas, lb/ft<sup>2</sup>

$B$  = presión barométrica, in. de mercurio

$V_w$  = velocidad del viento, mph

$F_s$  = factor de forma igual a 1.0 para placas planas y perpendiculares al viento

La mayoría de las torres, y en especial las más elevadas, se encuentran libres de accesorios tales como escaleras y se puede considerar que tienen forma de un cilindro uniforme; en este caso el factor de forma se considera igual a 0.6. Si el recipiente cuenta con accesorios tales como: plataformas, escaleras, jaulas, etc. así considerado, el factor de forma tendrá un valor de 0.85.

Este valor de presión de viento deberá ser corregido por la altura de la torre, ya que la velocidad del viento varía del

nivel de piso hasta una altura de 152m ( 500').

Con estas consideraciones se recomienda el uso de -- una presión de viento máxima que permita calcular los momentos flexionantes debidos a la carga por viento; si los cálculos demuestran que esta es crítica, la columna puede dividirse en dos zonas, separando así los valores de  $P_w$  en diferentes partes de la columna para que -- los cálculos puedan apegarse más a la realidad.

Una carga de viento uniforme, que se considera actúa a una distancia de  $X/2$  pies, por su brazo de palanca define al momento flexionante como:

$$M_{wx} = (P_w)(X)(d_{efec}/12)(X/12) = 1/2(P_w)(X^2) \quad (4.19)$$

$(d_{efec})$

donde:  $M_{wx}$  = momento flexionante debido al viento, a una distancia  $X$  de la parte superior, lb-in

$d_{efec}$  = diámetro efectivo del recipiente, in

$X$  = distancia desde la parte superior de la torre, ft

El diámetro efectivo es el del recipiente más el doble del espesor, más una tolerancia por el área proyectada de tubería y equipo adicionado; cuando se tienen estructuras abiertas, con marco, el área efectiva se toma como el doble del área proyectada y se provee una tolerancia de 43.2cm ( 17") para escaleras enjauladas.

Momentos flexionantes, como los calculados con la -- ecuación 4.19, producen un esfuerzo en las fibras extremas de la en-

volvente, pudiendo calcularse éstos:

$$f_{wx} = M_c / I = (M_{wx})(r_o) / I \quad (4.20)$$

donde:  $r_o$  = diámetro exterior de la envolvente, in

$I$  = momento de inercia rectangular, perpendicular al eje longitudinal y a través de éste, in

$f_{wx}$  = esfuerzo en el extremo de la fibra debido al viento lb/in<sup>2</sup>  
(esfuerzo que se toma a la compresión en la parte inferior de la torre y a la tensión en la parte superior)

Un valor aproximado para el momento de inercia de la torre, perpendicular al eje longitudinal, lo dá:

$$I = (\pi)(t)(r_m^3) \quad (4.21)$$

donde:  $r_m$  = radio promedio de la envolvente  $r_o$ , in

Substituyendo las ecuaciones 4.19 y 4.20 en la ecuación 4.21 se tiene la expresión para el esfuerzo a la flexión producido por una carga de viento, que es:

$$f_{wx} = \frac{(P_w)(X^2)(d_{efec})(r_o)}{2\pi(r_m^3)(t)} \quad (4.22)$$

considerando que:

- $d_{efec}$  puede igualarse a  $d_o$
- la máxima presión de viento igual a 25 lb/ft<sup>2</sup>, promedio, para toda la columna (este valor corresponde a una velocidad de viento igual a 160 kph {100 mph} a una altura de 9.1m {30'})

Para poder realizar cálculos rápidos la siguiente --  
ecuación, aproximada, resulta de utilidad:

$$f_{wx} = \frac{(16)(X^2)}{d_{ot}} \quad (4.23)$$

### 3. FUERZAS SISMICAS

Durante un movimiento telúrico se generan cambios en la corteza terrestre, tanto en dirección vertical como horizontal; ya que una estructura vertical, cilíndrica y elevada es muy estable a -- las fuerzas que actúan en forma vertical, las modificaciones que sufra la corteza terrestre en esta dirección no afectarán a la torre; - sin embargo, los cambios en la dirección horizontal pueden compararse a un desplazamiento violento de la cimentación desde la parte inferior del recipiente.

Debido a la inercia del recipiente, este movimiento produce una flexión similar a la que resultaría si una fuerza actuase a la compresión, sobre uno de los costados del recipiente, llevando a éste a un estado de vibración armónica. El balanceo de la torre producirá una velocidad máxima a medida que aquella pasa por su centro vertical; del mismo modo, la velocidad máxima de balanceo se encuentra - en la parte superior de la columna, con un valor de velocidad igual a cero en la base.

A medida que la columna alcanza su límite de deflexión la energía cinética del movimiento se transforma en energía de estira-

miento de la envolvente causando una reacción en dirección contraria y, por lo tanto, la columna se balanceará en ambas direcciones hasta que la energía se disipe. Utilizando las ecuaciones que relacionan la energía de estiramiento-simetría y resolviéndolas para expresar el -- factor de tiempo como un período de vibración; más aún simplificando al substituir el valor del módulo de elasticidad, momento de inercia y el cuadrado de la constante gravitacional, se tiene:

$$T = ( 2.65 ) ( 10^{-5} ) ( H/D )^2 \{ \sqrt{wD/t} \} \quad (4.24)$$

donde: T = período de vibración, seg  
H = altura total de la torre ( recipiente y faldón )  
D = diámetro de la torre, ft  
w = peso de la torre, lb/ft de altura  
t = espesor de placa, in

Si el período de vibración de una columna es amplio, se le podrá considerar flexible y, aún cuando su oscilación sea considerable, resistirá las fuerzas sísmicas de mejor manera que aquella - con un período menor, la cual tenderá a destruirse bajo la acción de las fuerzas sísmicas.

Por lo anterior se recomienda el uso de un coeficiente sísmico, en las consideraciones de diseño de una torre elevada, -- que se relacione con el período de vibración del recipiente; una estructura de este tipo no es capaz de absorber movimientos sísmicos y no deberá tratarse como una estructura rígida susceptible de falla debi

da a movimientos telúricos.

El diseño de estructuras capaces de soportar terremotos se basa en análisis empíricos, ya que un movimiento de esta naturaleza resulta complejo en su determinación real. Es así que la aceleración horizontal  $a$ , producida por cambios en la corteza terrestre, dividida entre la constante gravitacional  $g$ , genera el coeficiente sísmico  $c$  y si este último se expresa en forma de relación se tiene:

$$F = ( a/g ) ( w ) = ( c ) ( w ) \quad (4.25)$$

donde:  $a$  = aceleración sísmica, ft/seg<sup>2</sup>  
 $g$  = constante gravitacional, ft/seg<sup>2</sup>  
 $w$  = peso de la estructura, lb masa  
 $F$  = fuerza sísmica, lb fuerza  
 $c$  = coeficiente sísmico, adimensional

#### ESFUERZOS DEBIDOS A CARGAS MUERTAS

Sumando a los esfuerzos de flexión, ya sean producidos por carga sísmica, el peso de la torre y su contenido se producirá un esfuerzo axial acumulativo, en la envolvente, que se incrementará con la distancia que lo separe de la parte superior de la torre.

En el caso de recipientes con cargas a la compresión uniformemente distribuidas, debidas al peso muerto, el esfuerzo se conoce al: *sumar el peso total de la torre en el plano X y dividirlo entre el área de la sección transversal de la envolvente en el mismo plano; en caso de que las*

cargas a la compresión no se encuentren distribuidas uniformemente, - como pudiese ser el caso de un cambiador sostenido en un lado de la - columna, la excentricidad de una carga de esta naturaleza producirá - un esfuerzo flexionante que se sumará al total del peso muerto del es - esfuerzo que se tiene a la compresión.

Este tipo de esfuerzo axiales adicionales pueden cal - cularse por medio de las siguientes relaciones:

$$f_{dw} = \frac{\sum W}{(2 \pi) (r_m) (t)} \quad (4.26)$$

$$f_e = \frac{\sum W_e^e}{(\pi) (r_m^2) (t)} \quad (4.27)$$

donde:  $f_e$  = esfuerzo axial a la compresión producido por el peso --  
muerto acumulado W, psi

$\sum W$  = peso muerto acumulado ( torre + aislamiento + accesorios  
+ fluido ), lb

e = excentricidad, distancia del eje de la columna al centro  
de reacción, in {  $\sum M_e / \sum W_e$  }

$\sum M_e$  = suma de momentos de las cargas excéntricas, lb-in

$\sum W_e$  = suma de todas las cargas excéntricas, lb

$r_m$  = radio promedio de la envolvente, in

t = espesor de la envolvente, in

#### COMBINACION DE ESFUERZOS AXIALES

En forma separada deberán considerarse los esfuerzos  
axiales producidos por la operación de la torre a presión o vacío, se

consideran como importantes los esfuerzos por viento y sismo, dependiendo de la localización geográfica del equipo. Otro esfuerzo que debe tomarse en cuenta es el generado por la erección del recipiente vacío; en este punto los esfuerzos a la compresión, debidos al peso muerto, serán mínimos. Sin embargo, un recipiente trabajando al vacío y expuesto a presiones por viento o terremoto, tendrá un esfuerzo máximo a la tensión.

La carga máxima a la compresión se obtendrá con una torre operando al vacío con carga máxima de líquido u operando a vacío total; en este caso el esfuerzo axial a la compresión, más el esfuerzo axial debido al peso muerto y el de flexión, por viento o sismo, serán la suma total.

