

Capítulo 9

CÁLCULOS DE RESISTENCIA, TENSIONES Y PRESIONES ADMISIBLES

En el Capítulo 8 se han revisado algunos principios básicos de resistencia de materiales y las tensiones principales que un material sometido a carga debe resistir. Este capítulo está dedicado a los cálculos de resistencia aplicados a las calderas de alta presión según el código ASME. Se calcularán de modo similar las ecuaciones que expresan la resistencia de chapas y superficies arriestradas y componentes semejantes de calderas de baja presión y recipientes a presión, pero las ecuaciones específicas están disponibles en la sección correspondiente del código ASME de calderas. Los métodos de cálculo de resistencia de calderas demuestran cómo hacerlo. Debe reconocerse que los nuevos materiales, el mejor control de calidad de fabricación y el aumento de conocimientos de cómo los materiales se comportan bajo carga, continuará produciendo cambios en las ecuaciones y tensiones admisibles. Además, la última edición de las normativas (código ASME en EE. UU., normativa UNE sobre diseño y construcción de calderas en España, normas 9-300-90 y el «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del Ministerio de Industria y Energía) debería consultarse para conocer los detalles de diseño específicos.

Secciones del código ASME y de la normativa UNE aplicables. Para obtener las últimas ecuaciones y reglas de cálculos, deberá usarse como material de referencia:

Sección I: Reglas para la construcción de calderas. En España, además, las normas UNE 9-300-90 editadas por AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Esto además del siempre básico «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del MINER.

Sección II: Materiales, partes A, C y D.

Código ASME de tuberías, parte: B31.1.

Código de Inspección del National Board y, nuevamente en España, el «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del MINER.

Análisis de componentes. Toda caldera y sus partes sometidas a presión deben analizarse componente por componente para cuidadosamente considerar la tensión del material que está siendo utilizado, sus características físicas como tipo y clase de material, tensión admisible, espesor, etc. Deben analizarse las fuerzas que actúan sobre este material. Esta fuerza se crea normalmente por la presión pero puede también incluirse la temperatura, el peso que está soportando y la concentración de tensiones, como la existente alrededor de una abertura. El problema después evoluciona al comparar las fuerzas actuantes sobre el material y determinar si el material está siendo sometido a esfuerzos más allá de la tensión admisible determinada por la normativa de calderas. Los elementos a considerar dependen del tipo de caldera pero generalmente incluyen chapas o virolas, calderines, tubos, fondos esféricos, cabezales, superficies planas, riostras, tirantes, aberturas, hogares, juntas soldadas (remachadas en el pasado), soporte de estructuras y tuberías y válvulas de conexión. Cada uno de estos elementos está regido por el Código de calderas y recipientes a presión como material admisible, con tensiones admisibles y método de calcular los esfuerzos para obtener la presión admisible. Finalmente en las aplicaciones de calderas y recipientes a presión, el elemento más débil que produce la mínima presión, determina la *presión admisible* en la caldera.

Instalaciones existentes. Existe una vieja regla que dice que la presión admisible de una caldera que se basa en los requerimientos del Código prevalece cuando la caldera está construida. Con relación al cálculo de la presión admisible en este capítulo, la idea del autor es mostrar las ecuaciones de las instalaciones existentes y utilizadas hasta 1986, y los *nuevos requerimientos* del Código de 1986*. Esto ayudará al lector a determinar las presiones y tensiones admisibles para la recolección y resolución de preguntas y cuestiones sobre calderas que pueden surgir.

Las revisiones en los cálculos, basados en los cambios de 1986, incluyen:

1. Las juntas soldadas longitudinales deben tener cubrejuntas o chapas de refuerzo a intervalos y el refuerzo de la soldadura sustancialmente nivelado con la chapa. Anteriormente la normativa permitía esto como refuerzo de soldadura, pero la eficiencia permitida por la soldadura era sólo del 90 por 100.
2. Los cálculos en las piezas o componentes de las calderas de tubos de humos tales como tubos y virolas-hogares ahora requieren la utilización de la presión exterior y nuevas ecuaciones para determinar la presión admisible (norma UNE 9-300-90/3).

* *N. del T.*: Por ejemplo, «Reglamento de Aparatos a Presión e Instrucciones Técnicas Complementarias» del MINER y la Normativa UNE 98-300-90/3, de 1990, de AENOR.

3. La construcción de calderas roblonadas (remachadas) está permitida todavía, pero el Código actual hace referencia a la edición de 1971 de la Sección I para más detalles sobre calderas roblonadas. (Esto indica que la construcción roblonada está básicamente obsoleta*.)

La *presión manométrica* o efectiva se usa en la mayoría de los cálculos de presión admisible, porque ésta es la presión marcada en los manómetros en servicio. La presión manométrica es la presión por encima de la presión atmosférica, normalmente expresada como 1 atm o $1,033 \text{ kg/cm}^2$ ($14,7 \text{ psi} = 1,029 \text{ kg/cm}^2$) al nivel del mar (1.033 milibares). La presión absoluta es la presión *total* por encima de la atmosférica: por ejemplo, 100 psi (7 kg/cm^2) de presión manométrica es igual a 114,7 psi ($8,029 \text{ kg/cm}^2$) de presión absoluta. En general, presión absoluta = presión manométrica + 1 atm ($0,1 \text{ kg/cm}^2$).

Hay también una diferencia entre presión admisible y presión de trabajo u operativa. Las calderas operan siempre por debajo de la máxima presión admisible para evitar la apertura de la válvula de seguridad ya que una o dos válvulas deben estar taradas a la máxima presión admisible. La experiencia indica que el diferencial siguiente entre presión de trabajo y presión admisible evitará la apertura de la válvula de seguridad:

<i>Máxima presión admisible</i>	<i>Diferencial de presión de trabajo</i>
Hasta 100 psi (7 kg/cm^2)	10 %, pero no menos de 10 psi ($0,7 \text{ kg/cm}^2$)
De 300 hasta 1.000 psi (de 7 y hasta 70 kg/cm^2)	7 %, pero no menos de 35 psi ($2,45 \text{ kg/cm}^2$)
De 1.000 hasta 2.000 psi (de 70 a 140 kg/cm^2)	5 %, pero no menos de 80 psi ($5,6 \text{ kg/cm}^2$)
Más de 2.000 psi (140 kg/cm^2)	Recomendación del fabricante

Normativa de tubería exterior a la caldera. Se requiere una certificación sobre el proyecto de caldera y/o inspección y aprobación por la Consejería de Industria de la Autonomía (en EE. UU., certificación del código ASME o inspección y aprobación por un inspector autorizado) tanto sobre la propia caldera como sobre la instalación de tuberías externas a la caldera. Esto comprende proyectos y formularios presentados y aprobados con la caldera prevista de su placa de reconocimiento oficial estampada. La tubería externa de la caldera comprende las conexiones adecuadas para la(s) válvula(s) exigidas por el Código sobre esas tuberías, tales como salida de vapor, alimentación de agua a caldera, purga, drenajes, venteos, purga superficial, columnas de agua del nivel, vidrio de visión del nivel, manómetro de presión y la línea de retorno de la circulación del agua para una caldera de agua sobrecalentada.

Esta tubería externa clasificada está diseñada y determinada en lo que respecta al material, fabricación, instalación, inspección y presiones admisibles normalizadas según normativa (por ejemplo, ASME B31.1, Código de Tuberías de Potencia) y también se hace referencia a las clases de material en la Sección I y/o en los Artícu-

* *N. del T.*: Y la prueba también es que la norma UNE 9-300-90/3 no hace mención alguna a la solución roblonada, sino solamente a la soldada.

los 18, 19 y en la Institución Técnica Complementaria ITC MIE AP2 de tuberías para fluidos relativos a calderas (6-10-1980, BOE 4-10-80) obligatorios en España. Otras tuberías del interior de las calderas o para tubos de más de 5" (125 mm) de diámetro exterior requieren la utilización de las ecuaciones para calderines o virolas cilíndricas (Sección I del código ASME, en EE. UU., y Sección 5.9.1.5. de la norma UNE 9-300-90, en España).

Estas normativas dan detalles sobre las uniones o juntas aceptables de tuberías; sin embargo, no se puede utilizar las juntas roscadas allí donde puede haber corrosión severa, grietas por corrosión, choque o vibración, ni a temperaturas por encima de 496 °C. El mayor diámetro de tubería roscada es 3" (76 mm) y la máxima presión admisible por tamaño o diámetro de tubería roscada para vapor y agua caliente u otro fluido con temperaturas por encima de 104 °C es:

<i>Máximo diámetro de tubería roscada</i>		<i>Máxima presión</i>	
pulgadas	mm	psi	kg/cm ²
3"	76	400	28
2"	50	600	42
1"	25	1.200	84
3/4" y menores	19	1.500	105

La tabla de la Figura 9.1 suministra datos de la Asociación Americana de Normativa para Tuberías de Acero. La ecuación para tuberías B31.1 ilustrará sobre cómo determinar la presión admisible en una tubería exterior según el Código.

Problema. Una tubería de vapor, que va desde la propia caldera a dos válvulas de corte con finales planos para soldar a la caldera de 1.200 psi (84 kg/cm²), es de diámetro nominal 6", norma 80 y, según el cuadro Figura 9.1 muestra, tiene un espesor de 0,432" (10,9 mm). El material del tubo es A210C según B31.1. La temperatura de trabajo no excede los 370 °C. ¿Cuál es la *presión admisible* si se permite una tolerancia de 1/16" (1,6 mm) para la corrosión?

Solución. El Código exige que la tensión admisible para el material no sea mayor que la correspondiente a la temperatura del vapor; por tanto, de la tabla de tensiones B31.1, la tensión permisible para el material A210C es de 16.600 lb/in² (1.162 kg/cm²). La ecuación a utilizar según B31.1 es:

$$P = \frac{2S(t_m - A)}{D_0 - 2y(t_m - A)}$$

donde

P = presión de diseño o presión interna admisible, psi.

t_m = mínimo espesor de pared requerido, pulgadas.

$t_m = 0,432'' - 1/16'' = 0,432'' - 0,0625'' = 0,3695''$

D_0 = diámetro exterior del tubo, pulgadas.

$D_0 = 6,625''$ de la Figura 9.1.

S = máxima tensión admisible para el material, lb/in²

$S = 16.600$ lb/in².

y = un factor normativo para acero ferrítico o austenítico basado en la temperatura de diseño.

