

CAPÍTULO 3

RESULTADOS DE UN DISEÑO MECÁNICO

En la figura 3.1 se muestra un intercambiador de calor coraza y tubos, señalándose los elementos que lo componen, y que en términos generales son:

- a) Carcasa cilíndrica
- b) Tapas
- c) Espejos de tubos
- d) Tubos
- e) Bridas
- f) Boquillas
- g) Deflectores

Diferentes tipos de equipos de transferencia de calor también están compuestos por la combinación de algunos elementos listados antes, por lo que el diseño mecánico de los equipos consiste en diseñar adecuadamente cada uno de los elementos componentes, considerando que están sujetos a presión interna y externa, a cambio de temperaturas, al peso propio y a efectos de excitación dinámica (vibraciones).

El procedimiento más común de diseño mecánico es a través del análisis de esfuerzo a que están sometidas las partes y apoyándose en códigos y normas aceptadas, como son el ASME (American Society of Mechanica Engineers) y el TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association).

A continuación se hace una breve descripción del contenido del ASME y del TEMA, y posteriormente se proporcionan los elementos básicos del diseño mecánico.

3.1. Contenido del Código ASME y de la Normas del TEMA.

3.1.1. El Código ASME.

Trata todo lo relacionado con el diseño y operación de calderas y recipientes a presión; se compone de XI secciones, de las cuales la VIII está dedicada exclusivamente a los recipientes a presión.

A continuación se hace una descripción de la sección VIII, división I:

Consta de tres subsecciones:

- a) Requisitos generales
- b) Requisitos concernientes a los métodos de diseño y fabricación de los recipientes sujetos a presión
- c) Requisitos concernientes a las clases de materiales

3.1.1.1. Sección VIII, División I, Subsección A

Está subsección también se conoce como la parte UG y trata de los requisitos mínimos concernientes a materiales, diseño, aberturas y refuerzos, superficies reforzadas y apoyadas, ligamentos, fabricación, inspección y prueba, estampado de reportes y dispositivos de alivio de presión.

Materiales.- UG-4 a UG-15; hace referencia a los requisitos que deben cumplir los diferentes tipos de materiales empleados en los recipientes sujetos a presión.

Diseño.- UG-16 a UG-35; Establece que el espesor mínimo para las carcasas y las tapas debe ser de $1/16"$ sin considerar lo correspondiente a la corrosión; también aclara que las condiciones de diseño deben ser la más críticas que se esperen en operación normal. Proporciona las ecuaciones para el diseño de carcasas y tubos bajo condiciones de presión interna y externa. También proporciona las ecuaciones para el diseño de tapas.

Aberturas y refuerzos.- UG-36 a UG-46; trata lo referente a los refuerzos que deben colocarse a las aberturas que se necesiten para las boquillas en las carcasas y cabezas.

Superficies reforzadas y apoyadas.- UG-47 a UG-50; se proporciona las ecuaciones de cálculo para este tipo de superficies; los tipos y las dimensiones de los pernos y la localización de los mismos.

Ligamentos.- UG-53 a UG-55; se presentan las eficiencias de los ligamentos de los diferentes tipos de placas perforadas.

Fabricación.- UG-75 a UG-85; trata lo referente a la fabricación, como es la identificación de materiales, reparación de defectos de materiales, formado de carcasas y tapas, la redondez permitida para las carcasas, pruebas Charpy y tratamiento térmico.

Inspección y prueba.- UG-90 a UG-103; se define lo que es un inspector y las inspecciones que debe realizar durante la construcción; trata también sobre los diferentes tipos de pruebas.

Estampado y reportes.- UG-115 a UG-120; se señala los requisitos a cumplir por el fabricante para que el elemento fabricado reciba el estampado correspondiente; también indica los datos que debe contener la placa y por último se indica el tipo de reporte que debe ser llenado por el fabricante y que debe ser firmado por el inspector.

Dispositivos de alivio de presión.- UG-125 a UG-136; se indica las características que deben cumplir estos dispositivos.

3.1.1.2. Sección VIII, División I, Subsección B.

Esta subsección trata sobre los requisitos mínimos para los diferentes métodos de fabricación.

Parte UW.- En esta parte se tratan los requisitos para la fabricación por soldadura de los recipientes sujetos a presión.

En las generalidades especifican los diferentes tipos de usarse juntas soldadas.

Con respecto a los materiales, se establecen las diferentes clases y cualidades que deben para la construcción de los recipientes sujetos a presión.

En la parte de diseño se trata el diseño de juntas soldadas, tratamiento térmico al que deben someterse los exámenes por radiografía y por ultrasonido que deben realizarse, las eficiencias de las juntas, los detalles de los diferentes tipos de juntas, aberturas cercanas a soldaduras, y conexiones soldadas.

En la fabricación se tratan los procesos de soldadura y su calificación, las pruebas a los soldadores, las temperaturas permisibles de soldadura, los tipos de cortes, la limpieza de la superficie a soldar, tolerancias y reparación de defectos de soldadura.

En la inspección y prueba, se trata la supervisión del procedimiento de soldadura, la calificación de soldadores, supervisión del tratamiento térmico, pruebas no destructivas, exámenes radiográficos, exámenes ultrasónicos y el estampado y reportes.

Parte UF.- Trata lo referente a la fabricación por forja de recipientes sujetos a presión.

Parte UB.- Presenta los requisitos de fabricación por soldadura no ferrosa para los recipientes sujetos a presión.

3.1.1.3. Sección VIII, División I, Subsección C.

En esta subsección, el código trata lo referente a los materiales de construcción de los recipientes sujetos a presión.

Parte UCS.- Señala los requisitos a cumplir con los recipientes sujetos a presión construidos en aceros al carbón y aceros de baja aleación. Esta parte se completa con sus respectivas tablas de valores de esfuerzos admisibles para el diseño.

Parte UNF.- Se refiere a los requisitos para recipientes a presión construidos de materiales no ferrosos. Su complemento se encuentra en las tablas de valores de esfuerzos admisibles para el diseño.

Parte UMA.- Trata los requisitos a cubrir por los recipientes sujetos a presión construidos de aceros de alta aleación. Se complementa con sus tablas de valores de admisibles para el diseño.

Parte UCI.- Trata los requisitos a cubrir por los recipientes construidos de hierro fundido.

Parte UTH.- Se refiere a los requisitos para recipientes sujetos a presión construidos de acero ferrítico con propiedades de alta resistencia a la tensión; se complementa con las tablas de valores de esfuerzos admisibles para el diseño.

3.1.2. Normas del TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association).

El tema trata lo relacionado a los Intercambiadores de calor de carcaza y tubos. Su contenido es el siguiente:

Parte N: Nomenclatura

Parte F: Tolerancias de fabricación

Parte G: Fabricación en general e información de funcionamiento

Parte E: Instalación operación y mantenimiento

Parte RCB: Normas mecánicas del TEMA para Intercambiadores de calor RCB

Parte V: Vibración inducida por flujo

Parte T: Relaciones térmicas

Parte P: Propiedades físicas de fluidos

Parte D: Información general

Parte RGP: Recomendaciones Prácticas

3.1.2.1. Parte N.

Presenta de manera normalizada, una nomenclatura para los diferentes tipos de intercambiadores de calor.

3.1.2.2. Parte F.

Establece las tolerancias admisibles en la construcción; y en términos generales van de $\pm 1/8''$ a $\pm 5/8''$.

3.1.2.3. Parte G.

Inicia con una hoja de datos necesarios que deben suministrarse para lograr el diseño adecuado. Posteriormente cubre lo relacionado a inspección, a datos de placa, a dibujos y reportes, a garantías, a la preparación para embarque y a las características generales de construcción.

3.1.2.4. Parte E.

Se señala que la correcta instalación y el mantenimiento preventivo son responsabilidades del usuario.

Con respecto a la instalación se trata sobre las características del sitio de instalación así como la limpieza que debe efectuarse antes de la instalación.

Con respecto a la operación, se debe tener la información suficiente para ese propósito. Se recomienda secuencias de arranques y paros.

Para el mantenimiento se recomiendan los intervalos de inspección, los procedimientos de limpieza, de reemplazo de juntas y de partes.

3.1.2.5. Parte RCB.

Define tres clases de intercambiadores, R, C y B, especificando que deben cumplir con la sección VIII, división I del ASME. Señala la presión de diseño, las pruebas, las temperaturas del metal, las normas admisibles de corrosión. Con respecto a los tubos, especifica sus longitudes, sus diámetros y sus calibres, los espaciamientos y los tipos de sus arreglos.

Para las carcasas y las tapas se tratan los diámetros, las tolerancias así como los espesores mínimos.

Muestra los diferentes tipos de deflectores, sus espesores, sus espaciamientos, protecciones contra la erosión en las áreas de entrada y salida; y las características de los separadores.

Describe las características constructivas de las cabezas flotantes y de los empaques.

Pone especial énfasis en el diseño de los espejos de tubos, proporcionando las ecuaciones de cálculo de los espesores.

Proporciona los métodos de cálculo de elementos flexibles de la carcaza.

También trata lo relacionado a las boquillas y a las bridas.

3.1.2.6. Parte V.

Aquí se indica que el problema de la inducción de vibraciones por el flujo es muy complejo y que todavía no se tiene una solución del tipo analítico.

Se describen los diferentes daños por vibración y las regiones de falla. Se tratan las características de la frecuencia natural, los esfuerzos axiales en los tubos, el amortiguamiento y proporciona el método de cálculo de la velocidad crítica de flujo.

3.1.2.7. Parte T.

Se hace un estudio del problema térmico, mediante la relación básica de transmisión de calor y de la determinación del coeficiente global de transmisión de calor. Se trata el

problema de ensuciamiento y de la diferencia media de temperaturas. También se presentan las relaciones que permiten el cálculo de las temperaturas medias de la coraza y los tubos.

3.1.2.8. Parte P.

Se proporciona un amplio conjunto de datos en forma gráfica y tabular de fluidos muy importantes, principalmente hidrocarburos.

3.1.2.9. Parte D.

Se encuentra información general sobre dimensiones de tubos de conexiones y debridas. También se proporcionan tablas de conductividades térmicas de metales y de coeficiente medios de expresión.

3.1.2.10 Parte RGP (sección 10).

Aquí se proporciona información adicional y guía relativa al diseño de intercambiadores de calor, no incluida en las partes principales de la norma. Un ejemplo lo constituye la tabla de resistencia de ensuciamiento de diseño.

3.2. Elementos de Diseño Mecánico.

En ésta parte se proporciona un breve panorama sobre los procedimientos de diseño de carcasas o envolventes, tapas, espejos de tubos, tubos, bridas, boquillas y deflectores.

3.2.1. Diseño de Carcasas o Envolventes.

3.2.1.1. Por Presión Interna.

3.2.1.1.1. Carcasa o Envolvente Cilíndrica.

El espesor mínimo t de la carcasa o envolvente cilíndrica (figura 3.2) sometida a presión interna P , debe ser el que resulte mayor por cálculo de esfuerzos circunferenciales y longitudinales:

* Esfuerzo Circunferencial.

Cuando el espesor de la pared no sea mayor a la mitad del radio interno o cuando P no sea mayor a 0.385 SE:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (3.1)$$

* **Esfuerzo Longitudinal.**

Cuando el espesor de la pared no sea mayor a la mitad del radio interno o cuando P no sea mayor a 1.25 SE:

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad (3.2)$$

Las ecuaciones (3.1) y (3.2) obtenidas de la sección VIII, división I (UG-27) del ASME, no toman en cuenta el efecto de la corrosión, y sus términos son:

t: Espesor mínimo de la pared (plg)

P: Presión interna de diseño (lb/plg²)

R: Radio interno de la carcasa (plg)

S: Esfuerzo máximo permisible del material (lb/plg²)

E: Eficiencia de la junta; para recipientes soldados, corresponde a la eficiencia de soldadura. Los valores se muestran en la figura 3.2.1.

3.2.1.1.2. Secciones de carcaza cónicas.

Cuando $\alpha = 30^\circ$ (figura 3.3), el espesor mínimo admisible está dado por:

$$t = \frac{PD}{2 \cos\alpha (SE - 0.6P)} \quad (3.3)$$

siendo:

P: Presión interna de diseño (lb/plg^2)

D: Diámetro interior del lado del cilindro mayor (plg)

α : Semi-ángulo del vértice ($\alpha = 30^\circ$)

S: Esfuerzo máximo permisible del material (lb/plg^2)

E: Eficiencia de la junta

3.2.1.2. Por Presión Externa.

3.2.1.2.1. Carcaza o envolvente cilíndrica.

De acuerdo con el código ASME, se sigue un procedimiento gráfico en UG-28, complementado con el apéndice 5 de la sección VIII, división I.

* Para cilindros con $D_0/t \geq 10$.

D_0 : Diámetro exterior de la carcasa (plg)

t: Espesor mínimo de la pared (plg)

L: Longitud de la carcasa (plg)

P: Presión externa de diseño (lb/plg)

P_a : Presión máxima permisible (lb/plg^2)

E: Módulo de elasticidad del material (lb/plg^2)

El procedimiento es el siguiente:

- 1º Se considera un espesor t y se determinan las relaciones L/D_0 y D_0/t .
- 2º Se entra a la figura 3.4 (que corresponde a la figura UGO-28.0) con el valor L/D_0 y se hace coincidir con la curva correspondiente a D_0/t . Para valores de L/D_0 mayores a 50, se usa $L/D_0=50$.
- 3º De la figura 3.4 se obtiene el valor de A , que corresponde a un factor.
- 4º Con el valor calculado de A se entra a la figura correspondiente al tipo de material, y que son las 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 (corresponden a las figuras UCS-28.2, UHA-28.1, UHA-28.2, UHA-28.3 y UHA-28.4).
- 5º De las figuras 3.5 y 3.9 se calcula el valor de B que corresponde a un factor.
- 6º Se aplica la siguiente ecuación para el cálculo de la presión máxima permisible. Pa :

$$Pa = \frac{4B}{3(D_0 / t)} \quad (3.4)$$

- 7º Cuando no se puede obtener el valor de B gráficamente, la presión máxima permisible Pa se calcula por la siguiente ecuación:

$$Pa = \frac{2AE}{3(D_0 / t)} \quad (3.5)$$

- 8º Se compara el valor calculado de Pa con el valor de la presión externa de diseño:
 Si $Pa > P$ el espesor t supuesto es correcto.
 Si $Pa < P$ el espesor t supuesto no es correcto, y debe iniciarse nuevamente el procedimiento con valor mayor de t .

* Para Cilindros con $D_0/t < 10$.

El procedimiento indicado es el siguiente:

1º Usando el mismo procedimiento anterior se calcula B. Cuando la relación $D_0/t < 4$, el valor A se calcula por:

$$A = \frac{1.1}{(D_0/t)^2} \quad (3.6)$$

para valores de A mayores de 0.10, se usa 0.10

2º Con el valor obtenido de B, se calcula Pa_1 :

$$Pa_1 = \left[\frac{2.167}{(D_0/t)} - 0.0833 \right] B \quad (3.7)$$

3º Se calcula Pa_2 :

$$Pa_2 = \frac{2S^0}{(D_0/t)} \left[1 - \frac{1}{(D_0/t)} \right] \quad (3.8)$$

Siendo S^0 el menor valor de dos veces el esfuerzo máximo permisible del material o 0.9 veces el esfuerzo de cedencia del material (tabulado en la sección 11 del ASME).

4º Pa se selecciona como el menor valor calculado de Pa_1 y Pa_2 , y se compara con la presión externa de diseño:

Si $Pa > P$ el espesor t supuesto es correcto.

Si $Pa < P$ el espesor y supuesto no es correcto, y debe iniciarse nuevamente el procedimiento con el valor mayor de t.

Después de calculado el espesor de la carcaza, se deben tomar en cuenta las indicaciones que proporciona el TEMA para los espesores mínimos de carcaza como se indican en las tablas 3.1 y 3.2 (que corresponden a las R-3.13 y CB-3.13).

3.2.2. Diseño de Tapas.

El diseño de tapas se hace de acuerdo a UG-32 y UG-33 del ASME, sección VIII, división I.

3.2.2.1. Por Presión Interna.

3.2.2.1.1. Tapa Semielíptica.

Este tipo de tapa tiene las características geométricas mostradas en la figura 3.10.

El espesor se calcula por la ecuación:

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P} \quad (3.9)$$

Siendo:

P: Presión interna de diseño (lb/plg^2)

D: Diámetro interior de la tapa (plg)

S: Esfuerzo máximo permisible del material (lb/plg^2)

E: Eficiencia de la junta

3.2.2.1.2. Tapa Toriesférica.

Sus características geométricas se muestran en la figura 3.11.

Su espesor mínimo se calcula por la ecuación:

$$t = \frac{0.885PR}{SE - 0.1P} \quad (3.10)$$

Siendo R el radio interno de la corona.

3.2.2.1.3. Tapa Semiesférica.

Sus características geométricas se muestran en la figura 3.12.

El cálculo de su espesor mínimo se hace por la ecuación:

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} \quad (3.11)$$

3.2.2.1.4. Tapa Cónica.

Sus características geométricas se muestran en la figura 3.13.

Su ángulo α no debe ser mayor a 30° , y en ese caso el cálculo de su espesor mínimo se calcula por la siguiente ecuación:

$$t = \frac{PD}{2 \cos\alpha (SE - 0.6P)} \quad (3.12)$$

3.2.2.1.6. Tapa Plana.

* Soldable.

Algunos casos típicos se muestran en la figura 3.14.

El espesor mínimo se calcula por la ecuación:

$$t = d \sqrt{C' P / SE} \quad (3.13)$$

Siendo:

C' : Factor que depende del método de unión de la tapa, como se muestra en la figura 3.14.

d : Diámetro de la tapa (plg).

* Bridas.

Se considera el empaque entre la carcaza y la tapa como se muestra en la figura 3.15.

Para éstos casos, el espesor mínimo se calcula por la siguiente ecuación:

$$t = d \sqrt{C P / SE + 1.9 W h_g / S E d^3} \quad (3.14)$$

Siendo:

d: Diámetro medio del empaque, como se muestra en la figura 3.15.

h_g : Brazo de palanca del empaque, que es la distancia radical de la línea de reacción del empaque, a la línea central de los tornillos.

W: Carga total en los tornillos.

Notas: 1. A condiciones de operación, W es el mayor valor que resulte de las siguientes ecuaciones:

$$W_{m1} = 0.785 d^2 P + 2\pi b d m P$$

$$W_{m2} = \pi b d y$$

La mayor es la que se aplica

Siendo:

b: Ancho efectivo de contacto del empaque; se obtiene de la figura 3.16.

m: Relación t_r/t_s .

t_r : Espesor requerido de la carcaza (plg).

t_s : Espesor real de la carcaza o comercial (plg).

y: Carga máxima permisible en el empaque; su valor se obtiene de la figura 3.17.

2. Para condiciones de sellado del empaque, W se calcula por la ecuación:

$$W = \frac{A_m + A_b}{2} S_a \quad (3.16)$$

Donde:

A_b : Área total transversal de los tornillos (plg^2).

A_a : Área total transversal requerida de los tornillos (plg^2), y que resulta ser la mayor de la obtenida por las siguientes ecuaciones:

$$A_{a1} = \frac{W_{m1}}{S_b} \quad (3.17)$$

$$A_{a2} = \frac{W_{m2}}{S_a} \quad (3.18)$$

Se toma el valor mayor.

S_a : Esfuerzo máximo permisible del material de los tornillos, a la temperatura ambiente (lbf/plg^2).

S_b : Esfuerzo máximo permisible del material de los tornillos, a la temperatura de diseño (lbf/plg^2).

3.2.2.2. Por presión Externa.

Se sigue el procedimiento señalado por el código ASME en UG-33, y que se describe a continuación:

3.2.2.2.1. Tapa Semielíptica.

El procedimiento que se sigue para el diseño de éstas tapas es el siguiente:

1° Se calcula el factor A por la siguiente expresión:

$$A = \frac{0.125}{(R_0 / t)} \quad (3.19)$$

Siendo:

$R_0 = K_0 D_0$, radio esférico exterior de la tapa.

D_0 : Diámetro interior de la tapa.

K_0 : Factor dependiente de las proporciones de la tapa semielíptica. K_0 se calcula en función de la relación $D_0/2h_0$, como se muestra en la tabla 3.3.

h_0 : Mitad del eje menor del eje de la tapa semielíptica; altura de la tapa.

2° Con el valor de A calculado, se procede a calcular el factor B, de acuerdo al tipo de material utilizado, por medio de las figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9.

3° Con el valor obtenido, se calcula el valor de presión externa máxima permisible, por medio de la siguiente ecuación:

$$Pa = \frac{B}{(R_0 / t)} \quad (3.20)$$

4° Cuando B no puede determinarse por las figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, y 3.9, la presión externa permisible se calcula por la ecuación:

$$Pa = \frac{0.0625E}{(R_0 / t)^2} \quad (3.21)$$

En donde E es el módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño.

5° Se compara Pa con P, y el diseño de la tapa es correcto cuando: $Pa > P$.

3.2.2.2. Tapa toriesférica.

El procedimiento seguido para el diseño de éstas tapas es similar al mostrado para el caso de tapas semielípticas.

1º Se calcula el factor A por la siguiente expresión:

$$A = \frac{0.125}{(R_0 / t)} \quad (3.19-1)$$

Siendo:

R_0 : Radio exterior de abombado (R : Radio interno de la corona).

2º Se determina el factor B de acuerdo al tipo de material utilizado mediante las figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, y 3.9.

3º Se calcula el valor de la presión máxima permisible, por la ecuación:

$$Pa = \frac{B}{(R_0 / t)} \quad (3.20-1)$$

4º Cuando B no puede determinarse por las figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, y 3.9, la presión externa máxima permisible se calcula por la ecuación:

$$Pa = \frac{0.0625E}{(R_0 / t)} \quad (3.21-1)$$

En donde E es el módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño.

5º Se compara Pa con P; y el diseño de la tapa es correcto cuando $Pa > P$.

3.2.2.2.3. Tapa Semiesférica.

El procedimiento que se sigue para el diseño de éste tipo de tapas es el siguiente:

1º Se calcula el factor A:

$$A = \frac{0.125}{(R_0 / t)} \quad (3.19-2)$$

Siendo R_0 el radio exterior de abombado.

2º Se determina el factor B por medio de las figuras 3.5 a 3.9.

3º Se calcula el valor de la presión externa máxima permisible:

$$Pa = \frac{B}{(R_0 / t)} \quad (3.20-2)$$

4º Cuando B no puede determinarse por las figuras 3.5 a 3.9, la presión externa permisible se calcula por la siguiente ecuación:

$$Pa = \frac{0.0625E}{(R_0 / t)} \quad (3.21-2)$$

En donde E es el módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño.

5º Se compara Pa con P; el diseño de la tapa es correcto cuando $Pa > P$.

3.2.2.2.4. Tapa Cónica.

El siguiente procedimiento es aceptable cuando $\alpha = 60^\circ$ y $D_L/t_e = 10$, siendo α el semi-ángulo del cono, D_L el diámetro exterior de la sección mayor del cono, y t_e el espesor efectivo de la sección cónica $t_e = t \cos \alpha$.

1º Se establece un valor t_e y se determinan las relaciones L_e/D_L y D_L/t_e .

$$L_e = \left(\frac{L}{2} \right) \left(1 + \frac{D_s}{D_L} \right) \quad (3.22)$$

Siendo:

L : Longitud de la sección del cono.

D_s : Diámetro exterior de la sección menor del cono.

2º Se entra a la figura 3.4 con el valor L_e/D_L y se hace coincidir con la curva correspondiente a D_0/t . Para valores de $L_e/D_L > 50$, se usa el valor $L_e/D_L = 50$.

3º De la figura 3.4 se obtiene el valor del factor A.

4º Con el valor de A se entra a la figura que corresponde al tipo de material (figuras 3.5 a 3.9) y se obtiene el valor del factor B.

5º Se calcula la presión máxima permisible:

$$Pa = \frac{4B}{3(D_L / t_e)} \quad (3.23)$$

6º Cuando B no se puede obtener de las figuras 3.5 a 3.9, el cálculo de la presión máxima permisible se hace por la siguiente ecuación:

$$Pa = \frac{2AE}{3(D_L / t_e)} \quad (3.24)$$

En donde E es el módulo de elasticidad del material a la temperatura del diseño.

7º Se compara Pa con P. Cuando $Pa > P$, el valor propuesto de t es el adecuado.

Nota: El TEMA especifica que el espesor mínimo de las tapas no podrá ser menor al espesor de la carcaza.

3.2.3. Diseño de espejos de tubos.

Los espejos de tubos son elementos que contienen perforaciones por los que se insertan los tubos usados para la transferencia de calor, como se muestra en la figura 3.18.

Los espejos de tubos sirven para dividir los fluidos y como elementos de sujeción de los tubos.

El diseño de éstos elementos se hace mediante las normas del TEMA, que recomienda que en ningún caso los espesores de los espejos deben ser menores a las tres cuartas partes del diámetro exterior de los tubos para intercambiadores clase B y C, y al menos del mismo diámetro exterior de los tubos para los intercambiadores clase R.

El cálculo del espesor por flexión se hace por la siguiente ecuación (TEMA RCB-7.132):

$$T = \frac{FG}{3} \sqrt{\frac{P}{\eta S}} \quad (3.25)$$

El cálculo del espesor por cortante se hace por la siguiente ecuación (TEMA RCB-7.133):

$$T = \frac{0.31D_L}{\left(1 - \frac{d_0}{P}\right)} \left(\frac{P}{S}\right) \quad (3.26)$$

Cuando $\frac{P}{S} < 1.6 \left(1 - \frac{d_0}{P}\right)^2$, no se considera el esfuerzo cortante.

Siendo:

T: Espesor efectivo del espejo (plg).

S: Esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño (lb/plg²).

P: Presión de diseño depende del tipo de soporte del espejo de tubos que se use (lb/plg²).

F: Constante que depende del tipo de espejo. El valor de F varía entre 0.8 y 1.25. F se puede evaluar por medio de la figura 3.18.1. La curva U se usa para espejos no fijos, y la curva H se usa para espejos fijos.

G: Diámetro medio del empaque o la carcaza (plg).

η : Constante que depende del tipo de arreglo.

$$\eta = 1 - \frac{0.785}{\left[\frac{P}{d_0} \right]^2} \quad \text{para arreglos cuadrados}$$

$$\eta = 1 - \frac{0.907}{\left[\frac{P}{d_0} \right]^2} \quad \text{Para arreglos triangulares}$$

D_L: Diámetro equivalente del espejo (D_L=4A/C en plg).

P: Paso de tubos (plg).

d₀: Diámetro exterior de tubos (plg).

C: Perímetro de los tubos periféricos del espejo (ver figura 3.19) (plg).

A: Superficie del área encerrada por el perímetro C (plg²).

Para el caso particular de espejos fijos:

*** Presión efectiva de diseño del lado de carcaza.**

La presión efectiva de diseño del lado de carcaza es la que resulte mayor en valor absoluto entre las siguientes:

$$P = \frac{P_{S'} - P_d}{2} \quad (3.27.1)$$

$$P = P_{S'} \quad (3.27.2)$$

$$P = P_{BS} \quad (3.27.3)$$

$$P = \frac{P_{S'} - P_d - P_{BS}}{2} \quad (3.27.4)$$

$$P = \frac{P_{BS} + P_d}{2} \quad (3.27.5)$$

$$P = P_{S'} - P_{BS} \quad (3.27.6)$$

Siendo:

$$P_{S'} = P_s \left\{ \frac{0.4J[1.5 + K(1.5 + f_s)] - \left[\left(\frac{1-J}{2} \right) \left(\frac{D_J^2}{G^2} \right) - 1 \right]}{1 + JKf_q} \right\} \quad (3.28)$$

Donde:

P_s : Presión de diseño en el lado de la coraza (lb/plg^2).

$$f_s = 1 - N \left(\frac{d_0}{C} \right)^2 \quad (3.29)$$

N: Número de tubos.

d_0 : Diámetro exterior de tubos (plg).

G: Diámetro interior de carcasa (plg).

D_J : Diámetro interior de la junta de expansión de fuelle (en la carcaza), (plg). Cuando hay junta de expansión, $D_J=C$.

$$J = \frac{S_J L}{S_J L + \pi(D_0 - t_s)t_s E_s}, \text{ para carcasas con junta de expansión} \quad (3.30)$$

J=1 Para carcasas sin junta de expansión.

S_J : Constante de resorte de la junta de expansión (lb/plg²).

L: Longitud de tubos entre espejos (plg).

D_0 : Diámetro exterior de la carcasa (plg).

t_s : Espesor de la pared de la carcasa (plg).

E_s : Módulo de elasticidad del material de la carcasa, a la temperatura media (lb/plg²).

$$K = \frac{E_s t_s (D_0 - t_s)}{E_t t_t N (d_0 - t_t)} \quad (3.31)$$

E_t : Módulo de elasticidad del material del tubo, a la temperatura media (lb/plg²).

t_t : Espesor de la pared del tubo (plg).

$$F_q = 0.25 + (F - 0.6) \left[\frac{300 t_s E_s}{KLE} \left(\frac{C}{T} \right)^3 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.32)$$

E: Módulo de elasticidad del material del espejo a la temperatura del metal (lb/plg²).

T: Espesor del espejo, que no debe resultar menor que el 98.5% del calculado por la ecuación (3.25) y (3.26).

$$P_d = \frac{4 J E_s t_s \left(\frac{\Delta L}{L} \right)}{(D_0 - 3t_s)(1 + JK F_q)} \quad (3.33)$$

P_d : Presión debida a la expansión térmica (lb/plg^2).

ΔL : Expansión diferencial entre la carcaza y los tubos (plg).

$$\Delta L = L_t (\alpha_s (T_m - 70) - \alpha_t (t_M - 70)) \quad (3.34)$$

α_s : Coeficiente de expansión térmica de la coraza ($\text{plg/plg/}^\circ\text{F}$) (tabla 3.4).

α_t : Coeficiente de expansión térmica de los tubos ($\text{plg/plg/}^\circ\text{F}$) (tabla 3.4).

T_m : Temperatura media de la carcaza ($^\circ\text{F}$).

t_M : Temperatura media de los tubos ($^\circ\text{F}$).

L : Longitud de tubos entre espejos (plg).

$$P_{BS} = \frac{6.2M_2}{F^2 G^3} \quad (3.35)$$

P_{BS} : Presión equivalente de pernos cuando no actúa la presión del lado de tubos (lb/plg^2).

M_2 : Momento total actuante sobre la extensión bajo condiciones de apornado (lb/plg).

* Presión efectiva de diseño del lado de tubos.

La presión efectiva de diseño del lado de tubos es la que resulte mayor absoluto entre las siguientes:

$$P = \frac{P_r + P_{Bt} + P_d}{2} \quad (3.35.1)$$

$$P = P_r + P_{Bt} \quad (3.35.2)$$

$$P = \frac{P_r + P_s + P_{Bt} + P_d}{2} \quad (3.36.3)$$

$$P = P_t - P_s + P_{Bt} \quad (3.36.4)$$

Siendo:

$$P_t = P_t \left[\frac{1 + 0.4JK(1.5 + f_t)}{1 + JK F_q} \right] \quad (3.37)$$

P_t : Presión de diseño del lado de tubos (lb/plg^2) (para presión de vacío, P_t es negativa).

$$f_t = 1 - N \left[\frac{d_0 - 2t_t}{G} \right]^2 \quad (3.38)$$

P_{Bt} : Presión equivalente de pernos cuando actúa la presión del lado de tubos (lb/plg^2).

$$P_{Bt} = \frac{6.2M_1}{F^2 G^3} \quad (3.39)$$

M_1 : Momento total actuante sobre la extensión bajo condiciones de operación.

Notas:

1. El signo algebraico de P_t , debe conservarse en donde se aplique.
2. Cuando $J=0$
 - a) No se aplican las ecuaciones que contienen P_d .
 - b) Cuando P_s y P_t son positivas, se aplica la siguiente ecuación:

$$P = P_t + \frac{P_s}{2} \left[\left(\frac{D_J}{C} \right) - 1 \right] + P_{Bt} \quad (3.40)$$

* **Presión efectiva diferencial de diseño.**

En determinadas circunstancias se permite que el diseño se realice en base a la presión del lado de carcaza y del lado de tubos. En esas circunstancias se usa el valor que resulte mayor en valor absoluto entre las siguientes ecuaciones:

$$P = P_r - P_s + P_{Bt} \quad (3.41.1)$$

$$P = \frac{P_r + P_s + P_{Bt} + P_d}{2} \quad (3.41.2)$$

$$P = P_{BS} \quad (3.41.3)$$

$$P = \frac{P_{BS} + P_d}{2} \quad (3.41.4)$$

$$P = P_r - P_s \quad (3.41.5)$$

$$P = \frac{P_r + P_s + P_d}{2} \quad (3.41.6)$$

$$P = P_{Bt} \quad (3.41.7)$$

3.2.4. Diseño de tubos.

El TEMA indica (RCB-2.1 y RCB-2.2) que los tubos que se usan para equipos de transferencia de calor deben ser calibrados e identificados por la nomenclatura BWG (Birmingham Wire Gage); en la tabla 3.5 se muestran los calibres de los tubos más comunes en cobre, acero y aleaciones.

Las longitudes de los tubos más comúnmente usadas son 98, 120, 144, 192 y 240 plg.

El código ASME en sus artículos UG-28 y UG-31 permiten el cálculo de espesores de diseño, e indican el procedimiento a usar.

3.2.4.1. Por presión Interna.

El espesor mínimo del tubo sometido a la presión interna P, debe ser el que resulte mayor por cálculo de esfuerzos circunferenciales (tangenciales) y longitudinales:

- Esfuerzo Circunferencial.

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (3.1)$$

- Esfuerzo Longitudinal.