El esfuerzo máximo combinado en la parte superior del recipiente en un punto X, considerando un recipiente sin tirantes y sometido a presión interna, en ausencia de cargas excéntricas, se tiene:

$$f_t (\text{máx}) = ( f_{wx} \delta f_{sx} ) + f_{ap} - f_{dx} \quad (4.28)$$

para recipientes sometidos a presión externa:

$$f_t (\text{máx}) = ( f_{wx} \delta f_{sx} ) - f_{ap} - f_{dx} \quad (4.29)$$

En el caso de esfuerzo máximo a la compresión en la parte inferior del recipiente en un punto X, en ausencia de cargas excéntricas y sin contar con tirantes, así como considerando presión

interna se tiene:

$$f_c (\text{máx}) = ( f_{wx} \text{ ó } f_{sx} ) + f_{dx} - f_{ap} \quad (4.30)$$

para recipientes sometidos a presión externa:

$$f_c (\text{máx}) = ( f_{wx} \text{ ó } f_{sx} ) + f_{dx} + f_{ap} \quad (4.31)$$

Para hacer uso de las ecuaciones 4.28,4.29,4.30 y 4.31 debe tomarse en cuenta el tipo de esfuerzos que se tienen; como -- una guía se sugieren los siguientes casos:

1° Recipiente en construcción

- erección del recipiente
- envolvente y equipo auxiliar platos o empaque, sin tomar en consideración el aislamiento

2° Recipiente completo, instalado, sin operar

3° Recipiente en condiciones de prueba

- prueba hidrostática
- prueba neumática

4° Recipiente en operación normal

De esta forma, si se iguala la ecuación apropiada ( 4.28,4.29,4.30,4.31 ) al esfuerzo permisible, se obtiene la solución, para un espesor determinado, del valor de la distancia X; al incrementarse las cargas sísmicas y las debidas al viento, se incrementan a su vez el valor de X, generando así un binomio. Aún cuando éste se --

puede calcular, se prefiere realizar cálculos de aproximación para -- los diferentes números de anillos de refuerzo, principiando desde la parte superior.

El procedimiento que aquí se presenta calcula la parte superior de la columna utilizando las ecuaciones descritas para el caso en el que los esfuerzos circunferenciales son los que controlan; en la mayoría de los diseños se utilizan varios anillos de placa soldada de 2.4m ( 8') por 2.7m ( 9'), antes de llegar a la zona donde -- los esfuerzos axiales principien a ejercer control.

Por tanto, se recomienda un primer cálculo de los esfuerzos axiales máximos, combinados con un valor de  $X$  igual a la altura que representen ocho anillos; si los esfuerzos axiales combinados no resultan críticos, se puede llevar a cabo un cálculo con un número de anillos entre ocho y nueve, dependiendo del grado de esfuerzo; para lograr esto último se requiere de por lo menos dos aproximaciones.

El valor de  $X$  así determinado, en el que el esfuerzo axial controla, dará como resultado un espesor; éste deberá incrementarse primeramente en 0.15cm (1/16") y se le considerará satisfactorio para los siguientes dos o tres anillos en dirección a la base. -- Sin embargo, hay que tomar en cuenta que los esfuerzos axiales debidos al viento y cargas sísmicas se incrementan en función de  $X^2$ , por lo que se recomienda:

- Incrementar más frecuentemente los espesores
- Hacer estos incrementos mayores, en valor, a medida que se aproximan a la base

De lo anterior puede concluirse que si se utilizan incrementos de 0.3cm ( 1/8" ) resultarán convenientes y satisfactorios para los dos o tres anillos siguientes en dirección a la base; los cálculos continuarán hasta llegar a la unión del recipiente con el faldón de soporte.

Al diseñar el faldón no se requiere considerar las presiones a las que operará el recipiente, ya que éste no se encuentra sujeto a cargas debidas a presión o vacío; hay que considerar sin embargo, que los momentos flexionantes aumentan en función de  $x^2$ , provocando que el espesor del faldón se incremente y se logre una cancelación entre ambos fenómenos. El resultado es el uso de un espesor del faldón igual al usado en el anillo inferior de la envolvente.

#### ESFUERZOS AXIALES PERMISIBLES

En la parte inferior de torres elevadas, donde los esfuerzos axiales combinados controlan el diseño de la envolvente, existe el problema de seleccionar el esfuerzo axial máximo, permisible, a la compresión; sin embargo, el esfuerzo axial combinado a la tensión representa poco problema ya que los esfuerzos a la tensión producidos por presión interna y los esfuerzos axiales por carga de viento o carga sísmicas pueden combinarse por adición simple de ellos; el espesor de la envolvente puede calcularse de tal forma que la combinación de esfuerzos axiales a la tensión sea igual o menor que el máximo valor permitido por el código ASME<sup>6</sup>.

El código ASME no proporciona forma alguna de reali-

zar el cálculo de espesores de envolventes, cuando los esfuerzos que controlan son una combinación de esfuerzos axiales a la compresión en el equipo; para este caso se puede aplicar el procedimiento de diseño de recipientes sometidos a presión externa, ya que éste se limita a - cargas circunferenciales como factor controlante del diseño. La falla que un recipiente cilíndrico, sometido a presión externa, puede tener se debe al pandeo circunferencial de la envolvente; sin embargo, las fallas en envolventes cilíndricas sometidas a esfuerzos axiales a la compresión, son el resultado de pandeos axiales o arrugamiento, como en el caso de columnas sobrecargadas a la compresión.

Las fallas que se pueden presentar en recipientes -- cilíndricos de pared delgada, sometidos a cargas axiales, pueden tener dos formas:

- Por acción de columna, como en el caso del pandeo de Euler
- Arrugamiento ocurrido entre soportes de platos

La rigidez que proporcionan las estructuras internas de las columnas tales como: platos, soportes de éstos, bajantes, etc., incrementan el valor de la rigidez en forma considerable teniéndose, como resultado, que el pandeo de Euler, producido en forma de doblamiento de la envolvente como un todo, es pocas veces un factor que -- controle en el diseño de recipientes elevados.

Desde el punto de vista estructural, una envolvente cilíndrica es la mejor configuración geométrica para soportar cargas

axiales compresibles; las fallas ocurren, primordialmente, cuando se tienen envolventes de pared delgada, con lo que se incrementa la posibilidad de arrugamiento local producido por la combinación de cargas axiales excesivas. Para propósitos de diseño no se utiliza el procedimiento empleado para cargas actuando a la compresión en recipientes sometidos a presión externa, en el que se considera una presión permisible, en lugar de este valor deberán de utilizarse esfuerzos permisibles que generen una suma de cargas, de una combinación de presiones externas, tales como las cargas muertas y esfuerzos debidos a cargas de viento y sísmicas; esta es la forma más práctica de combinar las cargas a la compresión por la suma de todos los esfuerzos debidos a ellas. Pero aún así, el problema de diseño continúa siendo el de la estabilidad elástica, esta es una función del espesor de la envolvente y del radio de curvatura. Para este caso el esfuerzo permisible se expresa como:

$$f_c \text{ (disponible)} = (1.5)(10^6) (t/r) \leq \frac{1}{3} \text{ del límite elástico} \quad (4.32)$$

Al aplicar la ecuación 4.32 se debe verificar que el esfuerzo combinado a la compresión no exceda el esfuerzo permisible a la compresión debido a una simple aplicación de ésta (tomando como 1/3 del punto de límite elástico aparente), así como que se encuentre dentro de los límites permisibles de estabilidad elástica (tomada como  $\{1.5 \times 10^6\} \{t/r\}$ ).

Los soportes de los platos así como los refuerzos --

axiales circunferenciales, proporcionan rigidez adicional a la envolvente contra defectos debidos al arrugamiento. Esto se deduce de las siguientes ecuaciones:

$$f_{\text{(permisible)}} = (1.5 \times 10^6) (t/r) (\sqrt{(\tau_y)/\tau^2}) \quad (4.33)$$
$$= \frac{(1.5 \times 10^6)}{r} \{ \sqrt{(\tau_y)(\tau_x)} \} \leq \text{1/3 del límite elástico}$$

donde:  $t_y = t + \frac{A_y}{d_y}$  ( espesor equivalente de la envolvente, en dirección circunferencial )

$t_x = t + \frac{A_x}{d_x}$  ( espesor equivalente de la envolvente, en dirección axial )

de aquí:  $A_y$  = área seccional transversal de un refuerzo circunferencial, in<sup>2</sup>

$d_y$  = distancia entre refuerzos circunferenciales, in

$A_x$  = área seccional de un refuerzo axial, in<sup>2</sup>

$d_x$  = distancia entre refuerzos axiales, in

La ecuación 4.33 demuestra que el área de metal agregada a la envolvente, como refuerzo, incrementa la resistencia al pandeo en una proporción que varía según la raíz cuadrada; sin embargo, al adicionar metal al espesor de la envolvente, se incrementa la resistencia al pandeo en proporción directa al espesor, por lo que es más económico reforzar la envolvente incrementando el espesor y no agregando refuerzos.

VIBRACION ARMONICA

En torres de gran tamaño se denomina vibración armónica al período de vibración, que se encuentra en resonancia con el período de coincidencia, de las corrientes eddy en dirección a la base de la torre; tratándose de columnas cilíndricas con superficies lisas, se forma un vértice turbulento en la parte inferior de presión de viento; debido a que este vértice tiene un movimiento circular, éste se moverá a la izquierda o derecha de la dirección del viento. Cuando el movimiento del vértice alcanza la distancia límite del centro, la corriente eddy invertirá su dirección cambiando al lado opuesto del eje en que se encuentra la dirección del viento; es decir que se tiene una corriente eddy, en dirección a la parte baja de la torre, que oscila en uno y otro sentido, así como de izquierda a derecha de la dirección del viento; esta oscilación tiene una frecuencia definida, controlada por la velocidad del viento, diámetro de la torre y rugosidad de la misma.