Tamaño nominal	Diámetro externo, pulgadas	Peso de tubería normal A.S.A. Norma 40										Extra fuerte A.S.A. Norma 80		Doble extra fuerte	
		Diámetro interno, pulgadas	Espesor de pared, pulgadas	Peso por pie extremos planos, libras	Roscas por pulgada	Circunferencia, pulgadas		Área transversal, pulgadas ²		Longitud de la tubería por pie ²		Espesor de pared, pulgadas	Peso por pie extremos planos, libras	Espesor de pared, pulgadas	Peso por pie extremos planos, libras
						Externa	Interna	Externa	Interna	Superficie exterior	Superficie interior				
1/8	0,405	0,269	0,068	0,244	27	1,272	0,845	0,129	0,057	9,431	14,199	0,095	0,31	—	—
2/4	0,540	0,364	0,088	0,424	18	1,696	1,144	0,229	0,104	7,073	10,493	0,119	0,54	—	—
3/6	0,675	0,493	0,091	0,567	18	2,121	1,549	0,358	0,191	5,658	7,748	0,126	0,74	—	—
1/2	0,840	0,622	0,109	0,850	14	2,639	1,954	0,554	0,304	4,547	6,141	0,147	1,09	0,294	1,71
3/4	1,050	0,824	0,113	1,130	14	3,299	2,589	0,866	0,533	3,637	4,635	0,154	1,47	0,308	2,44
1	1,315	1,049	0,133	1,678	11 1/2	4,131	3,296	1,358	0,864	2,904	3,641	0,179	2,17	0,358	3,66
1 1/4	1,660	1,380	0,140	2,272	11 1/2	5,215	4,335	2,164	1,495	2,301	2,768	0,191	3,00	0,382	5,21
1 1/2	1,900	1,610	0,145	2,717	11 1/2	5,969	5,058	2,835	2,036	2,010	2,372	0,200	3,63	0,400	6,41
2	2,375	2,067	0,154	3,652	11 1/2	7,461	6,494	4,430	3,355	1,608	1,847	0,218	5,02	0,436	9,03
2 1/2	2,875	2,469	0,203	5,793	8	9,032	7,757	6,492	4,788	1,328	1,547	0,276	7,66	0,552	13,70
3	3,500	3,068	0,216	7,575	8	10,996	9,638	9,621	7,393	1,091	1,245	0,300	10,25	0,600	18,58
3 1/2	4,000	3,548	0,226	9,109	8	12,566	11,146	12,566	9,886	0,954	1,076	0,318	12,51	0,636	22,85
4	4,500	4,026	0,237	10,790	8	14,137	12,648	15,904	12,730	0,848	0,948	0,337	14,98	0,674	27,54
5	5,563	5,047	0,258	14,617	8	17,477	15,856	24,306	20,006	0,686	0,756	0,375	20,78	0,750	38,55
6	6,625	6,065	0,280	18,974	8	20,813	19,054	34,472	28,891	0,576	0,629	0,432	28,57	0,864	53,16
8	8,625	7,981	0,322	28,554	8	27,096	25,073	58,426	50,027	0,443	0,478	0,500	43,39	0,875	72,42
10	10,750	10,020	0,365	40,483	8	33,272	31,479	90,763	78,855	0,355	0,381	—	—	—	—
12	12,750	12,000	0,375	49,562	8	40,055	37,699	127,676	113,097	0,299	0,318	—	—	—	—

Los tamaños de tubería de 14 pulgadas y superiores se designan por el diámetro exterior y el espesor de pared, si éste está especificado.

Figura 9.1. Datos de American Standard Association para tuberías de acero.

$$y = 0,4$$

A = espesor adicional para erosión o cargas impuestas de soporte.

A = 0,050 (estimado).

Sustituyendo en la ecuación anterior.

$$P = \frac{2(16.600)(0,3695 - 0,05)}{6,625 - 2(0,4)(0,3695 - 0,05)} = 1.665 \text{ psi} = 116,55 \text{ kg/cm}^2$$

Por tanto, la tubería tiene espesor suficiente para soportar una presión de trabajo de 1.200 psi (84 kg/cm²).

TUBOS DE CALDERA

Se usan tres métodos normales de fabricación de tubos de calderas:

1. El tubo sin soldadura (sin costura) que se perfora en caliente y se estira a su tamaño.
2. El tubo soldado a solape (en forja) que consiste en una tira metálica («estirada») curvada a la forma tubular con el cierre longitudinal por solape. Se le aplica calor y la junta queda soldada de forja.
3. El tubo soldado a tope por resistencia eléctrica se forma como el segundo tipo pero, como su nombre implica, la junta se suelda a tope (no a solape).

Se considera una buena práctica por algunos colocar la soldadura de los tubos soldados fuera de la acción radiante de la llama o fuego del hogar. Los tubos para las calderas de tubos curvados se curvan normalmente a máquina.

El diámetro de los tubos de caldera siempre se refiere al diámetro nominal exterior mientras que el diámetro de tuberías se refiere siempre al diámetro nominal interior.

Extremos del tubo: expansionado, mandrilado y achaflanado. Prácticamente todos los tubos de caldera tienen los extremos expandidos contra el orificio de la chapa virola o calderín. Esto se hace para conseguir estanqueidad del tubo contra fugas y darle un agarre firme en el orificio de forma que el tubo pueda tener una sujeción definida o efecto de arriostrado.

Los bordes de los orificios o agujeros de alojamiento están achaflanados aproximadamente 1/16" (0,0625") después de su taladrado de forma que no tengan bordes agudos que puedan cortar al tubo cuando éste se expande.

Los orificios o taladros son mayores en 1/32" (0,03125") mayores en diámetro sobre el diámetro exterior del tubo de caldera, excepto en las placas para los tubos de las calderas piro-tubulares. A través de estas placas, los tubos deben pasar durante el reentubado y, así, sus orificios o alojamientos en las placas serán 1/16" (0,0625") más grandes en diámetro para así permitir que su recubrimiento protector con suciedad sea eliminado sin daño para la placa de tubos.

Los calderines de gran espesor de virola deben estar contrataladrados (o contorneados los talados) para tener una razonable y estrecha banda circunferencial del tubo para expansión o dilatación. El diámetro del achaflanado debería ser suficiente para permitir el mandrilado y achaflanado del final del tubo según lo requiera.

El achaflanado o contorneado del taladro puede hacerse por el exterior o por el interior. Cuando un calderín de una caldera de tubos de agua tiene los tubos agrandados o expandidos en su parte superior, la mejor práctica es no utilizar el achaflanado exterior, para evitar bolsas o dobleces así formados donde se depositaría el hollín.

Para las calderas de tubos de agua los tubos y las conexiones deberían alargarse de 1/4" (6,35 mm) a 3/4" (19,05 mm) más allá del agujero de alojamiento y achaflanarlo al menos 1/8" (3,175 mm) más grande que el diámetro del orificio de alojamiento.

Las calderas de tubos de humos tienen los finales de los tubos expuestos al calor y productos de combustión y, así, los finales del tubo se quemarían rápidamente si estuvieran achaflanados. En estas calderas, los finales del tubo se retrotraen en burlete o retocan hacia atrás después de haberlos mandrilado, para protegerlos contra el recalentamiento, aunque el apoyo en burlete (o esfera) no debe incrementar la fuerza de fijación del tubo apreciablemente.

Presión admisible en las calderas de tubos de agua. Para calcular la presión admisible en los tubos de las calderas de tubos de agua hasta 5" (125 mm) de diámetro exterior, se utilizará la siguiente ecuación normalizada según el Código:

$$P = S \left[\frac{(2t - 0,01D - 2e)}{D - (t - 0,005D - e)} \right]$$

o:

$$t = \frac{PD}{2S + P} + 0,005D + e$$

donde: P = máxima presión admisible, psi (kg/cm²).

D = diámetro exterior de los tubos, pulgadas (cm).

t = espesor mínimo requerido, pulgadas (cm).

S = tensión máxima admisible, lb/in² (kg/cm²).

ke = factor de espesor para los finales expandidos de los tubos.

Nota. Para seleccionar el valor de S de los tubos, la temperatura de trabajo del metal no será menor que la temperatura media de la pared del tubo (suma de la temperatura exterior e interior del tubo dividido por 2). Ésta en ningún caso se tomará menor que 700 °F (371 °C). Para tubos que no absorben calor, la temperatura de la pared puede tomarse como la temperatura del fluido dentro del tubo, pero no menor que la temperatura de saturación del vapor.

Nota. En una longitud al menos igual a la longitud del asiento más 1" (25,4 mm), e es igual a 0,04 para tubos expandidos en los asientos tubulares (zonas de sujeción

en placa). Sin embargo, $e = 0$ para tubos expandidos en los asientos de tubo, supuesto que el *espesor* de los finales del tubo sobre una longitud del asiento más 1" (25,4 mm) *no* es menor que los valores siguientes:

- 0,095" (2,413 mm) para tubos de 1 $\frac{1}{4}$ " (31,75 mm) de diámetro exterior y menores.
- 0,105" (2,667 mm) para tubos mayores de 1 $\frac{1}{4}$ " (31,75 mm) de diámetro exterior hasta 2" (50,8 mm).
- 0,120" (3,048 mm) para tubos mayores de 2" (50,8 mm) de diámetro exterior hasta 3" (76,2 mm).
- 0,135" (3,429 mm) para tubos mayores de 3" (76,2 mm) de diámetro exterior hasta 4" (101,6 mm).
- 0,150" (3,810 mm) para tubos mayores de 4" (101,6 mm) de diámetro exterior hasta 5" (127 mm).
- Para tubos soldados por resistencia a calderines y cabezales o cajas, $e = 0$.

La Figura 9.2 muestra una tabla típica de tensiones admisibles para diferentes materiales de tubo a diferentes temperaturas. La Sección II, en su parte D, del código ASME lista las tensiones admisibles según los números SA (no confundir con los números A listados en el Código de tuberías de potencia). La Figura 9.3 de la página 306 lista las tensiones admisibles típicas para materiales de chapa de acero, ahora listado en la Sección II, parte D, en las tablas de tensiones admisibles. Nótese que los tubos que absorben calor, las chapas y calderines son diseñados por las ecuaciones y reglas de la Sección I.

Ejemplo de un problema de tubos para una caldera de tubos de agua. Un tubo de acero sin costura en una caldera de tubos de agua está fabricado con el material SA-210C y tiene 2 $\frac{1}{4}$ " (57,15 mm) de diámetro exterior y 0,188" (4,7752 mm) de espesor, y absorbe calor a 650 °F (343,3 °C). El tubo ha sido expansionado en el calderín. ¿Cuál es la presión admisible para este tubo?

Solución. Utilizar la ecuación P con:

S = el valor para 700 °F (371 °C) según la Figura 9.2 es de 16.600 lbs/in² (1.172 kg/cm²).

t = espesor del tubo = 0,188" (4,7752 mm).

D = diámetro exterior del tubo = 2,25" (57,15 mm).

$e = 0$ (porque el espesor del tubo es mayor que 0,12" (3,048 mm)).

Sustituyendo en la ecuación del tubo,

$$P = 16.600 \left[\frac{2(0,188) - 0,01(2,25)}{2,25 - (0,188 - 0,005(2,25))} \right] = 16.600 \left[\frac{0,3535}{2,2323} \right] = 2.628,7 \text{ psi}$$

Ejemplo. ¿Qué espesor se requiere sobre tubos de 2" (50,8 mm) de diámetro exterior fabricado por material SA-178A y que está situado en una zona de absorción térmica de una caldera de tubos de agua de 600 psi (42 kg/cm²)? Los tubos están ensanchados en su alojamiento en el calderín.

Número de especificación	Composición	Forma	Resistencia final	Tensión admisible (kilopondios/pulgada ²)*				
				De -20 a 650 °F (-6 a 343 °C)	700 °F (371 °C)	800 °F (426 °C)		
A. Tubos de acero al carbono								
SA 192	C-Si	Sin costura (sin soldadura)	47,0	18,8	11,5	9,0		
SA 178A	C	Soldado	47,0	11,8	11,5	7,7		
SA 226	C-Si	Soldado	47,0	11,8	11,5	7,7		
SA 210 A-1	C	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	14,4	10,8		
SA 178 C	C	Soldado	60,0	15,0	14,4	9,2		
SA 210 C	C-Mn	Sin costura (sin soldadura)	70,0	17,5	16,6	12,0		
B. Tubos de acero de baja aleación								
SA 209 T1b	C-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	53,0	13,3	13,2	13,1		
SA 250 T1b	C-1/2 Mo	Soldado	53,0	11,3	11,2	11,1		
SA 250 T1	C-1/2 Mo	Soldado	55,0	11,7	11,7	11,7		
SA 209 T1	C-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	55,0	13,8	13,8	13,7		
SA 213 T2	1/2 Cr-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,4		
SA 423-1	3/4 C-1/2 Ni-Cu	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	—		
SA-213-T12	1 Cr-Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,8		
SA-213-T11	1 1/4 Cr-1/2 Mo-Si	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	15,0		
SA-213-T3b	2 Cr-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,7		
SA-213-T22	2 1/4 Cr-1 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	15,0		
				De -20 a 100 °F	300 °F	500 °F	700 °F	800 °F
SA 213-T21	3 Cr-1 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	15,0	14,8	14,5
SA 213-T5	5 Cr-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	15,0	13,4	12,8
SA 213-T7	7 Cr-1/2 Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,5	13,4	12,5
SA 213-T9	9 Cr-Mo	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	15,0	14,5	13,4	12,8
C. Tubos de acero de alta aleación								
SA 268-TP405	12 Cr-1A1	Sin costura (sin soldadura)	60,0	15,0	13,3	12,9	12,1	—
SA 268-TP446	27 Cr	Sin costura (sin soldadura)	70,0	17,5	15,6	14,5	14,1	—
SA 213-TP304	18 Cr-8 Ni	Sin costura (sin soldadura)	75,0	18,8	16,6	15,9	15,9	15,2
SA 213-TP316	16 Cr-12 Ni & 2Mo	Sin costura (sin soldadura)	75,0	18,8	18,4	18,0	16,3	15,9
SA 213-TP321	18 Cr-10 Ni & Ti	Sin costura (sin soldadura)	75,0	18,8	17,3	17,1	15,8	15,5
SA 213-TP347	18 Cr-10 Ni & Cb	Sin costura (sin soldadura)	75,0	18,8	15,5	14,9	14,7	14,7

* N. del T.: Para pasar de kilopondios/pulgada² a kg/cm² hay que multiplicar por 645,16.