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} \quad (3.2)$$

Cuando se trata de tubos sin costura, E=1; para tubos con costura, se considera esfuerzo máximo posible, para tubos que ya consideran la eficiencia de la junta.

3.2.4.2. Por Presión Externa.

El procedimiento para el diseño de tubos por presión es el siguiente:

* **Para tubos con relación $D_0/t \geq 10$.**

1. Se determina L/D_0 y D_0/t con el valor de t propuesto.

L = Longitud del tubo entre espejos (plg).

D_0 = Diámetro exterior de los tubos (plg).

2. Se calcula el factor A por medio de la figura 3.4, haciendo coincidir el valor de L/D_0 mayores a 50, se usa el de $L/D_0 = 50$.

3. Se calcula el factor B por medio de las figuras 3.5 a 3.9.

4. Se calcula la presión máxima permisible P_a para el tubo por la ecuación:

$$P_a = \frac{4B}{3(D_0/t)} \quad (3.4)$$

5. Cuando no se puede obtener el valor de B gráficamente, la presión máxima permisible P_a , se calcula por la siguiente ecuación:

$$P_a = \frac{2AE}{3(D_0/t)} \quad (3.5)$$

E: Módulo de elasticidad del material (lb/plg^2).

6. Se compara el valor calculado P_a con el valor de la presión externa de diseño:

Si $P_a \geq P$ el espesor t supuesto es correcto;

Si $P_a < P$ el espesor t supuesto no es correcto, y debe iniciarse nuevamente el procedimiento con el valor mayor de t .

* Para tubos con $D_0/t < 10$.

- 1) Usando el mismo procedimiento anterior se calcula B . Cuando la relación $D_0/t < 4$, el factor A se calcula por:

$$A = \frac{1.1}{(D_0 / t)^2} \quad (3.6)$$

Para valores de A mayores a 0.10, se usa 0.10.

- 2) Se calcula P_{a1} :

$$P_{a1} = \left[\frac{2.167}{D_0 / t} - 0.0833 \right] B \quad (3.7)$$

- 3) Se calcula P_{a2} :

$$P_{a2} = \frac{2S^*}{(D_0 / t)} \left[1 - \frac{1}{(D_0 / t)} \right] \quad (3.8)$$

Siendo S^* el menor valor de 2 veces el esfuerzo máximo permisible del material, o 0.9 veces el esfuerzo de cedencia del material.

- 4) P_a se selecciona como el menor valor calculado de P_{a1} y P_{a2} , y se compara con la presión externa de diseño:

Si $P_a \geq P$ el espesor t supuesto es correcto.

Si $P_a < P$ el espesor t supuesto no es correcto, y debe iniciarse nuevamente el procedimiento con un valor mayor de t .

El TEMA, en su sección 9 proporciona una tabla en la que relaciona la máxima presión interna admisible con los esfuerzos máximos permisibles del material, como se muestra en la Tabla 3.6.

3.2.5. Diseño de Bridas.

Las Bridas son elementos que se utilizan para unir diferentes elementos de los equipos de transferencia de calor.

De acuerdo a su forma, se conocen las siguientes Bridas:

- Brida de cuello soldable.
- Brida deslizable.
- Brida roscada.
- Brida de traslape.
- Brida de ciega.

Los diferentes tipos de Bridas se muestran en la figura 3.20

3.2.5.1 Espesor de la Brida.

El diseño adecuado de las bridas no es sencillo, pero se puede iniciar con el cálculo del espesor, cuya expresión es la siguiente:

$$t = 0.72 \sqrt{\frac{M Y}{S_f}} \quad (3.42)$$

Siendo:

M = Momento Total de diseño (lb/plg).

Y = Factor de forma de la brida.

S_f = Esfuerzo del material de la brida a las condiciones de diseño (lb/plg²).

Para comprender los términos anteriores se usa la figura 3.21

* Cálculo de momentos que actúan sobre la brida.

$$Mo = H_D h_D \quad (3.43)$$

H_D : Fuerza Hidrostática sobre el área interior de la brida (lb).

$$H_D = \pi B^2 P / 4 \quad (3.44)$$

h_D : Distancia del brazo de la palanca (plg).

B : Diámetro interior de la brida (plg).

P : Presión de diseño (lb/plg²).

$$M_G = H_G h_G \quad (3.45)$$

H_G : Carga sobre el empaque (lb).

h_G : Distancia del brazo de la palanca (plg).

$$H_G = W - H \quad (3.46)$$

W : Carga de los pernos de diseño de bridas.

$$W = (Ab + Am) Sa / 2 \quad (3.47)$$

H : Fuerza Hidrostática total en el área del diámetro medio del empaque (lb).

$$H = \pi G^2 P / 4 \quad (3.48)$$

Ab : Área de la sección transversal de pernos usando el diámetro más pequeño de la sección sin rosca (plg^2).

Am : Área de la sección transversal de pernos requerida (plg^2); tomar la mayor de Am1 y Am2.

Am1 : Área de la sección de los pernos en la raíz de la rosca, a las condiciones de operación (plg^2).

Am2 : Área de la sección transversal de los pernos en la raíz de la rosca, a las condiciones de asentamiento del empaque (plg^2).

S_s : Esfuerzo permisible del material de los pernos a la temperatura ambiente (lb/ plg^2).

G : Diámetro medio del empaque (plg).

$$M_T = H_T h_T \quad (3.49)$$

$$H_T = H - H_D \quad (3.50)$$

h_T : Distancia total en condiciones de operación es:

El momento total en condiciones de asentamiento del empaque es:

$$M_A = Wh_G \quad (3.51)$$

El código exige que el diseño de las bridas se haga para las dos condiciones anteriores de momentos.

* **Cálculo del factor de forma.**

Se parte del cálculo de la relación:

$$K = A / B \quad (3.52)$$

A: Diámetro exterior de la brida (plg).

Con el valor K calculado se puede obtener mediante la tabla 3.7, el factor de forma y correspondiente.

3.2.5.2. Empaque.

Se calculan dos fuerzas que se ejercen sobre el empaque: la requerida para asentar el empaque, y las condiciones de operación.

La fuerza requerida para asentar el empaque está dada por:

$$W_{m2} = b \pi G y \quad (3.53)$$

Siendo:

b: Ancho efectivo de asentamiento de la superficie de contacto del empaque (plg).

y: Factor de asentamiento del empaque por unidad de superficie de contacto (lb/plg²).

Ver figura 3.17.

En la figura 3.16 se muestran diferentes situaciones para las que se indica como se obtiene el ancho efectivo de asentamiento del empaque b , y el brazo de palanca h_G .

La fuerza requerida para mantener el empaque hermético en condiciones de operación, está dada por:

$$W_{m1} = \frac{\pi G^2 P}{4} + 2b\pi GmP \quad (3.54)$$

m : Factor de asentamiento del empaque. Ver figura 3.17.

El cálculo de ancho del empaque está dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{d_0}{d_1} = \left(\frac{y - Pm}{y - P(m+1)} \right) \quad (3.55)$$

Siendo:

d_0 : Diámetro exterior del empaque (plg).

d_1 : Diámetro interior del empaque (plg).

El TEMA recomienda que el ancho del empaque debe ser cuando menos $3/8''$ para diámetros menores a $23''$ y de $1/2''$ para diámetros mayores.

3.2.5.3. Pernos.

El TEMA en RCB-11, recomienda que el diámetro mínimo de pernos debe ser de $1/2''$ para intercambiadores tipo R, de $5/8''$ para el tipo B y de $1/2''$ para el tipo C.

En la tabla 3.8 se presentan las principales características de los pernos y de algunas dimensiones principales en la colocación y el espaciamiento mínimo recomendado entre pernos.

El espaciamiento máximo recomendado entre centros de pernos está dado por la siguiente ecuación:

$$B_{max} = 2d_B + \frac{6t}{(m + 0.5)} \quad (3.56)$$

Siendo:

B_{max} : Espaciamiento máximo entre pernos (plg).

d_B : Diámetro nominal de pernos (plg).

t : Espesor de la brida (plg).

m : Factor de asentamiento del empaque.

3.2.6. Diseño de Boquillas (Registros).

Para colocar una boquilla o registro en la carcaza de un equipo para transferencia de calor, se requiere de refuerzos para evitar la rotura. El código ASME, en su sección UG proporciona las reglas a seguir para el diseño de esos refuerzos.

De la figura 3.22, en la que se muestra la colocación del refuerzo, se observa que el área total de la sección transversal del refuerzo, A ,

Se calcula por:

$$A = d \times t \quad (3.57)$$

Siendo:

d: Diámetro de la abertura para la boquilla (plg).

t: Espesor del recipiente (plg).

La extensión del refuerzo se calcula por la siguiente relación:

$$\frac{d' - d}{2} \leq \sqrt{Rt} \quad (3.58)$$

Donde:

d': Diámetro de la extensión del refuerzo (plg).

R: Radio de curvatura de la carcaza (plg).

3.2.7. Diseño de Deflectores.

Estos elementos cumplen con la función de desviar los fluidos y a la vez evitar vibraciones excesivas en los tubos. Sus características geométricas se muestran en la figura 3.23.

En la tabla 3.9 se encuentran los espesores de deflectores recomendados por el TEMA para diferentes situaciones. También recomienda que el espacio mínimo entre deflectores no debe ser menor que 1/5 del diámetro interior de la carcaza.

Tabla 3.1. Espesor mínimo de la carcaza (todas las dimensiones en pulgadas). Intercambiador tipo R*

| Diámetro nominal de la carcaza | Espesor mínimo | | |
|-----------------------------------|-----------------|-------|----------|
| | Acero al carbón | | Aleación |
| | Tubo | Placa | |
| 6 | Ced 40 | - | 1/8 |
| 8 - 12 | Ced 30 | - | 1/8 |
| 13 - 29 | 3/8 | 3/8 | 3/16 |
| 30 - 39 | - | 7/16 | 1/4 |
| 40 - 60 | - | 1/2 | 5/16 |

* El TEMA define al intercambiador tipo R, como el usado en aplicaciones de la industria petrolera y en aplicaciones de procesos. Sin incluir corrosión que dependerá de la aplicación.

Tabla 3.2. Espesor mínimo de la carcaza (todas las dimensiones en pulgadas). Intercambiador tipo C* y B**

| Diámetro nominal de la carcaza | Espesor mínimo | | |
|-----------------------------------|----------------|-------|----------|
| | Tubo | Placa | Aleación |
| 6 | Ced 40 | - | 1/8 |
| 8 - 12 | Ced 30 | - | 1/8 |
| 13 - 23 | Ced 20 | 5/16 | 1/8 |
| 24-29 | - | 5/16 | 3/16 |
| 30 - 39 | - | 3/8 | 1/4 |
| 40 - 60 | - | 7/16 | 1/4 |

* El TEMA define al intercambiador tipo C, como el usado en aplicaciones comerciales.

** El TEMA define al intercambiador tipo B, como el usado en aplicaciones de procesos químicos.

Tabla 3.3. Valor de K_o para tapas semielípticas sometidas a presión externa. Se permite la interpolación.

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| $D_0/2h_0$ | ... | 3.0 | 2.8 | 2.6 | 2.4 | 2.2 |
| k_0 | ... | 1.36 | 1.27 | 1.18 | 1.08 | 0.99 |
| $d_0/2h_0$ | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.0 |
| k_0 | 0.90 | 0.81 | 0.81 | 0.65 | 0.57 | 0.50 |

Tabla 3.4. Coeficientes medios de expansión Térmica

| MATERIAL | TEMP. °F | | PULG. POR PULG. POR °F X 10 ⁶ , ENTRE 70 °F Y | | | | | |
|--|----------|-------|--|------|------|------|------|------|
| | -200 | -100 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| AC. AL CARBÓN Y C-MN | 5.60 | 5.90 | 6.50 | 6.67 | 6.87 | 7.07 | 7.25 | 7.42 |
| AC. C-Si, C-1/2 Mo & 1 Cr-1/2 Mo | 5.60 | 5.64 | 5.73 | 6.09 | 6.43 | 6.74 | 7.06 | 7.28 |
| AC. C-Mn-Si, 1-1/4 Cr-1/2 Mo & 3 Cr-1 Mo | | | 5.53 | 5.89 | 6.26 | 6.61 | 6.91 | 7.17 |
| AC. Mn-Mo 2-1/2 & 3-1/2 Ni | 5.60 | 6.08 | 7.06 | 7.25 | 7.43 | 7.58 | 7.70 | 7.83 |
| | | | 6.27 | 6.54 | 6.78 | 6.98 | 7.16 | 7.32 |
| 2-1/4 Cr-1 Mo | 5.60 | 5.90 | 6.50 | 6.70 | 6.90 | 7.07 | 7.23 | 7.38 |
| 5 Cr-1/2 Mo | 5.60 | 5.90 | 6.50 | 6.73 | 6.87 | 6.97 | 7.05 | 7.15 |
| 7 Cr-1/2 Mo & 9 Cr-1 Mo | 5.60 | 5.68 | 5.85 | 6.02 | 6.15 | 6.29 | 6.40 | 6.51 |
| 12 Cr & 13 Cr | 5.10 | 5.39 | 5.98 | 6.15 | 6.30 | 6.40 | 6.48 | 6.53 |
| 15 Cr & 17 Cr | 5.10 | 5.19 | 5.37 | 5.52 | 5.65 | 5.75 | 5.85 | 5.95 |
| TODOS LOS GRADOS DE AI | | | | | | | | |
| 316 & 317 | | | 8.54 | 8.76 | 8.97 | 9.21 | 9.42 | 9.60 |
| TP 304 | | | 8.55 | 8.79 | 9.00 | 9.19 | 9.37 | 9.53 |
| TP 321 | | | 9.02 | 9.16 | 9.26 | 9.34 | 9.42 | 9.48 |
| TP 347 | | | 8.62 | 8.92 | 9.22 | 9.45 | 9.65 | 9.83 |
| 25 Cr-12 Ni, 23 Cr-12 Ni & 25 Cr-20 Ni | | | 8.87 | 9.02 | 9.10 | 9.14 | 9.18 | 9.21 |
| ALUMINIO (3003) | 11.80 | 12.04 | 12.54 | 12.8 | 13.1 | 13.4 | | |
| ALUMINIO (6061) | 11.80 | 12.06 | 12.60 | 12.9 | 13.2 | 13.5 | | |
| TITANIO (GRAD. 1,2,3,7) | | | 4.65 | 4.70 | 4.75 | 4.80 | 4.85 | 4.90 |
| Ni-Cu (aleación 400) | | | 7.78 | 8.08 | 8.33 | 8.54 | 8.69 | 8.81 |
| Ni-Cr-Fe (aleación 600) | | | 6.90 | 7.20 | 7.40 | 7.57 | 7.70 | 7.82 |
| Ni-Fe-Cr (AL. 800, 800H) | | | 7.95 | 6.34 | 8.60 | 8.78 | 8.92 | 9.00 |
| Ni-Fe-Cr-Mo-Cu (AL. 825) | | | 7.53 | 7.71 | 7.85 | 7.97 | 8.08 | 8.20 |
| Ni-Mo (AL. B) | | | 6.08 | 6.24 | 6.35 | 6.40 | 6.41 | 6.47 |
| Ni-Mo-Cr (AL. C-276) | | | 6.06 | 6.30 | 6.50 | 6.71 | 6.91 | 7.08 |
| Ni (AL. 200) | 6.20 | 6.39 | 6.77 | 7.21 | 7.52 | 7.74 | 7.91 | 8.05 |
| 70 -30 Cu-Ni | | | | 8.50 | 8.70 | 8.90 | | |
| 90 - 10 & 80 - 20 Cu-Ni | | | | | 9.50 | 9.80 | | |
| COBRE | 8.60 | 9.00 | 9.40 | 9.60 | 9.70 | 10.2 | 9.90 | 10.1 |
| LATÓN | 9.10 | 9.30 | 9.60 | 9.70 | 10.0 | | 10.5 | 10.7 |
| BRONCE ALUMINIO | | | | | | | 9.00 | |
| COBRE - SILICON | | | | | | | 10.0 | |
| ADMIRALTY | | | | | | | | 11.2 |
| ZIRCONIA | | | | 3.20 | | | | |
| Cr-Ni-Fe-Mo-Cu-Cb (ALEACIÓN 20Cb) | | | | 8.30 | 8.30 | | | |
| Ni-Cr-Mo-Cb (ALEACIÓN 625) | 5.20 | 6.20 | 6.80 | 7.10 | 7.20 | 7.30 | 7.35 | 7.40 |

Tabla 3.4. (Continuación)

| MATERIAL | TEMP. °F | PULG. POR °F X 10 ⁶ , ENTRE 70 °F Y | | | | | | | |
|--|----------|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 |
| AC. AL CARBÓN Y C-MN | 7.59 | 7.76 | 7.89 | | | | | | |
| AC. C-Si, C-1/2 Mo & 1 Cr-1/2 Mo | 7.51 | 7.71 | 7.86 | 8.00 | | | | | |
| AC. C-Mn-Si, 1-1/4 Cr-1/2 Mo & 3 Cr-1 Mo | 7.41 | 7.59 | 7.77 | 7.94 | 8.07 | 8.24 | | | |
| AC. Mn-Mo 2-1/2 & 3-1/2 Ni | 7.94 | 8.05 | 8.14 | 8.23 | | | | | |
| | 7.47 | 7.61 | | | | | | | |
| 2-1/4 Cr-1 Mo | 7.50 | 7.62 | 7.72 | 7.82 | 7.90 | 7.97 | | | |
| 5 Cr-1/2 Mo | 7.24 | 7.32 | 7.41 | 7.48 | 7.56 | 7.64 | | | |
| 7 Cr-1/2 Mo & 9 Cr-1 Mo | 6.62 | 6.71 | 6.82 | 6.90 | 7.00 | 7.08 | | | |
| 12 Cr & 13 Cr | 6.60 | 6.67 | 6.72 | 6.78 | 6.83 | 6.88 | | | |
| 15 Cr & 17 Cr | 6.05 | 6.13 | 6.22 | 6.30 | 6.37 | 6.44 | | | |
| TODOS LOS GRADOS DE AI | | | | | | | | | |
| 316 & 317 | 9.76 | 9.90 | 10.0 | 10.1 | 10.2 | 10.4 | 10.5 | 10.6 | |
| TP 304 | 9.69 | 9.82 | 9.95 | 10.0 | 10.1 | 10.2 | 10.3 | 10.4 | |
| TP 321 | 9.55 | 9.61 | 9.67 | 9.73 | 9.79 | 9.85 | 9.90 | 9.95 | |
| TP 347 | 9.97 | 10.0 | 10.2 | 10.3 | 10.4 | 10.5 | 10.6 | 10.7 | |
| 25 Cr-12 Ni, 23 Cr-12 Ni & 25 Cr-20 Ni | 9.25 | 9.28 | 9.32 | 9.37 | 9.41 | 9.47 | 9.54 | 9.62 | |
| ALUMINIO (3003) | | | | | | | | | |
| ALUMINIO (6061) | | | | | | | | | |
| TITANIO (GRAD. 1,2,3,7) | 4.97 | 5.05 | | | | | | | |
| Ni-Cu (aleación 400) | 8.88 | 8.91 | | | | | | | |
| Ni-Cr-Fe (aleación 600) | 7.94 | 8.04 | | | | | | | |
| Ni-Fe-Cr (AL. 800, 800H) | 9.11 | 9.20 | 9.30 | 9.40 | | | | | |
| Ni-Fe-Cr-Mo-Cu (AL. 825) | 8.30 | 8.40 | | | | | | | |
| Ni-Mo (AL. B) | 6.57 | 6.68 | | | | | | | |
| Ni-Mo-Cr (AL. C-276) | 7.22 | 7.33 | | | | | | | |
| Ni (AL. 200) | 8.16 | 8.27 | 8.50 | 8.60 | 8.70 | 8.80 | 8.90 | 8.90 | |
| 70 -30 Cu-Ni | | | | | | | | | |
| 90 - 10 & 80 - 20 Cu-Ni | | | | | | | | | |
| COBRE | 10.2 | 10.3 | 10.4 | 10.5 | | | | | |
| LATÓN | 10.9 | 11.2 | 11.4 | 11.6 | 11.9 | 12.1 | | | |
| BRONCE ALUMINIO | | | | | | | | | |
| COBRE - SILICON | | | | | | | | | |
| ADMIRALTY | | | | | | | | | |
| ZIRCONIA | 4.10 | | | | | | | | |
| Cr-Ni-Fe-Mo-Cu-Cb (ALEACIÓN 20Cb) | | | 9.40 | | | | | | |
| Ni-Cr-Mo-Cb (ALEACIÓN 625) | 7.50 | 7.60 | 7.70 | 7.80 | 8.00 | 8.20 | 9.60 | 8.35 | 8.50 |

Tabla 3.5. Calibres de los tubos más comunes en Cobre, Acero y Aleaciones.

| DIÁMETROS DE TUBOS Y CALIBRES | | | |
|--------------------------------------|---|---|----------------------------------|
| D E pulg. | COBRE Y ALEACIONES DE Cu | ACERO AL CARBÓN, ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO | OTRAS ALEACIONE S |
| | B W G | B W G | B W G |
| $\frac{1}{4}$ | 27 | - | 27 |
| | 24 | - | 24 |
| | 22 | - | 22 |
| $\frac{3}{8}$ | 22 | - | 22 |
| | 20 | - | 20 |
| | 18 | - | 18 |
| $\frac{1}{2}$ | 20 | - | 20 |
| | 18 | - | 18 |
| $\frac{5}{8}$ | 20 | 18 | 20 |
| | 18 | 16 | 18 |
| | 16 | 14 | 16 |
| $\frac{3}{4}$ | 20 | 16 | 18 |
| | 18 | 14 | 16 |
| | 16 | 12 | 14 |
| $\frac{7}{8}$ | 18 | 14 | 16 |
| | 16 | 12 | 14 |
| | 14 | 10 | 12 |
| | 12 | - | - |
| 1 | 18 | 14 | 18 |
| | 16 | 12 | 14 |
| | 14 | - | 12 |
| $1 - \frac{1}{4}$ | 16 | 14 | 14 |
| | 14 | 12 | 12 |
| $1 - \frac{1}{2}$ | 16 | 14 | 14 |
| | 14 | 12 | 12 |
| 2 | 14 | 14 | 14 |
| | 12 | 12 | 12 |

Tabla 3.6. Presión interna de trabajo (psi) de tubos a diferentes valores de esfuerzos permisibles.

| DE pulg | CALIBRE DE TUBO B W G | ESFUERZOS PERMISIBLES (PSI) | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 2000 | 4000 | 6000 | 8000 | 10000 | 12000 | 14000 | 16000 | 18000 | 20000 |
| $\frac{1}{4}$ | 27 | 269 | 539 | 809 | 1079 | 1349 | 1618 | 1888 | 2158 | 2428 | 2698 |
| | 26 | 305 | 611 | 916 | 1222 | 1528 | 1833 | 2139 | 2444 | 2750 | 3056 |
| | 24 | 378 | 757 | 1135 | 1514 | 1893 | 2271 | 2650 | 3029 | 3407 | 3786 |
| | 23 | 439 | 869 | 1304 | 1739 | 2173 | 2608 | 3043 | 3478 | 3913 | 4347 |
| | 22 | 492 | 984 | 1476 | 1968 | 2460 | 2952 | 3444 | 3936 | 4428 | 4920 |
| | 21 | 570 | 1140 | 1711 | 2281 | 2852 | 3422 | 3992 | 4563 | 5133 | 5704 |
| | 20 | 630 | 1261 | 1891 | 2522 | 3153 | 3783 | 4414 | 5045 | 5675 | 6308 |
| | 19 | 776 | 1552 | 2329 | 3105 | 3881 | 4638 | 5434 | 6210 | 6987 | 7763 |
| | 18 | 929 | 1859 | 2789 | 3719 | 4648 | 5578 | 6508 | 7438 | 8368 | 9297 |
| | | | | | | | | | | | |
| $\frac{3}{8}$ | 24 | 246 | 492 | 738 | 984 | 1231 | 1477 | 1723 | 1969 | 2216 | 2462 |
| | 22 | 317 | 635 | 952 | 1270 | 1588 | 1905 | 2223 | 2451 | 2858 | 3176 |
| | 21 | 366 | 732 | 1099 | 1465 | 1831 | 2198 | 2564 | 2930 | 3297 | 3663 |
| | 20 | 403 | 806 | 1210 | 1613 | 2017 | 2420 | 2824 | 3227 | 3631 | 4034 |
| | 19 | 492 | 984 | 1476 | 1968 | 2460 | 2952 | 3444 | 3936 | 4428 | 4920 |
| | 18 | 583 | 1167 | 1751 | 2334 | 2918 | 3502 | 4085 | 4669 | 5253 | 5836 |
| | 17 | 706 | 1412 | 2118 | 2824 | 3530 | 4236 | 4942 | 5648 | 6354 | 7060 |
| | 16 | 804 | 1609 | 2414 | 3219 | 4024 | 4829 | 5634 | 6439 | 7244 | 8049 |
| | 15 | 907 | 1814 | 2722 | 3629 | 4536 | 5444 | 6351 | 7258 | 8166 | 9073 |
| | 14 | 1075 | 2151 | 3227 | 4303 | 5379 | 6454 | 7530 | 8606 | 9682 | 10758 |
| $\frac{1}{2}$ | 22 | 234 | 496 | 703 | 938 | 1172 | 1407 | 1641 | 1876 | 2110 | 2345 |
| | 20 | 296 | 593 | 889 | 1186 | 1483 | 1779 | 2076 | 2372 | 2669 | 2966 |
| | 19 | 360 | 720 | 1080 | 1440 | 1801 | 2161 | 2521 | 2881 | 3241 | 3602 |
| | 18 | 425 | 850 | 1276 | 1701 | 2126 | 2552 | 2977 | 3402 | 3828 | 4253 |
| | 17 | 511 | 1022 | 1534 | 2045 | 2557 | 3068 | 3580 | 4091 | 4603 | 5114 |
| | 16 | 580 | 1160 | 1741 | 2321 | 2901 | 3484 | 4062 | 4642 | 5223 | 5803 |
| | 15 | 650 | 1301 | 1952 | 2603 | 3554 | 3905 | 4556 | 5207 | 5858 | 6509 |
| | 14 | 765 | 1531 | 2297 | 3062 | 3828 | 4594 | 5359 | 6125 | 6891 | 7556 |
| | 13 | 896 | 1792 | 2688 | 3584 | 4481 | 5377 | 6273 | 7169 | 8066 | 8962 |
| | 12 | 1056 | 2112 | 3168 | 4224 | 5281 | 6337 | 7393 | 8449 | 9505 | 10562 |
| $\frac{5}{8}$ | 20 | 234 | 469 | 703 | 938 | 1172 | 1407 | 1641 | 1876 | 2110 | 2345 |
| | 19 | 284 | 568 | 852 | 1136 | 1420 | 1704 | 1988 | 2272 | 2556 | 2840 |
| | 18 | 334 | 669 | 1003 | 1338 | 1672 | 2007 | 2342 | 2676 | 3011 | 3345 |
| | 17 | 400 | 801 | 1202 | 1603 | 2004 | 2405 | 2806 | 3207 | 3608 | 4009 |
| | 16 | 453 | 907 | 1361 | 1815 | 2268 | 2722 | 3176 | 3660 | 4083 | 4537 |
| | 15 | 507 | 1015 | 1522 | 2030 | 2537 | 3045 | 3553 | 4060 | 4568 | 5075 |
| | 14 | 594 | 1188 | 1783 | 2377 | 2971 | 3566 | 4160 | 4754 | 5349 | 5943 |
| | 13 | 692 | 1384 | 2076 | 2768 | 3460 | 4153 | 4845 | 5537 | 6229 | 6291 |
| | 12 | 810 | 1621 | 2432 | 3242 | 4053 | 4864 | 5674 | 6485 | 7296 | 8107 |
| | 11 | 907 | 1814 | 2722 | 3629 | 4536 | 5444 | 6351 | 7258 | 8166 | 9073 |
| | 10 | 1035 | 2070 | 3105 | 4140 | 5175 | 6210 | 7246 | 8281 | 9316 | 10351 |

Tabla 3.6. (Continuación)

| DE puig | CALIBRE DE TUBO B W G | ESFUERZOS PERMISIBLES (PSI) | | | | | | | | | |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 2000 | 4000 | 6000 | 8000 | 10000 | 12000 | 14000 | 16000 | 18000 | 20000 |
| ¾ | 20 | 193 | 387 | 581 | 775 | 969 | 1163 | 1357 | 1151 | 1745 | 1939 |
| | 18 | 275 | 551 | 827 | 1102 | 1378 | 1654 | 1930 | 2205 | 2481 | 2757 |
| | 17 | 329 | 659 | 989 | 1318 | 1648 | 1978 | 2308 | 2637 | 2967 | 3297 |
| | 16 | 372 | 744 | 1117 | 1489 | 1862 | 2234 | 2607 | 2679 | 3352 | 3724 |
| | 15 | 415 | 831 | 1247 | 1663 | 2079 | 2495 | 2911 | 3327 | 3743 | 4159 |
| | 14 | 485 | 971 | 1456 | 1942 | 2428 | 2913 | 3399 | 3885 | 4370 | 4856 |
| | 13 | 563 | 1127 | 1691 | 2255 | 2818 | 3382 | 3946 | 4510 | 5074 | 5637 |
| | 12 | 657 | 1315 | 1973 | 2631 | 3289 | 3946 | 4604 | 5262 | 5920 | 6578 |
| | 11 | 733 | 1467 | 2201 | 2935 | 3669 | 4403 | 5137 | 5871 | 6605 | 7339 |
| | 10 | 833 | 1667 | 2501 | 3335 | 4169 | 5003 | 5836 | 6670 | 7504 | 8338 |
| | 9 | 937 | 1874 | 2811 | 3749 | 4686 | 5623 | 6561 | 7498 | 8435 | 9373 |
| | 8 | 1067 | 2135 | 3203 | 4271 | 5339 | 6407 | 7475 | 8543 | 9611 | 10679 |
| 7/8 | 20 | 165 | 330 | 495 | 661 | 826 | 991 | 1157 | 1322 | 1487 | |
| | 18 | 234 | 469 | 703 | 938 | 1172 | 1407 | 1641 | 1876 | 2110 | |
| | 17 | 279 | 559 | 839 | 1119 | 1399 | 1679 | 1959 | 2239 | 2519 | |
| | 16 | 315 | 631 | 947 | 1263 | 1579 | 1895 | 2211 | 2527 | 2843 | |
| | 15 | 352 | 704 | 1057 | 1409 | 1761 | 2114 | 2466 | 2818 | 3171 | |
| | 14 | 410 | 821 | 1231 | 1642 | 2052 | 2463 | 2874 | 3284 | 3695 | |
| | 13 | 475 | 951 | 1426 | 1902 | 2377 | 2853 | 3329 | 3804 | 4280 | |
| | 12 | 553 | 1106 | 1660 | 2213 | 2767 | 3320 | 3874 | 4427 | 4980 | |
| | 11 | 616 | 1232 | 1848 | 2464 | 3080 | 3697 | 4313 | 4929 | 5545 | |
| | 10 | 698 | 1396 | 2094 | 2792 | 3490 | 4188 | 4886 | 5584 | 6282 | |
| | 9 | 782 | 1564 | 2347 | 3129 | 3912 | 4694 | 5477 | 6259 | 7042 | |
| | 8 | 888 | 1776 | 2664 | 3553 | 4441 | 5329 | 6218 | 7106 | 7994 | |
| 1 | 20 | 144 | 288 | 432 | 576 | 720 | 864 | 1008 | 1152 | 1296 | 1440 |
| | 18 | 203 | 407 | 611 | 815 | 1019 | 1223 | 1427 | 1631 | 1835 | 2039 |
| | 17 | 243 | 486 | 729 | 973 | 1216 | 1459 | 1703 | 1946 | 2189 | 2432 |
| | 16 | 274 | 548 | 822 | 1097 | 1371 | 1645 | 1919 | 2194 | 2468 | 2742 |
| | 15 | 305 | 611 | 916 | 1222 | 1528 | 1833 | 2139 | 2444 | 2750 | 3056 |
| | 14 | 355 | 711 | 1066 | 1422 | 1778 | 2133 | 2489 | 2844 | 3200 | 3556 |
| | 13 | 411 | 822 | 1233 | 1645 | 2056 | 2467 | 2878 | 3290 | 3701 | 4112 |
| | 12 | 477 | 955 | 1432 | 1910 | 2388 | 2865 | 3343 | 3821 | 4298 | 4776 |
| | 11 | 530 | 1061 | 1592 | 2123 | 2654 | 3185 | 3716 | 4247 | 4778 | 5309 |
| | 10 | 600 | 1200 | 1801 | 2401 | 3001 | 3602 | 4202 | 4802 | 5403 | 6003 |
| | 9 | 671 | 1343 | 2014 | 2686 | 3357 | 4029 | 4700 | 5372 | 6043 | 6715 |
| | 8 | 760 | 1520 | 2281 | 3041 | 3801 | 4562 | 5322 | 6082 | 6843 | 7603 |

Tabla 3.7 Factor de Forma de la Brida (Y)