Si el período de oscilación eddy es tal que se encuentre en resonancia con el período de la torre, ésta principiará a vibrar pudiendo provocarse una falla total; este fenómeno se ha observado únicamente en el caso de cilindros en extremo lisos. Cualquier rugosidad como el uso de aislamientos, escaleras y cualquier otro aditamento, evitará la oscilación del vértice en dirección a la parte baja del recipiente.

La figura 4.5 muestra las tolerancias sugeridas para la erección de un equipo en la práctica, se realiza al final del capítulo por considerar que se han cubierto los requerimientos que dan una idea de la construcción del equipo.



R E F E R E N C I A S

1. Brownell, Lloyd E. *Mechanical Design of Tall Towers*, Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner, Junio 1963, pág. 109
2. ASME sección VIII div. 1 UG-32 pág. 21
3. ASME sección VIII div. 1 UG-32 pág. 21
4. ASME sección VIII div. 1 UG-27 pág. 14
5. Scheiman, D. Adolph, *Use of Nomographs to find Design Pressure for Vacuum Towers*, Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner, Junio 1963, pág. 127
6. ASME sección VIII div. 1 UG-23 págs. 12, 12.1, 13
7. Brownell, Lloyd E. *Mechanical Design of Tall Towers*, Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner, Junio 1963, pág. 112

## V. DISEÑO DE CIMENTACIONES <sup>1</sup>

Como parte importante en la construcción de una torre y consideración complementaria al desarrollo del tema se incluye este capítulo que puede tener una significación básica en el diseño, ya que intervienen factores que son definitivos en el momento de la realización de un proyecto.

De manera general las columnas de tamaño considerable, fraccionadoras por ej., son equipos de proceso que se encuentran comúnmente en refinerías y plantas industriales; el recipiente vertical se soporta sobre un faldón metálico que tiene como parte integrante un anillo que se asienta directamente sobre una base de concreto (generalmente de forma hexagonal), los pernos de anclaje se encuentran empotrados en el concreto y pasan a través de barrenos en el anillo antes mencionado, manteniéndolo así el recipiente en posición vertical.

Los requerimientos y especificaciones mínimas para la construcción, diseño, fabricación e inspección de los recipientes a presión está comprendida en la sección VII del código ASME para calderas y recipientes a presión.

### REQUISITOS DE CIMENTACION

La cimentación a nivel de piso consta de un pedestal que cuenta con una zapata extendida, como un requisito de inclusión de

esta última hay que considerar:

- La magnitud y localización de las cargas aplicadas
- Los valores de carga permisibles para el suelo
- La estabilidad

La figura 5.1 muestra varios tipos de cimentación, de manera general se utilizan pedestales cuadrados cuando el diámetro -- del recipiente no excede de 1.2m (4') o existen patas de soporte adicional; en el caso de recipientes de mayor diámetro se requerirá de pedestal y zapata, siendo esta última de forma, normalmente, octagonal.

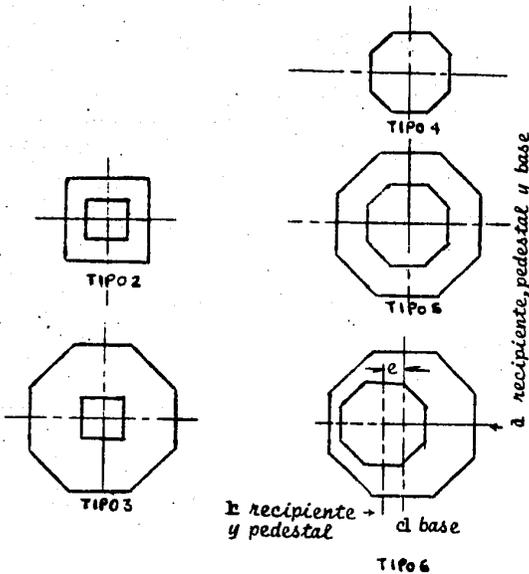


Figura 5.1  
Tipos de Cimentación

El diseño de la cimentación principia por determinar el espacio que requieren los pernos de anclaje en el pedestal, esto se realiza en forma práctica considerando:

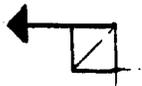
- Diámetro del anillo para anclaje + 20cm. (8")
- Diámetro del anillo para anclaje + 5 veces el diámetro de los pernos
- Diámetro del anillo para anclaje + diámetro de las ca misas + 15cm (6")

Cuando se requiere el uso de zapata, las dimensiones mínimas que tendrá la parte extendida serán de 30cm (12") mayor que la parte más ancha del pedestal, o un redondeo al siguiente múltiplo de - 15cm (6"); el espesor mínimo será de 30cm (12") cuando el pedestal se introduce directamente en el suelo y 50cm (20") cuando se encuentre so portado en pilastras. Las figuras 5.2 y 5.3 muestran las anteriores con sideraciones.

#### CONDICIONES DE CARGA

Las dimensiones de la cimentación se calculan por medio de métodos de prueba y error, en la determinación se consideran los factores adversos que generan condiciones tales como:

- Las cargas muertas
- Las condiciones de operación del equipo
- La prueba hidrostática
- Las cargas muertas y la presión del viento



-179-

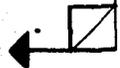
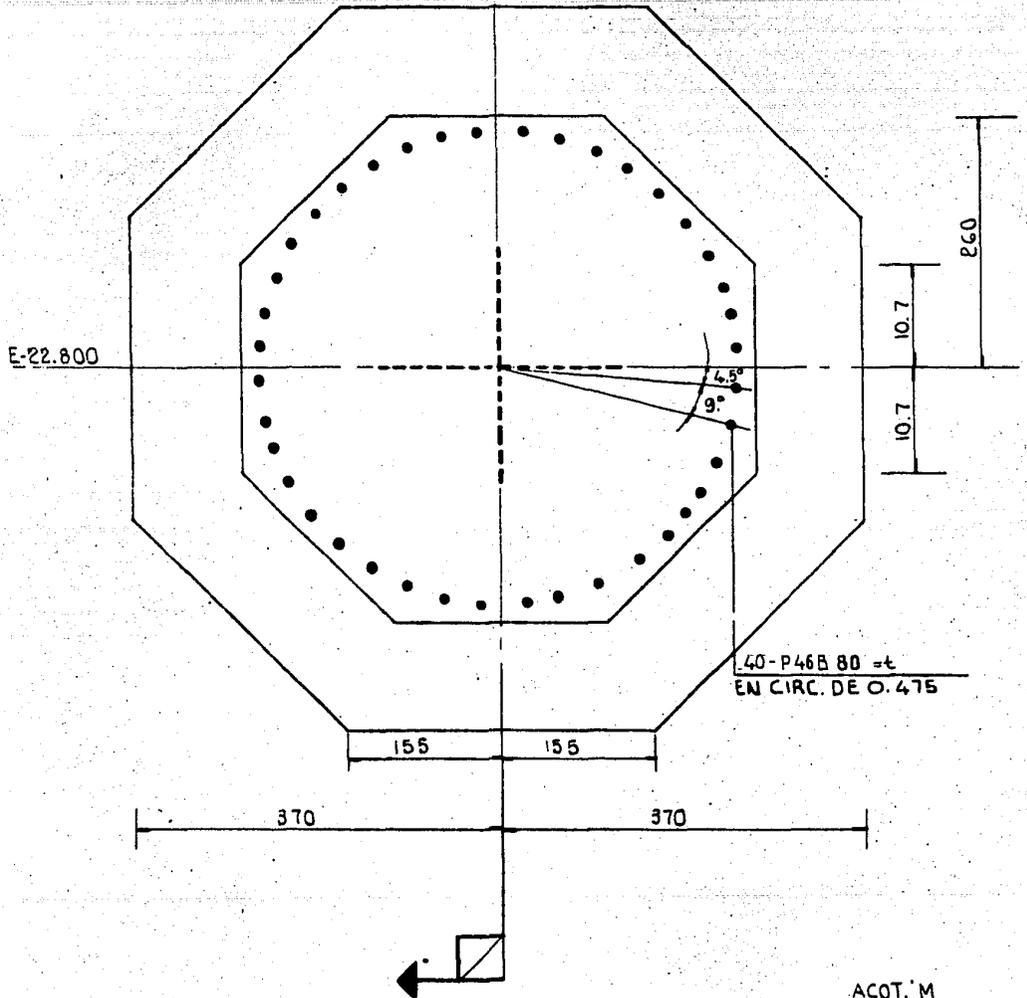
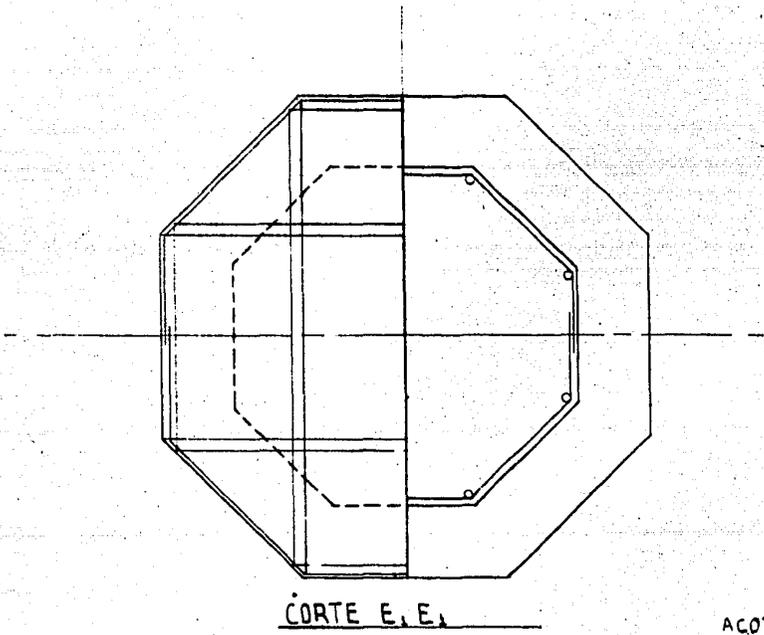
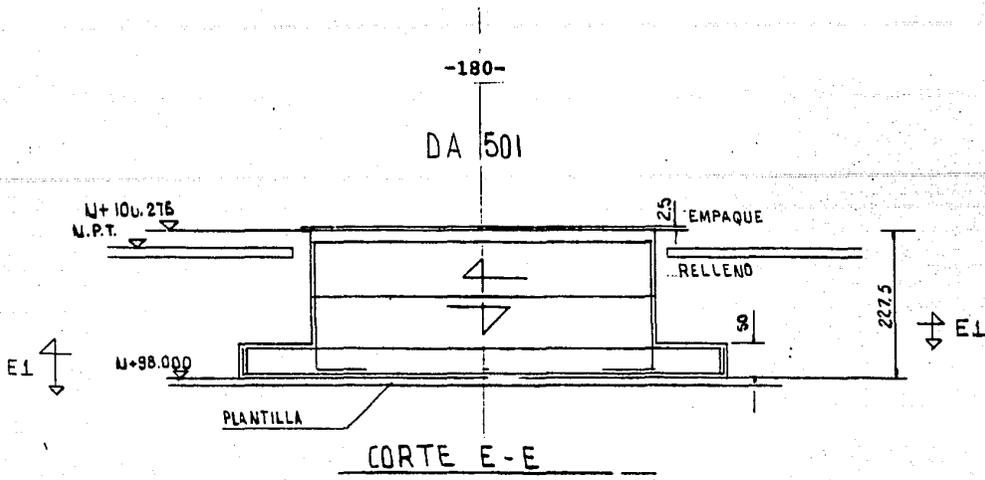