Figura 9.2. Tensiones admisibles típicas para el material de tubería según código ASME, Sección II, parte D. (Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.)

Número de especificación	Designación	Tensión de rotura, kilopondios/pulgada ²	Tensión admisible representativa no excediendo la temperatura del metal en °F			
			De -20 a 650 °F (de -6 a 343 °C)		800 °F (427 °C)	
A. Chapa de acero al carbono						
SA 285A	Carbono, C	45,0	11,3	8,3		
SA 285B	Carbono, C	50,0	12,5	9,0		
SA 285C	Carbono, C	55,0	13,8	10,2		
SA 442 Gr55	C-Mn-Si	55,0	13,8	10,2		
SA 515 Gr55	C-Si	55,0	13,8	10,2		
SA 516 Gr55	C-Si	55,0	13,8	10,2		
SA 442 Gr60	C-Mn-Si	60,0	15,0	10,8		
SA 516 Gr60	C-Si	60,0	15,0	10,8		
SA 515 Gr60	C-Si	60,0	15,0	10,8		
SA 515 Gr65	C-Si	65,0	16,3	11,4		
SA 516 Gr65	C-Mn-Si	65,0	16,3	11,4		
SA 515 Gr70	C-Si	70,0	17,5	12,0		
SA 516 Gr70	C-Mn-Si	70,0	17,5	12,0		
SA 299	C-Mn-Si	75,0	18,8	12,0		
B. Chapa de acero de baja aleación						
SA 204A	C-1/2 Mo	65,0	16,3	16,2		
SA 204B	C-1/2 Mo	70,0	17,5	17,5		
SA 204C	C-1/2 Mo	75,0	18,8	18,8		
SA 302A	Mn-1/2 Mo	75,0	18,8	17,7		
SA 302B	Mn-1/2 Mo	80,0	20,0	18,8		
SA 302C	Mn-1/2 Mo-1/2 Ni	80,0	20,0	18,8		
SA 302D	Mn-1/2 Mo-3/4 Ni	80,0	20,0	18,8		
SA 225A	Mn-V	70,0	17,5	14,8		
SA 225B	Mn-V	75,0	18,8	12,0		
SA 202A	1/2 Cr-1 1/4 Mn-Si	75,0	18,8	12,0		
SA 202B	1/2 Cr-1 1/4 Mn-Si	85,0	21,3	12,0		
SA 203A & D	2 1/2 Ni & 3 1/2 Ni	65,0	16,3	11,4		
SA 203B & E	2 1/2 Ni & 3 1/2 Ni	70,0	17,5	12,0		
SA 387 2C1.1	1/2 Cr-1/2 Mo	55,0	13,8	13,5		
SA 387 12C1.1	1 Cr-1/2 Mo	55,0	13,8	13,8		
SA 387 11C1.1	1 1/4 Cr-1/2 Mo-Si	60,0	15,0	14,8		
SA 387 22C1.1	2 1/4 Cr-1 Mo	60,0	15,0	15,0		
SA 387 21C1.1	3 Cr-1 Mo	60,0	15,0	13,9		
SA 387-5	5 Cr-1/2 Mo	60,0	15,0	12,8		
C. Chapa de acero de alta aleación						
			-20 a 100	300	500	700
SA 240-405	12 Cr-1A1	60,0	15,0	13,3	12,9	12,1
SA 240-304	18 Cr-8Ni	75,0	18,8	16,6	15,9	15,9
SA 240-316	16 Cr-12Ni-2 Mo	75,0	18,8	18,4	18,0	16,3
SA 240-321	18 Cr-10Ni-Ti	75,0	18,8	17,3	17,1	15,8
SA 240-347	18 Cr-10Ni-Cb	75,0	18,8	15,5	14,9	14,7

N. del T.: Para pasar de kilopondios/in² a kg/mm², hay que multiplicar por 645,16.

Figura 9.3. Tensiones admisibles típicas para los metales de chapa según el código ASME, Sección II, parte D. (*Cortersía de American Society of Mechanical Engineers.*)

Solución. Usando la ecuación:

$$t = \frac{PD}{2S + P} + 0,005D + e$$

donde: $P = 600$ psi (42 kg/cm²).

$S = 11,500$ lbs/in² de la Figura 9.2 a 700 °F.

$$D = 2'' \text{ (50,8 mm).}$$

$e = 0$ (supuesto; si es preciso añadir 0,04 si el tubo está por debajo del espesor requerido por el Código para tubos expandidos).

Sustituyendo valores:

$$t = \frac{600(2)}{2(11.500) + 600} + 0,005(2) + 0 = 0,061'' = 1,55 \text{ mm}$$

Como este valor está por debajo del valor mínimo de la Tabla de la Figura 9.1 para 2'' de diámetro (que marca 0,154'') añadimos 0,04, con lo que:

$$t = 0,061 + 0,04 = 0,101'' = 2,57 \text{ mm}$$

PRESIÓN ADMISIBLE EN LOS TUBOS DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES

Método antiguo: anterior a 1986. Para calderas de tubos de humos que utilizan el material común de tubos tipo SA-83 y SA-178A:

$$P = 14.000 \left(\frac{t - 0,065}{D} \right)$$

donde: P = máxima presión admisible, psi.

t = mínimo espesor requerido, in.

D = diámetro exterior del tubo, in.

Para calderas de tubos de cobre de especificación SB-75:

$$P = 12.000 \left(\frac{t - 0,039}{D} \right) - 250$$

Ejemplo. ¿Qué presión se permite sobre un tubo de acero de especificación SA-192 con los asientos finales del tubo expandidos y de 3'' (76,2 mm) de diámetro, con espesor de pared de 0,115'' (2,921 mm) y que va a utilizarse en una caldera pirotubular?

Solución.

$$P = \frac{14.000(0,115 - 0,065)}{3} = 4.667 \cdot (0,050) = 233 \text{ psi} = 16,3 \text{ kg/cm}^2$$

Método del nuevo Código. Es necesario utilizar los gráficos de presión exterior de la Sección II, parte D, del código ASME de calderas. Hay que obtener dos factores. El factor *A* se obtiene de una gráfica que se muestra en la Figura 9.4. Con el factor *A*, el factor *B* se obtiene de otra gráfica que está basada en el material utilizado con el límite elástico como criterio para cada curva. La Figura 9.5 es para acero al carbono y de baja aleación con un límite elástico mínimo de 24.000 psi (1.680 kg/cm²) hasta 30.000 psi (2.100 kg/cm²). El problema anterior se resuelve por el nuevo método como sigue a continuación.

El nuevo método requiere la utilización de la presión externa como fuerza actuando sobre el tubo en una cierta longitud, que para las calderas pirotubulares es desde la placa tubular hasta la otra placa tubular (distancia entre las dos placas de caldera). Para este ejemplo, suponemos que esta distancia es de 10 pies (3 metros). El primer paso, según el nuevo método ASME, es obtener los siguientes ratios o relaciones para el mismo tubo como se ha dado en el problema anterior:

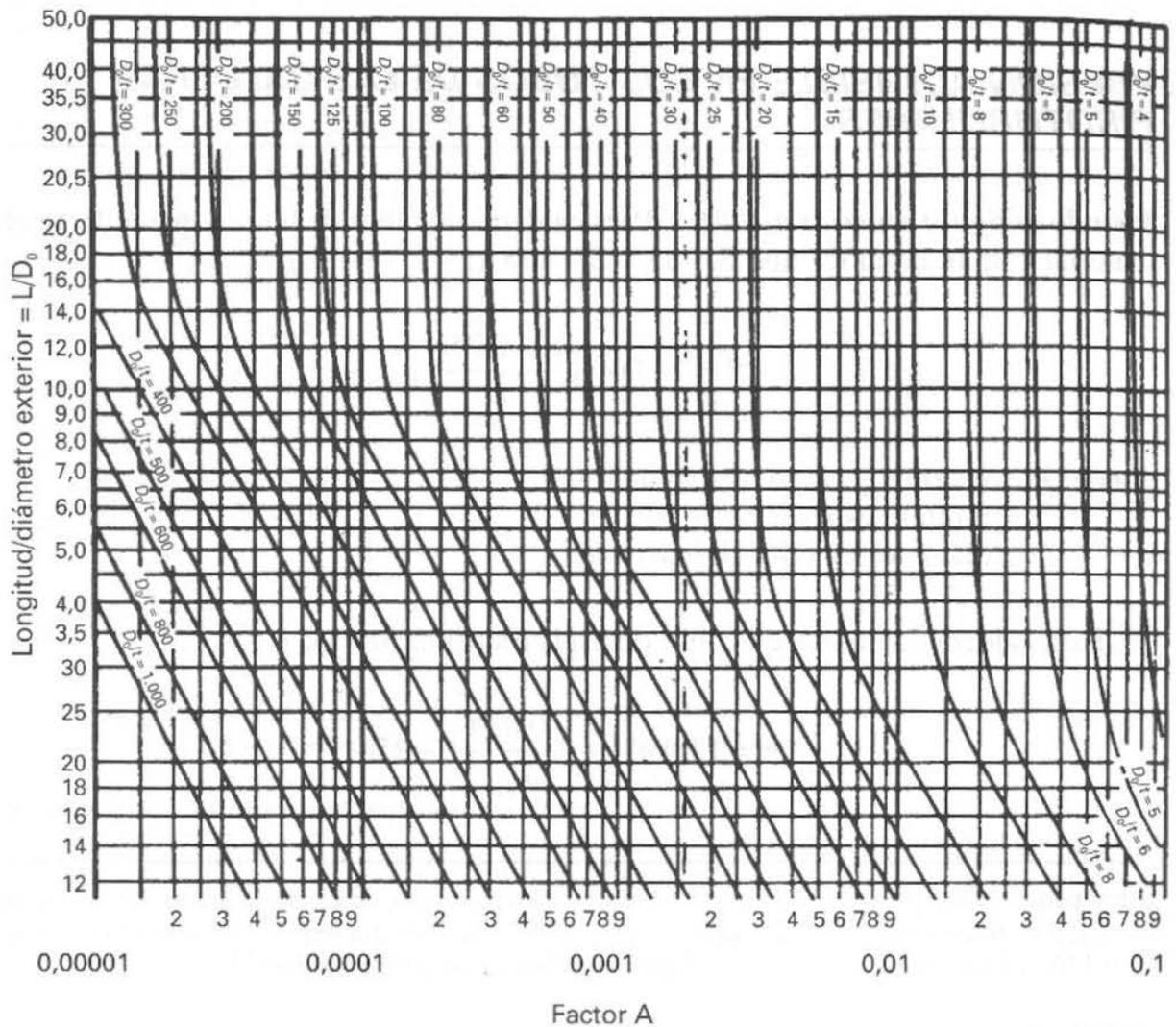


Figura 9.4. Gráfica del código ASME, Sección II, parte D, para determinar el Factor *A* al calcular la presión externa admisible para tubos de calderas pirotubulares, conductos y hornos. (Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.)