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.001 | 1.91 | 1000.5 | 1911.1 | 2100.1 | 1.051 | 1.89 | 20.12 | 38.68 | 42.51 |
| 1.002 | 1.91 | 500.50 | 956.16 | 1050.7 | 1.052 | 1.89 | 19.74 | 37.96 | 41.73 |
| 1.003 | 1.91 | 333.83 | 637.85 | 700.93 | 1.053 | 1.89 | 19.38 | 37.27 | 40.96 |
| 1.004 | 1.91 | 250.50 | 478.71 | 526.05 | 1.054 | 1.89 | 19.03 | 36.60 | 40.23 |
| 1.005 | 1.91 | 200.50 | 383.22 | 421.12 | 1.055 | 1.89 | 18.69 | 35.96 | 39.64 |
| 1.006 | 1.91 | 167.17 | 319.56 | 351.16 | 1.056 | 1.89 | 18.38 | 35.34 | 38.84 |
| 1.007 | 1.91 | 143.36 | 274.09 | 301.20 | 1.057 | 1.89 | 18.06 | 34.74 | 38.19 |
| 1.008 | 1.91 | 125.50 | 239.95 | 263.75 | 1.058 | 1.89 | 17.76 | 34.17 | 37.56 |
| 1.009 | 1.91 | 111.61 | 213.40 | 234.42 | 1.059 | 1.89 | 17.47 | 33.62 | 36.95 |
| 1.010 | 1.91 | 100.50 | 192.19 | 211.19 | 1.060 | 1.89 | 17.18 | 33.04 | 36.34 |
| 1.011 | 1.91 | 91.41 | 174.83 | 192.13 | 1.061 | 1.89 | 16.91 | 32.55 | 35.78 |
| 1.012 | 1.91 | 83.84 | 160.38 | 176.25 | 1.062 | 1.89 | 16.64 | 32.04 | 35.21 |
| 1.013 | 1.91 | 77.43 | 148.06 | 162.81 | 1.063 | 1.89 | 16.40 | 31.55 | 34.68 |
| 1.014 | 1.91 | 71.93 | 137.69 | 151.30 | 1.064 | 1.89 | 16.15 | 31.08 | 34.17 |
| 1.015 | 1.91 | 67.17 | 128.61 | 141.33 | 1.065 | 1.89 | 15.90 | 30.61 | 33.65 |
| 1.016 | 1.90 | 63.00 | 120.56 | 132.49 | 1.066 | 1.89 | 15.67 | 30.17 | 33.17 |
| 1.017 | 1.90 | 59.33 | 111.98 | 124.81 | 1.067 | 1.89 | 15.45 | 29.74 | 32.69 |
| 1.018 | 1.90 | 56.06 | 107.36 | 118.00 | 1.068 | 1.89 | 15.22 | 29.32 | 32.22 |
| 1.019 | 1.90 | 53.14 | 101.72 | 111.78 | 1.069 | 1.89 | 15.02 | 28.91 | 31.79 |
| 1.020 | 1.90 | 50.51 | 96.73 | 106.30 | 1.070 | 1.89 | 14.80 | 28.51 | 31.34 |
| 1.021 | 1.90 | 48.12 | 92.21 | 101.33 | 1.071 | 1.89 | 14.61 | 28.13 | 30.92 |
| 1.022 | 1.90 | 45.96 | 88.04 | 96.75 | 1.072 | 1.89 | 14.41 | 27.76 | 30.51 |
| 1.023 | 1.90 | 43.98 | 84.30 | 92.94 | 1.073 | 1.89 | 14.22 | 27.39 | 30.11 |
| 1.024 | 1.90 | 42.14 | 80.81 | 88.81 | 1.074 | 1.88 | 14.04 | 27.04 | 29.72 |
| 1.025 | 1.90 | 40.51 | 77.61 | 85.29 | 1.075 | 1.88 | 13.85 | 26.69 | 29.34 |
| 1.026 | 1.90 | 38.97 | 74.70 | 82.09 | 1.076 | 1.88 | 13.68 | 26.36 | 28.98 |
| 1.027 | 1.90 | 37.54 | 71.97 | 79.03 | 1.077 | 1.88 | 13.56 | 26.03 | 28.69 |
| 1.028 | 1.90 | 36.22 | 69.43 | 76.30 | 1.078 | 1.88 | 13.35 | 25.72 | 28.27 |
| 1.029 | 1.90 | 34.92 | 68.11 | 73.75 | 1.079 | 1.88 | 13.18 | 25.40 | 27.92 |
| 1.030 | 1.90 | 33.84 | 64.21 | 71.33 | 1.080 | 1.88 | 13.02 | 25.10 | 27.59 |
| 1.031 | 1.90 | 32.76 | 62.85 | 69.06 | 1.081 | 1.88 | 12.87 | 24.81 | 27.27 |
| 1.032 | 1.90 | 31.76 | 60.92 | 66.94 | 1.082 | 1.88 | 12.72 | 24.52 | 26.95 |
| 1.033 | 1.90 | 30.81 | 59.11 | 64.95 | 1.083 | 1.88 | 12.57 | 24.24 | 26.45 |
| 1.034 | 1.90 | 29.92 | 57.41 | 63.08 | 1.084 | 1.88 | 12.43 | 24.00 | 26.34 |
| 1.035 | 1.90 | 29.08 | 55.80 | 61.32 | 1.085 | 1.88 | 12.29 | 23.69 | 26.05 |
| 1.036 | 1.90 | 28.29 | 54.29 | 59.66 | 1.086 | 1.88 | 12.15 | 23.44 | 25.77 |
| 1.037 | 1.90 | 27.54 | 52.85 | 58.08 | 1.087 | 1.88 | 12.02 | 23.18 | 25.48 |
| 1.038 | 1.90 | 26.63 | 51.50 | 56.59 | 1.088 | 1.88 | 11.89 | 22.93 | 25.20 |
| 1.039 | 1.90 | 26.15 | 50.21 | 55.17 | 1.089 | 1.88 | 11.76 | 22.68 | 24.93 |
| 1.040 | 1.90 | 25.51 | 48.97 | 53.82 | 1.090 | 1.88 | 11.63 | 22.44 | 24.66 |
| 1.041 | 1.90 | 24.90 | 47.81 | 53.10 | 1.091 | 1.88 | 11.52 | 22.22 | 24.41 |
| 1.042 | 1.90 | 24.32 | 46.71 | 51.33 | 1.092 | 1.88 | 11.40 | 21.99 | 24.16 |
| 1.043 | 1.90 | 23.77 | 45.64 | 50.15 | 1.093 | 1.88 | 11.28 | 21.76 | 23.91 |
| 1.044 | 1.90 | 23.23 | 44.64 | 49.05 | 1.094 | 1.88 | 11.16 | 21.34 | 23.67 |
| 1.045 | 1.90 | 22.74 | 43.69 | 48.02 | 1.095 | 1.88 | 11.05 | 21.32 | 23.44 |
| 1.046 | 1.90 | 22.05 | 42.75 | 46.99 | 1.096 | 1.88 | 10.94 | 21.11 | 23.20 |
| 1.047 | 1.90 | 21.79 | 41.87 | 46.03 | 1.097 | 1.88 | 10.83 | 20.91 | 22.97 |
| 1.048 | 1.90 | 21.35 | 41.02 | 45.09 | 1.098 | 1.88 | 10.73 | 20.71 | 22.75 |
| 1.049 | 1.90 | 20.92 | 40.21 | 44.21 | 1.099 | 1.88 | 10.62 | 20.51 | 22.39 |
| 1.050 | 1.89 | 20.51 | 39.43 | 43.34 | 1.100 | 1.88 | 10.52 | 20.31 | 22.18 |

Tabla 3.7 (Continuación)

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.101 | 1.88 | 11.43 | 20.15 | 22.12 | 1.151 | 1.86 | 7.16 | 13.86 | 15.23 |
| 1.102 | 1.88 | 10.33 | 19.94 | 21.92 | 1.152 | 1.86 | 7.11 | 13.77 | 15.14 |
| 1.103 | 1.88 | 10.23 | 19.76 | 21.72 | 1.153 | 1.86 | 7.07 | 13.69 | 15.05 |
| 1.104 | 1.88 | 10.14 | 19.68 | 21.52 | 1.154 | 1.86 | 7.03 | 13.61 | 14.96 |
| 1.105 | 1.88 | 10.05 | 19.38 | 21.30 | 1.155 | 1.86 | 6.99 | 13.54 | 14.87 |
| 1.106 | 1.88 | 9.96 | 19.33 | 21.14 | 1.156 | 1.86 | 6.95 | 13.45 | 14.78 |
| 1.107 | 1.87 | 9.87 | 19.07 | 20.96 | 1.157 | 1.86 | 6.91 | 13.37 | 14.70 |
| 1.108 | 1.87 | 9.78 | 18.90 | 20.77 | 1.158 | 1.86 | 6.87 | 13.30 | 14.61 |
| 1.109 | 1.87 | 9.70 | 18.74 | 20.59 | 1.159 | 1.86 | 6.83 | 13.22 | 14.53 |
| 1.110 | 1.87 | 9.62 | 18.55 | 20.38 | 1.160 | 1.86 | 6.79 | 13.15 | 14.45 |
| 1.111 | 1.87 | 9.54 | 18.42 | 20.25 | 1.161 | 1.85 | 6.75 | 13.07 | 14.36 |
| 1.112 | 1.87 | 9.46 | 18.27 | 20.08 | 1.162 | 1.85 | 6.71 | 13.00 | 14.28 |
| 1.113 | 1.87 | 9.38 | 18.13 | 19.91 | 1.163 | 1.85 | 6.67 | 12.92 | 14.20 |
| 1.114 | 1.87 | 9.30 | 17.97 | 19.75 | 1.164 | 1.85 | 6.64 | 12.85 | 14.12 |
| 1.115 | 1.87 | 9.22 | 17.81 | 19.55 | 1.165 | 1.85 | 6.60 | 12.78 | 14.04 |
| 1.116 | 1.87 | 9.16 | 17.66 | 19.43 | 1.166 | 1.85 | 6.56 | 12.71 | 13.97 |
| 1.117 | 1.87 | 9.08 | 17.54 | 19.27 | 1.167 | 1.85 | 6.53 | 12.64 | 13.89 |
| 1.118 | 1.87 | 9.00 | 17.40 | 19.12 | 1.168 | 1.85 | 6.49 | 12.58 | 13.82 |
| 1.119 | 1.87 | 8.94 | 17.27 | 18.99 | 1.169 | 1.85 | 6.46 | 12.51 | 13.74 |
| 1.120 | 1.87 | 8.86 | 17.13 | 18.83 | 1.170 | 1.85 | 6.42 | 12.43 | 13.66 |
| 1.121 | 1.87 | 8.79 | 17.01 | 18.68 | 1.171 | 1.85 | 6.39 | 12.38 | 13.60 |
| 1.122 | 1.87 | 8.72 | 16.89 | 18.54 | 1.172 | 1.85 | 6.35 | 12.31 | 13.53 |
| 1.123 | 1.87 | 8.65 | 16.76 | 18.40 | 1.173 | 1.85 | 6.32 | 12.25 | 13.46 |
| 1.124 | 1.87 | 8.59 | 16.62 | 18.26 | 1.174 | 1.85 | 6.29 | 12.18 | 13.39 |
| 1.125 | 1.87 | 8.53 | 16.42 | 18.13 | 1.175 | 1.85 | 6.25 | 12.10 | 13.30 |
| 1.126 | 1.87 | 8.47 | 16.37 | 17.99 | 1.176 | 1.85 | 6.22 | 12.06 | 13.25 |
| 1.127 | 1.87 | 8.40 | 16.24 | 17.86 | 1.177 | 1.85 | 6.19 | 12.00 | 13.18 |
| 1.128 | 1.87 | 8.34 | 16.14 | 17.73 | 1.178 | 1.85 | 6.16 | 11.93 | 13.11 |
| 1.129 | 1.87 | 8.25 | 15.02 | 17.60 | 1.179 | 1.85 | 6.13 | 11.87 | 13.05 |
| 1.130 | 1.87 | 8.22 | 15.90 | 17.48 | 1.180 | 1.85 | 6.10 | 11.79 | 12.96 |
| 1.131 | 1.87 | 8.16 | 15.79 | 17.36 | 1.182 | 1.85 | 6.04 | 11.70 | 12.86 |
| 1.132 | 1.87 | 8.11 | 15.68 | 17.24 | 1.184 | 1.85 | 5.98 | 11.58 | 12.73 |
| 1.133 | 1.86 | 7.06 | 15.57 | 17.12 | 1.186 | 1.85 | 5.92 | 11.47 | 12.61 |
| 1.134 | 1.86 | 7.99 | 15.46 | 16.99 | 1.188 | 1.85 | 5.86 | 11.36 | 12.49 |
| 1.135 | 1.86 | 7.94 | 15.36 | 16.90 | 1.190 | 1.84 | 5.81 | 11.26 | 12.37 |
| 1.136 | 1.86 | 7.88 | 15.26 | 16.77 | 1.192 | 1.84 | 5.75 | 11.15 | 12.25 |
| 1.137 | 1.86 | 7.83 | 15.15 | 16.65 | 1.194 | 1.84 | 5.70 | 11.05 | 12.14 |
| 1.138 | 1.86 | 7.78 | 15.05 | 16.54 | 1.196 | 1.84 | 5.65 | 10.95 | 12.03 |
| 1.139 | 1.86 | 7.73 | 14.95 | 16.43 | 1.198 | 1.84 | 5.60 | 10.85 | 11.92 |
| 1.140 | 1.86 | 7.68 | 14.86 | 16.35 | 1.200 | 1.84 | 5.55 | 10.75 | 11.81 |
| 1.141 | 1.86 | 7.62 | 14.76 | 16.22 | 1.202 | 1.84 | 5.50 | 10.65 | 11.71 |
| 1.142 | 1.86 | 7.57 | 14.66 | 16.11 | 1.204 | 1.84 | 5.45 | 10.56 | 11.61 |
| 1.143 | 1.86 | 7.53 | 14.57 | 16.01 | 1.206 | 1.84 | 5.40 | 10.47 | 11.51 |
| 1.144 | 1.86 | 7.44 | 14.48 | 15.91 | 1.208 | 1.84 | 5.35 | 10.38 | 11.41 |
| 1.145 | 1.86 | 7.43 | 14.39 | 15.83 | 1.210 | 1.84 | 5.31 | 10.30 | 11.32 |
| 1.146 | 1.86 | 7.38 | 14.29 | 15.71 | 1.212 | 1.83 | 5.27 | 10.21 | 11.22 |
| 1.147 | 1.86 | 7.34 | 14.20 | 15.61 | 1.214 | 1.83 | 5.22 | 10.12 | 11.12 |
| 1.148 | 1.86 | 7.29 | 14.12 | 15.51 | 1.216 | 1.83 | 5.18 | 10.04 | 11.03 |
| 1.149 | 1.86 | 7.25 | 14.03 | 15.42 | 1.218 | 1.83 | 5.14 | 9.96 | 10.94 |
| 1.150 | 1.86 | 7.20 | 13.95 | 15.34 | 1.220 | 1.83 | 5.10 | 9.89 | 10.87 |

Tabla 3.7 (Continuación)

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.222 | 1.83 | 5.05 | 9.80 | 10.77 | 1.354 | 1.77 | 3.40 | 6.57 | 7.21 |
| 1.224 | 1.83 | 5.01 | 9.72 | 10.68 | 1.358 | 1.77 | 3.37 | 6.50 | 7.14 |
| 1.226 | 1.83 | 4.98 | 9.65 | 10.60 | 1.362 | 1.77 | 3.34 | 6.44 | 7.08 |
| 1.228 | 1.83 | 4.94 | 9.57 | 10.52 | 1.366 | 1.77 | 3.31 | 6.38 | 7.01 |
| 1.230 | 1.83 | 4.90 | 9.50 | 10.44 | 1.370 | 1.77 | 3.28 | 6.32 | 6.95 |
| 1.232 | 1.83 | 4.86 | 9.43 | 10.36 | 1.374 | 1.77 | 3.25 | 6.27 | 6.89 |
| 1.234 | 1.83 | 4.83 | 9.36 | 10.28 | 1.378 | 1.76 | 3.22 | 6.21 | 6.82 |
| 1.236 | 1.82 | 4.79 | 9.29 | 10.20 | 1.382 | 1.76 | 3.20 | 6.16 | 6.77 |
| 1.238 | 1.82 | 4.76 | 9.22 | 10.13 | 1.386 | 1.76 | 3.17 | 6.11 | 6.72 |
| 1.240 | 1.82 | 4.72 | 9.15 | 10.05 | 1.390 | 1.76 | 3.15 | 6.06 | 6.66 |
| 1.242 | 1.82 | 4.69 | 9.05 | 9.98 | 1.394 | 1.76 | 3.12 | 6.01 | 6.60 |
| 1.244 | 1.82 | 4.65 | 9.02 | 9.91 | 1.398 | 1.75 | 3.10 | 5.96 | 6.55 |
| 1.246 | 1.82 | 4.62 | 8.95 | 9.84 | 1.402 | 1.75 | 3.07 | 5.92 | 6.49 |
| 1.248 | 1.82 | 4.59 | 8.89 | 9.77 | 1.406 | 1.75 | 3.05 | 5.87 | 6.44 |
| 1.250 | 1.82 | 4.56 | 8.83 | 9.70 | 1.410 | 1.75 | 3.02 | 5.82 | 6.39 |
| 1.252 | 1.82 | 4.52 | 8.77 | 9.64 | 1.414 | 1.75 | 3.00 | 5.77 | 6.34 |
| 1.254 | 1.82 | 4.49 | 8.71 | 9.57 | 1.418 | 1.75 | 2.98 | 5.72 | 6.29 |
| 1.256 | 1.82 | 4.46 | 8.65 | 9.51 | 1.422 | 1.75 | 2.96 | 5.48 | 6.25 |
| 1.258 | 1.81 | 4.43 | 8.59 | 9.44 | 1.426 | 1.74 | 2.94 | 5.64 | 6.20 |
| 1.260 | 1.81 | 4.40 | 8.53 | 9.38 | 1.430 | 1.74 | 2.91 | 5.60 | 6.16 |
| 1.263 | 1.81 | 4.36 | 8.45 | 9.28 | 1.434 | 1.74 | 2.89 | 5.56 | 6.10 |
| 1.266 | 1.81 | 4.32 | 8.37 | 9.19 | 1.438 | 1.74 | 2.87 | 5.52 | 6.05 |
| 1.269 | 1.81 | 4.28 | 8.29 | 9.11 | 1.442 | 1.74 | 2.85 | 5.48 | 6.01 |
| 1.272 | 1.81 | 4.24 | 8.21 | 9.02 | 1.446 | 1.74 | 2.83 | 5.44 | 5.97 |
| 1.275 | 1.81 | 4.20 | 8.13 | 8.93 | 1.450 | 1.73 | 2.81 | 5.40 | 5.93 |
| 1.278 | 1.81 | 4.16 | 8.05 | 8.85 | 1.454 | 1.73 | 2.80 | 5.36 | 5.89 |
| 1.281 | 1.81 | 4.12 | 7.98 | 8.77 | 1.458 | 1.73 | 2.78 | 5.32 | 5.85 |
| 1.284 | 1.80 | 4.08 | 7.91 | 8.69 | 1.462 | 1.73 | 2.76 | 5.28 | 5.80 |
| 1.287 | 1.80 | 4.05 | 7.84 | 8.61 | 1.466 | 1.73 | 2.74 | 5.24 | 5.76 |
| 1.290 | 1.80 | 4.01 | 7.77 | 8.53 | 1.470 | 1.72 | 2.72 | 5.20 | 5.71 |
| 1.293 | 1.80 | 3.98 | 7.70 | 8.46 | 1.475 | 1.72 | 2.70 | 5.16 | 5.64 |
| 1.296 | 1.80 | 3.94 | 7.68 | 8.39 | 1.480 | 1.72 | 2.68 | 5.12 | 5.61 |
| 1.299 | 1.80 | 3.91 | 7.57 | 8.31 | 1.485 | 1.72 | 2.66 | 5.08 | 5.57 |
| 1.302 | 1.80 | 3.88 | 7.50 | 8.24 | 1.490 | 1.72 | 2.64 | 5.04 | 5.53 |
| 1.305 | 1.80 | 3.84 | 7.44 | 8.18 | 1.495 | 1.71 | 2.62 | 5.00 | 5.49 |
| 1.308 | 1.79 | 3.81 | 7.38 | 8.11 | 1.500 | 1.71 | 2.60 | 4.96 | 5.45 |
| 1.311 | 1.79 | 3.78 | 7.32 | 8.05 | 1.505 | 1.71 | 2.58 | 4.92 | 5.41 |
| 1.314 | 1.79 | 3.75 | 7.26 | 7.98 | 1.510 | 1.71 | 2.56 | 4.88 | 5.37 |
| 1.317 | 1.79 | 3.72 | 7.20 | 7.92 | 1.515 | 1.71 | 2.54 | 4.84 | 5.33 |
| 1.320 | 1.79 | 3.69 | 7.14 | 7.85 | 1.520 | 1.70 | 2.53 | 4.80 | 5.29 |
| 1.323 | 1.79 | 3.67 | 7.09 | 7.79 | 1.525 | 1.70 | 2.51 | 4.77 | 5.25 |
| 1.326 | 1.79 | 3.64 | 7.03 | 7.73 | 1.530 | 1.70 | 2.49 | 4.74 | 5.21 |
| 1.329 | 1.78 | 3.61 | 6.98 | 7.67 | 1.535 | 1.70 | 2.47 | 4.70 | 5.17 |
| 1.332 | 1.78 | 3.58 | 6.92 | 7.61 | 1.540 | 1.69 | 2.46 | 4.66 | 5.13 |
| 1.335 | 1.78 | 3.56 | 6.87 | 7.55 | 1.545 | 1.69 | 2.44 | 4.62 | 5.09 |
| 1.338 | 1.78 | 3.53 | 6.82 | 7.50 | 1.55 | 1.69 | 2.43 | 4.60 | 5.05 |
| 1.341 | 1.78 | 3.51 | 6.77 | 7.44 | 1.56 | 1.69 | 2.40 | 4.54 | 4.99 |
| 1.344 | 1.78 | 3.48 | 6.72 | 7.39 | 1.57 | 1.68 | 2.37 | 4.48 | 4.92 |
| 1.347 | 1.78 | 3.45 | 6.68 | 7.33 | 1.58 | 1.68 | 2.34 | 4.42 | 4.84 |
| 1.350 | 1.78 | 3.43 | 6.63 | 7.28 | 1.59 | 1.67 | 2.31 | 4.36 | 4.79 |

Tabla 3.7 (Continuación)

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.60 | 1.67 | 2.28 | 4.31 | 4.73 | 2.18 | 1.44 | 1.53 | 2.64 | 2.90 |
| 1.61 | 1.66 | 2.26 | 4.25 | 4.67 | 2.20 | 1.44 | 1.52 | 2.61 | 2.87 |
| 1.62 | 1.65 | 2.23 | 4.20 | 4.61 | 2.22 | 1.43 | 1.51 | 2.58 | 2.84 |
| 1.63 | 1.65 | 2.20 | 4.15 | 4.56 | 2.24 | 1.42 | 1.50 | 2.56 | 2.81 |
| 1.64 | 1.65 | 2.18 | 4.10 | 4.50 | 2.26 | 1.41 | 1.49 | 2.53 | 2.78 |
| 1.65 | 1.65 | 2.16 | 4.05 | 4.45 | 2.28 | 1.41 | 1.48 | 2.50 | 2.75 |
| 1.66 | 1.64 | 2.14 | 4.01 | 4.40 | 2.30 | 1.40 | 1.47 | 2.48 | 2.72 |
| 1.67 | 1.64 | 2.12 | 3.96 | 4.35 | 2.32 | 1.40 | 1.46 | 2.45 | 2.69 |
| 1.68 | 1.63 | 2.10 | 3.92 | 4.30 | 2.34 | 1.39 | 1.45 | 2.43 | 2.67 |
| 1.69 | 1.63 | 2.08 | 3.88 | 4.26 | 2.36 | 1.38 | 1.44 | 2.40 | 2.64 |
| 1.70 | 1.63 | 2.06 | 3.83 | 4.21 | 2.38 | 1.38 | 1.43 | 2.38 | 2.61 |
| 1.71 | 1.62 | 2.04 | 3.78 | 4.17 | 2.40 | 1.37 | 1.42 | 2.36 | 2.59 |
| 1.72 | 1.62 | 2.02 | 3.75 | 4.12 | 2.42 | 1.36 | 1.41 | 2.33 | 2.56 |
| 1.73 | 1.61 | 2.00 | 3.72 | 4.08 | 2.44 | 1.36 | 1.40 | 2.31 | 2.54 |
| 1.74 | 1.61 | 1.99 | 3.68 | 4.01 | 2.46 | 1.35 | 1.40 | 2.29 | 2.52 |
| 1.75 | 1.60 | 1.97 | 3.64 | 4.00 | 2.48 | 1.35 | 1.39 | 2.27 | 2.50 |
| 1.76 | 1.60 | 1.95 | 3.61 | 3.96 | 2.50 | 1.34 | 1.38 | 2.25 | 2.47 |
| 1.77 | 1.60 | 1.94 | 3.57 | 3.93 | 2.53 | 1.33 | 1.37 | 2.22 | 2.44 |
| 1.78 | 1.59 | 1.92 | 3.54 | 3.89 | 2.56 | 1.32 | 1.36 | 2.19 | 2.41 |
| 1.79 | 1.59 | 1.91 | 3.51 | 3.85 | 2.59 | 1.31 | 1.35 | 2.17 | 2.38 |
| 1.80 | 1.58 | 1.89 | 3.47 | 3.82 | 2.62 | 1.30 | 1.34 | 2.14 | 2.35 |
| 1.81 | 1.58 | 1.88 | 3.44 | 3.78 | 2.65 | 1.30 | 1.33 | 2.12 | 2.32 |
| 1.82 | 1.58 | 1.86 | 3.41 | 3.75 | 2.68 | 1.29 | 1.32 | 2.09 | 2.30 |
| 1.83 | 1.57 | 1.86 | 3.38 | 3.72 | 2.71 | 1.28 | 1.31 | 2.07 | 2.27 |
| 1.84 | 1.57 | 1.84 | 3.35 | 3.69 | 2.74 | 1.27 | 1.31 | 2.04 | 2.25 |
| 1.85 | 1.56 | 1.83 | 3.33 | 3.65 | 2.77 | 1.26 | 1.30 | 2.02 | 2.22 |
| 1.86 | 1.56 | 1.81 | 3.30 | 3.62 | 2.80 | 1.26 | 1.29 | 2.00 | 2.20 |
| 1.87 | 1.56 | 1.80 | 3.27 | 3.59 | 2.83 | 1.25 | 1.28 | 1.98 | 2.17 |
| 1.88 | 1.55 | 1.79 | 3.24 | 3.56 | 2.86 | 1.24 | 1.28 | 1.96 | 2.15 |
| 1.89 | 1.55 | 1.78 | 3.22 | 3.54 | 2.89 | 1.23 | 1.27 | 1.94 | 2.13 |
| 1.90 | 1.54 | 1.77 | 3.19 | 3.51 | 2.92 | 1.22 | 1.27 | 1.92 | 2.11 |
| 1.91 | 1.54 | 1.75 | 3.17 | 3.48 | 2.95 | 1.22 | 1.26 | 1.90 | 2.09 |
| 1.92 | 1.54 | 1.74 | 3.14 | 3.45 | 2.98 | 1.21 | 1.25 | 1.88 | 2.07 |
| 1.93 | 1.53 | 1.73 | 3.12 | 3.43 | 3.02 | 1.20 | 1.25 | 1.86 | 2.04 |
| 1.94 | 1.53 | 1.72 | 3.09 | 3.40 | 3.06 | 1.19 | 1.24 | 1.83 | 2.01 |
| 1.95 | 1.53 | 1.71 | 3.07 | 3.38 | 3.10 | 1.18 | 1.23 | 1.81 | 1.99 |
| 1.96 | 1.52 | 1.70 | 3.05 | 3.35 | 3.14 | 1.17 | 1.23 | 1.79 | 1.97 |
| 1.97 | 1.52 | 1.69 | 3.03 | 3.33 | 3.18 | 1.16 | 1.22 | 1.77 | 1.94 |
| 1.98 | 1.51 | 1.68 | 3.01 | 3.30 | 3.22 | 1.16 | 1.21 | 1.75 | 1.92 |
| 1.99 | 1.51 | 1.68 | 2.98 | 3.28 | 3.26 | 1.15 | 1.21 | 1.73 | 1.90 |
| 2.00 | 1.51 | 1.67 | 2.96 | 3.26 | 3.30 | 1.14 | 1.20 | 1.71 | 1.88 |
| 2.01 | 1.50 | 1.66 | 2.94 | 3.23 | 3.34 | 1.13 | 1.20 | 1.69 | 1.84 |
| 2.02 | 1.50 | 1.65 | 2.92 | 3.21 | 3.38 | 1.12 | 1.19 | 1.67 | 1.84 |
| 2.04 | 1.49 | 1.63 | 2.88 | 3.17 | 3.42 | 1.11 | 1.19 | 1.66 | 1.83 |
| 2.06 | 1.48 | 1.62 | 2.85 | 3.13 | 3.46 | 1.11 | 1.18 | 1.64 | 1.80 |
| 2.08 | 1.48 | 1.60 | 2.81 | 3.09 | 3.50 | 1.10 | 1.18 | 1.62 | 1.78 |
| 2.10 | 1.47 | 1.59 | 2.78 | 3.05 | 3.54 | 1.09 | 1.17 | 1.61 | 1.76 |
| 2.12 | 1.46 | 1.57 | 2.74 | 3.01 | 3.58 | 1.08 | 1.17 | 1.59 | 1.75 |
| 2.14 | 1.46 | 1.56 | 2.71 | 2.97 | 3.62 | 1.07 | 1.16 | 1.57 | 1.73 |
| 2.16 | 1.45 | 1.55 | 2.67 | 2.94 | 3.66 | 1.07 | 1.16 | 1.56 | 1.71 |

Tabla 3.7 (Continuación)

| K | T | Z | Y | U | K | T | Z | Y | U |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 3.70 | 1.06 | 1.16 | 1.55 | 1.70 | 4.35 | 0.962 | 1.11 | 1.35 | 1.48 |
| 3.74 | 1.05 | 1.15 | 1.53 | 1.68 | 4.40 | 0.955 | 1.11 | 1.34 | 1.47 |
| 3.78 | 1.05 | 1.15 | 1.52 | 1.67 | 4.45 | 0.948 | 1.11 | 1.33 | 1.46 |
| 3.82 | 1.04 | 1.15 | 1.50 | 1.65 | 4.50 | 0.941 | 1.10 | 1.31 | 1.44 |
| 3.86 | 1.03 | 1.14 | 1.49 | 1.64 | 4.55 | 0.934 | 1.10 | 1.30 | 1.43 |
| 3.90 | 1.03 | 1.14 | 1.48 | 1.62 | 4.60 | 0.928 | 1.10 | 1.29 | 1.42 |
| 3.94 | 1.02 | 1.14 | 1.46 | 1.61 | 4.65 | 0.921 | 1.10 | 1.28 | 1.41 |
| 3.98 | 1.01 | 1.13 | 1.45 | 1.60 | 4.70 | 0.914 | 1.09 | 1.27 | 1.39 |
| 4.00 | 1.009 | 1.13 | 1.43 | 1.59 | 4.75 | 0.908 | 1.09 | 1.26 | 1.38 |
| 4.05 | 1.002 | 1.13 | 1.42 | 1.57 | 4.80 | 0.900 | 1.09 | 1.25 | 1.37 |
| 4.10 | 0.996 | 1.13 | 1.42 | 1.56 | 4.85 | 0.893 | 1.09 | 1.24 | 1.36 |
| 4.15 | 0.989 | 1.12 | 1.40 | 1.54 | 4.90 | 0.887 | 1.09 | 1.23 | 1.35 |
| 4.20 | 0.982 | 1.12 | 1.39 | 1.53 | 4.95 | 0.880 | 1.08 | 1.22 | 1.34 |
| 4.25 | 0.975 | 1.12 | 1.38 | 1.51 | 5.00 | 0.873 | 1.08 | 1.21 | 1.33 |
| 4.30 | 0.968 | 1.11 | 1.36 | 1.50 | | | | | |

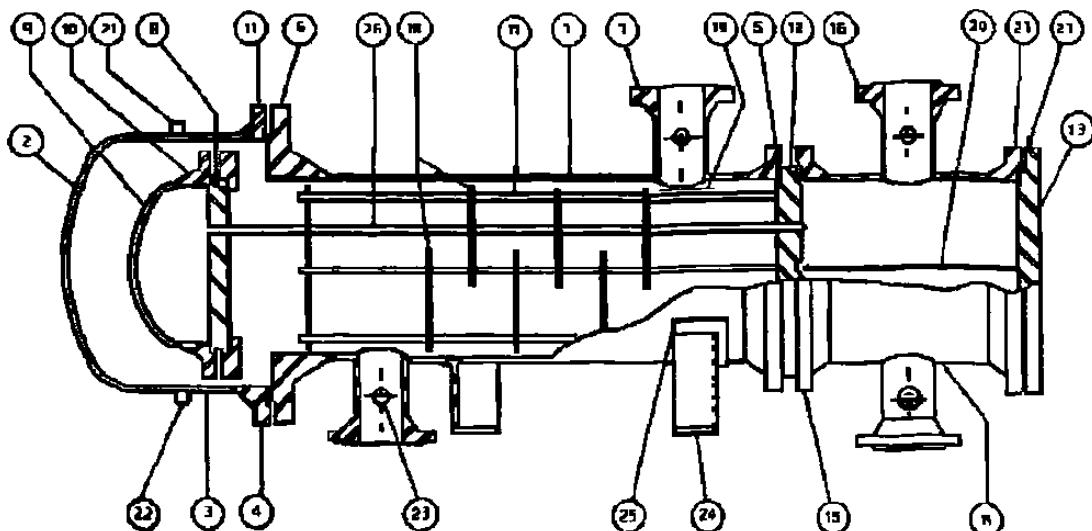
**Tabla 3.8. Pernos mínimos recomendados
(Todas las dimensiones en plgs)**

| TAMAÑO DE PERNOS | CUERDAS | | TUERCA | | ESPACIO ENTRE PERNOS | DISTANCIA RADIAL | DISTANCIA AL EXTERIOR |
|------------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------------|------------------|-----------------------|
| | No. DE CUERDAS | ÁREA DE RAÍZ | ENTRE FLANCOES | ENTRE ESQUINAS | | | |
| ½ | 13 | 0.12 | 7/8 | 0.969 | 1 ¼ | 13/16 | 5/8 |
| 5/8 | 11 | 0.20 | 1 1/16 | 1.175 | 1 ½ | 15/16 | ¾ |
| ¾ | 10 | 0.30 | 1 ¼ | 1.383 | 1 ¾ | 1 1/8 | 13/16 |
| 7/8 | 9 | 0.41 | 1 7/16 | 1.589 | 2 1/16 | 1 ¼ | 15/16 |
| 1 | 8 | 0.55 | 1 5/8 | 1.796 | 2 ¼ | 1 3/8 | 1 1/16 |
| 1 1/8 | 8 | 0.72 | 1 13/16 | 2.002 | 2 ¼ | 1 ½ | 1 1/8 |
| 1 ¼ | 8 | 0.92 | 2 | 2.209 | 2 13/16 | 1 ¾ | 1 ¼ |
| 1 3/8 | 8 | 1.15 | 2 3/16 | 2.416 | 3 1/16 | 1 7/8 | 1 3/8 |
| 1 ½ | 8 | 1.40 | 2 3/8 | 2.622 | 3 ¼ | 2 | 1 ½ |
| 1 5/8 | 8 | 1.68 | 2 9/16 | 2.828 | 3 ½ | 2 1/8 | |
| 1 ¾ | 8 | 1.99 | 2 ¾ | 3.035 | 3 ¾ | 2 ¼ | |
| 1 7/8 | 8 | 2.30 | 2 15/16 | 3.242 | 4 | 2 3/8 | |
| 2 | 8 | 2.65 | 3 1/8 | 3.449 | 4 ¼ | 2 ½ | |
| 2 ¼ | 8 | 3.42 | 3 ½ | 3.862 | 4 ¾ | 2 ¾ | |
| 2 ½ | 8 | 4.29 | 3 7/8 | 4.275 | 5 ¼ | 3 1/16 | |
| 2 ¾ | 8 | 5.25 | 4 ¼ | 4.688 | 5 ¾ | 3 3/8 | |
| 3 | 8 | 6.32 | 4 5/8 | 5.102 | 6 ¼ | 3 5/8 | |
| 3 ¼ | 8 | 7.48 | 5 | 5.515 | 6 5/8 | 3 ¾ | |
| 3 ½ | 8 | 8.74 | 5 3/8 | 5.928 | 7 1/8 | 4 1/8 | |
| 3 ¾ | 8 | 10.1 | 5 ¾ | 6.341 | 7 5/8 | 4 7/16 | |
| 4 | 8 | 11.5 | 6 1/8 | 6.755 | 8 1/8 | 4 5/8 | |

Las dimensiones de las tuercas están basadas en la Norma Americana 318.2.2.