Figura 5.2

ACOT. M  
ESC: 1:50



ACOT. CM.  
ESC: 1:75

Figura 5.3

- Las cargas muertas durante sismo
- Las cargas durante la operación del equipo y la presión del viento
- Las cargas durante operación combinadas con sismo

*Cargas Muertas:* condición que incluye el peso del equipo, partes internas, plataformas y escaleras, tubería conectada ( exterior ) aislamientos.

*Operación del equipo:* que incluye el peso de sólidos o líquidos dentro del recipiente, así como la suma del total del inciso anterior. En recipientes de tamaño considerable, la tubería puede causar tensiones que afecten directamente el diseño.

*Prueba Hidrostática:* el total del peso que soporta la base durante el tiempo que se efectuó la prueba.

*Cargas excéntricas:* debidas a equipo que se adiciona a la torre y que puede generar momentos, ej. condensadores, rehervidores, como solución a este problema se puede considerar la base de la fig. 5. 1, en la que el pedestal se encuentra excéntrico a la zapata.

*Cargas laterales:* este tipo de cargas en cualquier dirección se consideran provenientes de los efectos sísmicos y de la presión del viento, al ser consideradas estas deberán sumarse al valor obtenido en el inciso anterior y tomar la precaución de que pueden presentarse durante ventiscas o sismos.

Considerando que el diseño se rige por las cargas laterales, de corta duración como viento o sismo, se acostumbra incremen-

tar en un 20% estos mismos en el caso de prueba hidrostática.

El método de montaje debe ser determinado con precisión ya que afectará el diseño de la zapata, puesto que se envontará sometida a cargas considerables en forma temporal.

#### CALCULO DE PERNOS DE ANCLAJE Y DIMENSIONAMIENTO DE ANILLOS BASE <sup>2</sup>

Esta forma abreviada de determinación simplifica el método de Marshall para dimensionar pernos de anclaje y anillos base por medio de nomogramas; las torres tipo auto-soportadas se encuentran sujetas a fuerzas debidas al viento, sismo u otras como son las de doblamiento; es por ello que se utilizan pernos de anclaje, puesto que el momento producido por las cargas laterales tiende a voltear la torre, mientras que el peso tiende a mantenerla sobre su base.

CALCULOS PRELIMINARES: habrá que efectuar dos de ellos que son:

- Los momentos causados por viento y fuerzas sísmicas, -- así como los debidos a pesos excéntricos
- El peso total de la torre

Estos cálculos se realizan para las condiciones que la torre experimentará durante la operación o montaje.

NUMERO DE PERNOS: para hacer la selección óptima del número de éstos, hay que considerar:

- Usar un número de pernos que se incremente en múltiplos de 4, considerando como un mínimo 8
- Pernos de diámetro no menor a 2.5cm (1")
- Espacio entre centros de pernos no menor a 60cm (2')

La tabla 5.1 sugiere un número máximo y mínimo de pernos, de acuerdo con el diámetro del anillo base:

TABLA 5.1

diámetro del círculo	n.º mínimo	n.º máximo
0.6m (2') a 1.4m (4.5')	4	4
1.5m (5') 2.1m (7')	8	8
2.3m (7.5') a 2.9m (9.5')	8	12
3m (10') a 3.7m (12')	12	16
3.8m (12.5') a 4.4m (14.5')	12	20
4.6m (15') a 5.5m (18')	16	24
5.6m (18.5') a 6.1m (20')	20	24

SELECCION DE LOS PERNOS DE ANCLAJE: estos mantienen al recipiente sobre su base y se supone comparten la carga de volteo, de manera uniforme, y la relación que ejemplifica este caso es:

$$A_b = \frac{L_t}{S_b} = \frac{1}{(N)(S_b)} \left\{ \frac{(4)(M)}{D_b} - W \right\} \quad 5.1$$

donde:  $A_b$  = área del perno a la raíz de la cuerda, in<sup>2</sup>

$L_t$  = carga máxima a la tensión por perno, lbs

- $S_b$  = esfuerzo permisible, psi ( 18,000 psi usados en la fig. 5.4 )
- $N$  = número de pernos en múltiplos de 4
- $M$  = momento de volteo en la base, lb-ft
- $D_b$  = círculo de pernos, ft
- $W$  = peso de la torre, lbs

Para utilizar la figura 5.4, que resuelve la ecuación 5.1, se seleccionan los pernos y se procede:

- en la escala del lado izquierdo colocar el valor del -- círculo de pernos de anclaje
- trazar una recta desde este punto a través de la escala de momento flexionante, prolongándola hasta hacerla coincidir con la ordenada de la curva de peso ( si la coincidencia de este trazo se encuentra por debajo de la -- curva de peso de torre, no se continúa ya que se requieren pernos de tamaño mínimo )
- de la marca en la ordenada desplazarse horizontalmente hacia el peso de la torre
- de la anterior intersección llegar hasta la línea índice, marcando aquí la nueva intersección
- partiendo de la escala de pernos ( principiando con el número menor ) trazar una línea a través de la marca en el índice
- extender esta línea hasta la escala tamaño del perno ( en caso de utilizar esfuerzos diferentes a 18,000 psi, se usará el dato de área y se corregirá ésta para el esfuerzo requerido )

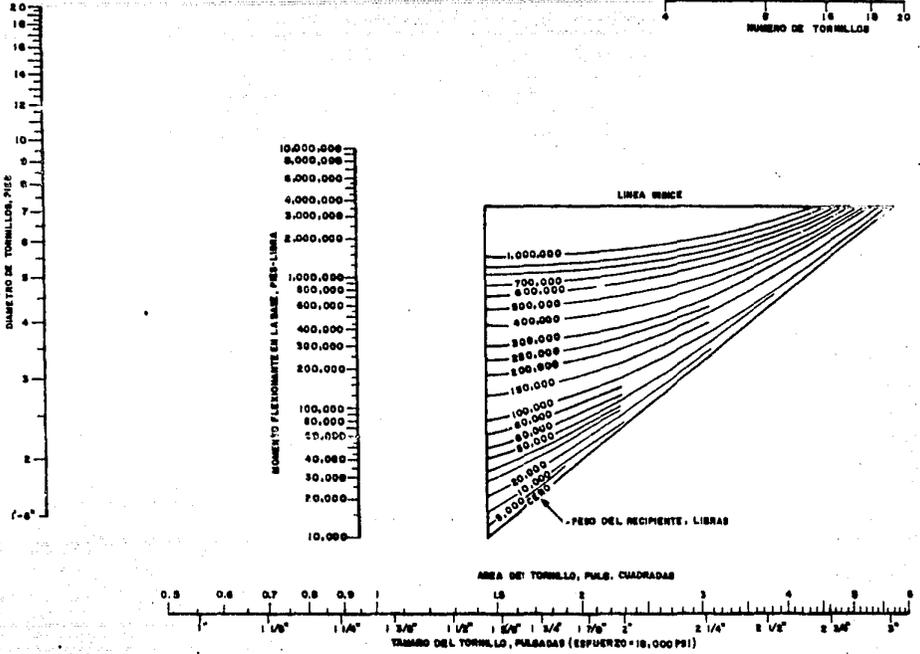


Figura 5.4

## ANILLO BASE

DISEÑO PARA SOPORTE: al faldón inferior de la torre se le adicionará una placa lo suficientemente ancha para que distribuya las cargas, directamente, sobre las vigas de soporte o cimentación de concreto.