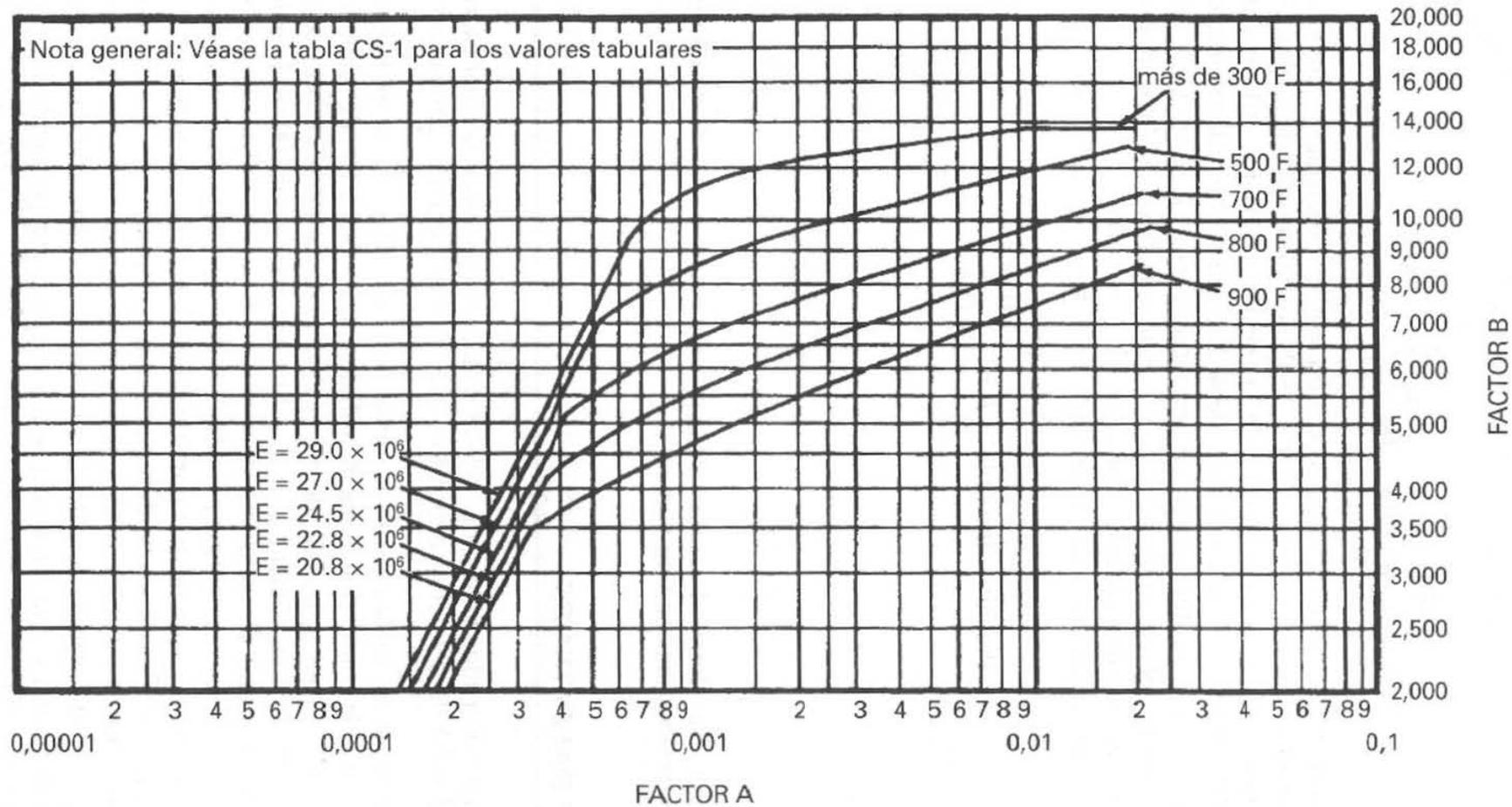


Figura 9.5. Gráfica del código ASME, Sección II, parte D, para determinar el factor B de los tubos para calderas y hornos pirotubulares, sometidos a presión exterior y construidos en aceros al carbono o aceros de baja aleación con límite elástico mínimo especificado de 24.000 psi ($1,68 \times 10^6$ kg/cm²) y máximo de 30.000 psi ($2,1 \times 10^6$ kg/cm²). (Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.)

$$\frac{\text{Diámetro exterior}}{\text{Espesor}} = \frac{D_0}{t} = \frac{3}{0,115} = 26$$

$$\frac{\text{Longitud}}{\text{Diámetro exterior}} = \frac{L}{D_0} = \frac{10 \cdot 12}{3} = 40$$

Véase la Figura 9.4. Utilice los valores de $L/D_0 = 40$ en ordenadas y moviéndose horizontalmente en la línea llega hasta $D_0/t = 26$. Baje a abscisas y lea $A = 0,0012$.

Véase la Figura 9.5. Ésta es la gráfica de la presión exterior a utilizar para el material SA-178A del tubo. Usando el valor de A determinado anteriormente, muévase verticalmente hasta la línea curva de temperatura 700°F (371°C) y en esa curva (en ese punto de intersección del valor A con la curva), vaya horizontalmente hasta la ordenada de la curva obtenido así el factor $B = 7.400$.

El código ASME de calderas da la siguiente ecuación para este caso:

$$\text{Presión admisible} = P = \frac{4B}{3 \cdot D_0/t}$$

y sustituyendo:

$$P = \frac{4 \cdot 7.400}{3 \cdot 26} = 379,5 \text{ psi} = 26,5 \text{ kg/cm}^2$$

Como puede verse, el método gráfico de la presión exterior considera la longitud del tubo, que el método antiguo no considera.

VIROLAS Y CALDERINES

Para calcular la presión admisible sobre virolas o calderines y tubos normalizados de más de 5" (125 mm) de diámetro, deben tomarse en consideración dos factores:

1. Eficiencia de la soldadura de la junta longitudinal. Si una soldadura de unión se nivela con la chapa, puede utilizarse un 100 por 100 de eficiencia o rendimiento, lo que se ha exigido por el Código desde 1986. De otra manera, hay que utilizar una eficiencia de la soldadura del 90 por 100. Si la caldera era de construcción remachada (roblonada), se tenía que utilizar una eficiencia de unión apropiada (véase el código ASME de 1971). Si la virola es del tipo sin costura, se usa un 100 por 100 de eficiencia (véase la Figura 9.6a).
2. Como las calderas de tubos de agua están construidas de forma que los calderines tienen los orificios de entrada de los tubos, el efecto de debilitamiento que ello origina se calcula en términos de una eficiencia o rendimiento de unión, y esta eficiencia se usa con el correspondiente espesor de la virola para obtener una presión de trabajo admisible para la virola o calderín en la zona de los orificios de los tubos.

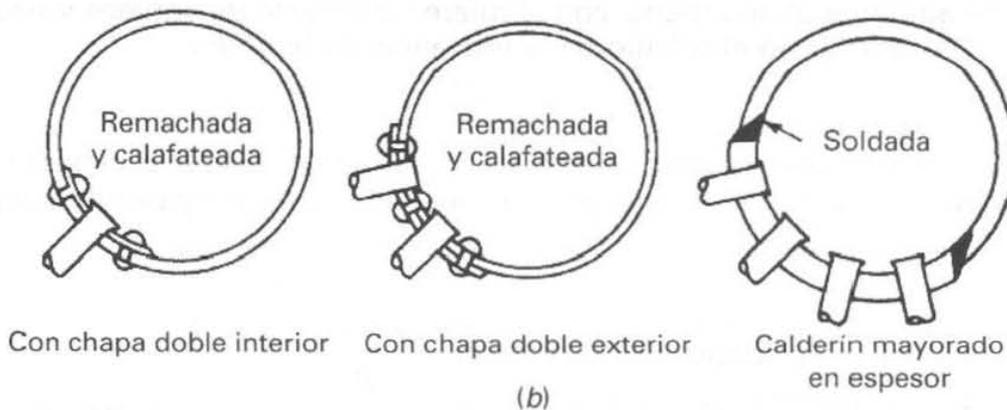
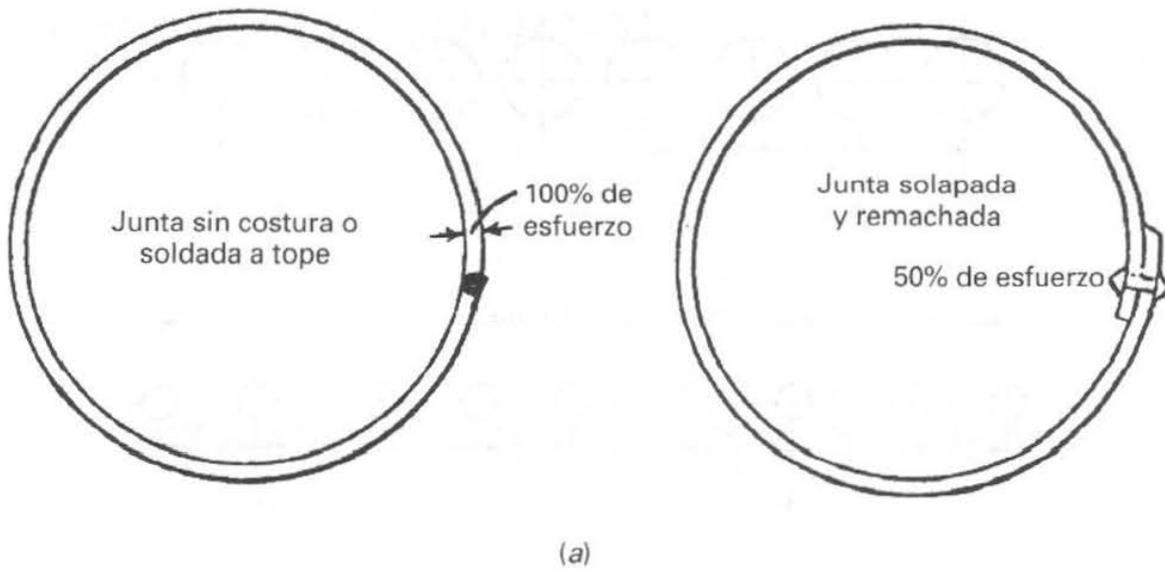


Figura 9.6. La eficiencia o rendimiento de calderines y juntas de virola se determina por el tipo de construcción. (a) La virola sin costura o soldada a tope tiene un 100 por 100 de eficiencia comparada con una junta antigua remachada y solapada. (b) Las juntas de unión de los calderines o virolas se construyen de mayor espesor para contrarrestar el debilitamiento producido por los orificios de los tubos. Las viejas calderas reblonadas utilizan doble chapa como se ve en el dibujo. Los calderines soldados tienen una sección fina o delgada y una sección de mayor espesor del calderín y ambas están unidas por soldadura.

La eficiencia de una unión se halla como sigue: cuando el paso entre agujeros (taladros) es igual (Fig. 9.7a de la página siguiente):

$$\text{Eficiencia} = \frac{p - d}{p}$$

donde: p = paso o distancia longitudinal entre agujeros, pulgadas o mm.
 d = diámetro del agujero, pulgadas o mm.

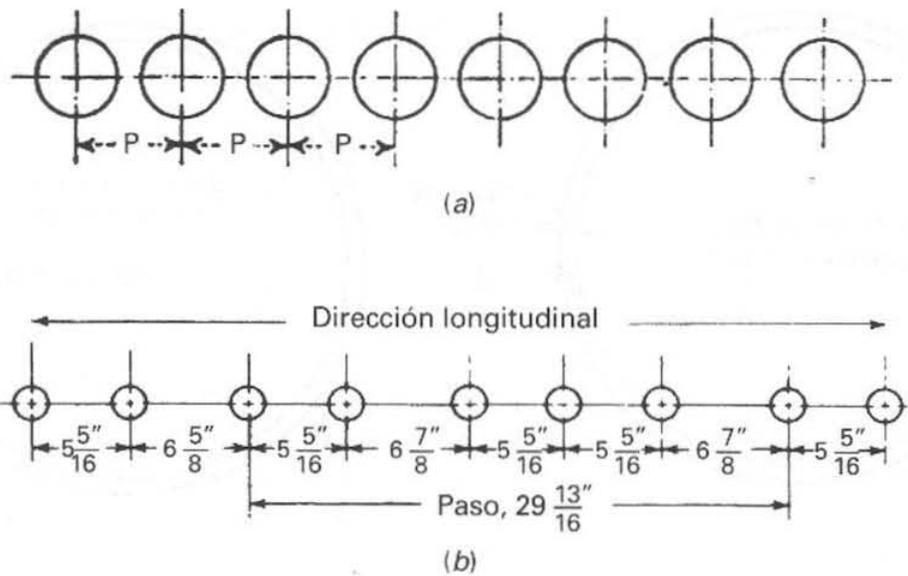


Figura 9.7. Determinación del paso para calcular la unión. (a) Orificios de los tubos igualmente espaciados con el mismo diámetro de orificio. (b) Espaciado desigual de agujeros de los tubos, con el mismo diámetro de agujero y paso a utilizar en el cálculo de la eficiencia de la unión.