Tabla 3.9. Espesores de deflectores (dimensiones en pulgadas).

| DIÁMETRO INTERIOR DE LA CARCAZA | ESPESOR DE PLACA | | | | |
|---|-----------------------------|---------|---------|---------|---------------|
| | DISTANCIA ENTRE DEFLECTORES | | | | |
| | 24 Y MENORES | 24 A 36 | 36 A 48 | 48 A 60 | MAYOR A 60 |
| 6 - 14 | 1/8 | 3/16 | 1/4 | 3/8 | 3/8 |
| 15 - 28 | 3/16 | 1/4 | 3/8 | 3/8 | 1/2 |
| 29 - 38 | 5/16 | 5/16 | 3/8 | 1/2 | 5/8 |
| 39 - 60 | 3/8 | 3/8 | 1/2 | 5/8 | 5/8 |



1. Envolvente
2. Tapa de envolvente
3. Carrete cilíndrico
4. Brida de tapa envolvente
5. Brida de envolvente a cabezal fijo
6. Brida de envolvente a la tapa
7. Boquilla de envolvente
8. Espejo flotante
9. Tapa de cabezal flotante
10. Brida de tapa de cabezal flotante
11. Contra brida
12. Espejo estacionario
13. Tapa de cabezal de distribución
14. Cabezal de distribución
15. Brida de cabezal de distribución
16. Boquilla de cabezal de distribución
17. Válvulas de amarre y espaciadores
18. Mamparas
19. Placas de choque
20. Mampara divisoria
21. Conexión para venteo
22. Conexión para drenaje
23. Conexión para medición de presión y temp.
24. Soporte tipo silla
25. Refuerzo de sillas
26. Tubos
27. Orejas Izaje

| TIPOS DE UNIONES | EFICIENCIA DE LA UNION CUANDO LA JUNTA ESTA | | | |
|---|--|--------------------------|------------------|------|
| | RADIOGRAFIADA AL 100% | RADIOGRAFIADA POR PUNTOS | SIN RADIOGRAFIAR | |
|  | Soldadura a topé unida con soldadura por ambos lados o por otro método con el cual se obtenga la misma calidad del acero de aquella en ambos lados de la superficie sellada. Si se usa solera de respaldo, deberá aplicarse después de aplicar la soldadura y antes de radiografiar. | 1.00 | 0.85 | 0.70 |
|  | Soldadura simple a topé con solera de respaldo la cual permanecerá en el interior del recipiente. | 0.90 | 0.80 | 0.65 |
|  | Unión simple por un solo lado sin solera de respaldo. | --- | --- | 0.60 |
|  | Unión traslapada con doble fillet. | --- | --- | 0.55 |
|  | Unión traslapada con filete sencillo y tapón de soldadura. | --- | --- | 0.50 |
|  | Unión traslapada con filete sencillo sin tapón de soldadura. | --- | --- | 0.45 |

Figura 3.2.1. Valores típicos de la eficiencia de las uniones de soldadura.

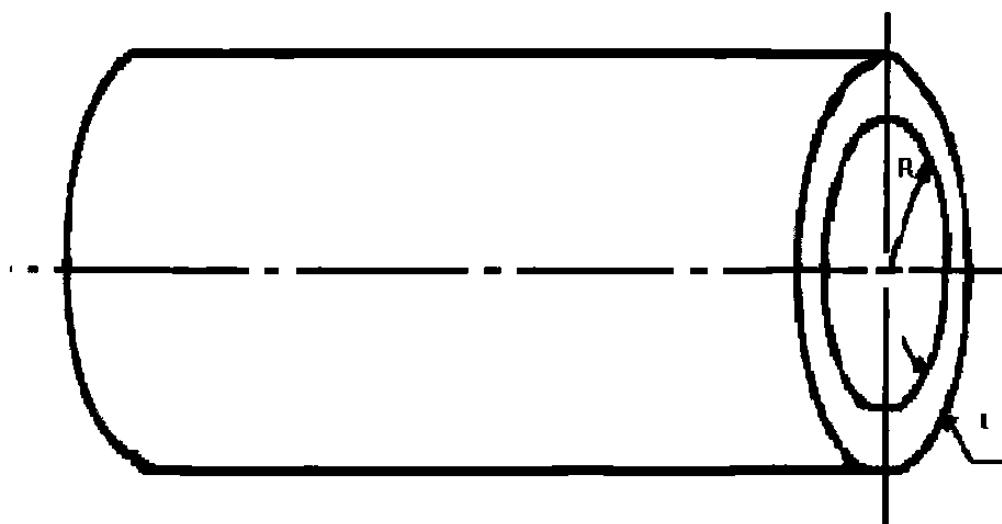


Figura 3.2. Diagrama de carcaza cilíndrica.

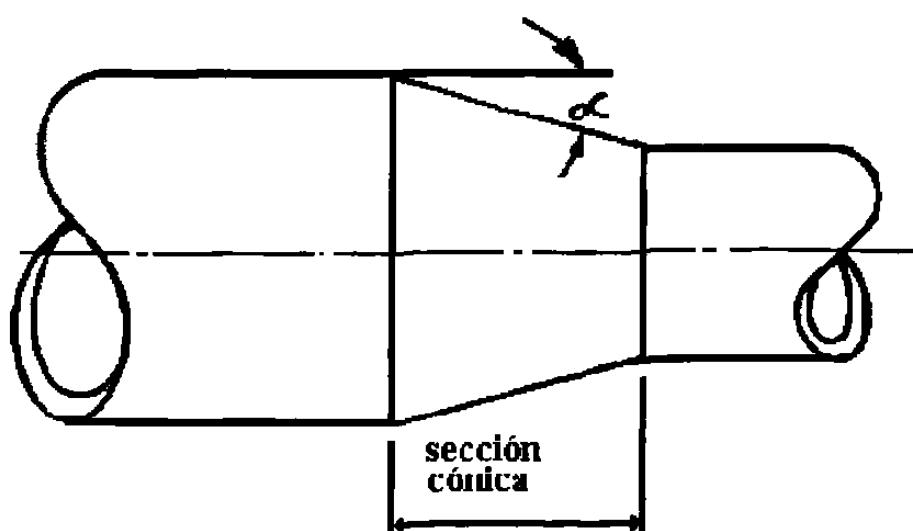


Figura 3.3. Diagrama de sección cónica.

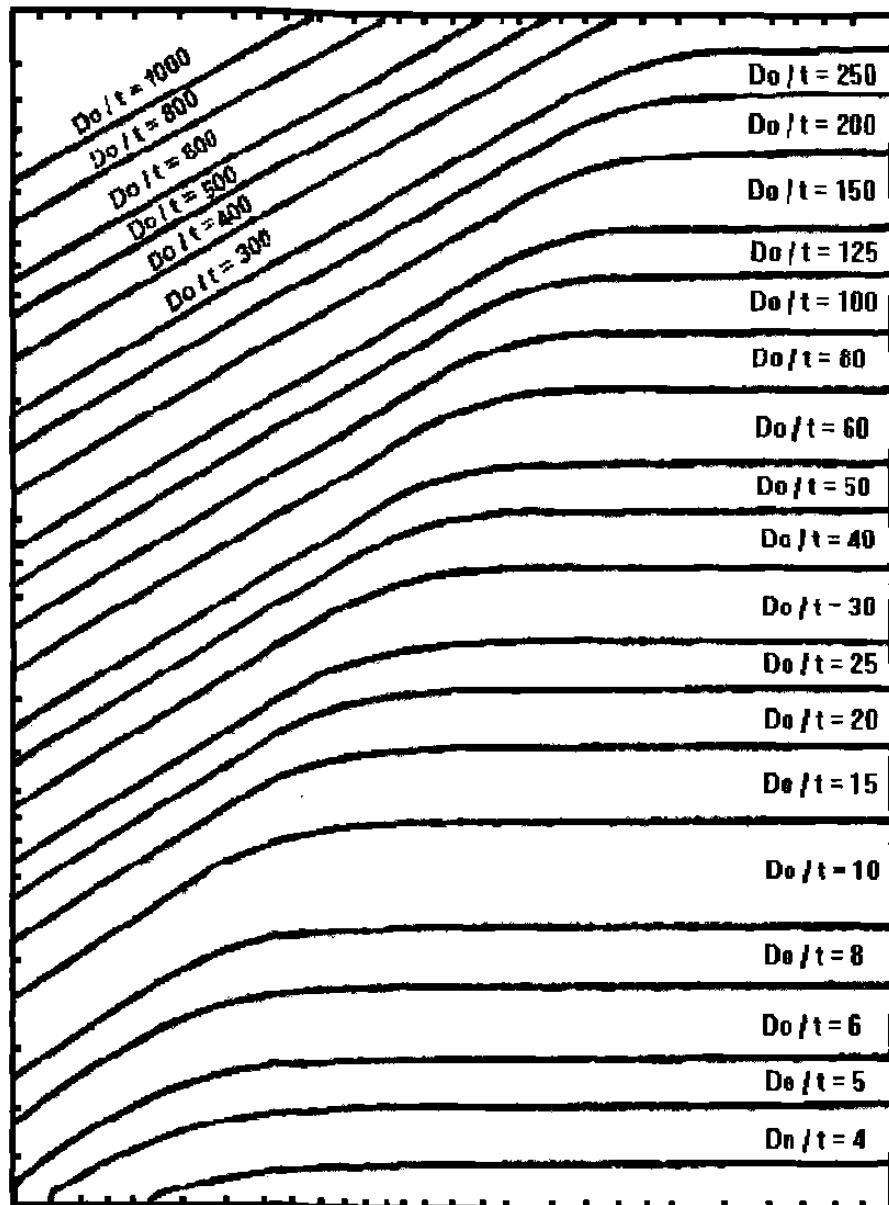


Figura 3.4. (Parte 1) Diagrama para envolventes cilíndricas sometidas a presión externa o cargas de compresión (para todos los materiales)

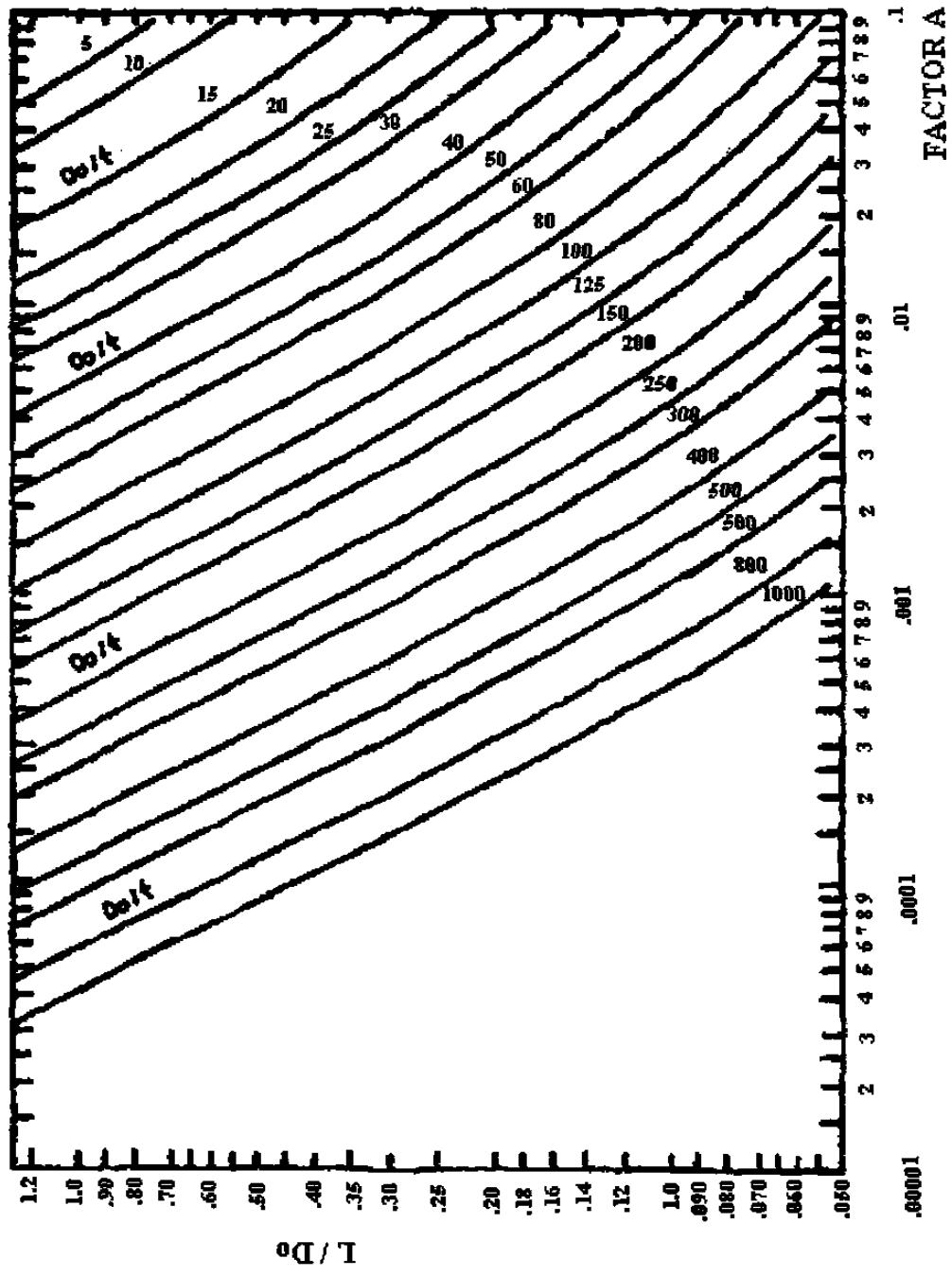


Figura 3.4. (Parte 2) Diagrama para envolventes cilíndricas sometidas a presión externa o cargas de compresión (para todos los materiales)

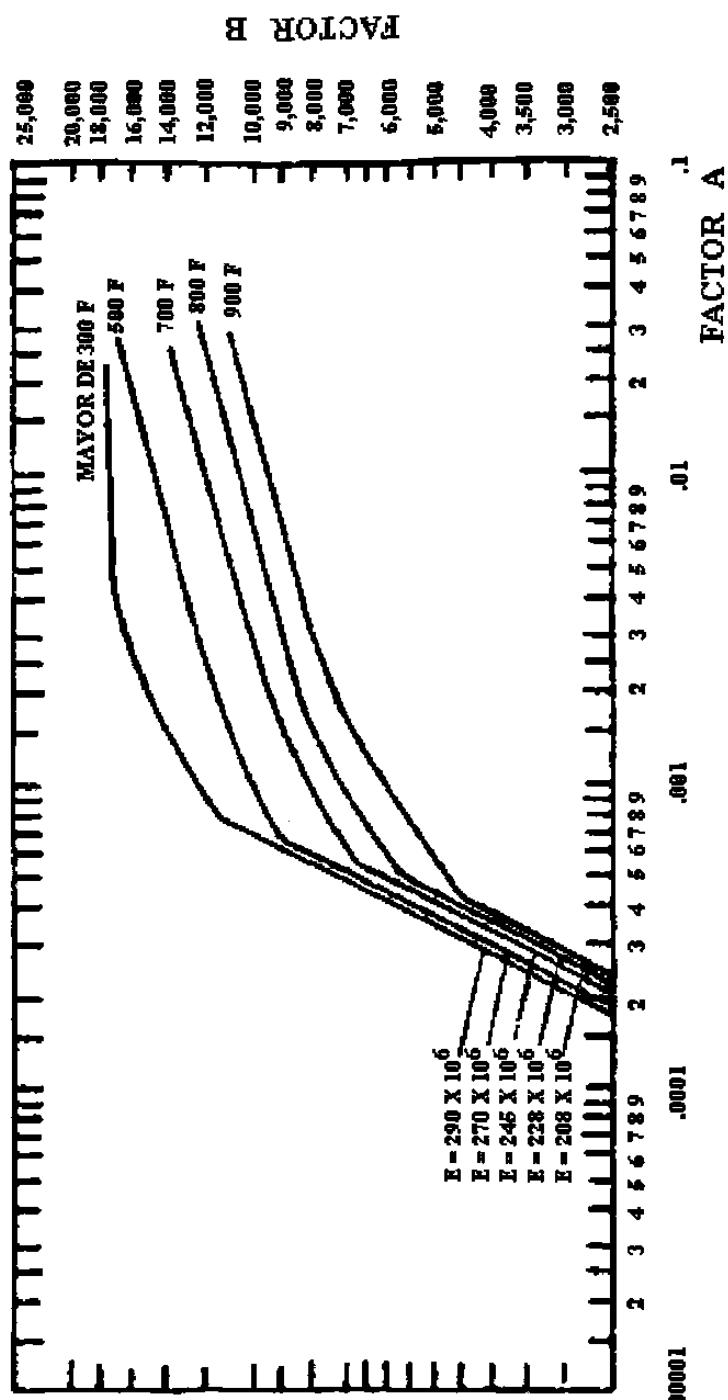


Figura 3.5. Diagrama para determinar el espesor de la envolvente cilíndrica y esférica, sometida a presión externa, y construido en acero al carbono o de baja aleación (punto de cedencia de 30000 a 38000 PSI) y aceros inoxidables tipos 405 y 410.

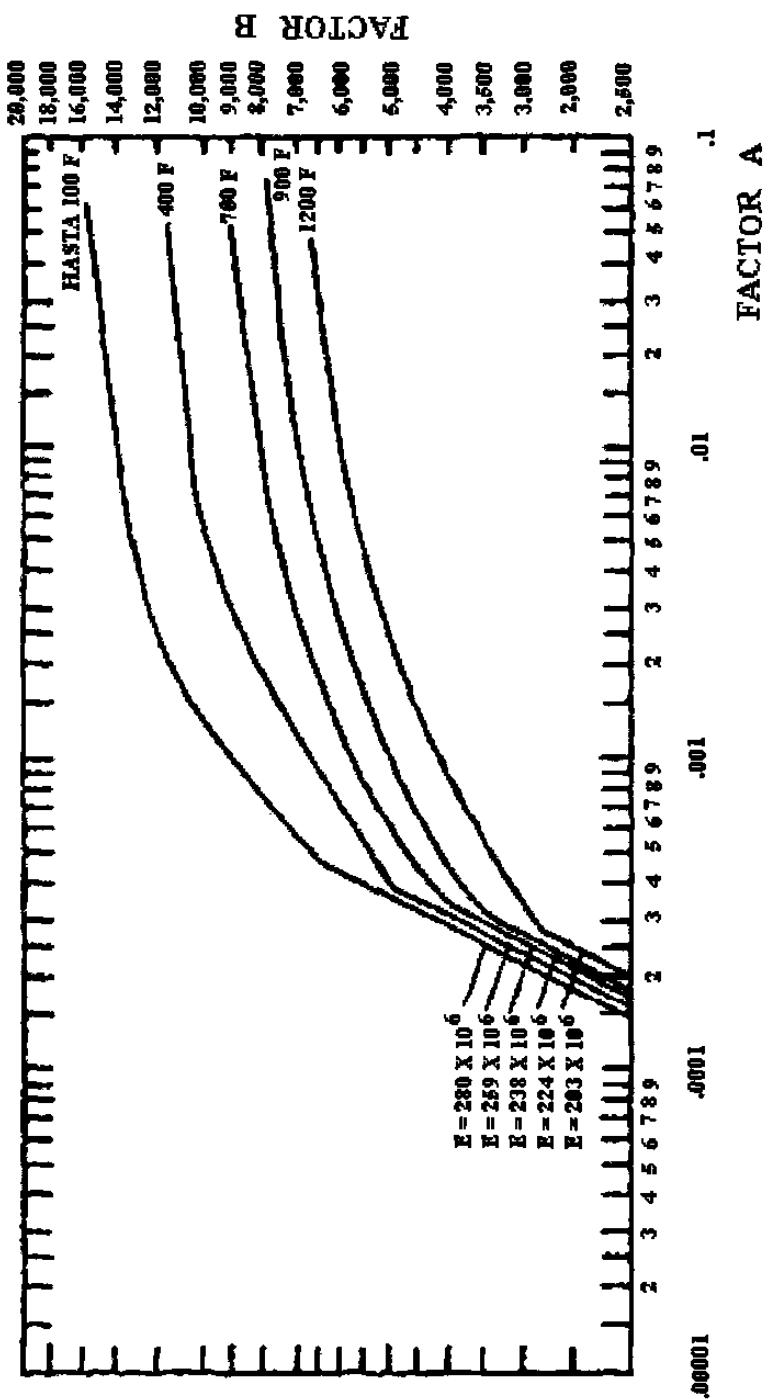


Figura 3.6. Diagrama para determinar el espesor de la envolvente cilíndrica y esférica sometida a presión externa, y construido de acero austenítico (18Cr-8Ni, tipo 304).

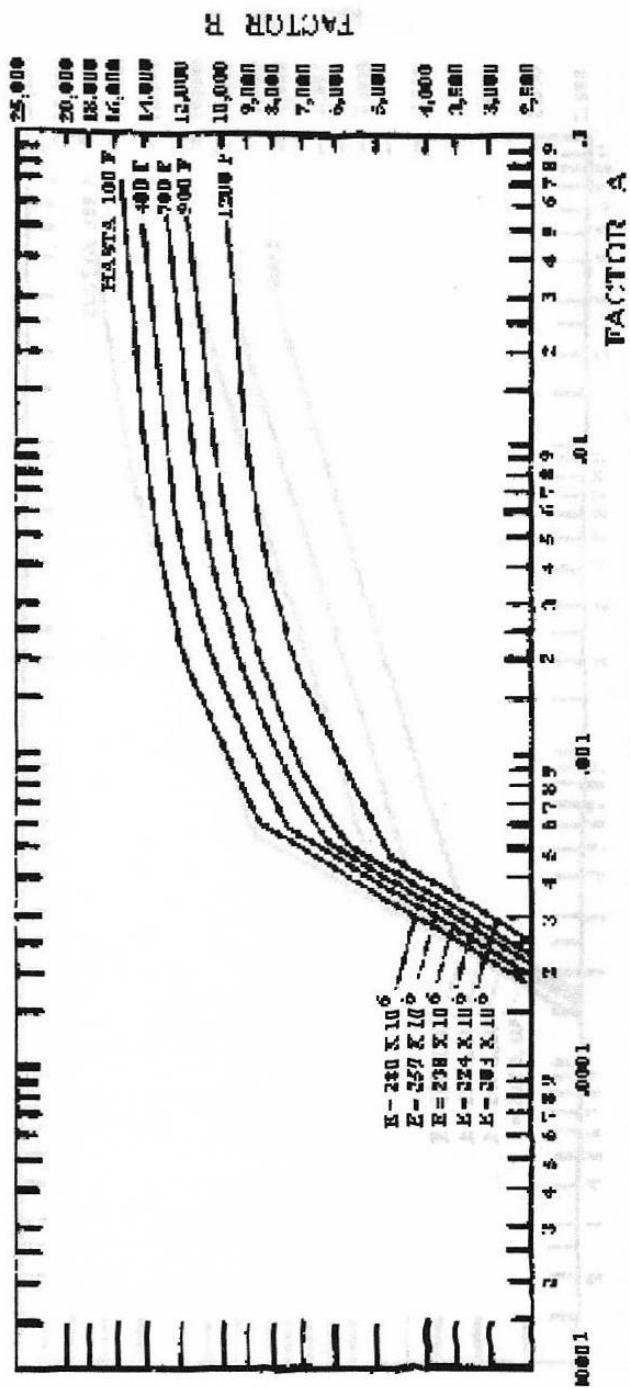


Figura 3.7. Diagrama para determinar el espesor de la envolvente cilíndrica y esférica sometida a presión extrema, y construido de acero austemperado (18Cr-8Ni-Ti, tipo 321; 18Cr-8Ni-Cb, tipo 347; 25Cr-12Ni, tipo 309; 25Cr-20Ni, tipo 310 y 17Cr, tipo 430B).

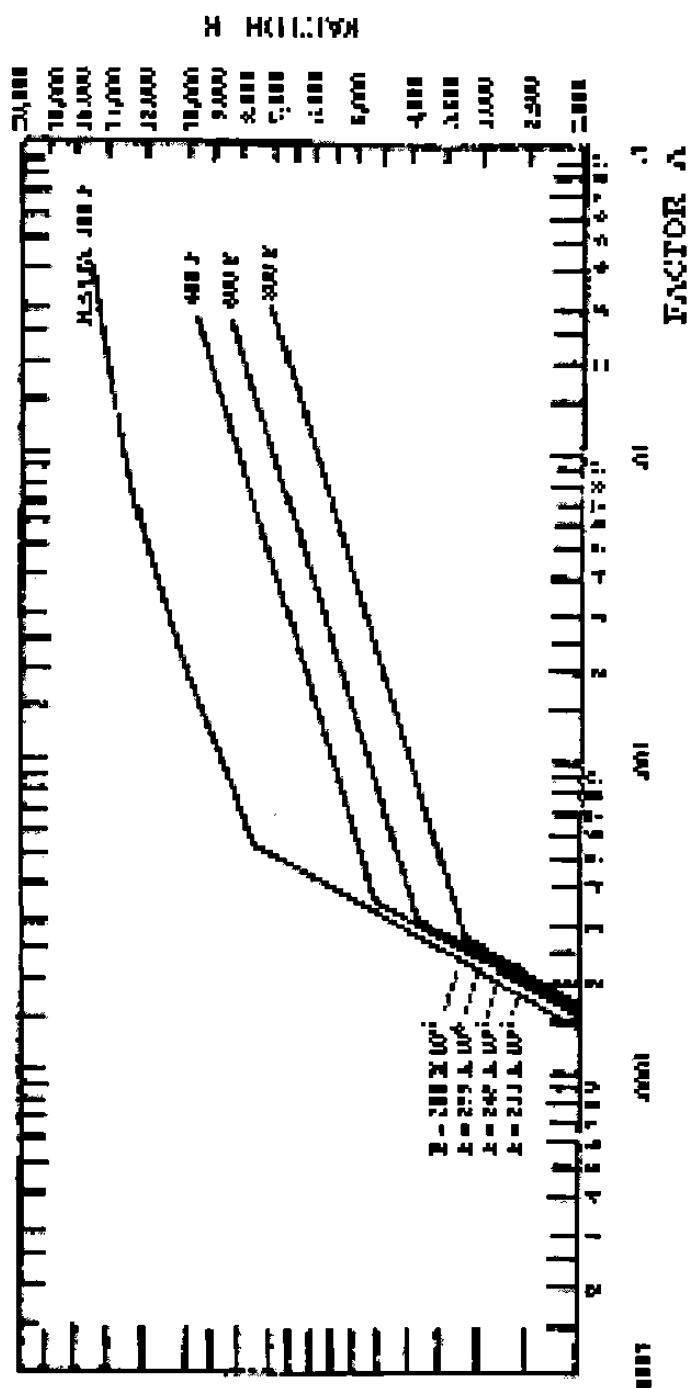


Figura 3.8. Diagrama para determinar el espesor de la envoltura cilíndrica y estriada sometida a presión exterior y construida de acero austemperado 116Cr-8Ni+J. G3 ultracido de carbono, tipo 304L.

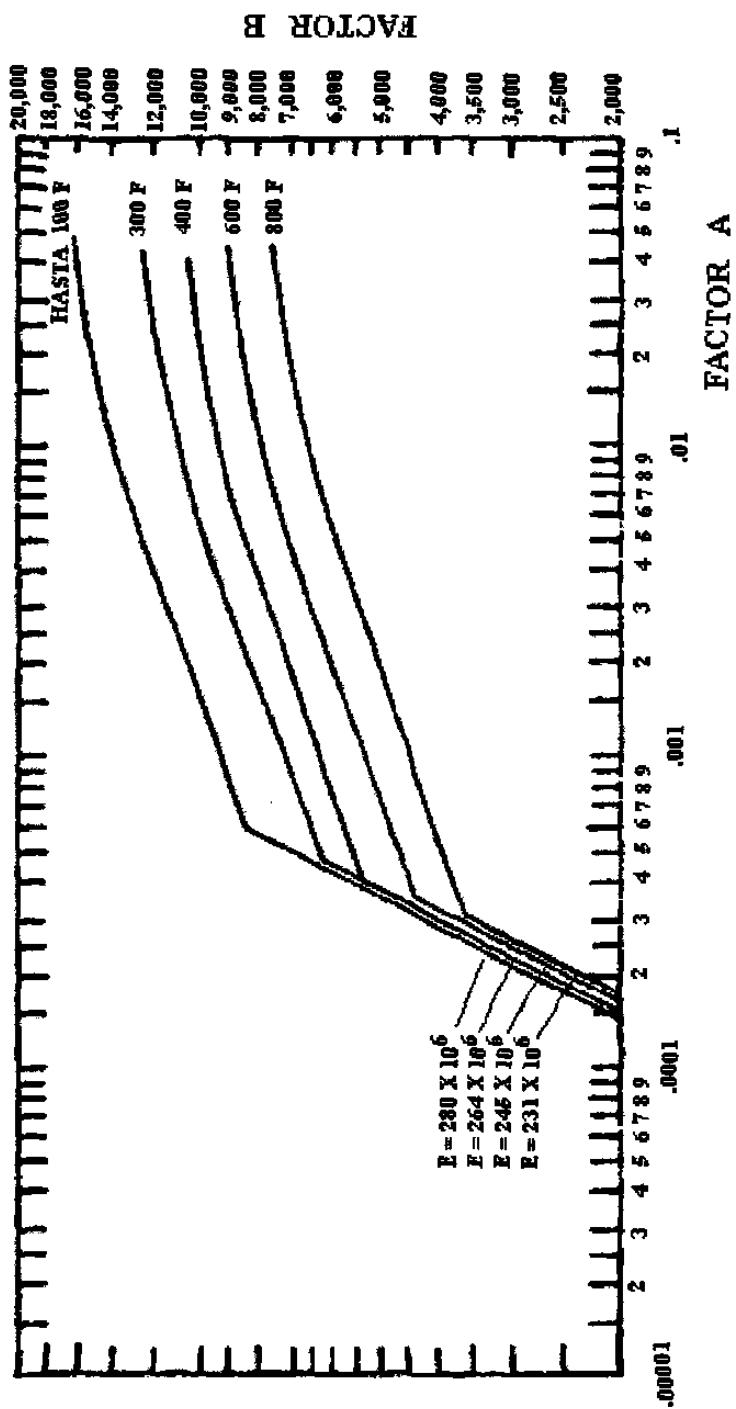


Figura 3.9. Diagrama para determinar el espesor de la envolvente cilíndrica y esférica sometida a presión externa, y construido de acero austenítico (18Cr-8Ni+Mo, 0,09 máximo de carbono 316L y 317).