La carga total a la compresión que actúa sobre el anillo base, es igual a la carga del faldón en la base misma:

$$L_{cb} = \left\{ \frac{(4)(M)}{\pi D^2} + \frac{W}{\pi D} \right\} \left\{ \frac{1}{12} \right\} \quad (5.2)$$

donde:  $L_{cb}$  = carga a la compresión en el anillo base, lb/in

$D$  = diámetro del faldón, ft

La figura 5.5 sirve para la solución de la ecuación --  
5.2 procediendo de la siguiente manera:

- localizar el diámetro del faldón en la escala del lado izquierdo y desde ahí trazar una línea a través del momento flexionante
- prolongar la línea hasta intersectar la ordenada de la curva de peso, desplazarse horizontalmente hasta intersectar la curva de peso de la torre
- de la anterior intersección llegar hasta la línea índice
- colocar en la escala inferior el valor del diámetro del faldón, trazando una línea a través del índice
- leer en la escala correspondiente la carga a la compresión en el anillo base

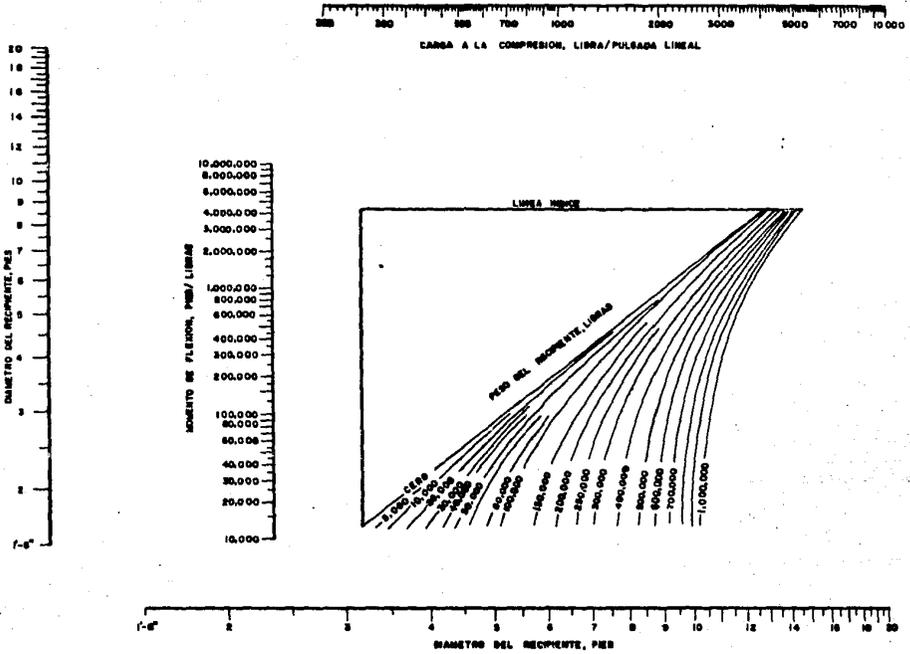


Figura 5.5

La carga a la compresión se supone que se encuentra --  
uniformemente distribuida sobre toda el área de la placa base; si se --  
selecciona una unidad de longitud de la placa base, se tendrá la siguien  
te relación:

$$W_b = \frac{L_{cb}}{f_b} \quad (5.3)$$

donde:  $W_b$  = ancho del anillo base de la torre, in

$f_b$  = carga de apoyo permisible sobre el concreto, psi

En caso de necesitarse el valor de anchura mínimo para  
la placa base, se puede incrementar para proporcionar espacio para rea-  
lizar maniobras de soldadura ( si se requieren ) y para los pernos de -  
anclaje. Para obtener el espesor del anillo base se considera a esta --  
placa como una viga enl antiliver, con un arqueo B y soportando una car  
ga uniformemente distribuida, por lo que la relación que se utiliza en  
este caso es:

$$t_b = (B) \{ \sqrt{(3)(f'_b)/S} \} \quad (5.4)$$

donde:  $t_b$  = espesor del anillo base, in

$f'_b$  = presión real soportada, psi

S = esfuerzo permisible de doblamiento del material, psi

( 20,000 psi en la figura 5.6 )

La figura 5.6 es la solución gráfica de las ecuaciones  
5.3 y 5.4 y para utilizar esta figura se procede:

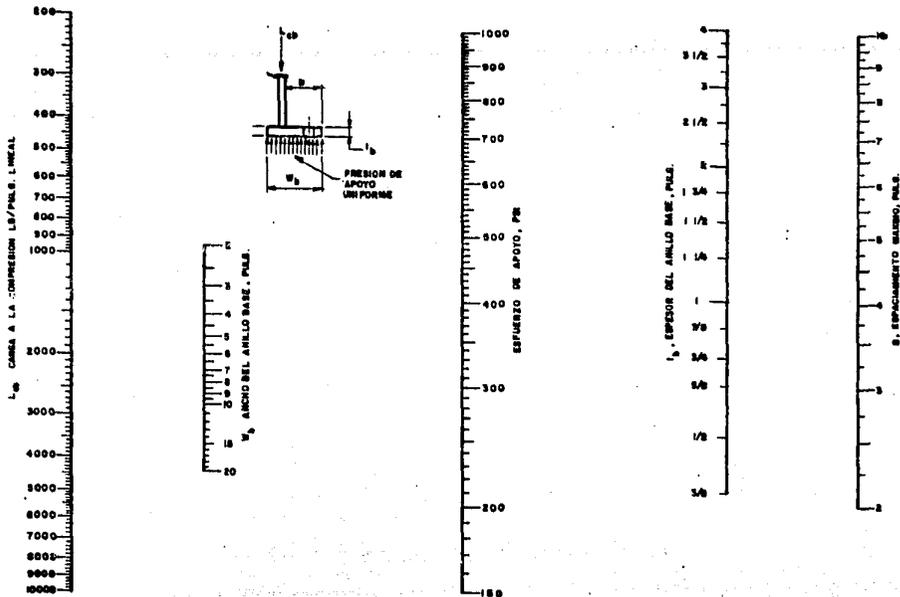


Figura 5.6

- en la escala de la extrema izquierda colocar el valor de carga a la compresión ( de la fig. 5.5 )
- interconectar este punto con el esfuerzo de soporte permisible; la intersección que se obtenga en la escala de espesor será el valor de éste para el anillo base; en caso necesario se efectuará un ajuste para el espacio del perno de anclaje
- una vez que el espesor ha sido ajustado se traza una línea que conecte a este punto con el de carga a la compresión ( valor encontrado en el primer paso de esta secuencia ), donde este trazo intersecte la escala de presión este será el valor real de soporte
- de este valor de presión obtenido en el paso anterior - trazar una línea hasta la escala de máximo arqueado del anillo base, en el punto donde esta línea intersecte la escala de espesor este será el valor correspondiente

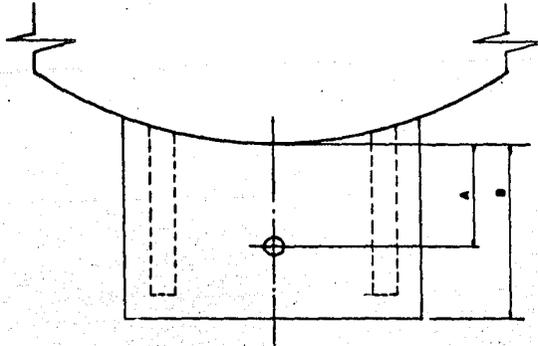
SILLETAS CON PERNO: este tipo de accesorio se diseña considerando la carga máxima que el perno puede transmitirles; debido a que la variedad en el tamaño de los pernos es pequeña, resulta más conveniente realizar el cálculo de una silleta tipo como la que se muestra en la figura 5.7 que puede servir de base para estos diseños.

### PRESION DE VIENTO<sup>3</sup>

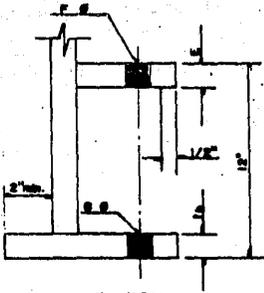
Este valor dependerá de la localización geográfica y de la forma en que se realice la instalación misma del equipo; respecto a la magnitud de las presiones las que actúan sobre superficies cilíndricas son menores a las que actúan, supuestamente, sobre superficies -

# DIMENSIONES DE SILLETAS

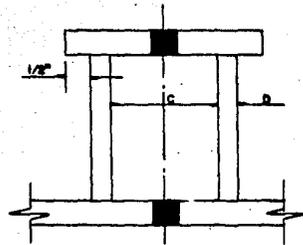
-191-



PLANTA



V. LATERAL



ALZADO

Figura 5.7.