Si el paso de los agujeros o taladros es desigual (Fig. 9.7b), deberá seleccionarse una unidad longitudinal de longitud en la que estén incluidos todos los pasos desiguales. Así pues:

$$\text{Eficiencia de la unión} = \frac{p - nd}{p}$$

donde: p = longitud o paso seleccionado para incluir todas las variaciones de paso, pulgadas o mm.

d = diámetro de los taladros o agujeros, pulgadas o mm.

n = número de taladros en la longitud seleccionada.

El código ASME, Sección I, proporciona métodos para hallar la eficiencia de uniones diagonales por medio de gráficos.

La eficiencia de las uniones usuales de tubos es bastante baja, normalmente del 35 por 100 al 50 por 100. En tiempos pasados, en la práctica de calderas roblonadas, a menudo, la resistencia de la unión se reforzaba con una chapa o doble espesor sobre la sección de unión de los taladros. Los agujeros o taladros estaban en toda la sección; así, aunque la eficiencia de la unión no se aumentaba porque el espaciado del tubo permanecía inalterado, el espesor sí se aumentaba (véase la Figura 9.6b).

Como ilustra la Figura 9.7b, otro método para aumentar la resistencia de la unión es hacer el calderín en dos mitades longitudinales con los extremos longitudinales soldados y la zona de los taladros de mayor espesor. Las zonas de espesor desigual son mecanizadas normalmente en la zona de mayor espesor con un fresado de 3 a 1 para igualar el espesor de la chapa más delgada antes de la soldadura. Esto se hace para evitar la concentración de tensiones en la junta o unión.

CÁLCULO DE LA PRESIÓN ADMISIBLE

1. Para calderas antiguas, véase el código ASME de 1971. La ecuación siguiente se utilizó para calcular la presión admisible de virolas o calderines:

$$P = \frac{0,8SEt}{R + 0,6t} \quad \text{o} \quad t = \frac{PR}{0,8SE - 0,6P}$$

2. Para construcción soldada o sin costura, con el refuerzo de soldadura eliminado sustancialmente y la chapa de refuerzo también eliminada, utilice la ecuación de la Sección I:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(y - C)} \quad \text{o} \quad t = \frac{PR}{SE - (1 - y)P} + C$$

donde:

P = presión máxima admisible, en psi o kg/cm^2 .

S = máxima tensión admisible para la temperatura de trabajo del metal, lbs/in^2 o kg/cm^2 .

t = mínimo espesor necesario, pulgadas o cm.

R = radio interior del cilindro o virola, pulgadas o cm.

E = eficiencia de la unión. (E = eficiencia de las juntas longitudinales soldadas o de las uniones entre taladros, la que sea menor. $E = 1$ para cilindros sin costuras, y $E = 1$ para juntas soldadas, supuesto que todo el refuerzo sobre las juntas longitudinales está eliminado y nivelada la soldadura con la chapa. Para viejas calderas soldadas $E = 0,9$ si la unión no está repasada uniformemente. E = eficiencia para juntas remachadas. E = eficiencia para uniones entre taladros.)

C = factor dependiente de si el tubo o virola está taladrado (para calderines o virolas $C = 0$; véase el Código para otras especificaciones).

y = factor que depende de si el acero es férrico o austenítico según se especifique a continuación:

Temperatura	Valores de y	
	Acero férrico	Acero austenítico
Menor de 900 °F (480 °C)	0,4	0,4
950 °F (510 °C)	0,5	0,4
1.000 °F (538 °C)	0,7	0,4
1.050 °F (566 °C)	0,7	0,4
1.100 °F (593 °C)	0,7	0,5
1.150 °F (621 °C)	0,7	0,7

Ejemplo 1. Problema de una caldera antigua roblonada. Una caldera remachada tiene 66" (1,676 metros) de diámetro y 16 pies (4,80 metros) de longitud. La chapa de la virola es de 7/16" (11,11 mm) de espesor, la tensión admisible es de 13.750 lb/in² (962,5 kg/cm²) y la presión admisible es de 125 psi (8,75 kg/cm²). ¿Cuál es la eficiencia mínima admisible circunferencial de la junta periférica?

Solución. Utilizando la fórmula:

$$P = \frac{0,8 SET}{R + 0,6t}$$

sustituyendo valores:

$$125 = \frac{0,8(13.750)E(0,4375)}{33 + 0,6(0,4375)}$$

y despejando:

$$E = \frac{125(33,2625)}{11.000(0,4375)} = 0,864 \text{ (86,4 \%)}$$

$$\text{Eficiencia circunferencial} = \frac{86,4 \%}{2} = 43,2 \%$$

La resistencia circunferencial de la virola debe ser siempre al menos la mitad que la de la junta o unión longitudinal. Esto se ilustró en el Capítulo 8.

Ejemplo 2. Virola de espesor desigual a causa de problemas de unión. ¿Cuál es la máxima presión de trabajo admisible en un calderín soldado que tiene una chapa de 1,469" (37,31 mm) de espesor y 2,406" (61,11 mm) de espesor de la chapa tubular? El diámetro exterior de la virola es de 57,75" (1.454,15 mm). El diámetro exterior de la chapa tubular es de 58,688" (1.490,68 mm). El material es un acero al carbono tipo SA-515-70 y la temperatura del metal no es mayor de 650 °F (343 °C). La eficiencia de la unión es de 0,429 y la eficiencia de la junta soldada es del 100 por 100. La tensión admisible para este acero ferrítico es de 17.500 lbs/in² (1.225 kg/cm²). Los cálculos para la presión admisible deben hacerse por duplicado, como sigue.

Solución. Basándose en la unión por soldadura, en el espesor de la chapa y en el radio interior de la virola o chapa tubular:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

$$R = \frac{D}{2} - t = \frac{57,75''}{2} - 1,469 = 27,406''$$

$$y = 0,4 \quad \text{y} \quad C = 0$$

Así pues:

$$P = \frac{17.500 \times 1 \times (1,469)}{27,406 + (1 - 0,4) \times (1,469)} = 908 \text{ psi (63,62 kg/cm}^2\text{)}$$

Basándose en el espesor de la chapa tubular y eficiencia de la unión:

$$R = \frac{58,688}{2} - 2,406 = 26,938''$$

Utilizando la misma ecuación:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

$$P = \frac{17.500 \times 0,429 \times 2,406}{26,938 + (1 - 0,4) \times 2,046} = 636,44 \text{ psi (44,55 kg/cm}^2\text{)}$$

La presión más baja domina, la presión admisible es 636,44 psi (44,55 kg/cm²).

Ejemplo 3. Problema de eficiencia de la unión y presión admisible de virola. El calderín de lodos de una caldera de tubos de agua tiene un espesor de chapa de 5/8'' (15,9 mm) con un diámetro exterior de 43,25'' (1.098,6 mm) y tiene taladros para tubos de 3 9/32'' (83,341 mm) de diámetro separados horizontalmente con un paso de 5 5/16'' (134,93 mm) en grupos de tres (Fig. 9.7b) y dos tubos con 6 7/8'' (174,63 mm) entre grupos. El espesor de la chapa es de 1/2'' (12,7 mm). Los tubos y la chapa del calderín están soldados según exige el código ASME. El material para ambos es acero SA-285C con temperaturas máximas por debajo de 650 °F (343 °C) ¿Cuál es la máxima presión admisible para este calderín si el diámetro interior es de 43,125'' (1.095,375 mm)?

Solución. Utilizando la ecuación:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

donde: $S = 13.800 \text{ lbs/in}^2$ (966 kg/cm²), obtenido de la Figura 9.3.

$E = 1$ o la eficiencia calculada de la soldadura de unión.

$C = 0$.

$y = 0,4$.

Basándose en la virola de:

$$R = \frac{43,125}{2} - 0,5 = 21,0625'' \text{ (534,988 mm) con } t = 0,5''$$

Sustituyendo en la ecuación principal de P :

$$P = \frac{13.800(0,5 - 0)}{21,0625 + (1 - 0,4)(0,5 - 0)} = 323 \text{ psi (22,6 kg/cm}^2\text{)}$$

Basándose en la chapa tubular (es necesario calcular primero la eficiencia de la unión):

$$E = \frac{p - nd}{p} = \frac{29,8125 - 5(3,28125)}{29,8125} = 0,449$$

$$R = \frac{43,25}{2} - \frac{5}{8} = 21'' \text{ (533,4 mm)}$$

Sustituyendo en la ecuación de P :

$$P = \frac{13.800(0,449)(0,625 - 0)}{21 + (1 - 0,4)(0,625 - 0)} = 181,17 \text{ psi (12,7 kg/cm}^2\text{)}$$

y ésta es la presión admisible.

Virolas de chapa de gran espesor. Las virolas de gran espesor se definen en la Sección I como aquéllas cuyo espesor de chapa de virola excede del 50 por 100 del radio interior; bajo estas condiciones se utiliza la siguiente ecuación para calcular la presión admisible de la virola o colector:

$$P = SE \left[\frac{Z - 1}{Z + 1} \right]$$

donde: S = tensión admisible.

P = presión máxima admisible.

E = eficiencia de la unión o junta longitudinal o eficiencia de la soldadura.

$$Z = \frac{(SE + P)}{(SE - P)} = \left[\frac{(R + t)}{R} \right]^2 = \left[\frac{R_0}{R} \right]^2$$

donde: t = mínimo espesor de la chapa de la virola, pulgadas o cm.

R = radio interior de la zona más débil (o delgada) de la virola, pulgadas o cm.

R_0 = radio exterior de la zona más débil o delgada de la virola, pulgadas o cm.

Ejemplo de cálculo de presión admisible de una virola de gran espesor. Un colector cilíndrico de una caldera de tubos de agua está hecho de acero SA-204B y trabaja a 650 °F (340 °C). El diámetro exterior es de 12" (305 mm) y de 3" (76,2 mm) de espesor. Calcular la presión admisible.

Solución. De la tabla de características de los aceros (Fig. 9.3) se ve que para el acero SA-204B, la tensión $S = 17.500 \text{ lbs/in}^2$ (1.225 kg/cm^2).

$$R = \frac{12 - (2 \cdot 3)}{2} = 3''$$

El espesor de 3" excede del 150 por 100 del radio (1,5")

$$E = 1 \text{ (junta soldada)}$$

$$Z = \left[\frac{R}{R_0} \right]^2 = \left[\frac{6}{3} \right]^2 = 4$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$P = 17.500(1) \left[\frac{4 - 1}{4 + 1} \right] = 10.500 \text{ psi (735 kg/cm}^2\text{)}$$

Fondos curvados

Los fondos de calderín de la mayoría de las calderas de tubos de agua convencionales están cerrados con un fondo curvado esférico o elipsoidal. Cuanto más corto sea el radio de curvatura, esto es, cuanto menor sea la distancia o aproximación a la forma semiesférica de radio reducido, tanto mayor será la resistencia a la presión interior. Consecuentemente, el código ASME especifica que el radio no será mayor que el diámetro de la virola o calderín al cual está soldado, de otro modo el fondo requiere refuerzo o nervadura.

Hay cuatro tipos de fondos huecos no arriostrados permitidos por el Código: *segmento esférico*, *semielipsoidal*, *hemisférico* y *fondo plano*. Los tres primeros son fondos bombeados (Fig. 9.8a de la página siguiente). En la Figura 9.8b se ven algunos fondos planos y sistemas de refuerzo. Los fondos bombeados están prolongados en su extrema circunferencia con una prolongación cilíndrica para soldar a la virola y con un radio de esquina angular en el lado cóncavo del fondo de no menos que tres veces el espesor del fondo y en ningún caso menor del 6 por 100 del diámetro de la virola a la cual se van a soldar los fondos.