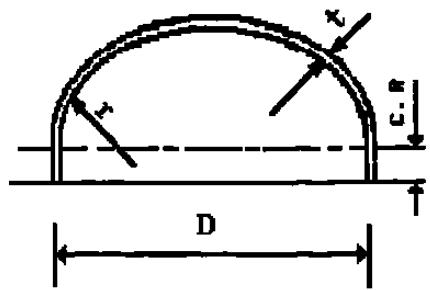


Figura 3.10. Semielíptica

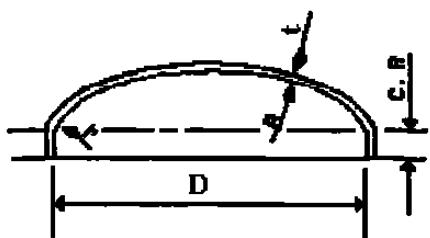


Figura 3.11. Tóriesférica

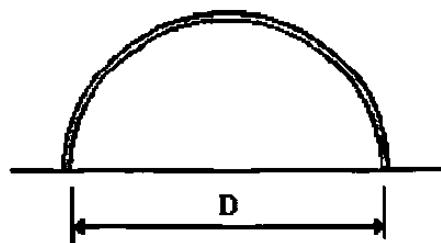


Figura 3.12. Semiesférica

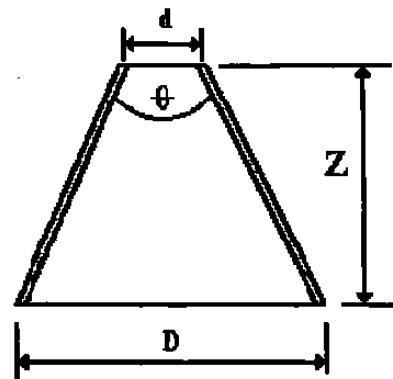


Figura 3.13. Cónica

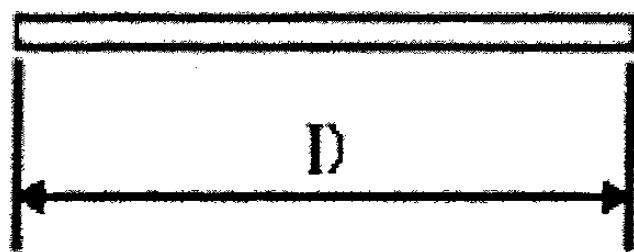


Figura 3.14-a. Plana

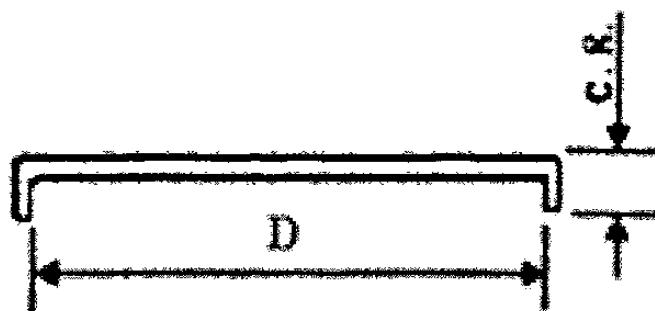


Figura 3.14-b. Plana con ceja

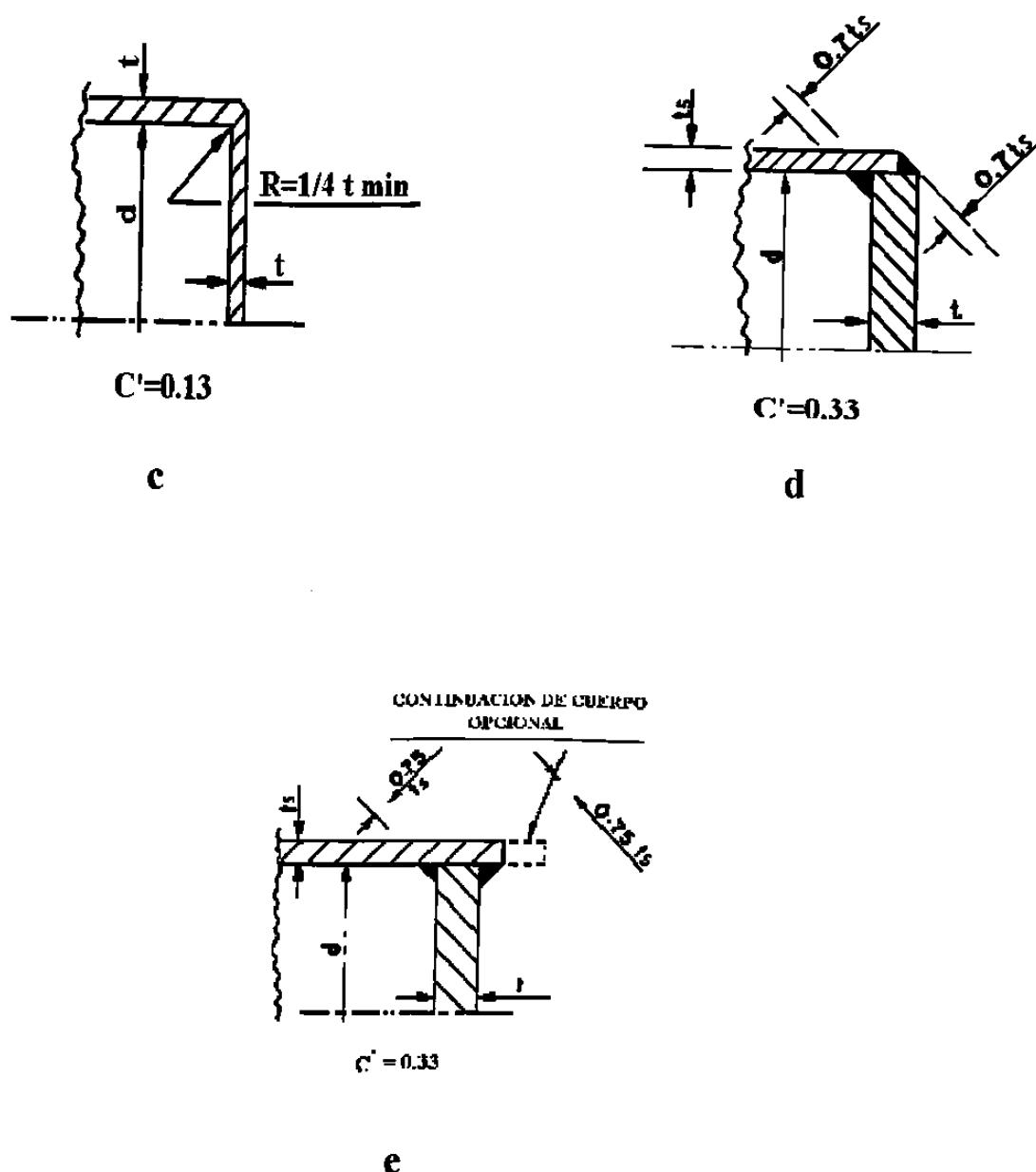
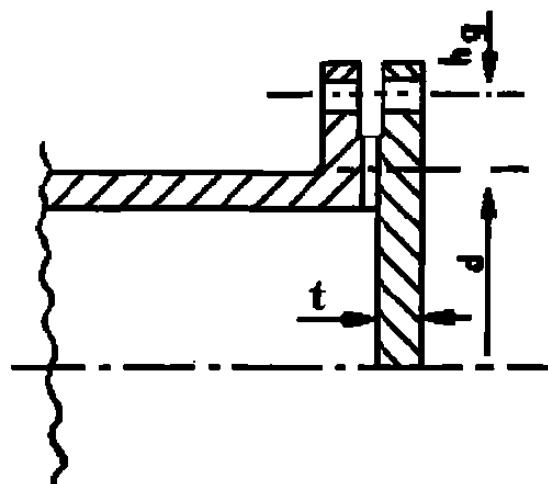
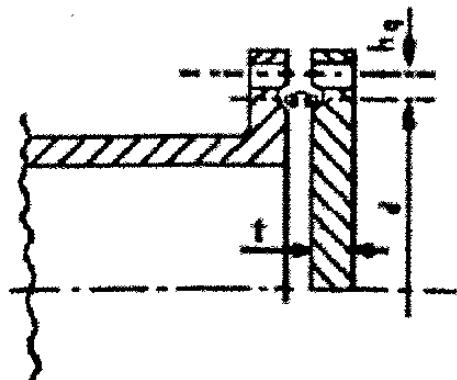


Figura 3.14-c, d, e. Tipos de uniones de tapas planas



$$C = 0.3$$

a



$$C' = 0.3$$

b

Figura 3.15-a,b. Tipos de empaques entre la carcasa y tapas.

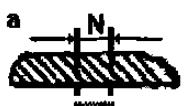
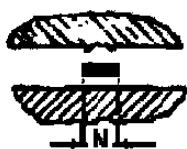
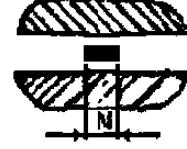
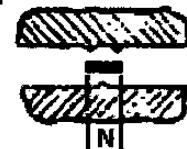
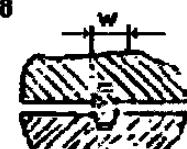
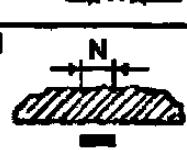
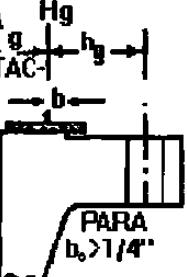
| TIPO DE CARA | b_o | | TIPO DE CARA | b_o | | | |
|---|---|-----------------|---|--|---|----------------|-----------------|
| | COLUMNA I | COLUMNA II | | COLUMNA I | COLUMNA II | | |
| 1a |  | $\frac{N}{2}$ | $\frac{N}{2}$ | 5 |  | $\frac{3N}{8}$ | $\frac{7N}{16}$ |
| 1b |  | $\frac{w+T}{2}$ | $\frac{w+T}{2}$ | 6 |  | $\frac{N}{4}$ | $\frac{3N}{6}$ |
| 2 |  | $\frac{w+N}{4}$ | $\frac{w+3N}{8}$ | 7 |  | $\frac{N}{4}$ | $\frac{3N}{6}$ |
| 3 |  | $\frac{w}{2}$ | $\frac{3N}{8}$ | 8 |  | $\frac{w}{8}$ | |
| 4 |  | $\frac{3N}{8}$ | $\frac{7N}{16}$ | LOCALIZACION DE LA CARGA DE REFACCION DFI FMPAQUE | | | |
| ANCHO EFECTIVO DEL ASENTAMIENTO DFI FMPAQUE "h" $b=b_o$ cuando $b_o < 1/4"$ | | | CARA DEL g CONTACTO — b —  PARA $b_o > 1/4"$ | | | | |
| $b=\frac{\sqrt{b_o}}{2}$ cuando $b_o > 1/4"$ | | | Hg g CARA DEL EMPAQUE  PARA $b_o < 1/4"$ | | | | |

Figura 3.16. Ancho efectivo del asentamiento del empaque, b .

Factores de empaque 'm' para condiciones de operación y esfuerzo mínimo de sellado de diseño y.

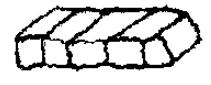
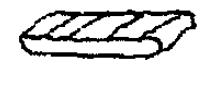
| MATERIAL DE EMPAQUE | FACTOR DE EMPAQUE (m) | ESFUERZO Y PSI | FORMAS | REF. A FIG. 3.1 b |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------|--|-----------------------------------|
| ELASTOMEROS SIN TEJER. | | | | |
| DUREZA SHORE (75 | 0.50 | 0 | | |
| DUREZA SHORE (75 | 1.00 | 260 |  | (1a, b, c, d) (4, 5) ; col. II |
| ASBESTO CON LIGADO ACEPTABLE. | | | | |
| 1/8" ESP. | 2.00 | 1600 |  | (1a, b, c, d) |
| 1/16" ESP. | 2.75 | 3700 | | (4, 5) ; col. II |
| 1/32" ESP. | 3.50 | 6500 | | |
| ELASTOMERO CON TEJIDO DE ALGODÓN | 1.25 | 400 |  | (1a, b, c, d) (4, 5) ; col. II |
| ELASTÓMERO CON ASBESTO | | | | |
| INSERTADO | 2.25 | 2200 |  | (1a, b, c, d) |
| 3 CAPAS | 2.50 | 3900 | | (4, 5) ; col. II |
| 2 CAPAS | 2.75 | 3700 | | |
| 1 CAPA | | |  | |
| FIBRA VEGETAL. | 1.75 | 1100 |  | (1a, b, c, d) (4, 5) ; col. II |
| METAL DILVANADO EN ESPIRAL CON ASB. | | | | |
| CARBON | 2.50 | 10000 |  | (1a, b) ; col. II |
| ACERO O MONEL | 3.00 | 10000 | | |
| METAL CORRUGADO ASBESTO | | | | |
| INSERTADO | 2.50 | 2900 |  | (1a, b) ; col. II |
| ALUMINIO SUAVE | 2.75 | 3700 | | |
| COBRE SUAVE | 3.00 | 4500 | | |
| FERRO | 3.25 | 5500 | | |
| MONEL O 4-6% Cr. | 3.50 | 6500 |  | |
| ACERO INOX. | | | | |

Figura 3.17. Materiales de empaque y caras de contacto.

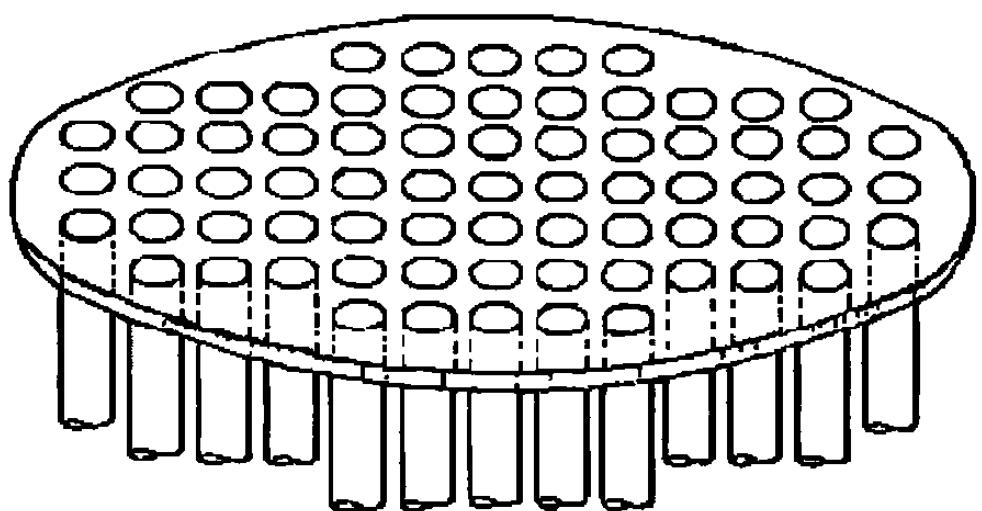


Figura 3.18. Espejo de tubos.

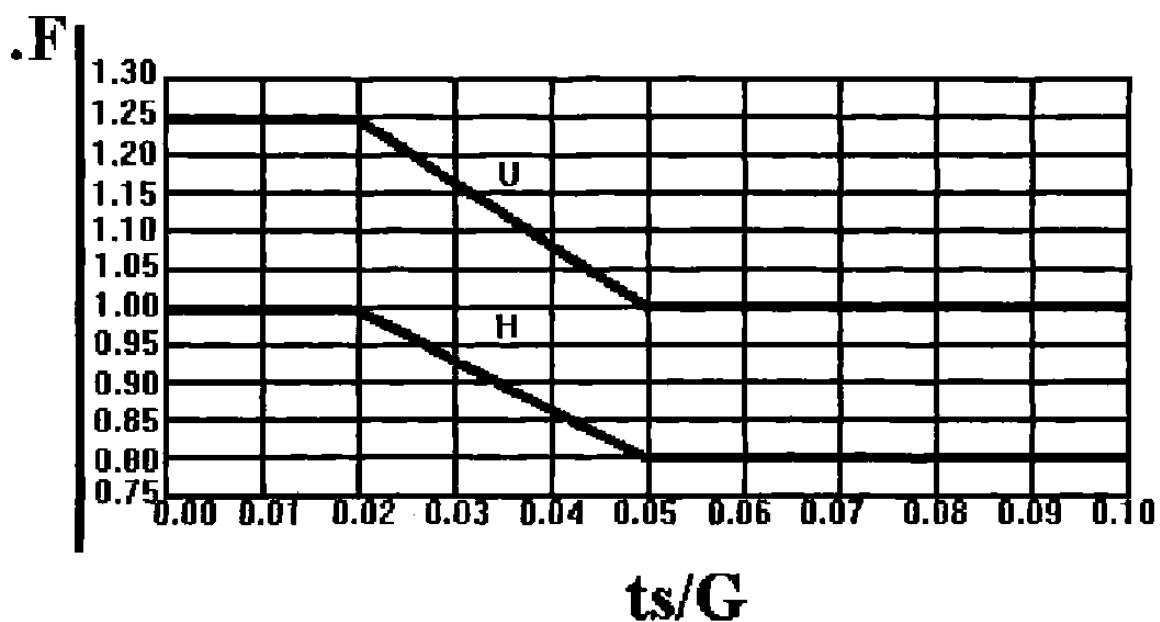


Figura 3.18-1 Relación espesor de pared / diámetro para espejos integrales.

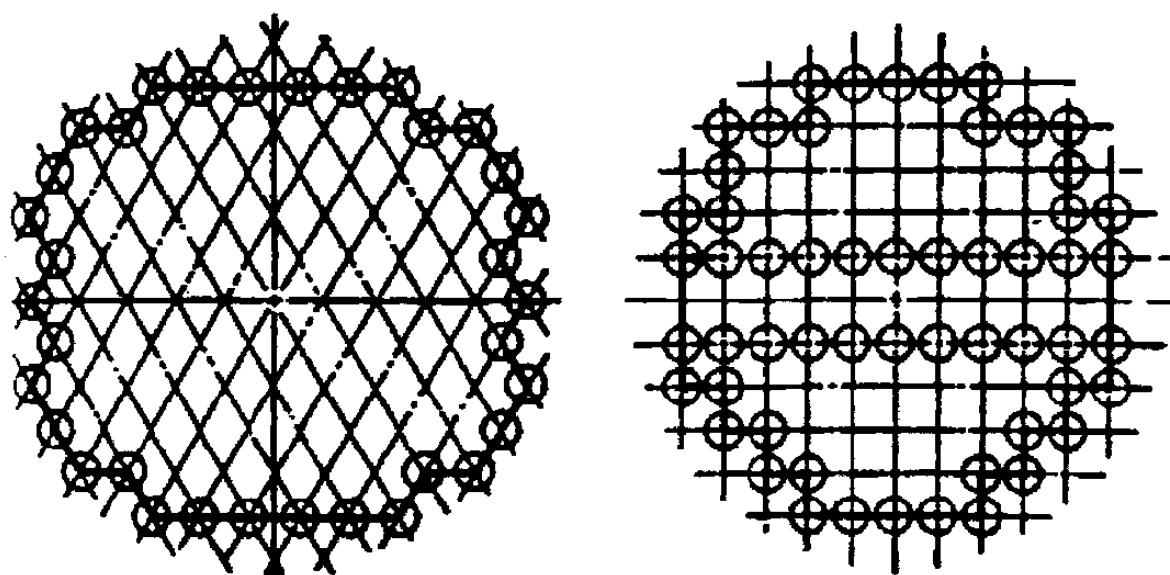


Figura 3.19. Perímetro (c).

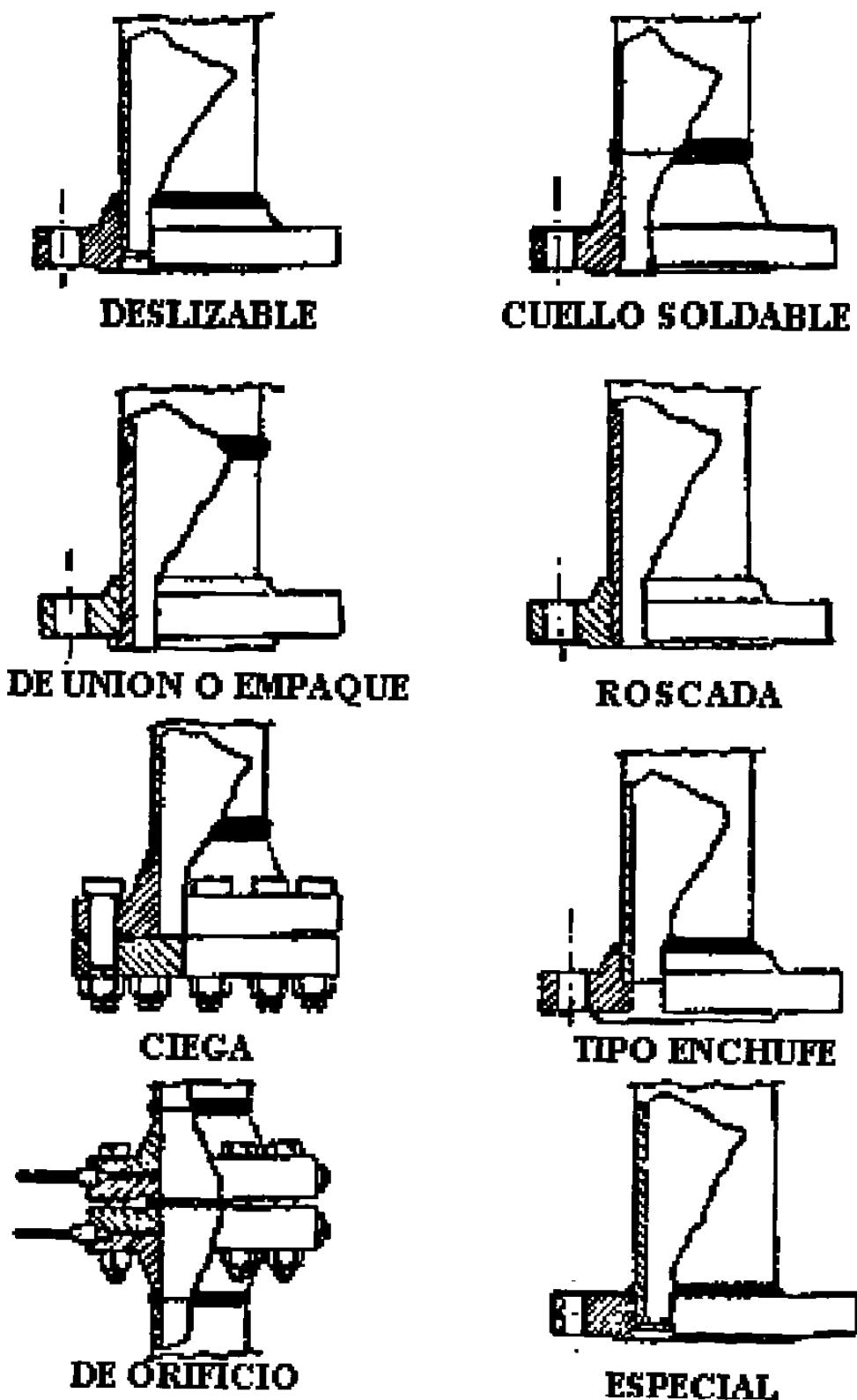


Figura 3.20. Tipo de bridas.

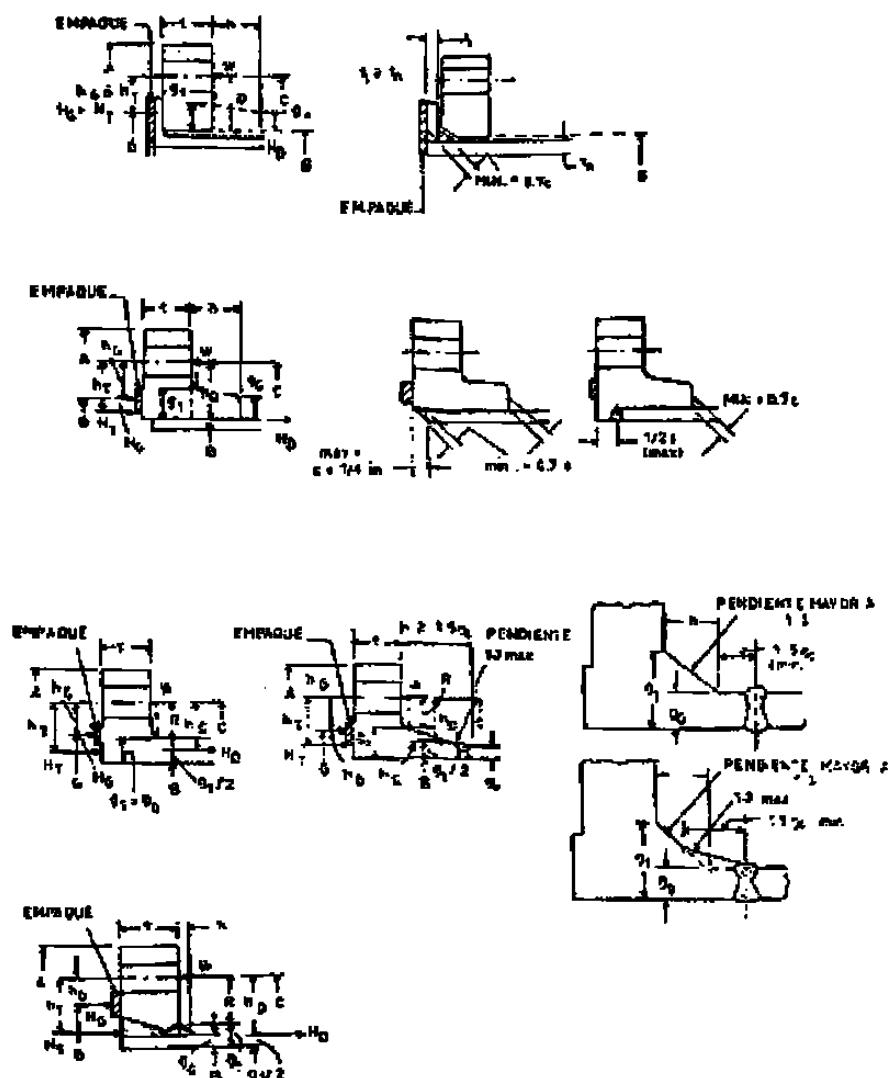


Figura 3.21. Nomenclatura de las bridas.

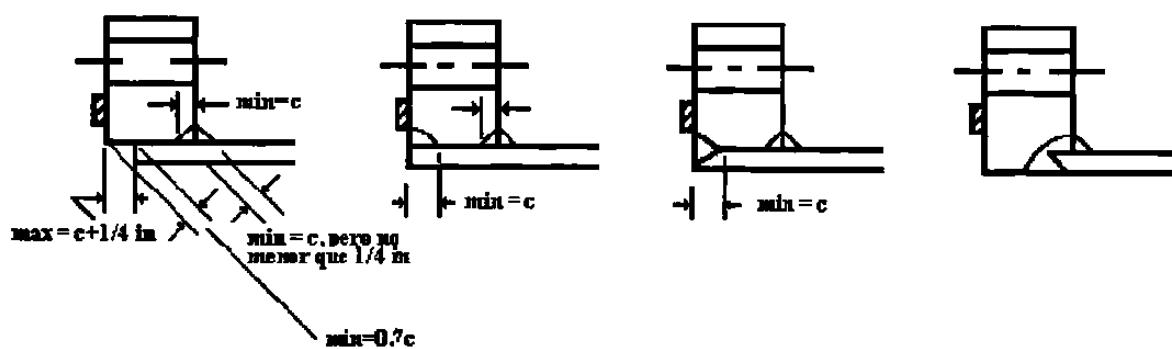


Figura 3.21. Continuación de nomenclatura de las bridas.

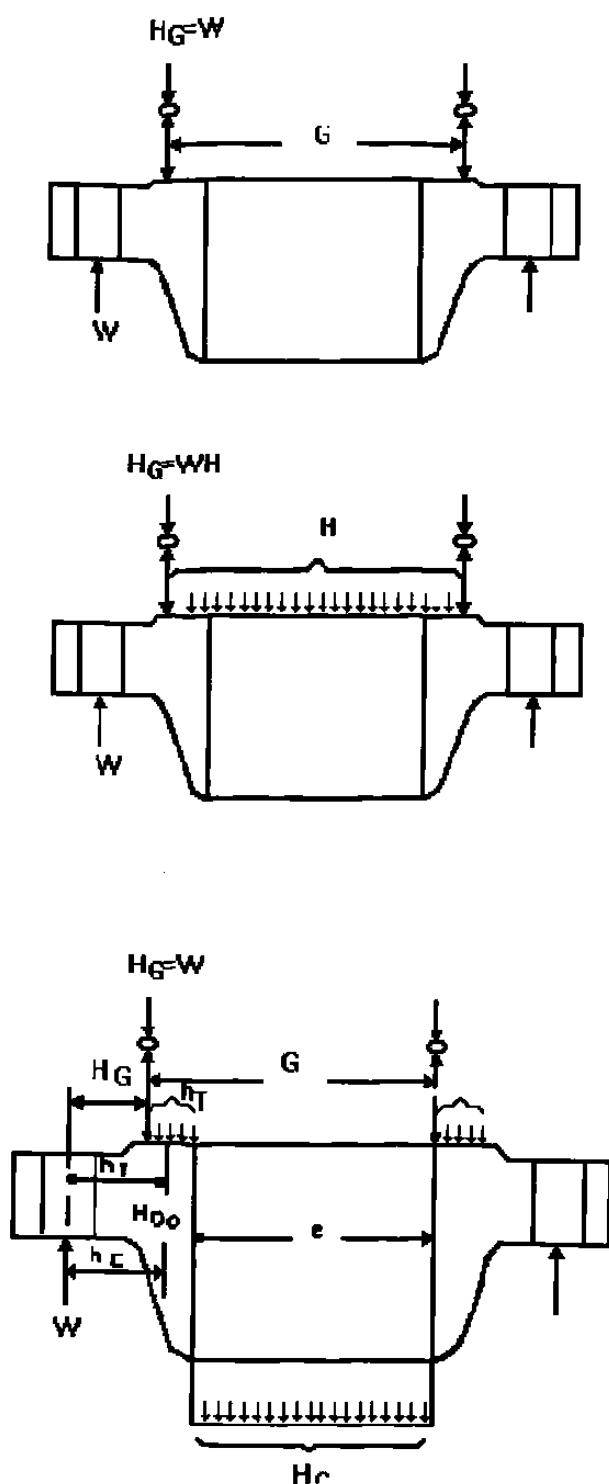


Figura 3.21. Continuación de nomenclatura de las bridas.

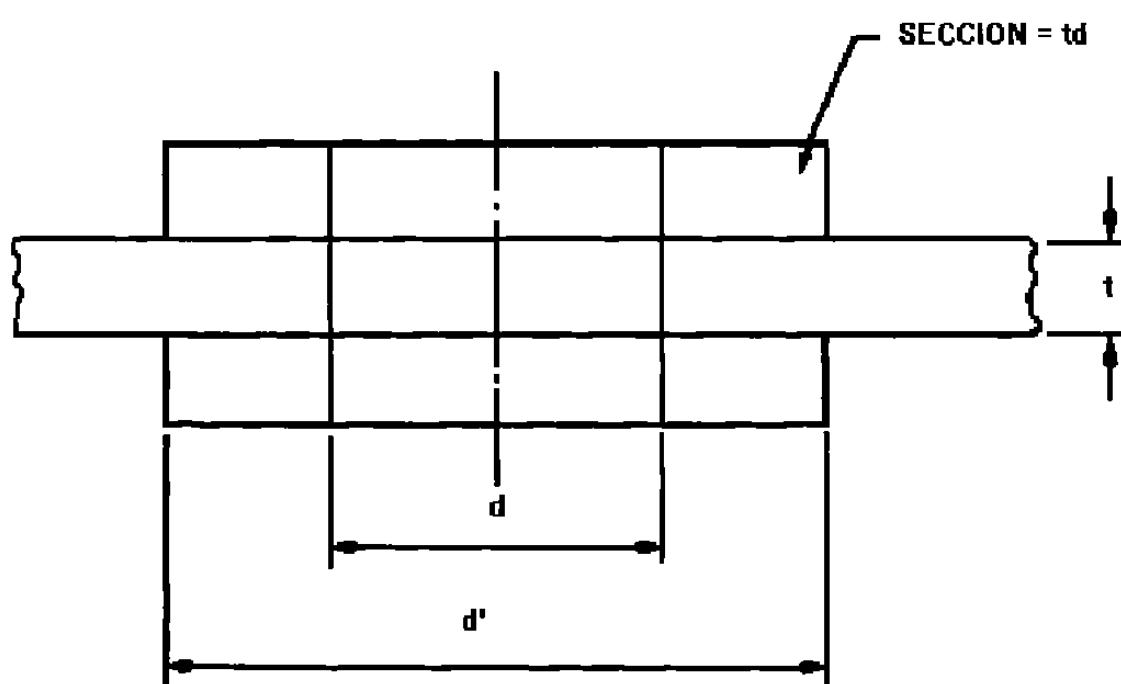


Figura 3.22. Diseño de refuerzos.