TAM. TORN.	A	B	C	D	E	F	G
1"	1 3/8"	3"	2 1/4"	1/8"	3/4"	1 1/4"	1 1/8"
1 1/8"	1 3/8"	3"	2 1/4"	1/8"	3/4"	1 3/8"	1 3/8"
1 1/4"	2"	3"	2 1/2"	1/4"	1"	1 1/2"	1 3/8"
1 3/8"	2 1/8"	4"	3"	3/8"	1"	1 3/8"	1 3/8"
1 1/2"	2 1/8"	4"	3"	3/8"	1 1/4"	1 3/8"	2"
1 3/4"	2 3/8"	4"	3"	3/8"	1 1/2"	1 7/8"	2 1/8"
1 7/8"	2 3/8"	5"	3 1/4"	3/8"	1 1/2"	2 1/8"	2 1/8"
2"	2 3/8"	5"	3 1/4"	3/8"	1 3/4"	2 1/8"	2 1/8"
2 1/4"	3"	6"	4"	1"	1 3/4"	2 1/2"	2 3/8"
2 1/2"	3 1/4"	6"	4"	1"	2"	2 3/4"	3"
2 3/4"	3 1/4"	7"	5"	1 1/4"	2 1/8"	3"	3 1/4"
3"	3 3/4"	7"	5"	1 1/4"	2 1/4"	3 1/4"	3 1/2"

planas.

Para la evaluación correcta de las presiones debidas al viento se deberá tener información, lo más detallada posible, de -- las presiones para diferentes localidades, para así poder hacer uso de los factores llamados "de forma" ya que estos corrigen a la presión proporcionando un valor más cercano a la realidad; estos factores ( o valores ) "de forma" se consideran como:

0.60 para secciones redondas o elípticas

0.80 para secciones hexa y octagonales

La presión que el viento ejerce sobre accesorios tales como: escaleras, plataformas, boquillas y tubería conectada se considera como el producto del diámetro del recipiente, incluido el aislamiento, multiplicado por los siguientes factores:

	factor
Diámetro < 0.9m (36")	1.5
0.9m (36") ≤ " < 1.4m (54")	1.37
1.4m (54") ≤ " < 2.0m (78")	1.28
2.0m (78") ≤ " < 2.6m (102")	1.20
2.6m (102") ≤ "	1.18

En caso de tenerse recipientes con dimensiones muy particulares y en los que se requiera de un número de plataformas y/o escaleras diferente a lo normal, la presión horizontal total deberá calcularse sumando la presión de cada uno de los accesorios a la total del recipiente.

## FUERZAS SISMICAS

Este fenómeno resulta bastante complejo en su explicación, si se toma en cuenta que como resultado del sismo se tiene desde el movimiento errático de las capas del subsuelo hasta el movimiento de la estructura misma; ahora bien, para fines prácticos de diseño este problema, complejo en sí mismo, se reduce a uno de "fuerzas equivalentes estáticas", todas las estructuras deberán diseñarse y construirse para soportar una fuerza sísmica lateral mínima, actuando esta en dirección horizontal y definiéndose de la manera siguiente:

$$V = ( Z ) ( K ) ( W ) ( C ) \quad (5.5)$$

donde: V = carga total o esfuerzo en la base

W = peso total de la estructura sobre el suelo, lbs

Z = coeficiente sísmico que dependerá de la zona geográfica en que se lleve a cabo la construcción. ( para el caso de México este valor tendrá variantes de 0.5 a 1 )

K = coeficiente numérico relacionado con el sistema estructural y la naturaleza de este; para estos casos se considera un valor de 2.0

C = coeficiente numérico relacionado con la flexibilidad de la estructura, valor obtenido de una relación empírica -- igual a:

$$C = \frac{0.05}{\sqrt{T}} \quad (5.6)$$

donde: T = período fundamental de vibración del edificio o estructura ( en seg. ), en una dirección considerada

Ya que el valor de  $C$  es inversamente proporcional a la raíz cúbica de  $T$ , este no será muy sensible a pequeños errores de él. Para estructuras de tipo oscilante con distribución de peso uniforme y sección transversal constante, el período de vibración puede estimarse utilizando el valor de altura  $H$  de la estructura y la rigidez  $EI$ , en la dirección paralela al movimiento y que se representa por la relación:

$$T = ( 1.79 ) \{ ( WH^4 ) ( EI_g ) \}^{1/2} \quad (5.7)$$

donde:  $g$  = aceleración debida a la gravedad

$W$  = peso/unidad de altura

Utilizando un valor de  $E = ( 29 \times 10^6 )$  psi para el módulo de elasticidad del acero,  $I = ( D^3 ) ( t ) / 8$  para el momento de inercia del área del recipiente y ajustando la relación para tener consistencia dimensional en la fórmula, ésta se reduce a:

$$T = ( 0.27 ) \left\{ \{ W / ( 100 ) ( t ) \} \{ H / ( 10 ) ( D ) \} \right\}^{1/2} \quad (5.8)$$

donde:  $W$  = peso total, kips

$H$  = altura sobre la base, ft

$D$  = diámetro de la envolvente, ft

$t$  = espesor de la envolvente, in

En el caso de que estructuras y recipientes no presentan características uniformes, la aproximación de Rayleigh, descrita -

en los textos de análisis vibracional, es adecuada.

Para recipientes de tamaño considerable y que guarden una relación diámetro-altura con un valor mayor a 3 una parte del esfuerzo (V) de la base se sumará al esfuerzo de la parte superior, a este tipo de esfuerzos se les denomina  $F_t$  y se determinan:

$$F_t = (0.004)(V)(H/D)^2 \leq (0.15)(V) \quad (5.9)$$

El asignar hasta un 15% del esfuerzo de la base a la parte superior del recipiente, denota el elevado módulo de respuesta - presente en estructuras de gran tamaño, el esfuerzo restante de la base se distribuye de tal manera que reflejaría las fuerzas que se obtuvieran en el módulo fundamental dominante ( que es el de mayor ocurrencia) de acuerdo con la ecuación de distribución triangular se tiene:

$$F_x = \frac{(V - F_t)(W_x)(H_x)}{\sum_{i=1}^n (W_i)(h_i)} \quad (5.10)$$

donde:  $F_x$  = fuerza lateral aplicada en un nivel x determinado

$W_i, W_x$  = la parte de W localizada o asignada a un nivel x o i

$h_i, h_x$  = altura en ft, desde la base hasta el nivel x o i

El esfuerzo en la base refleja el módulo de respuesta, acumulado, del recipiente; en el momento de volteo predomina exclusivamente el módulo fundamental, como compensación parcial del esfuerzo en la base cuya respuesta sería mayor que el módulo fundamental del momento de volteo; para esto se puede utilizar un coeficiente de reducción

de momentos  $J$ , determinado del período fundamental por medio de la ecuación:

$$J = \frac{(0.05)}{T} \quad (5.11)$$

Por lo que el momento de volteo de la base  $M$  es igual a la suma de fuerzas  $F_x$  por su brazo de palanca, respecto de la base, multiplicado por el coeficiente  $J$ , aún cuando no existen valores mínimos para este coeficiente se recomienda utilizar un valor que no sea menor a 0.4.

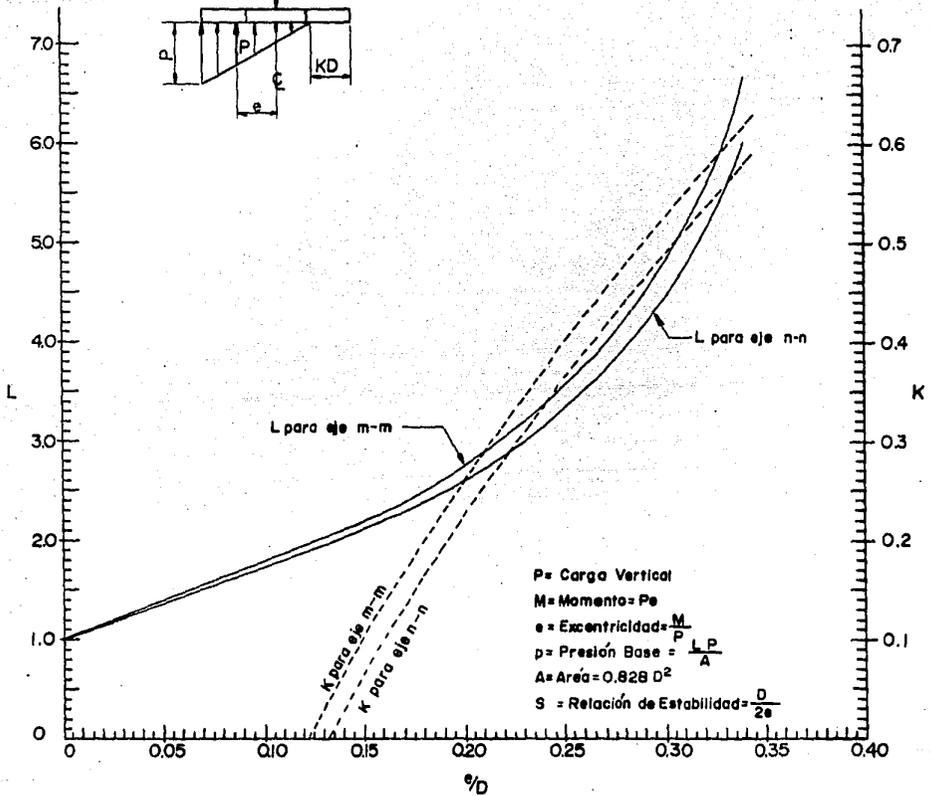
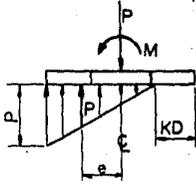
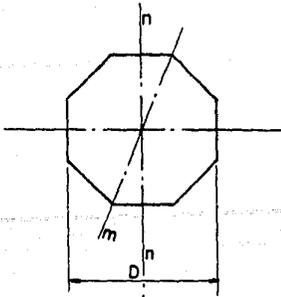
#### 1. TAMAÑO DE LA ZAPATA

Los principales parámetros que deberán considerarse para decidir la colocación de una zapata bajo el pedestal, son:

- Resistencia del suelo
- Estabilidad

El tamaño y forma de la zapata ( o del pedestal cuando no se requiere de zapata ) debe ser tal que las cargas aplicadas verticales, laterales y momento de volteo sean soportadas sin exceder la resistencia del suelo y con un factor de seguridad amplio para prevenir la volcadura provocada por el efecto de presión de viento.