Las aberturas de paso de hombre en los fondos bombeados deben tener una pestaña o reborde de no menos de tres veces el espesor requerido del fondo para chapa de hasta $1 \frac{1}{2}''$ (38 mm) de espesor. Si es de mayor espesor, el espesor del reborde debe ser el espesor de la chapa más 3" (76,2 mm). La mínima anchura de la superficie de cierre para una junta de agujero de hombre debe ser $11/16''$ (17,5 mm) y los espesores de las juntas cuando están apretadas y comprimidas deben ser menores de $1/4''$ (6,4 mm).

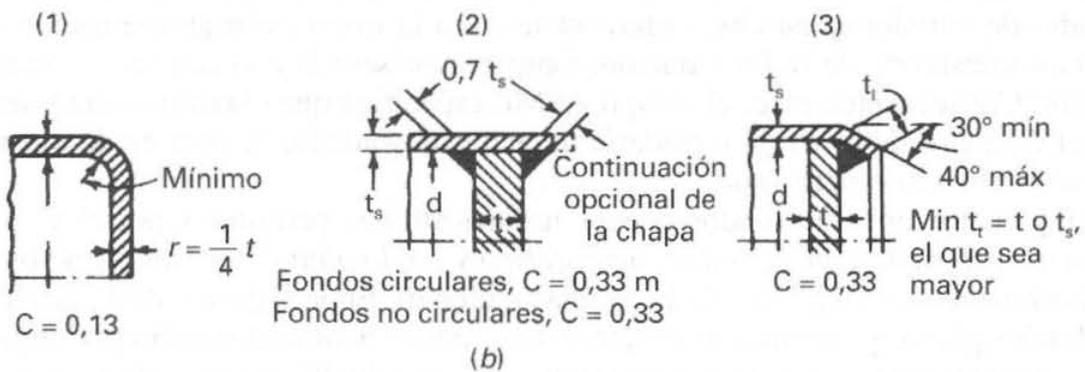
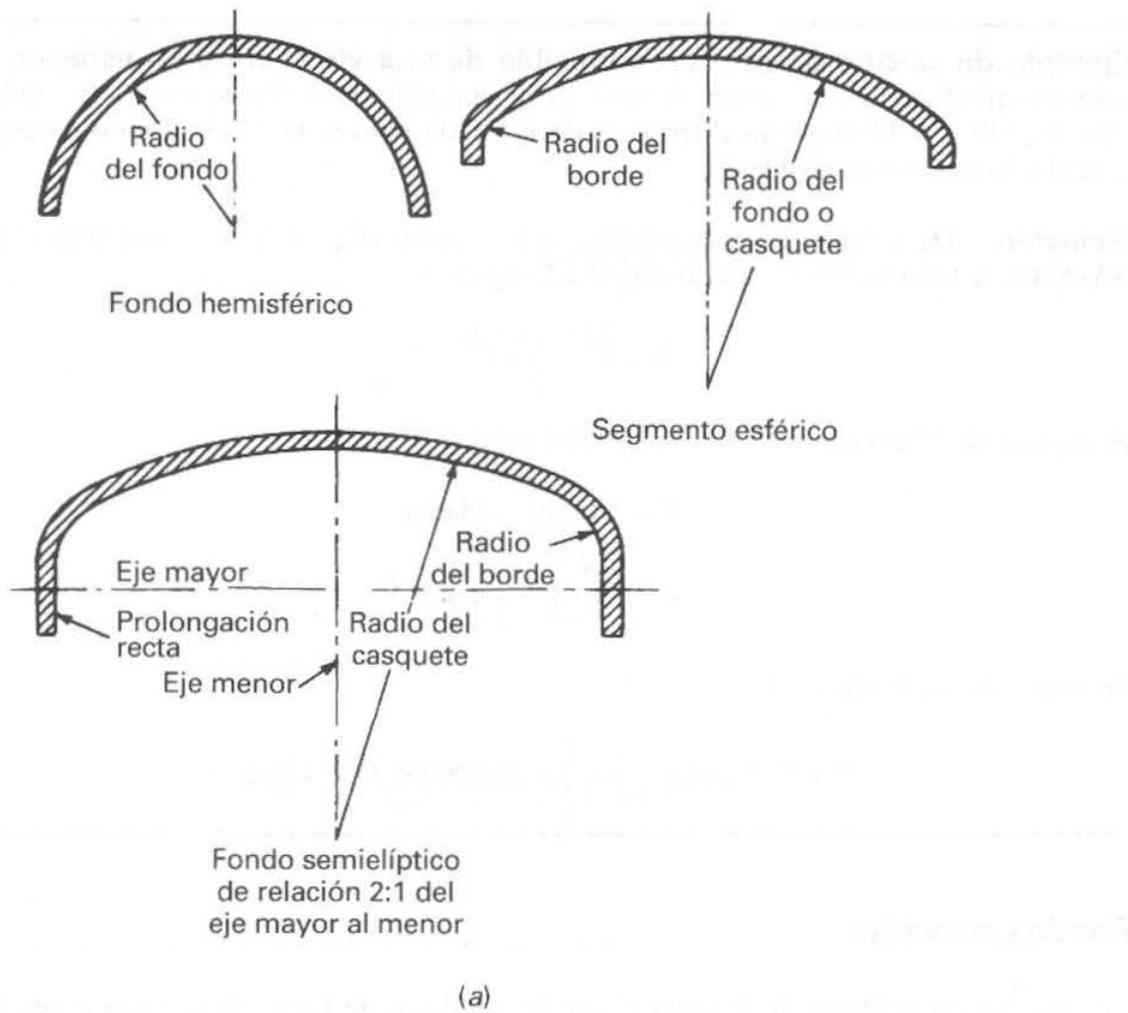


Figura 9.8. Fondos curvos y planos. (a) Tres tipos de fondos curvos: semiesférico, segmento o casquete esférico y semiesférico. (b) Métodos aceptables según el Código de soldar fondos planos que determinan el factor *C* en la ecuación de los fondos planos.

Los fondos curvados se calculan para la presión admisible según los siguientes métodos, dependiendo del tubo de fondo y de si tiene o no agujero de hombre. Para *segmentos esféricos sin manguito*, utilice la fórmula:

$$t = \frac{5PL}{4,8S}$$

donde: S = máxima tensión admisible, lbs/in² o kg/cm². (Sección II, parte D.)

t = espesor del fondo, pulgadas o cm.

P = máxima presión admisible, psi o kg/cm².

L = radio del lado cóncavo con el cual el fondo está curvado, pulgadas o cm.

Para *fondos semielípticos* (semielipsoidales) con presión por el lado cóncavo (sin agujero de hombre), utilice la fórmula de la chapa para virolas, pero suponga que la chapa es sin costura (no hay eficiencia de unión). Para *fondos semiesféricos* sin agujero de hombre y presión en el lado cóncavo, utilice la siguiente expresión:

$$t = \frac{PL}{1,6S} \quad (9.1)$$

o

$$t = \frac{PL}{2S - 0,2P} \quad (9.2)$$

donde t = espesor requerido, pulgadas o cm.

P = presión máxima admisible, psi o kg/cm².

S = tensión máxima admisible, lb/in² o kg/cm².

L = radio con el cual se ha construido el fondo, pulgadas o cm.

La ecuación 9.2 puede utilizarse para fondos de más de 1/2" (12,7 mm) de espesor con virolas o calderines de más de 5" (125 mm) de diámetro y que están integralmente agregados a calderines sin costura o que están unidos por soldadura de fusión sin arriostamientos.

Si el espesor requerido del fondo en la ecuación anterior excede del 35,6 por 100 del radio interior, debe utilizarse la fórmula siguiente para el espesor del fondo:

$$t = L(Y^{1/3} - 1)$$

donde:

$$Y = \frac{2(S + P)}{2(S - P)}$$

Fondos curvos con agujeros de hombre. Cuando uno de los fondos —segmento de esfera, semielíptico o hemisférico— tiene un agujero de hombre embridado o una abertura de acceso que excede de 6" (153 mm) en cualquier dimensión, se tiene en cuenta de la siguiente manera:

1. Por la fórmula para el segmento de fondo esférico.
2. Debe incrementarse el espesor del fondo en un 15 por 100, pero en ningún caso menos de 1/8" (3,2 mm) sobre el espesor obtenido por la fórmula.
3. Si el radio al cual se curva el fondo es menor del 80 por 100 del diámetro de la virola, el espesor del fondo con abertura de hombre embridada debe hallarse (o calcularse) haciendo el radio de la curva igual al 80 por 100 del diámetro de la virola.

Ejemplo de cálculos de fondo curvado. Un fondo curvado semielipsoidal de 42" (1.067 mm) de diámetro tiene un agujero de hombre embridado, es de 7/8" (22,2 mm) de espesor, tiene un radio de curvatura de 84" (2.134 mm) con la presión actuando sobre el lado cóncavo. El material es un acero SA-285C. ¿Cuál es la presión admisible para este fondo?

Solución. A causa del agujero de hombre embridado, la ecuación del segmento esférico debe utilizarse para calcular la presión admisible. Despejando esta ecuación para P :

$$P = \frac{4,8St}{5L}$$

con:

$$S = 13.800 \text{ lbs/in}^2 = 966 \text{ kg/cm}^2 \text{ (de la Sección II, parte D).}$$

$$t = 0,875'' - 0,131'' = 0,744'' \text{ (el espesor debe reducirse en un 15 por 100: } 0,875 \times 0,15 = 0,131 \text{ ó } 0,125, \text{ lo que sea mayor).}$$

Para fondos semielipsoidales el Código exige usar un radio de fondo igual al 80 por 100 del diámetro de la virola, o:

$$L = 0,8(42) = 33,6''$$

Y sustituyendo valores en P :

$$P = \frac{4,8(13.800)(0,744'')}{5(33,6)} = 293,35 \text{ psi (20,5 kg/cm}^2\text{)}$$

Ejemplo. Un fondo semiesférico de 54" (1.372 mm) de diámetro interior está soldado a la virola del calderín de una caldera de tubos de agua con presión en el lado cóncavo. La soldadura cumple los requisitos del Código. El material del fondo es un acero SA-387 grado 2 con tensión admisible de 13.800 Lbs/in² (966 kg/cm²). La caldera ha estado trabajando a 750 psi (52,5 kg/cm²) y 600 °F (316 °C) de sobrecalentamiento. ¿Cuál debería ser el espesor del fondo sin agujero y con agujero de hombre?