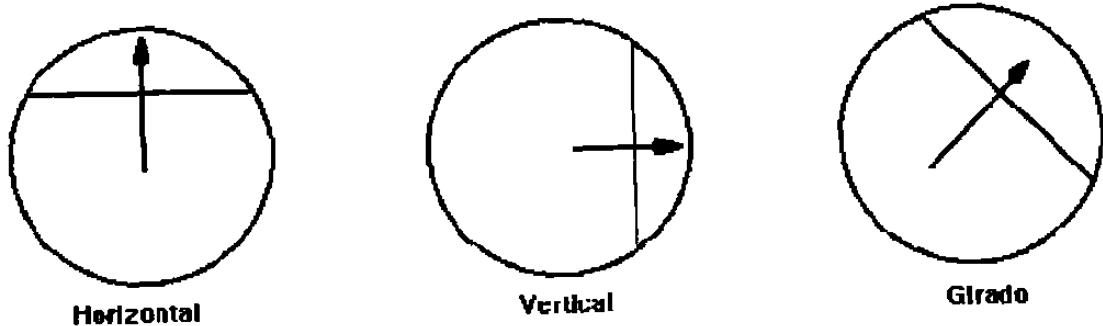
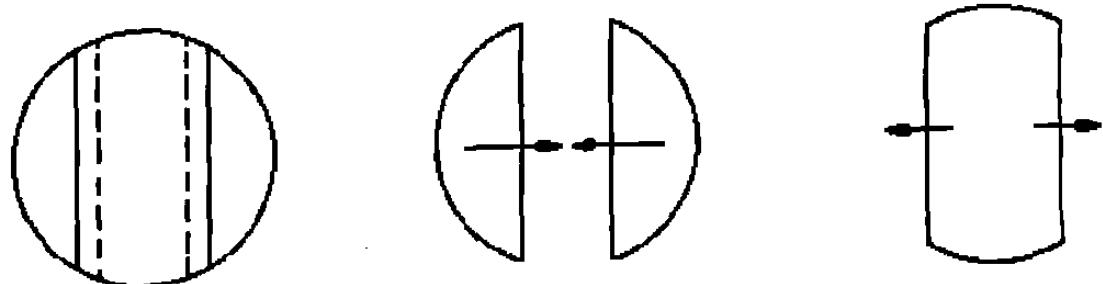
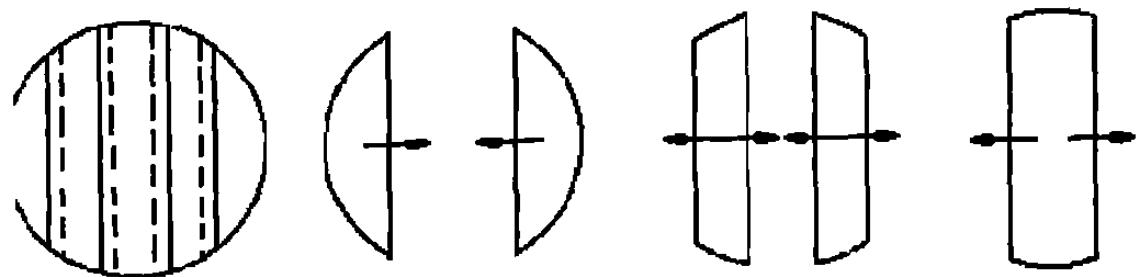
**CORTE SENCILLO****CORTE DOBLE****CORTE TRIPLE**

Figura 3.23. Diferentes diseños de deflectores.

CAPÍTULO 4

SOLUCION AL ENSUCIAMIENTO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Los principales efectos del ensuciamiento en los equipos de transferencia de calor son los siguientes:

- Incremento de la caída de presión
- Aceleración de la corrosión
- Decremento del coeficiente global de transferencia de calor

El ensuciamiento se puede clasificar en los siguientes tipos:

- Por precipitación:

Cristalización como resultado de la sobresaturación de una sal insoluble. El carbonato de calcio se forma sobre la superficie de transferencia de calor como resultado de la descomposición térmica del ion bicarbonato y su reacción con iones de calcio.

- Por partículas:

Sedimentación de partículas como arena, arcilla, herrumbre, etc.

- Planeación de métodos de limpieza y frecuencia requerida.
- Colocar el fluido más propicio al ensuciamiento, del lado de tubos.

También es necesario hacer consideraciones de tipo económicas para establecer el nivel de ensuciamiento aceptable, porque el tipo y frecuencia de limpieza varía considerablemente con el uso y la operación.

Para el resto de los equipos de transferencia de calor se presentan en la tabla 4.1, algunos valores típicos de la resistencia por ensuciamiento de algunos fluidos industriales.

| Líquido | Δh_f (K) |
|---------------------------------------|------------------|
| Agua | 0.001 |
| Aluminio Vacío | 0.001 |
| Aire Seco | 0.002 |
| Aire Seco + One Gas | 0.010 |
| Butano | |
| Ciclohexano + Aire Seco | 0.0005 |
| Dieléctrico líquido | 0.001 |
| Etileno | 0.001 |
| Fluoruro de Argón Heat Transfer Media | 0.002 |
| Glicerina Líquida | 0.001 |
| Acetona + Agua (Gel Desengrasante) | 0.003 |
| Cabotage Worldwide Solutions | 0.007 |
| Solvente Fluorado Solutions | 0.007 |
| CO ₂ líquido | 0.001 |
| Cloruro de Amonio | 0.013 |
| Álcali Soluciones | 0.001 |
| Óxido Nítrico | 0.007 |
| Trifluoro Metano Soluciones | 0.011 |

- Planeación de métodos de limpieza y frecuencia requerida.
 - Colocar el fluido más propicio al ensuciamiento, del lado de tubos.

También es necesario hacer consideraciones de tipo económicas para establecer el nivel de ensuciamiento aceptable, porque el tipo y frecuencia de limpieza varía considerablemente con el uso y la operación.

Para el resto de los equipos de transferencia de calor se presentan en la tabla 4.1, algunos valores típicos de la resistencia por ensuciamiento de algunos fluidos industriales.

Tabla 4.1. Resistencia al ensuciamiento para fluidos industriales.

| Oils: | |
|---|--------------|
| Fuel Oil # 2 | 0.002 |
| Fuel Oil # 6 | 0.005 |
| Transformer Oil | 0.001 |
| Engine Lube Oil | 0.001 |
| Quench Oil | 0.004 |
| Gases And Vapors: | |
| Manufactured Gas | 0.010 |
| Engine Exhaust Gas | 0.010 |
| Steam (Non-Oil Bearing) | 0.0005 |
| Exhaust Steam (Oil Bearing) | 0.0015-0.002 |
| Compressed Air | 0.002 |
| Ammonia Vapor | 0.001 |
| CO ₂ Vapor | 0.001 |
| Chlorine Vapor | 0.001 |
| Coal Flue Gas | 0.002 |
| Natural Gas Flue Gas | 0.010 |
| Liquids: | |
| Molten Heat Transfer Salts | 0.0005 |
| Refrigerant Liquids | 0.001 |
| Hydraulic Fluid | 0.001 |
| Industrial Organic Heat Transformer Media | 0.002 |
| Ammonia Liquid | 0.001 |
| Ammonia Liquid (Oil Bearing) | 0.003 |
| Calcium Chloride Solutions | 0.003 |
| Sodium Chloride C\Solutions | 0.003 |
| CO ₂ Liquid | 0.001 |
| Chlorine Liquid | 0.002 |
| Methanol Solutions | 0.002 |
| Ethanol Solutions | 0.002 |
| Ethylene Glycol Solutions | 0.002 |

Tabla 4.1. (Continuación)**Fouling Resistentes For Chemical Processing Streams****Gases And Vapors:**

| | |
|--------------------------|-------------|
| Acid Gases | 0.002-0.003 |
| Solvent Vapors | 0.001 |
| Stable Overhead Products | 0.001 |

Liquids:

| | |
|-------------------------------------|-------------|
| MEA And DEA Solutions | 0.002 |
| DEG And TEG Solutions | 0.002 |
| Stable Side Draw And Bottom Product | 0.001-0.002 |
| Caustic Solutions | 0.002 |
| Vegetable Oils | 0.003 |

Fouling Resistences For Natural Gas-Gasoline Processing Steams**Gases And Vapor:**

| | |
|-------------------|-------------|
| Natural Gas | 0.001-0.002 |
| Overhead Products | 0.001-0.002 |

Liquids:

| | |
|--|-------------|
| Lean Oil | 0.002 |
| Rich Oil | 0.001-0.002 |
| Natural Gasoline And Liquefied Petroleum Gases | 0.001-0.002 |

CAPITULO 5

CONCLUSIONES - CASO PRACTICO

Diseño de un intercambiador de calor de baja presión 300 psig (21 kg/cm²) para Isobutano líquido como fluido de trabajo en un ciclo de potencia geotérmico. El flujo de masa del Isobutano es de 380,000 lb/ hr (172,727.3 Kg/hr); El Isobutano se calienta desde 95°F (34.65°C) a 205°F (95.15°C) usando 232,000 lb/hr (105,454.6 Kg/hr) de Salmuera de baja salinidad y entrando a 230°F (108.9°C). El Isobutano se encuentra por el lado de la carcaza de un intercambiador de carcaza y tubos (8 o más en serie pueden ser requeridos), con la Salmuera por dentro de los tubos. El Isobutano deberá permitir

una resistencia por suciedad de $0.0005 \frac{hr - ft^2 - ^\circ F}{BTU}$. La Salmuera tiene una resistencia de $0.00015 \frac{hr - ft^2 - ^\circ F}{BTU}$ con una velocidad mínima permitida de 4.5 ft / seg. (1.364 m / seg) y una máxima de 6 ft / seg (1.82 m/seg)

Las caídas de presión de diseño permitidas pueden ser 20 psi (1.4 kg/cm²) en el Isobutano y 25 psi (1.76 kg/cm²) en la Salmuera.

El intercambiador de calor puede ser construido de tubos fijos o de cabezal flotante (tubos en U no es aceptable). Los tubos pueden ser de $\frac{3}{4}$ de plg (1.905 cm.) o de 1 pulgada (2.54 cm) de diámetro exterior, 90-10 cromo-níquel, con un 12 BWG de pared.

Las dimensiones máximas de la carcaza pueden ser de 60 pulgadas (152.4 cm.) de diámetro interior y 40 ft (12.19 m.) de longitud efectiva.

La Salmuera puede considerarse que tiene las mismas propiedades del agua. Las propiedades del Isobutano son dadas enseguida y se pueden considerar constantes para el propósito presente.

Densidad ----- 31.1 lb/ft³

Calor específico ----- 0.58 Btu/lb-OF

Viscosidad ----- 0.27 lb/ft-hr

Conductividad térmica ----- 0.075 Btu/ hr-ft-OF

DISEÑO TERMICO

1.- Cálculo del Calor Transferido

$$\dot{Q} = mc(t_2 - t_1)$$

$$Q = 3805000(0.58)(205 - 95) = 24.24 \times 10^6 \text{ BTU / hr}$$

$$\overset{\circ}{Q} = MC(T_1 - T_2)$$

$$(T_1 - T_2) = \frac{Q}{MC} = \frac{24024 \times 10^6}{232,000 \times 1} = 104.5^\circ F$$

$$T_2 = T_1 - 104.5 = 230 - 104.5$$

$$T_2 = 125.5^\circ F$$

2.- Cálculo del número de pasos de carcaza y los pasos de tubos.

Cálculo de la Eficiencia Térmica

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_2} = \frac{205 - 95}{230 - 95} = \frac{110}{135} = 0.815$$

Cálculo de la Capacidad Calorífica

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{230 - 125.5}{205 - 95} = 0.95$$

Con estos valores de P y R en la Figura 2.8 se determina el factor de corrección F, igual a 0.87 y en esta figura le corresponde 4 pasos de carcaza y 8 o múltiples de 8 pasos en los tubos.

3. - Cálculo de la Diferencia Media Logarítmica de Temperatura. Se calcula para un flujo contracorriente por ser el más critico.

$$\Delta T_{cc} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$$

$$\Delta Tm_{cc} = \frac{(230 - 205) - (125.5 - 95)}{\ln\left(\frac{230 - 205}{125.5 - 95}\right)} = 27.66^{\circ}F$$

$$\Delta Tm = 27.66 \times 0.87 = 24.10^{\circ}F$$

4. - Cálculo del área máxima de los tubos. Si se usa una velocidad de 4.5 ft/ seg. y una densidad del agua de 60.6 lb/ Se tiene que

$$\dot{M} = A v p ; v = 4.5 \text{ ft seg} ; p = 60.6 \text{ lb}$$

$$A_{max} = \frac{\dot{M}}{v \rho} = \frac{232,000}{4.5 \times 3600 \times 60.6} = 0.2363 \text{ ft}^2 (0.022 \text{ m}^2)$$

5.- Cálculo del número de tubos por paso.

El área máxima de los tubos es de $A_{..} = 0.2363 \text{ ft}^2$ (0.022 m^2) Y si usamos tubos de 1 pulgada (2.54 cm) por 12 BWG. De la tabla 6.2 se obtienen $A_i = 0.4803 \text{ plg}^2$ (0.044 m^2); $d_i = 0.78 \text{ plg}$ (1.98 cm), $\Delta r = 0.109 \text{ plg}$ (0.277 cm)

$$A_{\max} = A_i N_t; N_t = \frac{A_{\max}}{A_i} = \frac{0.2363 \times 144}{0.4803} \approx 71 \text{ tubos / paso}$$

6. - Cálculo de la longitud de los tubos o de la carcaza.

Considerando la salmuera como agua y el Isobutano como un líquido orgánico ligero

$$125 \leq U_o \leq 175 \text{ de la tabla 2.1 se toma un valor de } U_o = 165 \frac{BTU}{hr \cdot ft^2 \cdot {}^\circ F} \left(936.9 \frac{W}{m^2 \cdot {}^\circ C} \right)$$

$$Q = U_o A_T \Delta T_m, A_T = \frac{Q}{U_o \Delta T_m} = \frac{24.24 \times 10^6}{165 \times 24.1} = 6095.8 \text{ ft}^2 (566.5 \text{ m}^2)$$

$$A_c = \frac{6095.8}{4} = 1524 \text{ ft}^2 / \text{Coraza} (141.6 \text{ m}^2 / \text{Carcaza})$$

$$A_0^* = F_1 \times F_2 \times F_3 \times A_0 = 1.34 \times 1.03 \times 1.09 \times 1524 = 2292.73 \text{ ft}^2 / \text{Carcaza}$$

$$A_0^* = \pi d L N_t ; L = \frac{A_0^*}{\pi d N_t} ;$$

$$L = \frac{2292.73}{\pi \left(\frac{1}{12} \right) 284} = 31 \text{ ft}$$

Longitud de los tubos o carcaza es 9.32 m

A_r' = Área requerida, calculada

F_1 = Factor de corrección por arreglo de tubos (1.34 para 1 plg en 1.25 plg triángulo equilátero), tabla 5.4.

F_2 = Factor de corrección por el número de pasos en los tubos (1.03 para dos pasos en tubos), tabla 5.5.

F_3 = Factor de corrección por tipo de haz por carcaza (1.09 para tubos fijos), tabla 5.6.

7. - Cálculo de la velocidad del agua. (v_{agua})

$$v_{agua} = \frac{M}{\rho A_0 N_t^*} = \frac{232,000}{60.6 \times 3600 \times \frac{0.4803}{144} \times \frac{284}{4}} = 4.49 \text{ ft/seg}$$

$$v_{agua} = 4.49 \text{ ft/seg} (1.37 \text{ m/seg})$$

Donde este valor es igual al supuesto en el punto 4.

8. - Cálculo del número de detectores que se tienen que colocar.

$$A_m = \ell_s \left[D_s - D_i + \left(\frac{D_i - d_0}{P} \right) (p - d_0) \right]$$

$$A_m = \ell_s \left[25 - 23.375 + \left(\frac{23.375 - 1}{1.25} \right) (1.25 - 1) \right]$$

$$A_m = 6.10 \ell_s \text{ en plg cuadradas}$$

Usamos $\ell_s = 24$ plg de espaciado del baffle

ℓ_s = Separación entre detectores

$$A_m = 6.10 \times 24 = \frac{146.4 p \lg^2}{144} = 1.017 \text{ ft}^2$$

$$v_{max} = \frac{m}{\rho A_m} = \frac{380,000}{3600 \times 31.1 \times 1.017} = 3.34 \text{ ft/seg}$$

Este valor es aceptable

9. - Cálculo de h_i

Con la velocidad igual a 4.5 ft/seg. y con una temperatura promedio del agua calculada como:

$$T_m = \frac{T_E + T_S}{2} = \frac{230 - 125.5}{2} = 177.75 \approx 178^{\circ}F \quad (81.11^{\circ}C)$$

Con estos datos en la Fig. 5.3 se obtiene un valor de $h_i = 897155 \frac{W}{m^2 - ^{\circ}C}$ y como es para un diámetro de $\frac{3}{4}$ plg (1.9 cm.) se consulta la parte superior de la fig. 25 y se obtiene un factor de corrección de 0.96 y entonces $h_i = 1580 \times 0.96 = 8612.7 \frac{W}{m^2 - ^{\circ}C}$ y con un diámetro interior de $d_i = 0.782$ plg se obtiene una

$$h_{i0} = h_i x \frac{d_i}{d_o} = 1516.8 x \frac{0.782}{1} = 1186.14 \frac{BTU}{hr \cdot ft^2 - ^{\circ}F} \left(6735.14 \frac{W}{m^2 - ^{\circ}C} \right)$$

10.- Cálculo de h_0

Con la ecuación $h_0 = J_H \frac{k}{d_o} \left(\frac{C\rho\mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_{sf}} \right)^{0.14}$ y con

$$Re = \frac{d_o \dot{m}_s}{\mu A_m} = \frac{\left(\frac{1}{12} \right) (380,000)}{0.27 x 1.017} = 115,323 \text{ y la razón } L / d_o \text{ igual a 20.5.}$$

De la Fig. 5.2 $J_H = 350$ entonces el valor de la h_0 se calcula como:

$$h_0 = 350 \left(\frac{0.075}{\frac{1}{12}} \right) (2.088)^{1/3} (1) = 403 \frac{BTU}{hr \cdot ft^2 - ^{\circ}F} \left(2288.3 \frac{W}{m^2 - ^{\circ}C} \right)$$

11. - Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

$$U_0 = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + R_{f0} + \frac{\Delta r}{k_w} + \frac{A_0}{A_w} + \left(R_{fi} + \frac{1}{hi} \right) \frac{A_0}{Ai}}$$

$$U_0 = \frac{1}{\frac{1}{403} + 0.0005 + \left(\frac{0.109}{12x23} \right) x \left(\frac{1.0}{1.0 - 0.109} \right) + \left(0.0015 + \frac{1}{1516.8} \right) \left(\frac{1.0}{0.78} \right)}$$

$$U_0 = \frac{1}{2.951x10^{-3} + 0.44324x10^{-3} + 2.741x10^{-3}}$$

$$U_0 = \frac{1}{6.1352x10^{-3}} = 163 \frac{BTU}{hr \cdot ft^2 \cdot {}^\circ F} \quad \left(925.55 \frac{W}{m^2 \cdot {}^\circ C} \right)$$

Este valor es muy cercano al que se selecciono de la tabla 2.1 en el paso 6.

12. - Caida de Presión en el lado de la Carcaza (ΔP_s)

Con la ecuación (ΔP_s) = $\frac{fG^2 D_s (N+1)}{5.22x10^{10} dis\phi}$, $lb/p\lg^2$ se puede calcular la caída de

presión en el lado de la carcaza y conociendo el número de Reynold en la Fig. 5.6 se obtiene el coeficiente de fricción de 0.00132

$$Re = \frac{d_0 \dot{m}_s}{\mu A_m} = \frac{\left(\frac{1}{12} \right) (380,000)}{0.27x1.017} = 115,323$$

Área de Flujo

$$a_s = \frac{DiC'x\ell_s}{144P_T} = \frac{23.32x0.25x24}{144x1.25}$$

de donde : $C' = P_T - d_t$; ℓ_s = Espaciado de los deflectores

$$a_s = 0.779 \text{ ft}^2$$

Cálculo de la Velocidad de la Masa

$$G_s = \frac{M}{\alpha_s} = \frac{380,000}{0.779} = 487,700 \text{ lb/hr - ft}^2$$

Gs = Velocidad de la masa

di = Diámetro interior de los tubos

f= Coeficiente de fricción

N= Número de detectores

$$N + 1 = \frac{12L}{\ell} = \frac{12 \times 31}{24}$$

Aplicando la siguiente ecuación para el cálculo de la caída de presión en el lado de la

carcasa

$$\Delta P_s = \frac{0.0032x(487,700)^2 \left(\frac{23.375}{12} \right) (15+1)}{5.22 \times 10^{16} \times \left(\frac{0.782}{12} \right) \times 1 \times 1}$$

Este cálculo corresponde a una carcasa y como son 4 se multiplica por 4.

$$\Delta P_s = 2.87 \text{ lb/plg l carcaza x 4 carcasas}$$

Cálculo de la caída total de presión

$$\Delta P_s = 11.5 \text{ lb/plg}$$

13. - Caída de Presión del lado de los Tubos

Se calcula el número de Reynolds

$$R_e = \frac{diG_t}{\mu} = \frac{\frac{0.782}{12} \times 983,090}{1.21} = 52,943.88$$

Enseguida la velocidad de la masa es calculada:

$$G_t = \frac{\dot{m}}{a_t} = \frac{232,000}{0.236} = 983,090 \frac{lb}{hr \cdot ft^2}$$

$$a_t = \frac{N_t a_t}{144 \times n} = \frac{71 \times 0.479}{144} = 0.236 \frac{ft^2}{hr}$$

$$a_t = 0.479 \frac{ft^2}{hr}$$

$\mu = 0.5 \times 242 = 1.21$; Este valor se obtuvo con las coordenadas de la tabla 5.1 y en la fig. 5.1.

Este valor del coeficiente de fricción $f = 0.00017$ se obtiene de la fig. 5.4, con el número de Reynolds y para tubos de intercambiadores.

$$\Delta P_t = \frac{f G_t^2 L n}{5.22 \times 10^{10} d S \phi_t} = \frac{0.00017 \times (983,090)^2 \times 31 \times 4}{5.22 \times 10^{10} \times \frac{0.782}{12} \times 1 \times 1}$$

$$\Delta P_t = 6 \frac{lb}{p \lg^2}$$

Este cálculo de la caída de presión es para el lado de los tubos. Entonces para la caída de presión por retorno en el lado de los tubos se calcula con la ecuación

$$\Delta P_r = \frac{4n}{S} \frac{V^2}{2g}$$

De la gráfica de la fig. 5.5 se obtiene

$$\frac{V^2}{2g} \left(\frac{62.5}{144} \right) = 0.130$$

Para la caída de presión:

$$\Delta P_r = \frac{4x2}{1} = (0.130) = 1.04 \text{ lb/plg}^2$$

La caída de presión total por coraza es la suma de la caída del lado de los tubos más la caída de presión por retorno:

$$\Delta P_t = \Delta P_t + \Delta P_r = 6 + 1.04 = 7.04 \text{ lb/plg}^2$$

Como son 4 corazas entonces la caída total en el intercambiador es:

$$\Delta P_p = 7.04 \times 4 = 28.16 \text{ lb/plg}^2$$

DISEÑO MECANICO

1.- Diseño de Carcasa o Envolvente

Las carcasas pueden ser roladas y soldadas para cuando tenemos un diámetro de carcasa de 24 pulgadas (0.60 mts) o mayor, se usa tipo tubería cuando el diámetro la carcasa es menor de 24 pulgadas (0.60 mts). Es importante la redondez por las fugas debidas a la claridad entre el deflector y la carcasa.

Dejando los casos extremos para cuando son vaciados y rectificados.

Calculado por presión interna para carcasa cilíndrica.

Datos: $P = 300 \text{ psia}$, para un material (SA-515-70) el esfuerzo obtenido de la tabla 5.7; $S = 16.6 \times 10^3 \text{ lb / plg}^2$ el diámetro de la carcasa es de 25 pulgadas y la eficiencia de la unión soldada se obtiene de la fig. 3.2.1 para soldadura simple a tope con solera de respaldo la cual permitirá en el interior del recipiente y radiografiada al 100% ($E = 0.90$)

Calcular el mínimo espesor, primero por esfuerzo circunferencias.

$$P < 0.385 SE \Rightarrow P < 0.385 \times 16600 \times 0.9 = 5752$$

$$300 < 5,752$$

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} = \frac{300 \times 12.5}{16600 \times 0.9 - 0.6 \times 300} = 0.254 \text{ plg} \quad (6.45 \text{ mm})$$

y enseguida se calcula el espesor por esfuerzo longitudinal

$$P < 1.25 \text{ SE}; P < 1.25 \times 16600 \times 0.9 = 18.675$$

$$300 < 18675$$

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P} = \frac{300 \times 12.5}{2 \times 16600 \times 0.9 + 0.4 \times 300} = 0.125 \text{ plg} \quad (3.17 \text{ mm})$$

Se tomará como base el espesor de $t = 6.45 \text{ mm}$, pero comercialmente el mínimo espesor recomendado por TEMA para intercambiadores tipo R, según tabla 3.1 deberá ser un espesor de $3/8 \text{ plg}$ o 0.375 p/g igual a 9.525 mm .

Cálculo por presión externa para carcaza cilíndrica para cilindros con $D_o / t \geq 10$

$$D_o = Di + 2t = 25 + 2\left(\frac{3}{8}\right) = 25 \frac{3}{4} = 25.75 \text{ plg} \quad (65.4 \text{ cm})$$

$$\frac{D_o}{t} = \frac{25.75}{\frac{3}{8}} = \frac{25.75}{0.375} = 68.67 \geq 10$$

Para una longitud de carcaza de 24ft se calcula con la razón $\frac{L}{D_o} = \frac{24 \times 12}{25.75} = 11.18$ y con la razón de $\frac{D_o}{t} = 68.67$ en la fig. 3.4 se consulta el factor $A = 0.0011$, $B = 14,000$ y $E = 290 \times 10^6$, los valores de B y E se obtienen de la fig. 3.5 y con una temperatura

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} = \frac{4 \times 14000}{3(68.67)} = 271.83 \text{ lb/plg}^2$$

2.- Diseño de Tapas.

El diseño de las tapas se hizo de acuerdo a UG-32 y UG-33 del ASME, sección VIII, división I.

Cálculo de la tapa por presión interna.

Se selecciono una tapa semiesférica y se calculo el espesor mínimo por presión interna, con la ecuación (3.1 l)

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} = \frac{300 \times 12.5}{2 \times 16600 \times 0.9 - 0.2 \times 300} = 0.1257 \text{ plg} \approx \frac{1}{8} \text{ plg}$$

En el diseño del espesor mínimo de las tapas por presión externa se sigue el procedimiento siguiente:

a) Se calcula A como

$$A = \frac{0.125}{R_0/t} \quad \text{Siendo } R_0 \text{ el diámetro exterior de la caraza.}$$

$$R_0 = R + t_s = 12.5 + 0.375 = 12.875 \text{ plg} \text{ entonces;}$$

$$A = \frac{0.125}{\left(\frac{12.875}{0.375} \right)} = 3.64 \times 10^{-3} = 0.00364$$

b) En la fig. 3.5 se determina el valor del factor B, considerando una temperatura mayor de 300°F y con un valor de A = 0.00364 se obtiene que B = 17000 y E = 29.0 × 10⁶

c) Con los valores anteriores se calcula la presión externa máxima permisible de la siguiente ecuación:

$$Pa = \frac{B}{(R_o/t)} = \frac{17000}{\left(\frac{12.875}{0.375}\right)} = 495 \text{ lb / plg}^2$$

d) Se compara la presión externa máxima con la presión exterior del diseño y debe resultar $Pa > P$, lo cual si resulta $495 \text{ lb / plg}^2 > 14.7 \text{ lb / plg}^2$

3. - Diseño de Espejos.

El diseño se hace bajo las normas del TEMA que recomienda que en ningún caso los espesores de los espejos deben ser al menos del diámetro exterior de los tubos para intercambiadores tipo "R":

El cálculo del espesor se puede hacer por flexión a por corte, pero si se cumple que

$$\frac{P}{S} < 1.6 \left(1 - \frac{1}{1.25}\right)^2$$

$$\frac{P}{S} = \frac{300}{16600} < 0.064$$

$$0.01807 < 0.064$$

Con esta condición no se tomará el esfuerzo cortante.

El cálculo del esfuerzo por flexión se hace con la siguiente ecuación

$$t = \frac{FG}{2} \sqrt{\frac{P}{nS}}$$

$\frac{tS}{G} = \frac{\frac{3}{8} p \lg}{25 \sqrt[3]{\frac{8}{3} p \lg}} = \frac{0.035}{25.375} = 0.0148$, con este valor y en la Figura 3.18-1 se obtiene el valor de F igual a 1.25.

El valor de n se calcula para el arreglo triangular con

$$n = 1 - \frac{0.907}{\left(\frac{p}{d}\right)^2} = 1 - \frac{0.907}{\left(\frac{1.25}{1}\right)^2} = 0.4195$$

Entonces

$$t = \frac{1.25 \times 25.35}{3} \sqrt{\frac{0.0187}{0.4195}} = 2.20 \text{ plg}$$

4. - Selección de Tubos.

El TEMA indica que los tubos que se usan por equipo de transferencia de calor deben ser calibrados e identificados por la nomenclatura BWG en la Tabla 3.5 y se seleccionaron tubos de 1 plg de diámetro exterior con una aleación de 90 - 10 Cromo Níquel 12 BWG.

5. - Diseño de Deflectores.

Los espesores de los detectores recomendados por el TEMA en la Tabla 3.9 se puede obtener en función del diámetro de la carcasa, también recomienda que el espesor mínimo entre detectores no debe ser menor de $l/5$ del diámetro interior de la carcasa.

El espacio mínimo es igual a $1/5(25)$ pulgada, de la Tabla 3.9 se obtiene el espesor de la placa que es igual a $3/16$ pulgada y con un espaciamiento de detectores de 24 pulgadas y aplicando la ecuación:

$$N = \frac{31f}{24} - 1 = 15 \text{ deflectores}$$

$$\frac{31}{24} = \frac{12}{12}$$

| | |
|-------|--------|
| 1.5 | 15.0 |
| 2.0 | 19.0 |
| 2.5 | 24.0 |
| 3.0 | 27.0 |
| 3.5 | 30.0 |
| 4.0 | 34.0 |
| 4.5 | 38.0 |
| 5.0 | 42.0 |
| 5.5 | 47.0 |
| 6.0 | 51.0 |
| 6.5 | 55.0 |
| 7.0 | 59.0 |
| 7.5 | 63.0 |
| 8.0 | 67.0 |
| 8.5 | 71.0 |
| 9.0 | 75.0 |
| 9.5 | 79.0 |
| 10.0 | 83.0 |
| 10.5 | 87.0 |
| 11.0 | 91.0 |
| 11.5 | 95.0 |
| 12.0 | 99.0 |
| 12.5 | 103.0 |
| 13.0 | 107.0 |
| 13.5 | 111.0 |
| 14.0 | 115.0 |
| 14.5 | 119.0 |
| 15.0 | 123.0 |
| 15.5 | 127.0 |
| 16.0 | 131.0 |
| 16.5 | 135.0 |
| 17.0 | 139.0 |
| 17.5 | 143.0 |
| 18.0 | 147.0 |
| 18.5 | 151.0 |
| 19.0 | 155.0 |
| 19.5 | 159.0 |
| 20.0 | 163.0 |
| 20.5 | 167.0 |
| 21.0 | 171.0 |
| 21.5 | 175.0 |
| 22.0 | 179.0 |
| 22.5 | 183.0 |
| 23.0 | 187.0 |
| 23.5 | 191.0 |
| 24.0 | 195.0 |
| 24.5 | 199.0 |
| 25.0 | 203.0 |
| 25.5 | 207.0 |
| 26.0 | 211.0 |
| 26.5 | 215.0 |
| 27.0 | 219.0 |
| 27.5 | 223.0 |
| 28.0 | 227.0 |
| 28.5 | 231.0 |
| 29.0 | 235.0 |
| 29.5 | 239.0 |
| 30.0 | 243.0 |
| 30.5 | 247.0 |
| 31.0 | 251.0 |
| 31.5 | 255.0 |
| 32.0 | 259.0 |
| 32.5 | 263.0 |
| 33.0 | 267.0 |
| 33.5 | 271.0 |
| 34.0 | 275.0 |
| 34.5 | 279.0 |
| 35.0 | 283.0 |
| 35.5 | 287.0 |
| 36.0 | 291.0 |
| 36.5 | 295.0 |
| 37.0 | 299.0 |
| 37.5 | 303.0 |
| 38.0 | 307.0 |
| 38.5 | 311.0 |
| 39.0 | 315.0 |
| 39.5 | 319.0 |
| 40.0 | 323.0 |
| 40.5 | 327.0 |
| 41.0 | 331.0 |
| 41.5 | 335.0 |
| 42.0 | 339.0 |
| 42.5 | 343.0 |
| 43.0 | 347.0 |
| 43.5 | 351.0 |
| 44.0 | 355.0 |
| 44.5 | 359.0 |
| 45.0 | 363.0 |
| 45.5 | 367.0 |
| 46.0 | 371.0 |
| 46.5 | 375.0 |
| 47.0 | 379.0 |
| 47.5 | 383.0 |
| 48.0 | 387.0 |
| 48.5 | 391.0 |
| 49.0 | 395.0 |
| 49.5 | 399.0 |
| 50.0 | 403.0 |
| 50.5 | 407.0 |
| 51.0 | 411.0 |
| 51.5 | 415.0 |
| 52.0 | 419.0 |
| 52.5 | 423.0 |
| 53.0 | 427.0 |
| 53.5 | 431.0 |
| 54.0 | 435.0 |
| 54.5 | 439.0 |
| 55.0 | 443.0 |
| 55.5 | 447.0 |
| 56.0 | 451.0 |
| 56.5 | 455.0 |
| 57.0 | 459.0 |
| 57.5 | 463.0 |
| 58.0 | 467.0 |
| 58.5 | 471.0 |
| 59.0 | 475.0 |
| 59.5 | 479.0 |
| 60.0 | 483.0 |
| 60.5 | 487.0 |
| 61.0 | 491.0 |
| 61.5 | 495.0 |
| 62.0 | 499.0 |
| 62.5 | 503.0 |
| 63.0 | 507.0 |
| 63.5 | 511.0 |
| 64.0 | 515.0 |
| 64.5 | 519.0 |
| 65.0 | 523.0 |
| 65.5 | 527.0 |
| 66.0 | 531.0 |
| 66.5 | 535.0 |
| 67.0 | 539.0 |
| 67.5 | 543.0 |
| 68.0 | 547.0 |
| 68.5 | 551.0 |
| 69.0 | 555.0 |
| 69.5 | 559.0 |
| 70.0 | 563.0 |
| 70.5 | 567.0 |
| 71.0 | 571.0 |
| 71.5 | 575.0 |
| 72.0 | 579.0 |
| 72.5 | 583.0 |
| 73.0 | 587.0 |
| 73.5 | 591.0 |
| 74.0 | 595.0 |
| 74.5 | 599.0 |
| 75.0 | 603.0 |
| 75.5 | 607.0 |
| 76.0 | 611.0 |
| 76.5 | 615.0 |
| 77.0 | 619.0 |
| 77.5 | 623.0 |
| 78.0 | 627.0 |
| 78.5 | 631.0 |
| 79.0 | 635.0 |
| 79.5 | 639.0 |
| 80.0 | 643.0 |
| 80.5 | 647.0 |
| 81.0 | 651.0 |
| 81.5 | 655.0 |
| 82.0 | 659.0 |
| 82.5 | 663.0 |
| 83.0 | 667.0 |
| 83.5 | 671.0 |
| 84.0 | 675.0 |
| 84.5 | 679.0 |
| 85.0 | 683.0 |
| 85.5 | 687.0 |
| 86.0 | 691.0 |
| 86.5 | 695.0 |
| 87.0 | 699.0 |
| 87.5 | 703.0 |
| 88.0 | 707.0 |
| 88.5 | 711.0 |
| 89.0 | 715.0 |
| 89.5 | 719.0 |
| 90.0 | 723.0 |
| 90.5 | 727.0 |
| 91.0 | 731.0 |
| 91.5 | 735.0 |
| 92.0 | 739.0 |
| 92.5 | 743.0 |
| 93.0 | 747.0 |
| 93.5 | 751.0 |
| 94.0 | 755.0 |
| 94.5 | 759.0 |
| 95.0 | 763.0 |
| 95.5 | 767.0 |
| 96.0 | 771.0 |
| 96.5 | 775.0 |
| 97.0 | 779.0 |
| 97.5 | 783.0 |
| 98.0 | 787.0 |
| 98.5 | 791.0 |
| 99.0 | 795.0 |
| 99.5 | 799.0 |
| 100.0 | 803.0 |
| 100.5 | 807.0 |
| 101.0 | 811.0 |
| 101.5 | 815.0 |
| 102.0 | 819.0 |
| 102.5 | 823.0 |
| 103.0 | 827.0 |
| 103.5 | 831.0 |
| 104.0 | 835.0 |
| 104.5 | 839.0 |
| 105.0 | 843.0 |
| 105.5 | 847.0 |
| 106.0 | 851.0 |
| 106.5 | 855.0 |
| 107.0 | 859.0 |
| 107.5 | 863.0 |
| 108.0 | 867.0 |
| 108.5 | 871.0 |
| 109.0 | 875.0 |
| 109.5 | 879.0 |
| 110.0 | 883.0 |
| 110.5 | 887.0 |
| 111.0 | 891.0 |
| 111.5 | 895.0 |
| 112.0 | 899.0 |
| 112.5 | 903.0 |
| 113.0 | 907.0 |
| 113.5 | 911.0 |
| 114.0 | 915.0 |
| 114.5 | 919.0 |
| 115.0 | 923.0 |
| 115.5 | 927.0 |
| 116.0 | 931.0 |
| 116.5 | 935.0 |
| 117.0 | 939.0 |
| 117.5 | 943.0 |
| 118.0 | 947.0 |
| 118.5 | 951.0 |
| 119.0 | 955.0 |
| 119.5 | 959.0 |
| 120.0 | 963.0 |
| 120.5 | 967.0 |
| 121.0 | 971.0 |
| 121.5 | 975.0 |
| 122.0 | 979.0 |
| 122.5 | 983.0 |
| 123.0 | 987.0 |
| 123.5 | 991.0 |
| 124.0 | 995.0 |
| 124.5 | 999.0 |
| 125.0 | 1003.0 |
| 125.5 | 1007.0 |
| 126.0 | 1011.0 |
| 126.5 | 1015.0 |
| 127.0 | 1019.0 |
| 127.5 | 1023.0 |
| 128.0 | 1027.0 |
| 128.5 | 1031.0 |
| 129.0 | 1035.0 |
| 129.5 | 1039.0 |
| 130.0 | 1043.0 |
| 130.5 | 1047.0 |
| 131.0 | 1051.0 |
| 131.5 | 1055.0 |
| 132.0 | 1059.0 |
| 132.5 | 1063.0 |
| 133.0 | 1067.0 |
| 133.5 | 1071.0 |
| 134.0 | 1075.0 |
| 134.5 | 1079.0 |
| 135.0 | 1083.0 |
| 135.5 | 1087.0 |
| 136.0 | 1091.0 |
| 136.5 | 1095.0 |
| 137.0 | 1099.0 |
| 137.5 | 1103.0 |
| 138.0 | 1107.0 |
| 138.5 | 1111.0 |
| 139.0 | 1115.0 |
| 139.5 | 1119.0 |
| 140.0 | 1123.0 |
| 140.5 | 1127.0 |
| 141.0 | 1131.0 |
| 141.5 | 1135.0 |
| 142.0 | 1139.0 |
| 142.5 | 1143.0 |
| 143.0 | 1147.0 |
| 143.5 | 1151.0 |
| 144.0 | 1155.0 |
| 144.5 | 1159.0 |
| 145.0 | 1163.0 |
| 145.5 | 1167.0 |
| 146.0 | 1171.0 |
| 146.5 | 1175.0 |
| 147.0 | 1179.0 |
| 147.5 | 1183.0 |
| 148.0 | 1187.0 |
| 148.5 | 1191.0 |
| 149.0 | 1195.0 |
| 149.5 | 1199.0 |
| 150.0 | 1203.0 |
| 150.5 | 1207.0 |
| 151.0 | 1211.0 |
| 151.5 | 1215.0 |
| 152.0 | 1219.0 |
| 152.5 | 1223.0 |
| 153.0 | 1227.0 |
| 153.5 | 1231.0 |
| 154.0 | 1235.0 |
| 154.5 | 1239.0 |
| 155.0 | 1243.0 |
| 155.5 | 1247.0 |
| 156.0 | 1251.0 |
| 156.5 | 1255.0 |
| 157.0 | 1259.0 |
| 157.5 | 1263.0 |
| 158.0 | 1267.0 |
| 158.5 | 1271.0 |
| 159.0 | 1275.0 |
| 159.5 | 1279.0 |
| 160.0 | 1283.0 |
| 160.5 | 1287.0 |
| 161.0 | 1291.0 |
| 161.5 | 1295.0 |
| 162.0 | 1299.0 |
| 162.5 | 1303.0 |
| 163.0 | 1307.0 |
| 163.5 | 1311.0 |
| 164.0 | 1315.0 |
| 164.5 | 1319.0 |
| 165.0 | 1323.0 |
| 165.5 | 1327.0 |
| 166.0 | 1331.0 |
| 166.5 | 1335.0 |
| 167.0 | 1339.0 |
| 167.5 | 1343.0 |
| 168.0 | 1347.0 |
| 168.5 | 1351.0 |
| 169.0 | 1355.0 |
| 169.5 | 1359.0 |
| 170.0 | 1363.0 |
| 170.5 | 1367.0 |
| 171.0 | 1371.0 |
| 171.5 | 1375.0 |
| 172.0 | 1379.0 |
| 172.5 | 1383.0 |
| 173.0 | 1387.0 |
| 173.5 | 1391.0 |
| 174.0 | 1395.0 |
| 174.5 | 1399.0 |
| 175.0 | 1403.0 |
| 175.5 | 1407.0 |
| 176.0 | 1411.0 |
| 176.5 | 1415.0 |
| 177.0 | 1419.0 |
| 177.5 | 1423.0 |
| 178.0 | 1427.0 |
| 178.5 | 1431.0 |
| 179.0 | 1435.0 |
| 179.5 | 1439.0 |
| 180.0 | 1443.0 |
| 180.5 | 1447.0 |
| 181.0 | 1451.0 |
| 181.5 | 1455.0 |
| 182.0 | 1459.0 |
| 182.5 | 1463.0 |
| 183.0 | 1467.0 |
| 183.5 | 1471.0 |
| 184.0 | 1475.0 |
| 184.5 | 1479.0 |
| 185.0 | 1483.0 |
| 185.5 | 1487.0 |
| 186.0 | 1491.0 |
| 186.5 | 1495.0 |
| 187.0 | 1499.0 |
| 187.5 | 1503.0 |
| 188.0 | 1507.0 |
| 188.5 | 1511.0 |
| 189.0 | 1515.0 |
| 189.5 | 1519.0 |
| 190.0 | 1523.0 |
| 190.5 | 1527.0 |
| 191.0 | 1531.0 |
| 191.5 | 1535.0 |
| 192.0 | 1539.0 |
| 192.5 | 1543.0 |
| 193.0 | 1547.0 |
| 193.5 | 1551.0 |
| 194.0 | 1555.0 |
| 194.5 | 1559.0 |
| 195.0 | 1563.0 |
| 195.5 | 1567.0 |
| 196.0 | 1571.0 |
| 196.5 | 1575.0 |
| 197.0 | 1579.0 |
| 197.5 | 1583.0 |
| 198.0 | 1587.0 |
| 198.5 | 1591.0 |
| 199.0 | 1595.0 |
| 199.5 | 1599.0 |
| 200.0 | 1603.0 |
| 200.5 | 1607.0 |
| 201.0 | 1611.0 |
| 201.5 | 1615.0 |
| 202.0 | 1619.0 |
| 202.5 | 1623.0 |
| 203.0 | 1627.0 |
| 203.5 | 1631.0 |
| 204.0 | 1635.0 |
| 204.5 | 1639.0 |
| 205.0 | 1643.0 |
| 205.5 | 1647.0 |
| 206.0 | 1651.0 |
| 206.5 | 1655.0 |
| 207.0 | 1659.0 |
| 207.5 | 1663.0 |
| 208.0 | 1667.0 |
| 208.5 | 1671.0 |
| 209.0 | 1675.0 |
| 209.5 | 1679.0 |
| 210.0 | 1683.0 |
| 210.5 | 1687.0 |
| 211.0 | 1691.0 |
| 211.5 | 1695.0 |
| 212.0 | 1699.0 |
| 212.5 | 1703.0 |
| 213.0 | 1707.0 |
| 213.5 | 1711.0 |
| 214.0 | 1715.0 |
| 214.5 | 1719.0 |
| 215.0 | 1723.0 |
| 215.5 | 1727.0 |
| 216.0 | 1731.0 |
| 216.5 | 1735.0 |
| 217.0 | 1739.0 |
| 217.5 | 1743.0 |
| 218.0 | 1747.0 |
| 218.5 | 1751.0 |
| 219.0 | 1755.0 |
| 219.5 | 1759.0 |
| 220.0 | 1763.0 |
| 220.5 | 1767.0 |
| 221.0 | 1771.0 |
| 221.5 | 1775.0 |
| 222.0 | 1779.0 |
| 222.5 | 1783.0 |
| 223.0 | 1787.0 |
| 223.5 | 1791.0 |
| 224.0 | 1795.0 |
| 224.5 | 1799.0 |
| 225.0 | 1803.0 |
| 225.5 | 1807.0 |
| 226.0 | 1811.0 |
| 226.5 | 1815.0 |
| 227.0 | 1819.0 |
| 227.5 | 1823.0 |
| 228.0 | 1827. |

Tabla 5. 1. Viscosidades de líquidos,

Para usarse como Coordenadas con la Figura 5. 1.

| LÍQUIDO | x | y |
|-------------------------|------|------|
| Acetaldehido | 15.2 | 4.8 |
| Acetato de Amilo | 11.8 | 12.5 |
| Acetato de Butilo | 12.3 | 11.0 |
| Acetato de Etilo | 13.7 | 9.1 |
| Acetato de Metilo | 14.2 | 8.2 |
| Acetato de Vinilo | 14.0 | 8.8 |
| Acetona 100% | 14.5 | 7.2 |
| Acetona 35% | 7.9 | 15.0 |
| Agua | 10.2 | 13.0 |
| Ácido Acético 100% | 12.1 | 14.2 |
| Ácido Acético 75% | 9.5 | 17.0 |
| Ácido Butíruco | 12.1 | 15.3 |
| Ácido Clorosulfónico | 11.2 | 18.1 |
| Ácido Fórmico | 10.7 | 14.4 |
| Ácido Isobutírico | 12.2 | 13.8 |
| Ácido Nítrico 95% | 10.8 | 17.0 |
| Ácido Nítrico 60% | 12.8 | 13.8 |
| Ácido Propiónico | 7.2 | 27.4 |
| Ácido Sulfúrico 1 1 O% | 7.0 | 24.8 |
| Ácido Sulfúrico 98% | 10.2 | 21.3 |
| Ácido Sulfúrico 60% | 10.2 | 14.3 |
| Alcohol Alílico | 7.5 | 18.4 |
| Alcohol Butílico | 8.6 | 17.2 |
| Alcohol Etilico 1 00% | 10.5 | 13.8 |
| Alcohol Etilico 95% | 9.8 | 14.3 |
| Alcohol Etilico 40% | 6.5 | 16.6 |
| Ácido Clorhídrico 31.5% | 13.0 | 16.6 |
| Alcohol Isobutílico | 7.1 | 18.0 |
| Alcohol Isopropílico | 8.2 | 16.0 |
| Alcohol Octílico | 6.2 | 21.1 |
| Alcohol Propílico | 9.1 | 16.5 |
| Amoniaco 100% | 12.6 | 2.0 |
| Amoniaco 26% | 10.1 | 13.9 |
| Anhídrido Acético | 12.7 | 12.8 |
| Analina | 8.1 | 18.7 |
| Anisol | 12.3 | 13.5 |
| Benceno | 12.5 | 10.9 |
| Bióxido de Azufre | 15.2 | 7.1 |
| Bióxido de Carbono | 11.6 | 0.3 |
| Bisulfuro de Carbono | 16.1 | 7.5 |

Tabla 5.1. Continuación.

| LÍQUIDO | x | y |
|------------------------|----------|----------|
| Bromo | 14.2 | 13.2 |
| Bromotolueno | 20.0 | 15.9 |
| Bromuro de Etilo | 14.5 | 5.1 |
| Bromuro de Propilo | 14.5 | 9.6 |
| n-Butano | 15.3 | 3.3 |
| Ciclohexanol | 2.9 | 24.3 |
| Clorobenceno | 12.3 | 12.4 |
| Cloroformo | 14.4 | 10.2 |
| Clorotolueno, orto | 13.0 | 13.3 |
| Clorotolueno, meta | 13.3 | 12.5 |
| Clorotolueno, para | 13.3 | 12.5 |
| Cloruro de Etilo | 14.8 | 6.0 |
| Cloruro de Metilo | 15.0 | 3.8 |
| Cloruro de Propilo | 14.4 | 7.5 |
| Cloruro de Sulfurilo | 15.2 | 12.4 |
| Cloruro Estánico | 13.5 | 12.8 |
| Cresol, meta | 2.5 | 20.8 |
| Dibrometano | 12.7 | 15.8 |
| Dicloroetano | 13.2 | 12.2 |
| Diclorometano | 14.6 | 8.9 |
| Difenilo | 12.0 | 18.3 |
| Eter Etílico | 14.5 | 5.3 |
| Etilbenceno | 13.2 | 11.5 |
| Etilenglicol | 6.0 | 23.6 |
| Fenol | 6.9 | 20.8 |
| Formiato de Etilo | 14.2 | 8.4 |
| Freon 11 | 14.4 | 9.0 |
| Freon 12 | 16.8 | 5.6 |
| Freon 21 | 15.7 | 7.5 |
| Freon 22 | 17.2 | 4.7 |
| Feon 113 | 12.5 | 11.4 |
| Freon 114 | 14.6 | 8.3 |
| Glicerina 100% | 2.0 | 30.0 |
| Glicerina 50% | 6.9 | 19.6 |
| Heptano | 14.1 | 8.4 |
| Hexano | 14.7 | 7.0 |
| Hidróxido de Sodio 50% | 3.2 | 25.8 |
| Yoduro de Etilo | 14.7 | 10.3 |
| Yoduro de Propilo | 14.1 | 11.6 |
| Isobutano | 14.5 | 3.7 |
| Mercurio | 18.4 | 16.4 |

Tabla 5.1. Continuación.

| LÍQUIDO | x | y |
|--------------------------------|----------|----------|
| Metanol 100% | 12.4 | 10.5 |
| Metanol 90% | 12.3 | 11.8 |
| Metanol 40% | 7.8 | 15.5 |
| Metiletilcetona | 13.9 | 8.6 |
| Naftaleno | 7.9 | 18.1 |
| Nitrobenceno | 10.6 | 16.2 |
| Nitrotolueno | 11.0 | 17.0 |
| Octano | 13.7 | 10.0 |
| Oxalato de Dietilo | 11.0 | 16.4 |
| Oxalato de Dimetilo | 12.3 | 15.8 |
| Oxalato de Dipropilo | 10.3 | 17.7 |
| Pentacloroetano | 10.9 | 17.3 |
| Pentano | 14.9 | 5.2 |
| Propano | 15.3 | 1.0 |
| Salmuera CaCl ₂ 25% | 6.6 | 15.9 |
| Salmuera NaCl 25% | 10.2 | 16.6 |
| Sodio | 16.4 | 13.9 |
| Tetracloroetano | 11.9 | 15.7 |
| Tetracloroetileno | 14.2 | 12.7 |
| Tetracloruro de Carbono | 12.7 | 13.1 |
| Tetracloruro de Titanio | 14.4 | 12.3 |
| Tribromuro de Fósforo | 13.8 | 16.7 |
| Tricloruro de Arsénico | 13.9 | 14.5 |
| Tricloruro de Fósforo | 16.2 | 10.9 |
| Tricloroetileno | 14.8 | 10.5 |
| Tolueno | 13.7 | 10.4 |
| Turpentina | 11.5 | 14.9 |
| Xileno, orto | 13.5 | 12.1 |
| Xileno, meta | 13.9 | 12.1 |
| Xileno, para | 13.9 | 10.9 |

Tabla 5.2 Datos de Tubos para Intercambiadores de Calor.

| Tubos DE, plg. | BWG | Espesor de la pared, | DI, plg | Área de flujo de tubo, plg ² | Superficie por Ft lin. ft ² Exterior Interior | Peso por pie lineal, lb, de acero |
|----------------------|-------|----------------------------|---------|---|---|---|
| $\frac{1}{2}$ | 12 | 0.109 | 0.282 | 0.625 | 0.1309 | 0.0748 |
| | 14 | 0.083 | 0.334 | 0.0876 | | 0.0874 |
| | 16 | 0.065 | 0.370 | 0.1076 | | 0.0969 |
| | 18 | 0.049 | 0.402 | 0.127 | | 0.1052 |
| | 20 | 0.035 | 0.430 | 0.145 | 0.1963 | 0.1125 |
| | 20 | | | | | 0.190 |
| | 24 | 0.134 | 0.482 | 0.182 | | 0.1263 |
| | 10 | 0.120 | 0.510 | 0.204 | | 0.1335 |
| | 11 | 0.109 | 0.532 | 0.223 | | 0.1393 |
| | 12 | 0.095 | 0.560 | 0.247 | | 0.1466 |
| | 13 | 0.083 | 0.584 | 0.268 | | 0.1529 |
| | 14 | 0.072 | 0.606 | 0.289 | | 0.1587 |
| | 15 | 0.065 | 0.620 | 0.302 | | 0.1623 |
| | 16 | 0.058 | 0.634 | 0.314 | | 0.1660 |
| | 17 | 0.049 | 0.652 | 0.334 | | 0.1707 |
| | 18 | | | | | 0.401 |
| 1 | 8 | 0.165 | 0.670 | 0.355 | 0.2618 | 0.1754 |
| | 9 | 0.148 | 0.704 | 0.389 | | 0.1843 |
| | 10 | 0.134 | 0.732 | 0.421 | | 0.1916 |
| | 11 | 0.120 | 0.760 | 0.455 | | 0.1990 |
| | 12 | 0.109 | 0.7823 | 0.479 | | 0.2048 |
| | 13 | 0.095 | 0.810 | 0.515 | | 0.2121 |
| | 14 | 0.083 | 0.834 | 0.546 | | 0.2183 |
| | 15 | 0.072 | 0.856 | 0.576 | | 0.2241 |
| | 16 | 0.065 | 0.870 | 0.954 | | 0.2277 |
| | 17 | 0.058 | 0.884 | 0.613 | | 0.2314 |
| | 18 | 0.049 | 0.902 | 0.639 | | 0.2361 |
| | 1 1/4 | 8 | 0.165 | 0.920 | 0.3271 | 0.2409 |
| | 9 | 0.148 | 0.954 | 0.714 | | 0.2498 |
| | 10 | 0.134 | 0.982 | 0.757 | | 0.2572 |
| | 11 | 0.120 | 1.01 | 0.800 | | 0.2644 |
| | 12 | 0.109 | 1.03 | 0.836 | | 0.2701 |
| | 13 | 0.095 | 1.06 | 0.884 | | 0.2775 |
| | 14 | 0.083 | 1.08 | 0.923 | | 0.2839 |
| | 15 | 0.072 | 1.11 | 0.960 | | 0.2896 |
| | 16 | 0.065 | 1.12 | 0.985 | | 0.2932 |
| | 17 | 0.058 | 1.13 | 1.01 | | 0.2969 |
| | 18 | 0.049 | 1.15 | 1.04 | | 0.3015 |
| $1\frac{1}{2}$ | 8 | 0.165 | 1.17 | 1.175 | 0.3925 | 0.3063 |
| | 9 | 0.148 | 1.20 | 1.14 | | 0.3152 |
| | 10 | 0.134 | 1.23 | 1.19 | | 0.3225 |
| | 11 | 0.120 | 1.26 | 1.25 | | 0.3299 |
| | 12 | 0.109 | 1.28 | 1.29 | | 0.3356 |
| | 13 | 0.095 | 1.31 | 1.35 | | 0.3430 |
| | 14 | 0.083 | 1.33 | 1.40 | | 0.3492 |
| | 15 | 0.072 | 1.36 | 1.44 | | 0.3555 |
| | 16 | 0.065 | 1.37 | 1.47 | | 0.3587 |
| | 17 | 0.058 | 1.38 | 1.50 | | 0.3623 |
| | 18 | 0.049 | 1.40 | 1.54 | | 0.3670 |
| | | | | | | 0.978 |
| | | | | | | 0.831 |

Tabla 5.3 Conteo de Tubos.

| Diámetro Interior de Carcasa D_i , plg | Diámetro Exterior del Haz de Tubos D_e , plg | Diámetro Exterior del Tubo d_o , plg | Paso y Areglo de Tubos P , plg | Número de pasos en los tubos | | | | |
|---|---|---|---|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | | | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 8.071 | 6.821 | $\frac{3}{4}$ | 15/16 Δ | 38 | 32 | 26 | 24 | 18 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 \diamond \square | 32 | 26 | 20 | 20 | |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 Δ | 37 | 30 | 24 | 24 | |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ \diamond \square | 21 | 16 | 16 | 14 | |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ Δ | 22 | 18 | 16 | 14 | |
| | | | | | | | | |
| 10.02 | 8.77 | $\frac{3}{4}$ | 15/16 Δ | 62 | 56 | 47 | 42 | 36 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 \diamond \square | 52 | 52 | 40 | 36 | |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 Δ | 61 | 52 | 48 | 48 | |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ \diamond \square | 32 | 32 | 26 | 24 | |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ Δ | 37 | 32 | 28 | 28 | |
| | | | | | | | | |
| 12 | 10 $\frac{3}{4}$ | $\frac{3}{4}$ | 15/16 Δ | 109 | 98 | 86 | 82 | |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 \diamond \square | 80 | 72 | 68 | 68 | 60 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 Δ | 90 | 84 | 70 | 70 | 68 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ \diamond \square | 48 | 44 | 38 | 38 | 36 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ Δ | 57 | 52 | 42 | 42 | 40 |
| | | | | | | | | |
| 13 $\frac{1}{4}$ | 12 | $\frac{3}{4}$ | 15/16 Δ | 127 | 114 | 96 | 90 | 86 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 \diamond \square | 95 | 90 | 81 | 77 | 70 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 Δ | 110 | 101 | 90 | 88 | 74 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ \diamond \square | 60 | 56 | 51 | 46 | 44 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ Δ | 67 | 63 | 56 | 54 | 50 |
| | | | | | | | | |
| 15 $\frac{1}{4}$ | 14 | $\frac{3}{4}$ | 15/16 Δ | 170 | 160 | 140 | 136 | 128 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 \diamond \square | 138 | 132 | 116 | 112 | 108 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 Δ | 163 | 152 | 136 | 133 | 110 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ \diamond \square | 88 | 82 | 75 | 70 | 64 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ Δ | 96 | 92 | 86 | 84 | 72 |
| | | | | | | | | |
| 17 $\frac{1}{4}$ | 16 | $\frac{3}{4}$ | 15/16 Δ | 239 | 224 | 194 | 188 | 178 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 \diamond \square | 188 | 178 | 168 | 164 | 142 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 Δ | 211 | 201 | 181 | 176 | 166 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ \diamond \square | 112 | 110 | 102 | 98 | 82 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ Δ | 130 | 124 | 116 | 110 | 94 |
| | | | | | | | | |
| 19 $\frac{1}{4}$ | 18 | $\frac{3}{4}$ | 15/16 Δ | 301 | 282 | 252 | 244 | 234 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 \diamond \square | 236 | 224 | 216 | 208 | 188 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 Δ | 273 | 256 | 242 | 236 | 210 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ \diamond \square | 148 | 142 | 136 | 129 | 116 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ Δ | 172 | 162 | 152 | 148 | 128 |
| | | | | | | | | |
| 21 | 19 $\frac{1}{2}$ | $\frac{3}{4}$ | 15/16 Δ | 361 | 342 | 314 | 306 | 290 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 \diamond \square | 276 | 264 | 246 | 240 | 234 |
| | | $\frac{3}{4}$ | 1 Δ | 318 | 308 | 279 | 269 | 260 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ \diamond \square | 170 | 168 | 157 | 150 | 148 |
| | | 1 | 1 $\frac{1}{4}$ Δ | 199 | 188 | 170 | 164 | 160 |
| | | | | | | | | |

Tabla 5.3 Continuación.

| Diámetro Interior de Carcaza Di, plg | Diámetro Exterior del Haz de Tubos De, plg | Diámetro Exterior del Tubo d, plg | Paso y Arreglo de Tubos P, plg | Número de pasos en los tubos | | | | |
|---|---|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------|------|------|------|
| | | | | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 23 1/4 | 21 1/2 | 3/4 | 15/16 △ | 442 | 420 | 386 | 378 | 364 |
| | | | 1 ◇ □ | 341 | 321 | 308 | 296 | 292 |
| | | | 1 △ | 381 | 369 | 349 | 326 | 328 |
| | | 1 | 1 1/4 ◇ □ | 210 | 199 | 197 | 186 | 184 |
| | | | 1 1/4 △ | 247 | 230 | 216 | 208 | 202 |
| | | | 1 1/4 ◇ □ | 294 | 282 | 256 | 252 | 242 |
| 25 | 23 3/8 | 3/4 | 15/16 △ | 531 | 506 | 468 | 446 | 434 |
| | | | 1 ◇ □ | 397 | 391 | 370 | 360 | 343 |
| | | | 1 △ | 470 | 452 | 422 | 394 | 382 |
| | | 1 | 1 1/4 ◇ □ | 250 | 248 | 224 | 216 | 210 |
| | | | 1 1/4 △ | 294 | 282 | 256 | 252 | 242 |
| | | | 1 1/4 ◇ □ | 349 | 334 | 302 | 296 | 286 |
| 27 | 25 3/8 | 3/4 | 15/16 △ | 637 | 602 | 550 | 536 | 524 |
| | | | 1 ◇ □ | 465 | 452 | 427 | 418 | 408 |
| | | | 1 △ | 559 | 534 | 488 | 474 | 464 |
| | | 1 | 1 1/4 ◇ □ | 286 | 275 | 267 | 257 | 250 |
| | | | 1 1/4 △ | 349 | 334 | 302 | 296 | 286 |
| | | | 1 1/4 ◇ □ | 397 | 334 | 354 | 334 | 316 |
| 29 | 27 3/8 | 3/4 | 15/16 △ | 721 | 692 | 640 | 620 | 594 |
| | | | 1 ◇ □ | 554 | 542 | 525 | 509 | 500 |
| | | | 1 △ | 630 | 534 | 556 | 538 | 508 |
| | | 1 | 1 1/4 ◇ □ | 348 | 275 | 322 | 314 | 313 |
| | | | 1 1/4 △ | 397 | 334 | 354 | 334 | 316 |
| | | | 1 1/4 ◇ □ | 472 | 454 | 430 | 420 | 400 |
| 31 | 29 3/8 | 3/4 | 15/16 △ | 847 | 822 | 766 | 722 | 720 |
| | | | 1 ◇ □ | 633 | 616 | 590 | 568 | 570 |
| | | | 1 △ | 745 | 728 | 678 | 666 | 640 |
| | | 1 | 1 1/4 ◇ □ | 405 | 390 | 366 | 360 | 384 |
| | | | 1 1/4 △ | 472 | 454 | 430 | 420 | 400 |
| | | | 1 1/4 ◇ □ | 538 | 522 | 468 | 470 | 454 |
| 33 | 31 3/8 | 3/4 | 15/16 △ | 974 | 938 | 872 | 852 | 826 |
| | | | 1 ◇ □ | 742 | 713 | 687 | 683 | 672 |
| | | | 1 △ | 856 | 830 | 774 | 760 | 732 |
| | | 1 | 1 1/4 ◇ □ | 460 | 453 | 430 | 420 | 414 |
| | | | 1 1/4 △ | 538 | 522 | 468 | 470 | 454 |
| | | | 1 1/4 ◇ □ | 608 | 592 | 566 | 546 | 532 |
| 35 | 33 3/8 | 3/4 | 15/16 △ | 1102 | 1086 | 1004 | 988 | 958 |
| | | | 1 ◇ □ | 827 | 811 | 773 | 762 | 756 |
| | | | 1 △ | 970 | 938 | 882 | 864 | 848 |
| | | 1 | 1 1/4 ◇ □ | 517 | 513 | 487 | 486 | 480 |
| | | | 1 1/4 △ | 608 | 592 | 566 | 546 | 532 |
| | | | 1 1/4 ◇ □ | 678 | 664 | 632 | 614 | 598 |
| 37 | 35 1/4 | 3/4 | 15/16 △ | 1242 | 1200 | 1144 | 1104 | 1078 |
| | | | 1 ◇ □ | 929 | 902 | 880 | 870 | 852 |
| | | | 1 △ | 1090 | 1042 | 982 | 966 | 958 |
| | | 1 | 1 1/4 ◇ □ | 588 | 580 | 555 | 544 | 538 |
| | | | 1 1/4 △ | 678 | 664 | 632 | 614 | 598 |
| | | | 1 1/4 ◇ □ | 748 | 732 | 700 | 684 | 668 |

Tabla 5.3 Continuación.

| Diámetro Interior de Carcaza Di, plg | Diámetro Exterior del Haz de Tubos De, plg | Diámetro Exterior del Tubo do, plg | Paso y Arreglo de Tubos P, plg | Número de pasos en los tubos | | | | |
|---|---|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------|------|------|------|
| | | | | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 39 | 37 1/4 | 3/4 | 15/16 Δ | 1377 | 1330 | 1258 | 1248 | 1212 |
| | | | 1 ◊ □ | 1025 | 1012 | 984 | 964 | 952 |
| | | | 1 Δ | 1206 | 1176 | 1128 | 1100 | 1078 |
| | | 1 | 1 | 645 | 637 | 619 | 610 | 605 |
| | | | 1 1/4 ◊ □ | 766 | 736 | 700 | 688 | 672 |
| | | | 1 1/4 Δ | | | | | |
| 42 | 40 1/4 | 3/4 | 15/16 Δ | 1611 | 1580 | 1498 | 1464 | 1456 |
| | | | 1 ◊ □ | 1201 | 1171 | 1144 | 1109 | 1087 |
| | | | 1 Δ | 1409 | 1378 | 1314 | 1296 | 1280 |
| | | 1 | 1 | 7456 | 728 | 708 | 686 | 680 |
| | | | 1 1/4 ◊ □ | 890 | 878 | 834 | 808 | 800 |
| | | | 1 1/4 Δ | | | | | |
| 44 | 42 1/4 | 3/4 | 15/16 Δ | 1782 | 1738 | 1650 | 1624 | 1592 |
| | | | 1 ◊ □ | 1349 | 1327 | 1286 | 1270 | 1252 |
| | | | 1 Δ | 1562 | 1535 | 1464 | 1422 | 1394 |
| | | 1 | 1 | 856 | 837 | 809 | 778 | 763 |
| | | | 1 1/4 ◊ □ | 990 | 966 | 921 | 888 | 871 |
| | | | 1 1/4 Δ | | | | | |
| 48 | 46 | 3/4 | 15/16 Δ | 1965 | 1908 | 1834 | 1801 | 1766 |
| | | | 1 ◊ □ | 1620 | 1598 | 1553 | 1535 | 1505 |
| | | | 1 Δ | 1827 | 1845 | 1766 | 1724 | 1690 |
| | | 1 | 1 | 1029 | 1010 | 975 | 959 | 940 |
| | | | 1 1/4 ◊ □ | 1188 | 1163 | 1098 | 1076 | 1055 |
| | | | 1 1/4 Δ | | | | | |
| 52 | 50 | 3/4 | 15/16 Δ | 2347 | 2273 | 2178 | 2152 | 2110 |
| | | | 1 ◊ □ | 1918 | 1890 | 1848 | 1826 | 1790 |
| | | | 1 Δ | 2212 | 2183 | 2092 | 2050 | 2010 |
| | | 1 | 1 | 1216 | 1196 | 1167 | 1132 | 1110 |
| | | | 1 1/4 ◊ □ | 1405 | 1375 | 1323 | 1287 | 1262 |
| | | | 1 1/4 Δ | | | | | |
| 56 | 54 | 3/4 | 15/16 Δ | 2704 | 2660 | 2556 | 2526 | 2489 |
| | | | 1 ◊ □ | 2241 | 2214 | 2167 | 2142 | 2110 |
| | | | 1 Δ | 2588 | 2545 | 2446 | 2409 | 2373 |
| | | 1 | 1 | 1420 | 1400 | 1371 | 1333 | 1307 |
| | | | 1 1/4 ◊ □ | 1638 | 1605 | 1549 | 1501 | 1472 |
| | | | 1 1/4 Δ | | | | | |
| 60 | 58 | 3/4 | 15/16 Δ | 3399 | 3343 | 3232 | 3195 | 3162 |
| | | | 1 ◊ □ | 2587 | 2556 | 2510 | 2485 | 2460 |
| | | | 1 Δ | 2987 | 2945 | 2827 | 2798 | 2770 |
| | | 1 | 1 | 1639 | 1615 | 1587 | 1553 | 1522 |
| | | | 1 1/4 ◊ □ | 1889 | 1851 | 1797 | 1761 | 1726 |
| | | | 1 1/4 Δ | | | | | |

Tabla 5.4 Valores de F_1 para varios diámetros de tubos y arreglos.

| DIÁMETRO EXTERNO DE TUBO, PLG | SEPARACIÓN ENTRE CENTROS DE TUBO, PLG | ARREGLO | F_1 |
|----------------------------------|--|----------------------|-------|
| 5/8 | 13/16 | → Δ | 0.90 |
| 5/8 | 13/16 | → $\diamond \square$ | 1.04 |
| 3/4 | 15/16 | → Δ | 1.00 |
| 3/4 | 15/16 | → $\diamond \square$ | 1.16 |
| 3/4 | 1 | → Δ | 1.14 |
| 3/4 | 1 | → $\diamond \square$ | 1.31 |
| 1 | 1 $\frac{1}{4}$ | → Δ | 1.34 |
| 1 | 1 $\frac{1}{4}$ | → $\diamond \square$ | 1.54 |

NOTA.- Esta tabla se puede usar también para tubos con aletas pequeñas (low-finned) de la forma siguiente:

El valor estimado de U_0 debe estar basado en el área externa total (incluyendo las aletas) del tubo aletado. Este valor será generalmente más pequeño (10 a 30 %) que los valores para tubo plano dados en la tabla 2. entonces el valor requerido de A_0 está basado en el área del tubo aletado, y los valores de F_1 dados se dividen por la razón del área del tubo aletado del área del tubo plano (por unidad de longitud). Típicamente este valor será de 2.5 a 4.