Con la ayuda de la figura 5.8 puede obtenerse el valor de la resistencia del suelo y para utilizarlo se procede:



NOMOGRAMA PARA CALCULAR RESISTENCIA DEL SUBSUELO PARA BASES OCTAGONALES.

Figura 5.8

- obtener el valor apropiado de la relación  $e/D$ , para poder iniciar la determinación (  $e = M/P$  relación de -- excentricidad,  $D =$  diámetro del octágono, distancia -- entre caras paralelas ), continuando verticalmente has ta la curva  $L$  leyendo en el margen así marcado el va-- lor correspondiente
- la resistencia del suelo  $p = LP/A$ , en donde:
  - $P =$  carga vertical total incluyendo peso de la cimentación y tierra, lbs
  - $A =$  área del octágono,  $ft^2$
- de la gráfica se obtiene el coeficiente  $K$  pudiendo cal cular la distancia  $KD$  para la longitud de la zapata, -- cuya resistencia, de suelo, tendrá un valor igual a -- cero

Conociendo los valores de  $p$  y  $KD$  puede dibujarse un -- diagrama de resistencia para el suelo, con el objeto de tener una rela -- ción de estabilidad de  $1\ 1/2$ ; el tamaño de la zapata deberá ser tal -- que el momento estabilizador sea por lo menos un 50% mayor que el momen -- to de volteo.

Este momento estabilizador es la suma de los produc-- tos de carga vertical por su distancia al perímetro de la zapata; en -- el caso de tener zapata con pedestal concéntrico, la relación de esta -- bilidad se reduce a  $D/2e$ .

#### 1.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA ZAPATA\*

El método para cálculo del tamaño de la zapata se de-

termina por medio de la fórmula:

$$D = \sqrt[3]{(M)(18/P)} \quad (5.12)$$

donde: D = resistencia máxima del suelo

M = Kips/ft

P = Kip/ft<sup>2</sup>

En esta fórmula no se incluyen las cargas verticales y puede aplicarse sin necesidad de estimar el peso de la cimentación.

En el caso de recipientes pequeños, donde los momentos debidos a cargas laterales no son importantes, el tamaño del octágono puede determinarse por medio de la carga total W y la resistencia máxima del suelo por medio de la fórmula:

$$D = (1.1)(\sqrt{W/P}) \quad (5.13)$$

Si se desea calcular el peso de la cimentación, se deberá suponer un espesor razonable para la losa base, aún cuando los incrementos en espesor aumentan el peso del concreto y disminuyen el peso de la tierra, la diferencia neta es pequeña.

R E F E R E N C I A S

1. Czerniak, Eli *Foundation Design Guide for Stacks and Towers*, Hydrocarbon Processing, Junio 1969, pág. 95
2. Scheiman, Adolph D. *Short cuts to Anchor Bolting and base ring Sizing*, Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner, Junio 1963, pág. 132
3. Czerniak, Eli *Foundation Design Guide for Stacks and Towers*, Hydrocarbon Processing, Junio 1969, pág. 97
4. *Ibidem* pág. 103

## VI. COSTOS<sup>1</sup>

Se omitirán los detalles de la elaboración y preparación de una estimación de costos ya que estos representan en sí mismos un tema aparte.

### 1. FACTOR E INDICE DE COSTOS

Se necesita realizar una estimación preliminar de costos y para su preparación se pueden emplear métodos como el de "facto-rización" u otro equivalente, éstos básicamente acumulan los costos individuales de cada unidad de equipo principal y los multiplican por un factor de experiencia generando así:

- Costos totales instalados, sin costo indirecto
- Tubería instalada
- Equipo instalado

Para tener una precisión razonable, estos factores de deben desarrollarse partiendo de costos de plantas reales, los cuales --son casi siempre particulares para cada caso específico de construcción. Un factor con un valor entre 2.5 y 4.0 cubre la mayoría de los equipos incluidos en una planta química de proceso; este factor multiplicado -por el costo del equipo, sin instrumentación, generará el costo total.

Los costos se reflejarán en:

- Selección de la ruta del proceso
- Equipo que se requiere en el proceso
- Especificaciones del equipo

El equipo no deberá seleccionarse ni especificarse arbitrariamente, ni tampoco deberán fijarse presiones de diseño o detalles de fabricación sin considerar el efecto relativo al costo específico, del costo de un equipo así como los accesorios asociados como la instrumentación, etc.

Algunos factores específicos para determinar el costo individual, como una proporción del costo total de la planta, sirven para realizar una aproximación del costo total o como una comparación de costos para diferentes alternativas de proceso.

La estimación de costos es un campo en sí mismo, por lo que al llevar a cabo una de estas hay que tener en cuenta que se requiere de acceso a información lo más actualizada posible, respecto a los costos y a la relación gráfica de los mismos que son función de su capacidad. Se ha publicado un manual Page J.S. (*estimator's manual of equipment and installation costs, Gulf Publishing Co. Houston Tex.*) que sirve de apoyo apreciable, ya que el equipo es solamente parte del costo total de la planta o de una ampliación de proyecto ya existente; así mismo deben considerarse los costos de instalación, que incluyen parte de la mano de obra. Para lo anterior existe la suficiente información en la bibliografía que a continuación se incluye:

- Equipo Page J.S. Estimator's manual of equipment
- Construcción general Page J.S. Estimator's general man-hour - manual
- Calefacción, ventilación y plomería Page J.S. Estimator's man-hour manual on heating, air conditioning, ventilating and --- plumbing
- Tubería Page & Nation Estimator's man-hour manual
- Eléctrico Page & Nation Estimator's electrical man-hour manual

Con estas ayudas se puede establecer una aproximación de los costos si se toman en cuenta las funciones de trabajo y pasos - que deben seguirse.

#### FACTOR DE SEIS DECIMOS

La presentación de este factor se debe a Chilton, su primordial utilización ha sido la de escalar los costos del total o - segmentos de los costos de planta:

$$P_b = P_a (C_b/C_a)^{0.6} \quad (6.1)$$

donde:  $P_b$  = costo de la planta o sección con capacidad "b"

$P_a$  = costo de la planta o sección con capacidad "a"

$C_b$  = capacidad de la planta o sección con nuevos requerimientos

$C_a$  = capacidad de la planta o sección con requerimientos origi  
nales

Esta relación puede ser aplicada a cualquier año de -

realizada la construcción, pero no corrige las diferencias que existen año con año; para este propósito se utilizarán los índices anuales que generan una mejor explicación. La experiencia ha mostrado que esta regla es razonablemente exacta para el escalamiento de partes o equipos independientes, de tal modo que si se conoce el costo de una parte o del total del equipo, la cifra estimada para una capacidad del doble se obtendrá al multiplicarse, ésta, por  $(2)^{0.6} = 1.5157$ .

El inconveniente del método radica en que para cada tipo de planta o producto, así como para cada equipo, existe un punto de ruptura en el cual el factor no guarda correlación con el cambio de capacidad; en el caso de equipo pequeño, plantas piloto o de mediana capacidad, la pendiente de la curva de costos se incrementa y la relación de estos es mayor a 0.6 ( en ocasiones lo será a 0.75, 0.8 ó 0.9 ).

Para diferentes valores de costos y capacidades respectivas, es conveniente desarrollar curvas logarítmicas capacidad-costo que generarán el exponente apropiado por medio de la pendiente de la curva resultante, la extrapolación más allá de 8 ó 10 veces resulta muy inexacta.