Solución. Sin agujero de hombre:

$$t = \frac{PL}{2S - 0,2P}$$

con:

$$P = 750 \text{ psi}$$

$$S = 13.800 \text{ lbs/in}^2$$

$$L = 27''$$

Sustituyendo:

$$t = \frac{750(27)}{2(13.800) - 0,2(750)} = 0,738'' (18,73 \text{ mm})$$

Con agujero de hombre:

$$\text{Se requiere } t = \frac{5PL}{4,8S} \text{ más } 0,15t \text{ o } 0,125'', \text{ lo que sea mayor.}$$

Sustituyendo como antes:

$$t = \frac{5(750)(27)}{4,8(13.800)} = 1,53''$$

$$\text{Se requiere } t = 1,53 + 0,15(1,53) = 1,76'' (44,7 \text{ mm})$$

Cálculo del radio de curvatura con los datos de bombeo y cuerda de segmentos.
Véase la Figura 9.9a de la página siguiente. En el triángulo ABO:

R = hipotenusa del triángulo rectángulo

$$R^2 = \left(\frac{C}{2}\right)^2 + (R - b)^2$$

Despejando y operando:

$$R^2 = \frac{C^2}{4} + R^2 + b^2 - 2Rb$$

$$R = \frac{C^2}{8b} + \frac{b}{2}$$

Ejemplo. Cuerda $C = 38''$ (965,2 mm) en un fondo con un bombeo $B = 4''$ (102 mm).
Por tanto:

$$R = \frac{(38)^2}{8(4)} + \frac{4}{2} = 47,13'' (1.197 \text{ mm})$$

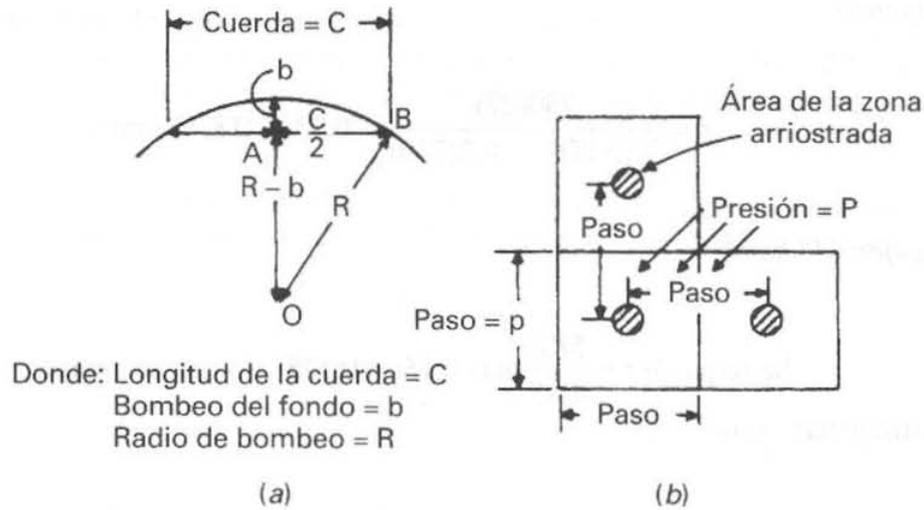


Figura 9.9. (a) El radio de bombeo puede calcularse mediante la longitud de la cuerda C y la flecha b . (b) Una riostra debe contrarrestar la fuerza creada por la presión actuante sobre el área limitada por la dimensión del paso.

Fondos planos

El código ASME tiene varias ecuaciones para fondos planos, dependiendo de si el fondo es circular, rectangular o cuadrado. Para un fondo típico circular, la ecuación usada es:

$$t = d \sqrt{\frac{CP}{S}}$$

donde: t = mínimo espesor requerido, pulgadas o cm.

d = diámetro, medido según indica el Código.

C = un factor, dependiente del método de unión (Fig. 9.8b).

S = valor de la tensión máxima admisible, lbs/in² o kg/cm².

P = valor de la presión máxima admisible, psi o kg/cm².

t_r = espesor requerido para la virola a la cual se une el fondo, pulgadas o cm.

t_s = espesor actual para la virola a la cual se une el fondo, pulgadas o cm.

m = relación de t_r/t_s .

(Consúltense PG- 31 de la Sección I y la Figura PG- 31 para modos de unión permitidos por el Código.)

Ejemplo. Un fondo plano no arriostrado está unido por soldadura a la virola como se muestra en la Figura 9.8b(2) y con tratamiento térmico posterior cumpliendo los requerimientos del Código. El fondo plano es circular de un diámetro de 16" (406 mm) y 1 1/2" (38 mm) de espesor. La virola sin costura a la cual está soldado el fondo es de un espesor de 3/8"

(9,53 mm) y los cálculos indican que sólo se requiere un espesor de $5/16''$ ($7,94 \text{ mm} \simeq 8 \text{ mm}$) para la virola. ¿Cuál es la presión admisible para el fondo plano?

Solución. Debe usarse la ecuación del fondo plano con los valores de: $S = 13.800 \text{ lb/in}^2$; $d = 16''$; $t = 1,5''$; $m = t_r/t_s = 5/16''/3/8'' = 0,3125/0,375 = 0,8333$; y de la Figura 9.8b(2) obtenemos $C = 0,33$ $m = 0,33 (0,833) = 0,275$. Con ello, sustituyendo en:

$$t = d \sqrt{\frac{CP}{S}}$$

obtenemos:

$$1,5 = 16 \sqrt{\frac{0,275P}{13.800}}$$

$$P = \frac{13.800}{0,275} \left[\frac{1,5}{16} \right]^2 = 441 \text{ psi (30,9 kg/cm}^2\text{)}$$

Para fondos planos no circulares se introduce un factor Z en la ecuación del fondo plano circular:

$$Z = 3,4 - \frac{2,4d}{D}$$

donde: d = lado corto.

D = lado largo.

Ejemplo. Si el fondo anterior fuera rectangular con unas dimensiones de $10'' \times 16''$ ($254 \times 406 \text{ mm}$) y las demás condiciones fuesen las mismas, excepto que $C = 0,33$. ¿Cuál sería la presión admisible sobre este fondo plano rectangular?

Solución. Con $d = 10''$ como lado menor del rectángulo, con $S = 13.800 \text{ lbs/in}^2$. Para fondos no circulares:

$$t = d \sqrt{\frac{ZCP}{S}}$$

$$C = 0,33$$

$$Z = 3,4 - \frac{2,4(10)}{16} = 1,9$$

Sustituyendo y resolviendo P :

$$1,5 = 10 \sqrt{\frac{1,9(0,33)P}{13.800}}$$

$$\sqrt{\frac{1,5}{10}} = \frac{1,9(0,33)P}{13.800}$$

$$P = \frac{13.800}{1,9(0,33)} \left[\frac{1,5}{10} \right]^2 = 495,2 \text{ psi (34,66 kg/cm}^2\text{)}$$

REFUERZO Y ARRIOSTRAMIENTO (ATIRANTADO)

El primer punto a recordar en todos los problemas que tienen que ver con el reforzamiento o arriostrado es que la tensión de una riostra o tirante es debida a la presión actuante (en psi o kg/cm²) sobre el área de chapa soportada por el tirante o riostra. Esta *presión total* está resistida por la resistencia interna del refuerzo (tensión unitaria) multiplicada por el área o sección neta del refuerzo. Estos hechos son la base de todas las fórmulas de los refuerzos.

Las riostras, tirantes y virotillas se usan en las calderas para reforzar la chapa plana u otra superficie expuesta a la carga de la presión, ya que las superficies planas deberían tener el espesor suficiente para resistir estas cargas si no se usasen las riostras o tirantes.

Para calcular y resolver problemas de arriostramiento con tirantes y virotillos, es necesario establecer los requisitos del Código que establecen que el área requerida de una riostra (tirante o virotillo) en su mínima sección de corte debe hallarse por cálculo de la carga sobre dicha riostra, dividiendo ésta por su tensión admisible sobre el tirante o riostra e incrementando el área o sección resultante por un factor de 1,1 (10 por 100) (véanse las Figuras 9.9b y 9.10 de la página siguiente). Puede desarrollarse en forma de ecuación, del modo siguiente, para usarla en problemas de tirantes/riostras:

$$\frac{\text{Carga sobre riostra}}{\text{Tensión admisible}} = \text{Área resistente de la riostra}$$

Estableciendo que:

S = tensión admisible, lb/in² o kg/cm².

a = área de la riostra o tirante (normalmente circular), pulgadas² o cm².

p = paso del espaciado de las riostras o tirantes, pulgadas o cm.

P = presión de trabajo admisible, psi o kg/cm².

Así pues:

$$\frac{(p^2 - a)P}{S} = \frac{a - (\text{área del orificio})}{1,1}$$

Adicionalmente al tirante o la riostra, la resistencia de la chapa entre tirantes debe ser la adecuada o la chapa se abombará entre los tirantes o riostras. El Código requiere que se compruebe esto mediante una de las siguientes ecuaciones:

$$t = p \sqrt{\frac{P}{CS}} \quad \text{o} \quad P = \frac{St^2C}{p^2}$$

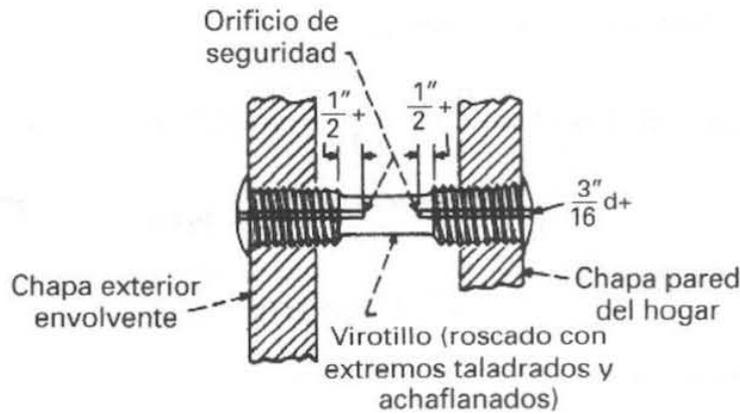


Figura 9.10. Tirante o virotillo taladrado de arriostamiento que lleva un taladro central que se prolonga 1/2" más allá de la rosca por ambos extremos, constituyendo un elemento de seguridad.

donde: S = máxima tensión admisible, lb/in² o kg/cm².

t = espesor requerido de la chapa, pulgadas o cm.

p = paso máximo, pulgadas o cm.

P = presión admisible máxima, psi o kg/cm².

C = factor dependiente del tipo de construcción.

Por ejemplo, $C = 2,1$ para riostras soldadas o atornilladas en chapas de no más de 7/16" (11,1 mm) de espesor, con los extremos remachados sobre ellas, y $C = 2,2$ si la chapa es de más de 7/16" (11,1 mm) de espesor.

La Sección I del código ASME lista otros valores de C e ilustra acerca del paso a utilizar en la construcción soldada en ángulo, ilustrada en la Figura A-8 de la Sección I. El paso es, generalmente, de tirante a tirante o del punto de tangencia en superficies curvas al primer tirante, como se ilustra en la Sección I.

Ejemplo de problema sobre arriostrado. Cuestión (a): ¿Cuál es el máximo paso al cuadrado admisible de los tirantes o riostras en la chapa plana del hogar de una caldera con caja de fuegos, si las chapas están soportadas por tirantes roscados o riostras de 7/8" (22,2 mm) con orificios de seguridad de 3/16" (4,76 mm) en los extremos como se ve en la Figura 9.10? Los tirantes o riostras tienen 12 roscas en V por pulgada y la presión es de 115 psi (8 kg/cm²). El material de los tirantes o riostras es acero SA-675 con una tensión admisible de 12.500 lbs/in² (875 kg/cm²), mientras que el material de la chapa es SA-299 con una tensión admisible de 18.800 lb/in² (1.316 kg/cm²) para trabajo a 650 °F (343 °C).

Cuestión (b): ¿Cuál es el mínimo espesor de chapa requerido entre las riostras?

Solución. Utilice esta ecuación para la cuestión (a):

$$(p^2 - a)P = \left(\frac{a - 0,0276}{1,1} \right) S$$

donde: $a = 0,4190$ in² (área de la sección de un tornillo de 7/8" roscado). El área del orificio de seguridad de 3/16" es de 0,0276 in².

$P = 115$ psi.

$S = 12.500$ lb/in²

Sustituyendo y resolviendo para el paso p :

$$(p^2 - 0,419)115 = \left(\frac{0,419 - 0,0276}{1,1} \right) 12.500 = 4.447,73$$

$$p^2 = \frac{0,419 + 4.447,73}{115} = 39,09$$

$$p = 6,25'' \text{ (158,8 mm)}$$

Para la cuestión (b), use:

$$t = p \sqrt{\frac{P}{CS}}$$

donde: $p = 6,25''$

$P = 115 \text{ psi}$

$C = 2,1$ (suponiendo que la chapa es menor de $7/16''$)

$S = 18.800 \text{ lb/in}^2$

Sustituyendo y resolviendo para t :

$$t = 6,25 \sqrt{\frac{115}{(2,1)(18.800)}} = 0,337'' \text{ (8,57 mm)}$$

Las riostras deben utilizarse para atirantar las chapas interiores del hogar a la exterior o chapa envolvente (Fig. 9.10). El tamaño y el paso del tirante tiene mucho que ver con la presión máxima admisible de la caldera.