Tabla 5.5 Valores de F_2 para varios números de pasos en los tubos.

| DIÁMETRO INTERNO DE CARCAZA, PLG | F_2 | | | |
|-------------------------------------|-------|------|------|------|
| | 2 | 4 | 6 | 8 |
| HASTA 12 | 1.20 | 1.40 | 1.80 | --- |
| 13 1/4 A 17 1/4 | 1.06 | 1.18 | 1.25 | 1.50 |
| 19 1/4 A 23 1/4 | 1.04 | 1.14 | 1.19 | 1.35 |
| 25 A 33 | 1.03 | 1.12 | 1.16 | 1.20 |
| 35 A 45 | 1.02 | 1.08 | 1.12 | 1.16 |
| 48 A 69 | 1.02 | 1.05 | 1.08 | 1.12 |
| ARRIBA DE 60 | 1.01 | 1.03 | 1.04 | 1.06 |

* Debido a que haces de tubos en U siempre tienen al menos 2 pasos, el uso de esta tabla es esencial para estimación de estos tipos. La mayoría de haces de tubos de cabezal flotante también requieren un número par de pasos en los tubos.

Tabla 5.6 Valores de F_3 para varios tipos de haces de tubos.

| TIPO DE CONSTRUCCIÓN DE HAZ DE TUBOS | F_3 | | | | |
|--|-------------------------------------|---------|---------|---------|----------|
| | DIÁMETRO INTERNO DE CARCAZA, PLG | | | | |
| | HASTA 12 | 13 – 22 | 23 – 36 | 37 – 48 | MAYOR 48 |
| SPLIT BACKING RING (TEMA S) | 1.30 | 1.15 | 1.09 | 1.06 | 1.04 |
| OUTSIDE PACKED | | | | | |
| FLOATING HEAD (TEMA P) | 1.30 | 1.15 | 1.09 | 1.06 | 1.04 |
| TUBO EN U (TEMA U)* | 1.12 | 1.08 | 1.03 | 1.01 | 1.01 |
| PULL – THROUGH FLOATING HEAD (TEMA T) | --- | 1.40 | 1.25 | 1.18 | 1.15 |

* Usar además de F_2 de tabla 4 cuando sea TEMA U.

Tabla 5.7 Valores de Esfuerzos Máximos Permisibles para Materiales Ferrosos (ASME 1989. Sección 8, División 1)

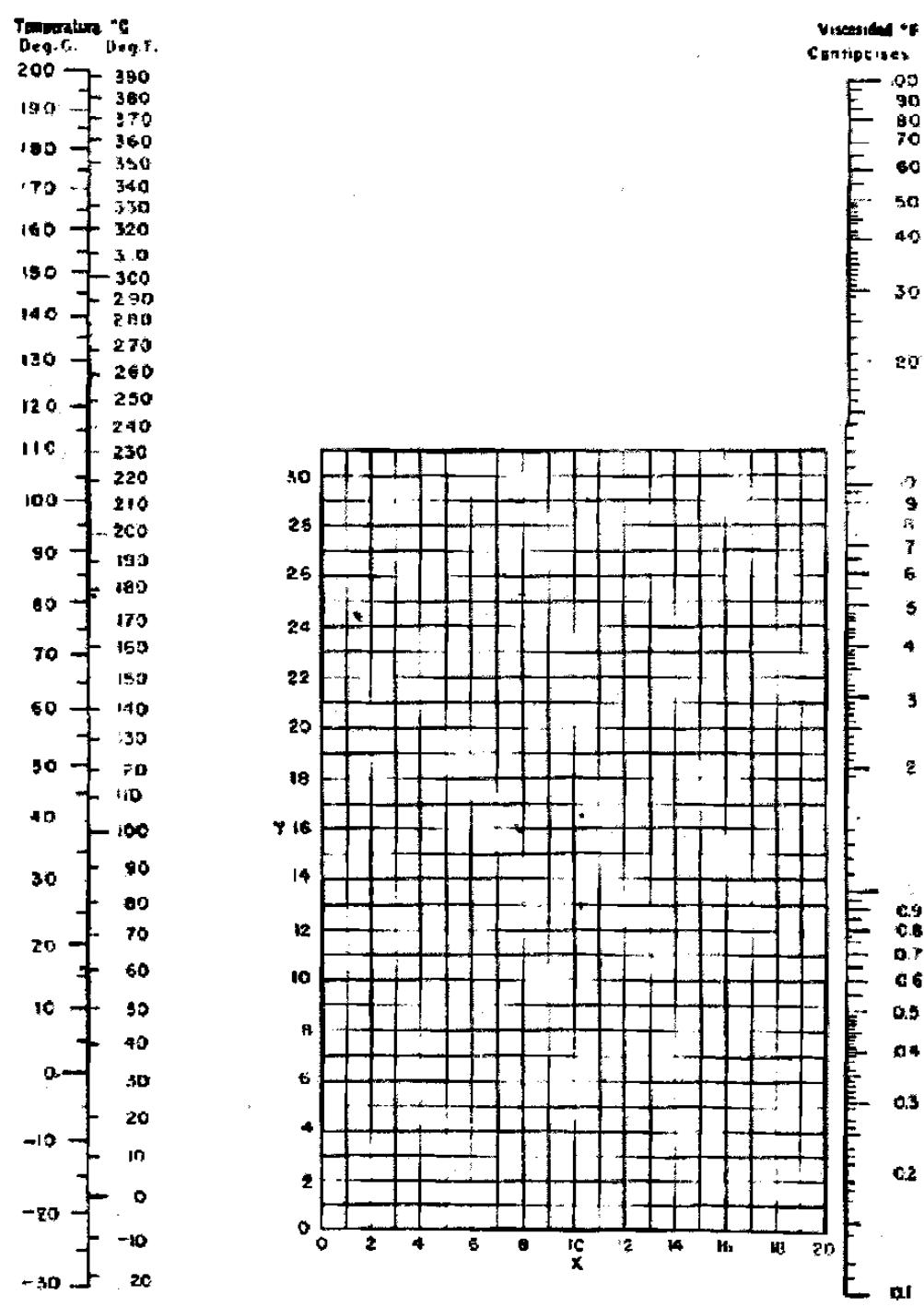


Figura 5.1. Viscosidades de los líquidos.

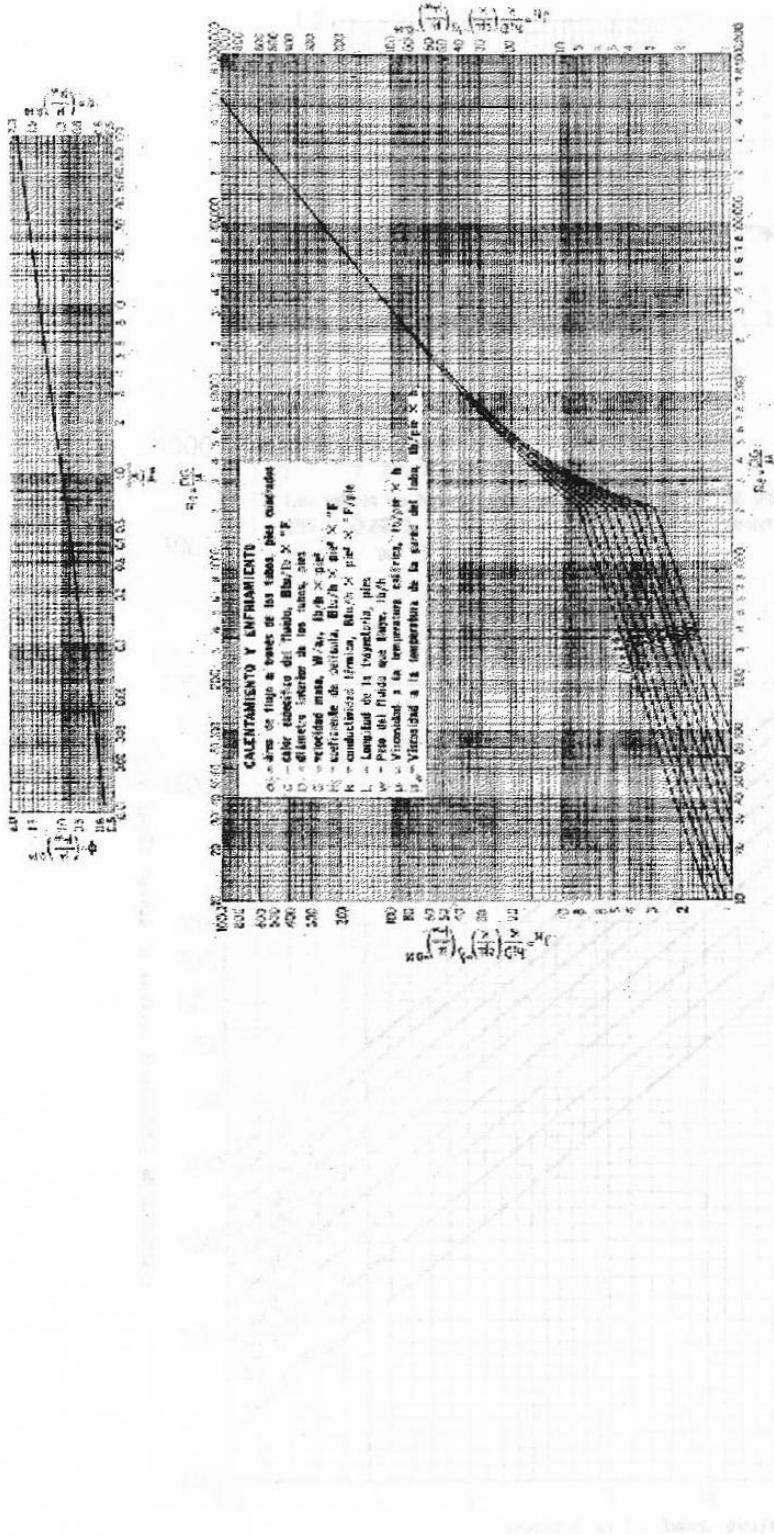


Figura 5.2 Curva de transferencia de calor lado de tubos.

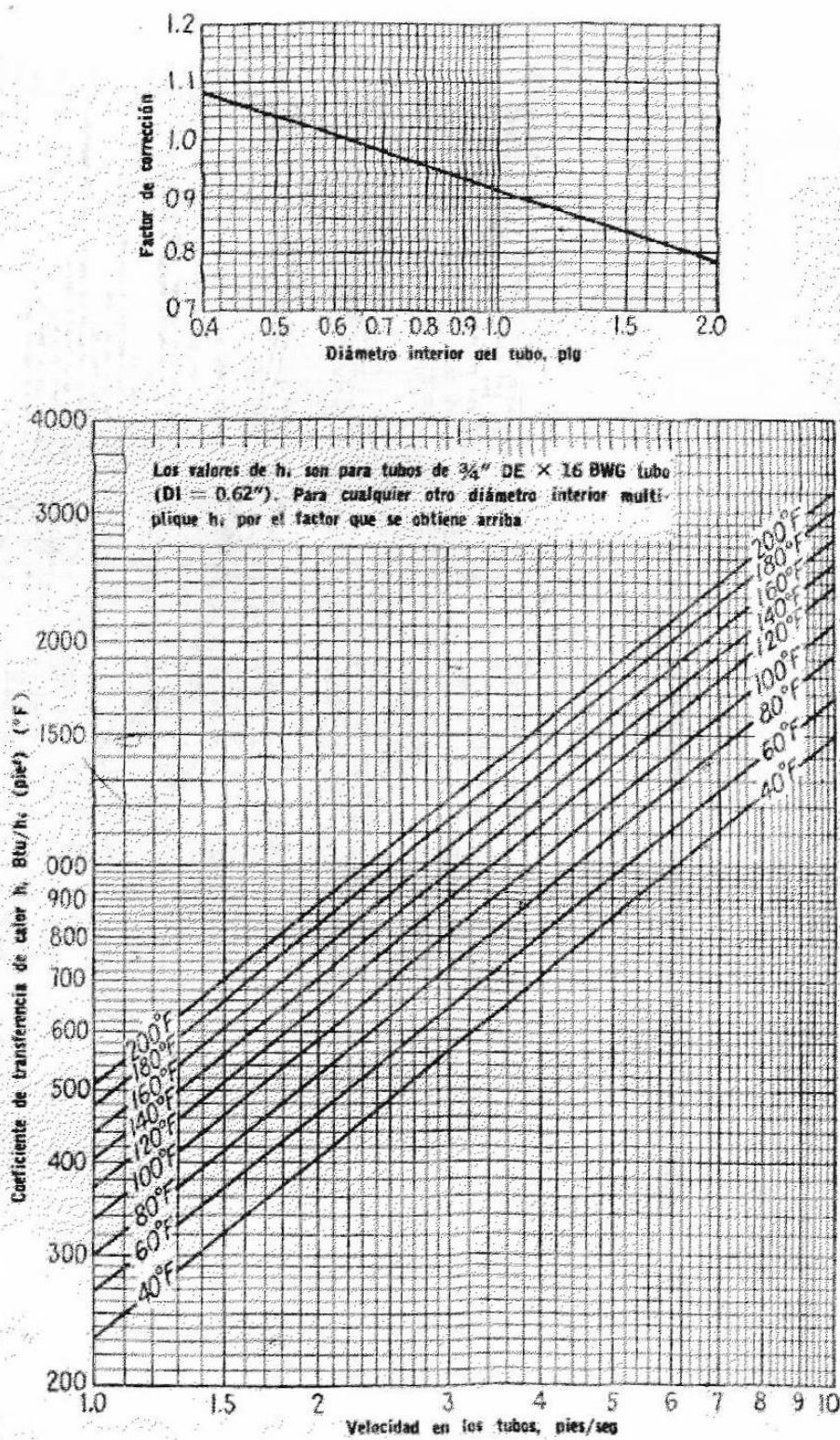


Figura 5.3 Curva de transferencia de calor, agua en los tubos.

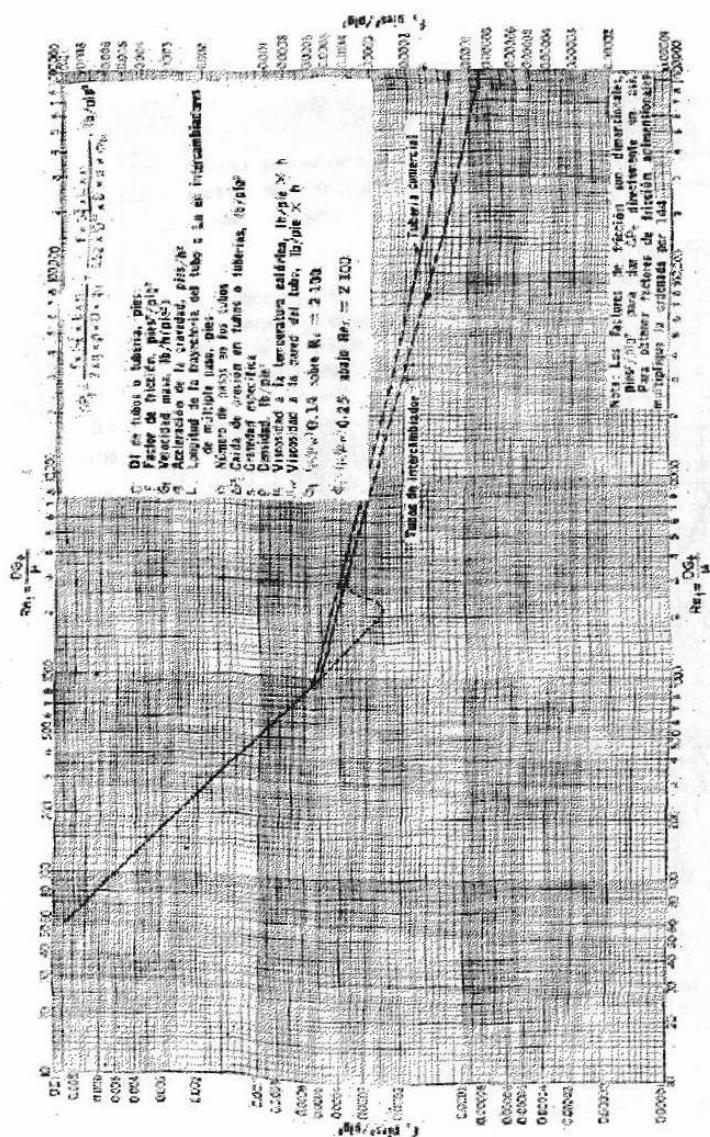


Figura 5.4 Factores de fricción, para lado de tubos.

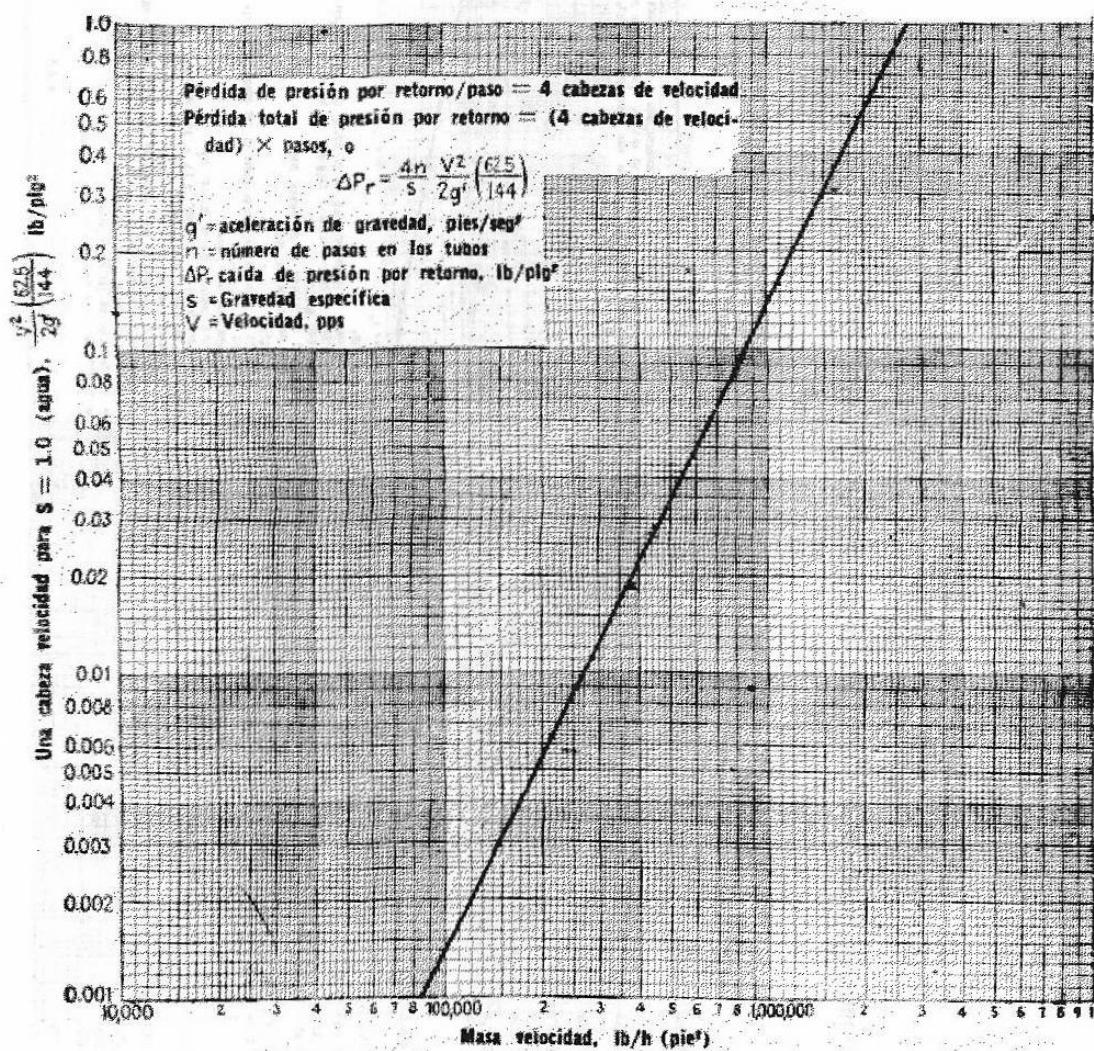


Figura 5.5 Pérdida de presión por retorno, lado de tubos.

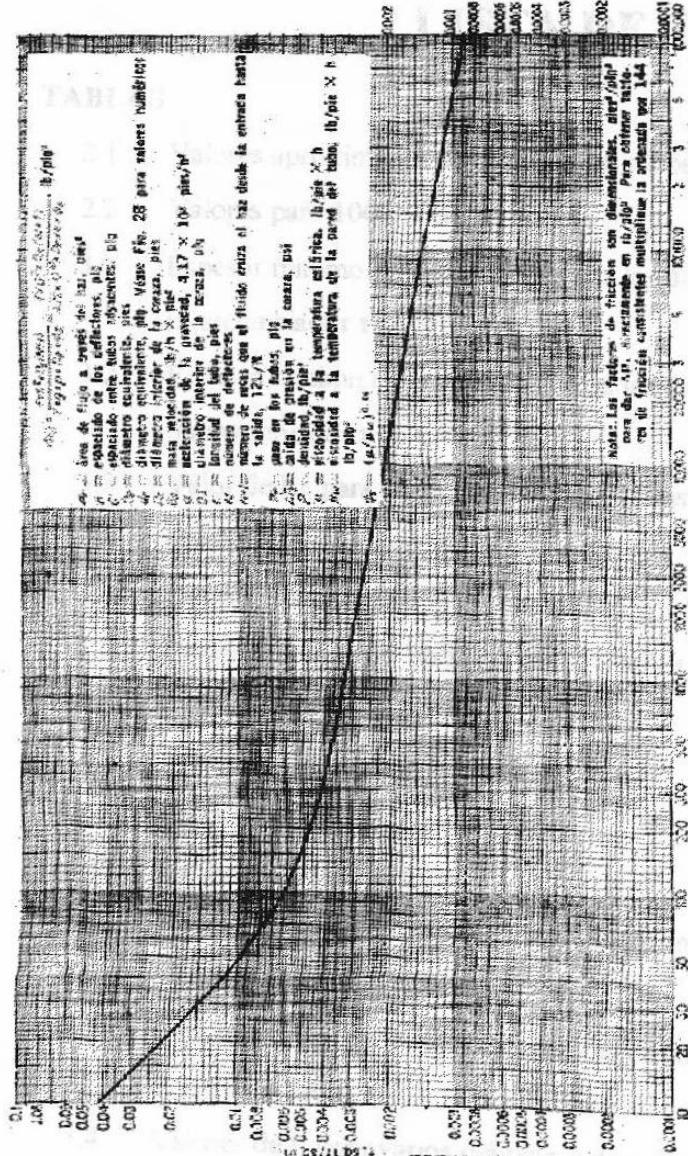


Figura 5.6 Factores de fricción lado de la carcaza, para haces de tubos con deflectores segmentados 25%

LISTA DE TABLAS

| TABLAS | PÁGINA |
|--|--------|
| 2.1 Valores aproximados de coeficientes globales de transmisión de calor. | 31 |
| 2.2 Valores para 1000 ω en función de χ y ψ . | 33 |
| 3.1 Espesor mínimo de la carcaza (todas las dimensiones en pulgadas). Intercambiador tipo R*. | 91 |
| 3.2 Espesor mínimo de la carcaza (todas las dimensiones en pulgadas). Intercambiador tipo C* y B**. | 92 |
| 3.3 Valor de K_0 para tapas semielípticas sometidas a presión externa. | 93 |
| 3.4 Coeficientes medios de expansión térmica. | 94 |
| 3.5 Calibres de los tubos más comunes en cobre, acero y aleaciones. | 96 |
| 3.6 Presión interna de trabajo (psi) de tubos a diferentes valores de esfuerzos permisibles. | 97 |
| 3.7 Factor de forma de la brida (Y). | 99 |
| 3.8 Pernos mínimos recomendados. | 104 |
| 3.9 Espesores de deflectores. | 105 |
| 4.1 Resistencia al ensuciamiento para fluidos industriales. | 135 |
| 5.1 Viscosidades de líquidos. | 153 |
| 5.2 Datos de tubos para intercambiadores de calor. | 156 |
| 5.3 Conteo de tubos. | 157 |
| 5.4 Valores de F para varios diámetros de tubos y arreglos. | 160 |
| 5.5 Valores de F para varios números de pasos en los tubos. | 161 |
| 5.6 Valores de F para varios tipos de haces de tubos. | 162 |
| 5.7 Valores de esfuerzos máximos permisibles para materiales ferrosos (ASME 1989: Sección 8, División 1) | 163 |

LISTA DE FIGURAS

| Fig. | PÁGINA |
|---|--------|
| 1.1 Cambiador de calor de doble tubo. | 8 |
| 1.2 Cambiador de calor de tipo evaporativo. | 9 |
| 1.3 Diagrama de cambiador de placas. | 10 |
| 1.4 Representación esquemática del funcionamiento de un intercambiador de calor tipo placa | 11 |
| 1.5 Cambiador de calor de serpentín. | 12 |
| 1.6 Cambiador de calor de espiral. | 13 |
| 1.7 Cambiador de calor enfriado por aire de tiro forzado. | 14 |
| 1.8 Cambiador de calor enfriado por aire de tiro inducido. | 15 |
| 1.9 Intercambiador de calor de carcaza y tubos tipo MEM. | 16 |
| 1.10 Cambiador de calor de tipo rotatorio Ljungstrom. | 17 |
| 2.1 Transmisión de calor a través de una pared. | 34 |
| 2.2 Diagrama de la distribución de temperaturas en flujos paralelos del mismo sentido. | 35 |
| 2.3 Diagrama de la distribución de temperaturas en flujos paralelos en contracorriente. | 36 |
| 2.4 Diagrama de la distribución de temperaturas en flujo cruzado. | 37 |
| 2.5 Factor de corriente de la diferencia de temp. media logarítmica, 1 paso en la coraza, 2 pasos en los tubos (en serie). | 38 |
| 2.6 Factor de corrección de la diferencia de temp. media logarítmica, 2 pasos en la coraza, 4 o múltiplos de 4 pasos en los tubos (en serie). | 39 |
| 2.7 Factor de corrección de la diferencia de temp. media logarítmica, 3 pasos en la coraza, 6 o múltiplos de 6 pasos en los tubos (en serie). | 40 |
| 2.8 Factor de corrección de la diferencia de temp. media logarítmica, 4 pasos en la coraza, 8 o múltiplos de 8 pasos en los tubos /en serie). | 41 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.9 | Factor de corrección de la diferencia de temp. media logarítmica, 5 pasos en la coraza, 10 o múltiplos de 10 pasos en los tubos (en serie). | 42 |
| 2.10 | Factor de corrección de la diferencia de temp. media logarítmica, 6 pasos en la coraza, 12 o múltiplos de 12 pasos en los tubos (en serie). | 43 |
| 2.11 | Efectividad para un intercambiador de calor con flujos en paralelo. | 44 |
| 2.12 | Efectividad para un intercambiador de calor con flujos opuestos. | 45 |
| 2.13 | Efectividad para un intercambiador de calor con flujos transversales con un flujo mezclado y otro sin mezclar. | 46 |
| 2.14 | Efectividad para un intercambiador de calor con flujos transversales con un flujo sin mezclar. | 47 |
| 2.15 | Efectividad para un intercambiador de calor de coraza y tubo. | 48 |
| 2.16 | Efectividad para un intercambiador de calor de coraza y tubo. | 49 |
| 3.1 | Intercambiador de calor de coraza y tubo. | 106 |
| 3.2.1 | Valores típicos de la eficiencia de las uniones de soldadura. | 107 |
| 3.2 | Diagrama de carcasa cilíndrica. | 108 |
| 3.3 | Diagrama de sección cónica. | 108 |
| 3.4 | (Parte 1) Diagrama para envolventes cilíndricas sometidas a presión externa o cargas de compresión (para todos los materiales). | 109 |
| | (Parte 2) Diagrama para envolventes cilíndricas sometidas a presión externa o cargas de compresión (para todos los materiales). | 110 |
| 3.5 | Diagrama para determinar el espesor de la envolvente cilíndrica y esférica, sometida a presión externa y construido en acero al carbono o de baja aleación (punto de cedencia de 30000 a 38000 PSI) y aceros inoxidables tipos 405 y 410. | 111 |
| 3.6 | Diagrama para determinar el espesor de la envolvente cilíndrica y esférica, sometida a presión externa, t construido de acero austenítico (18Cr-8Ni, tipo 304). | 112 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 3.7 | Diagrama para determinar el espesor de la envolvente cilíndrica y esférica, sometida a presión externa, y construido en acero austenítico (18Cr-8Ni+Cb, tipo 347, 25Cr-12Ni, tipo 309, 25Cr-20Ni, tipo 310 y 17Ct, tipo 430B) | 113 |
| 3.8 | Diagrama para determinar el espesor de la envolvente cilíndrica y esférica, sometida a presión externa, y construido en acero austenítico (18Cr-8Ni+0.03 máximo de carbono, tipo 304L) | 114 |
| 3.9 | Diagrama para determinar el espesor de la envolvente cilíndrica y esférica, sometida a presión externa, y construido en acero austenítico (18Cr-8Ni+Mo, 0.09 máximo de carbono 316L y 317) | 115 |
| 3.10 | Semielíptica. | 116 |
| 3.11 | Toriesférica. | 116 |
| 3.12 | Semiesférica. | 117 |
| 3.13 | Cónica. | 117 |
| 3.14-a | Plana. | 118 |
| 3.14-b | Plana con ceja. | 118 |
| 3.14-c,d,e | Tipos de uniones de tapas planas. | 119 |
| 3.15-a,b | Tipos de empaques entre la coraza y tapas. | 120 |
| 3.16 | Ancho efectivo del asentamiento del empaque b. | 121 |
| 3.17 | Materiales de empaques y caras de contacto. | 122 |
| 3.18 | Espejo de tubos. | 123 |
| 3.18.1 | Relación espesor de pared / diámetro para espejos integrales. | 124 |
| 3.19 | Perímetro (c). | 125 |
| 3.20 | Tipos de bridas. | 126 |
| 3.21 | Nomenclatura de las bridas. | 127 |
| 3.22 | Diseño de refuerzos. | 130 |
| 3.23 | Diferentes diseños de deflectores. | 131 |
| 5.1 | Viscosidades de los líquidos. | 164 |
| 5.2 | Curva de transferencia de calor lado de tubos. | 165 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.3 | Curva de transferencia de calor, agua en los tubos. | 166 |
| 5.4 | Factores de fricción, para lado de tubo. | 167 |
| 5.5 | Perdida de presión por retorno, lado de tubos. | 168 |
| 5.6 | Factores de fricción de lado de la caraza, para hacer de tubos con deflectores segmentados 25%. | 169 |

BIBLIOGRAFIA

- Procesos de Transferencia de Calor
Donald Q. Kern
C.E.C.S.A. 1986
- Heat and Mass Transfer
E.R.G. Eckert
Roberto M. Drake
Mc Graw Hill 1972
- Perry's Chemical Engineers
Handbook
Robert H. Perry, Don Green
Mc Graw Hill 1995
- Transferencia de Calor Aplicada a
la Ingeniería
James R. Welty
Limusa 1993
- Transferencia de Calor
J.P. Holman
Mc Graw Hill 1995
- Engineering Heat Transfer
Shao Ti Hsu
Jan Monstrand 1963
- Engineering Data Book II
Wolverine Heat Transfer
Data Book
- Código ASME Edición 1989 de la
Sección 1