#### INDICE DE COSTOS ANUALES

Existen tres de ellos que son los más utilizados para relacionar el nivel de costos para un año o mes determinado, como un punto de referencia y son:

- *Engineering news-record construction and building. índice de cos*

tos conocido como EN-R ( publicado por Mc.Graw Hill N.Y ), son de utilidad para la construcción y si se ajustan a la construcción de plantas químicas de proceso pueden usarse directamente

- Índice Marshall & Stevens ( publicación de Mc.Graw Hill Chem. Eng. )
- Índice Nelson para la construcción de refinerías ( *oil & gas Journal* ). La figura 6.1 es una representación de este índice

Los índices antes mencionados se utilizan para actualizar costos cuando se conoce el valor del equipo en una fecha determinada, los costos así calculados tienen exactitud de estimación y deberán verificarse, si es posible, de la misma forma en que se lleva a cabo la verificación con el factor de 0.6 que correlaciona costo-capacidad; la relación que se muestra a continuación representa lo anterior:

$$EC_2 = ( EC_1 ) ( I_2 / I_1 ) \quad (6.2)$$

donde:  $I_2$  = valor índice para el año 2 ( costo real )

$I_1$  = valor índice para el año 1

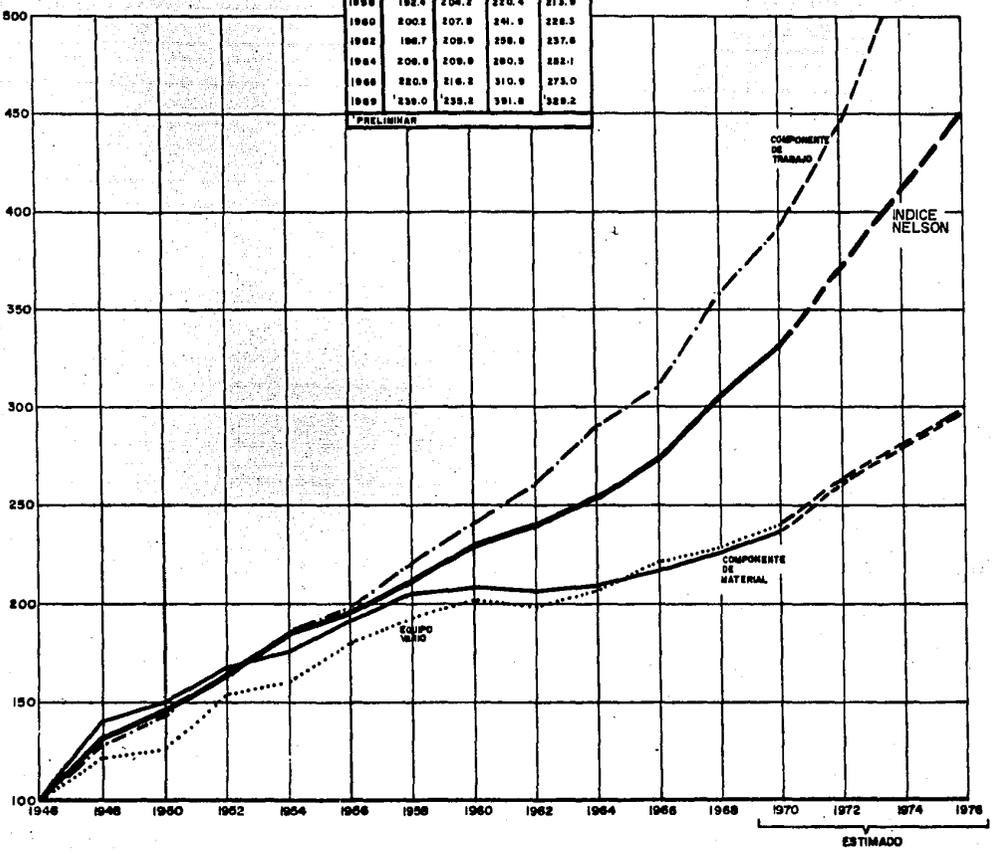
$EC_2$  = costo estimado del equipo para el año 2

$EC_1$  = costo del equipo comprado, cuando se dispone del dato, para el año 1

## 2. AMORTIZACION

Aún cuando no es materia de este estudio la evaluación

	EQUIPO VIBRO	MATERIAL	TRABAJO	NELSON
1948	100.0	100.0	100.0	100.0
1949	122.1	139.3	128.0	132.5
1950	126.2	149.5	144.0	146.2
1951	135.1	164.3	153.1	162.6
1952	160.7	176.9	183.3	179.8
1953	160.5	190.4	196.2	195.3
1954	192.4	204.2	220.4	213.9
1955	200.2	207.9	241.9	228.3
1956	196.7	209.9	258.8	237.6
1957	209.9	209.9	280.5	252.1
1958	220.9	216.2	310.9	273.0
1959	239.0	239.2	391.8	329.2
PRELIMINAR				



INDICE NELSON

| Figura 6.1

correcta de los costos y su efecto en la selección del equipo de proceso, hay que enfatizar el hecho de que se debe conocer estas relaciones.

Existen varios métodos para calcular la amortización y la figura 6.2 representa uno de ellos, puede decirse que es una guía útil para estimar el valor de la amortización de una inversión y así poder dar idea del ahorro total que se puede tener en material y/o costos. La figura se emplea para determinar la inversión justificable --- para una amortización anual neta determinada, suponiendo un porcentaje de rendimiento, un cargo por depreciación anual y los impuestos sobre la amortización. Esta relación es:

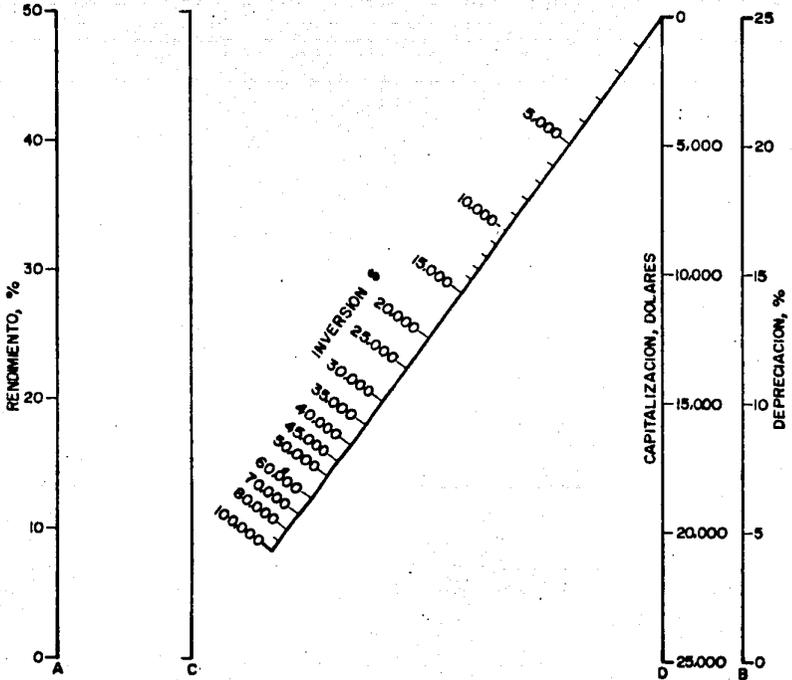
$$\text{Rendimiento} = \frac{((\kappa - \delta)(\chi))\{1 - \zeta\}}{(\chi)} \quad (6.3)$$

donde:  $\kappa$  = capitalización

$\delta$  = depreciación

$\chi$  = inversión

$\zeta$  = impuestos



CAPITALIZACION ANUAL, RENDIMIENTO Y DEPRECIACION

FIJA, PARA INVERSION JUSTIFICABLE.

Figura 6.2

## COORDINACION CONTABLE

Todas las instalaciones recién construidas, así como los cambios a instalaciones o plantas existentes deberán tener un sistema de contabilidad por costos; frecuentemente en la construcción, servicios e instalaciones y desarrollo del terreno se tendrán renglones - separados, desde el punto de vista costos; cada uno de los constructores cuenta con necesidades diferentes en la presentación de esta información, así como de sus propias políticas de impuestos y depreciación.

Aún cuando el ingeniero de proyecto es responsable de la coordinación de estas actividades a través de los grupos de ingeniería, se requiere que él genere los detalles propios del análisis que - sirvan en la ejecución posterior del detalle en el análisis a profundidad de los costos.

## R E F E R E N C I A S

1. Ludwig, Ernst E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, tomo I pág. 140

B I B L I O G R A F I A

- Andrew, G.W. *Applied Instrumentation in the Process Industries*, Gulf Publishing Co., 1965
- ASME *Boiler and Pressure Vessel Code, section VIII ( Division 1 & 2 )*, ASME New York, 1975
- Brown, G.C. & Associates, *Unit Operations*, John Wiley & Sons, New York, 1950
- Brownell, Lloyd E. *Mechanical Design of Tall Towers, Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner*, Junio 1963
- Brownell, Lloyd E. & Young, Edwin H. *Process Equipment Design*, John Wiley & Sons Inc., 1969
- Chávez, Gamboa J.R. *Diseño Mecánico de Cambiadores de Calor*, Tesis Facultad de Química UNAM, 1972
- Czerniak, Eli *Foundation Design guide for Stacks and Towers*, Hydrocarbon Processing, Junio 1969
- Fogle, *Fogle's Engineer's Handbook*, Fogle Publications, Foxboro Mass., 1965
- Foust, Alan S., Wenzel, L.A., Clump. C.W., Maus, L. & Anderson, L.B. *Principles of Unit Operations*, John Wiley & Sons New York, 1960
- Glitsch, *Ballast Tray Design Manual*, Fritz W. Glitsch & Sons, Inc.
- Gilliland, Edwin R. *Elements of Fractional Distillation*, Mc. Graw Hill New York, 1959
- Leva, M. *Tower Packings and Packed Tower Design*, U.S. Stonewear Co. Akron Ohio, 1953

- Ludwig, Ernst E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, -  
Gulf Publishing Co., 1965
- Mc. Cabe, Warren L. & Smith, Julian C. *Unit Operations of Chemical Enginee-  
ring*, Mc. Graw Hill New York, 1967
- Nelson, H. *Petroleum Refinery Engineering ( Fourth Edition )*, Mc. Graw Hill --  
New York, 1958
- Perry, John H. ( editor ) *Chemical Engineer's Handbook ( Fourth Edition )*, Mc.  
Graw Hill New York, 1965
- Scheiman, Adolph D. *Use of Nomographs to find Design Pressure for Vacuum Towers,  
Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner*, Junio 1963
- Smith, Bufford D. *Design of Equilibrium Stage Processes*, Mc. Graw Hill New  
York, 1963
- Treybal, Robert E. *Mass Transfer Operations*, Mc. Graw Hill New York, 1967