Es de notar en la Figura 9.10 que los finales están torneados ligeramente de forma que el área del tornillo en la raíz de la rosca no sea menor que la del cuerpo central. Sin embargo, algunos tirantes roscados están fabricados sin aguzar los finales; así, al calcular el área neta se utilizará el diámetro de la raíz de la rosca.

Los finales afilados de los tirantes roscados deberían ser tratados térmicamente para reducir cualquier tendencia a la fragilidad. La longitud del tirante atornillado debe ser tal que al menos dos roscas sobresalgan de las chapas. Las extremidades están remachadas sobre las chapas.

Las riostras o tirantes se rompen a veces a consecuencia de la dilatación y contracción de la chapa del hogar; el punto de rotura está normalmente cerca de la superficie interior de la chapa. Los orificios —chivato (de seguridad)— de los tirantes deben ser de no más de $8''$ (200 mm) de longitud, ya que estos tirantes son considerados como menos flexibles y más susceptibles de roturas que los tirantes más largos. El orificio «chivato» es al menos de $3/16''$ (4,76 mm) de diámetro y está taladrado desde fuera hasta una profundidad de al menos $1/2''$ (12,7 mm) más allá de la superficie interior de la chapa o, si el tirante es con reducción central de diámetro, hasta al menos $1/2''$ más allá de esta reducción. Es obvio que cuando el tirante rompe a medio camino en su sección recta, la fuga a través del orificio «chivato» daría la alarma.

Riostras diagonales. Para arriostrar las partes planas de los colectores que no están soportados por los tubos, se usan riostras en diagonal por encima de los tubos. Este arriostramiento no es tan directo como el del tirante longitudinal y también atiranta las chapas. Pero el tirante diagonal deja más sitio encima de los tubos para inspección, reparación y limpieza. Una forma común de riostra diagonal se muestra en la Figura 9.11 de la página siguiente, ahora soldada en los puntos de anclaje según el Código*. Para calcular la resistencia de una riostra diagonal, hay que tener en consideración todo lo siguiente según el Código:

1. ¿Cuál es el sesgo o inclinación de la diagonal o su ángulo con la superficie plana que arriostra?
2. ¿Está soldada o remachada a la virola y colector?
3. ¿Cómo es la construcción en los extremos de la riostra donde se abrocha a la virola o colector: remachada o soldada, con pernos o pasadores, pletinas u hojas (tipo pata de gallo)? Véanse las Figuras 9.11a(2) y a(3).

El Código permite que las riostras diagonales o «tirantes de esquina» puedan calcularse como riostras rectas similares al método de la riostra atirantada. Este método hace apelación a la multiplicación de la presión por el área de un lado o término, con la tensión de sujeción de la riostra en el otro lado o término de la ecuación. Por ejemplo, en la Figura 9.11a(1), si la relación de L/l es 1,15 o menos (en una caldera pirotubular horizontal), el cuerpo de la riostra se calcula como tirante recto. Pero la tensión admisible a utilizar es del 90 por 100 de la permitida para un tirante recto. Si L/l es mayor de 1,15, el cuerpo del tirante se calcula incrementando el área requerida del tirante por L/l . En forma de ecuación, esto se expresa como sigue:

$$A = \frac{aL}{l}$$

donde: a = área de la sección recta del cuerpo de la riostra.

A = área de la sección diagonal del cuerpo de la riostra.

l = longitud de los ángulos recto y normal al área a arriostrar [véase la Figura 9.11a(1)].

L = longitud de la riostra diagonal.

Las reglas del Código sobre pletinas o «palmas» que estén remachadas al final de las riostras diagonales requeridas exigen que la sección recta de esta parte de la riostra sea al menos 25 por 100 mayor que la del cuerpo principal de la riostra.

Ejemplo. El área neta de un segmento a arriostrar es de 504 in² y está soportada por siete riostras diagonales de 1 1/4" de diámetro (1,227 in² de área neta). La longitud de estas diagonales es menor que 1,15 veces la longitud de un tirante directo y no excede de 120 diámetros. Se usa el acero SA-285C para construcción soldada según el Código. ¿Qué presión es permisible en el segmento arriostrado?

* *N. del T.*: En España, estos detalles de los «tirantes de esquina» y cartelas soldadas se pueden ver en las Figuras 25 y 26, páginas 73 y 74, respectivamente, de la Norma UNE 9-300-90/3.

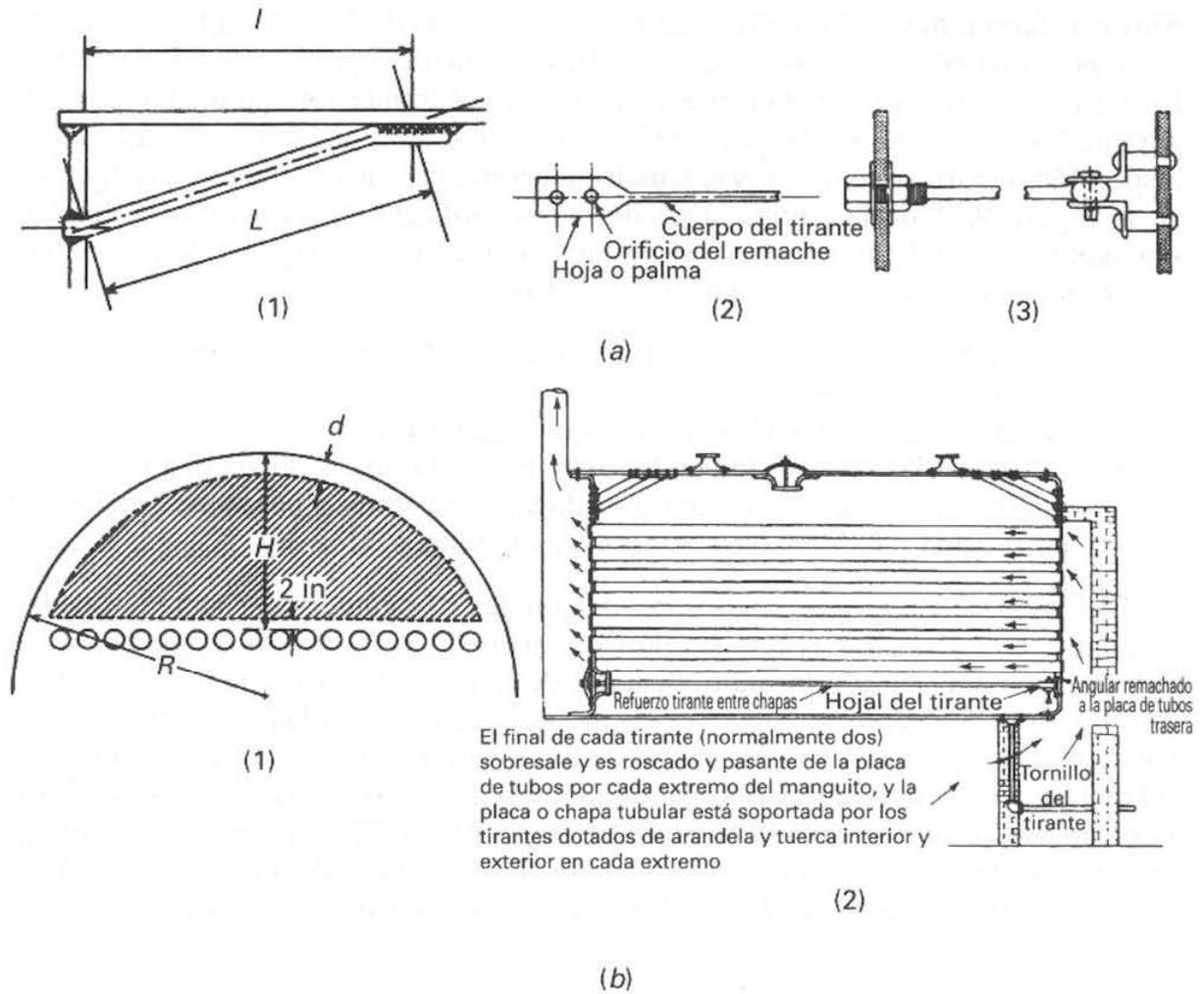


Figura 9.11. (a) Tipos de riostras usadas en calderas de tubos de humos para reforzar superficies planas: (1) tirante diagonal, (2) tirante con plentina y (3) riostra pasante. (b) Las superficies planas por encima de los tubos de 2" de diámetro desde la línea tangencial de tubos requieren arriostramiento, usualmente por riostras diagonales como se muestra, mientras que las superficies planas por debajo de los tubos están arriostradas con riostras longitudinales en toda la longitud entre las placas.

Solución. El material SA-285C grado C (tabla de la Figura 9.3) tiene una tensión admisible de 13.800 lb/in². Todas las temperaturas están por debajo de 400 °F (204 °C).

$$AP = 0,9(7aS)$$

$$a = \text{área de una riostra} = 1,227 \text{ in}^2$$

$$A = \text{área a arriostar} = 504 \text{ in}^2$$

Sustituyendo en la ecuación y resolviendo para P :

$$P = \frac{(0,9)(7)(1,227)(13.900)}{504} = 213,2 \text{ psi (14,92 kg/cm}^2\text{)}$$

Ejemplo. El área a arriostrar en la chapa frontal tubular de una caldera es de 136 in^2 . Si se refuerza con dos riostras diagonales del tipo soldado, ¿qué diámetro de riostra se requeriría para soportar con seguridad 165 psi, $L = 29 \frac{1}{4}''$; $l = 28 \frac{5}{8}''$. El material es SA-285C para riostras por debajo de $600 \text{ }^\circ\text{F}$ ($315 \text{ }^\circ\text{C}$). La tensión admisible es de 13.800 lbs/in^2 (966 kg/cm^2).

Solución.

$$\frac{L}{l} = \frac{29,25}{28,625} = 1,02, \text{ menos que } 1,15, \text{ puede calcularse como tirante recto.}$$

Utilizando:

$$AP = 0,9 naS$$

donde: $A = 136 \text{ in}^2$

* $n = 2$ riostras

$P = 165 \text{ psi}$

$S = 13.800 \text{ lbs/in}^2$

Sustituyendo y resolviendo para a :

$$136(165) = 0,9(2)13.800(a)$$

$$a = \frac{136(165)}{1,8(13.800)} = \frac{22.440}{24.840} = 0,903 \text{ in}^2$$

De ese modo, riostras de $1 \frac{1}{8}''$ deberán utilizarse, ya que:

$$\frac{\pi D^2}{4} = 0,903 \text{ in}^2$$

y resolviendo, $D = 1,1''$. El tamaño más próximo es $1 \frac{1}{8}''$ ($28,58 \text{ mm}$).

Áreas de las placas tubulares a arriostrar. El Código tiene dos ecuaciones para determinar el área a arriostrar en las superficies planas, o sea las áreas o zonas sin agujeros tubulares denominadas segmentos.

Segmentos de una virola embridada. El área a arriostrar está separada $2''$ ($50,8 \text{ mm}$) de los tubos y a una distancia d de la virola como se muestra en la Figura 9.11b(1). La distancia d es la más grande de las siguientes:

$d =$ el radio exterior de la brida, pero sin exceder 8 veces el espesor de la virola, o

$$d = 80 \frac{t}{\sqrt{P}}$$

donde: $d =$ distancia no arriostrada desde la virola, pulgadas o cm.

$t =$ espesor de la virola, pulgadas o cm.

$p =$ presión de trabajo máxima admisible, psi o kg/cm^2 .

El área neta A a arriostrar para una virola embridada es pues:

$$A = \frac{4(H - d - 2)^2}{3} \sqrt{\frac{2(R - d)}{H - d - 2}} - 0,608$$

donde: A = Área a arriostrar, in² o cm².

H = distancia desde los tubos hasta la virola, pulgadas o cm.

d = diámetro exterior de la brida, pulgadas o cm. Para virolas no embridadas, $d = 0$.

R = radio o diámetro de la virola, pulgadas o cm.

Ejemplo. (a) Una caldera de 66" (167,64 cm) de tubos de humos está trabajando a 140 psi (9,8 kg/cm²) de presión. Las placas embridadas frontales son de 9/16" (14,3 mm) de espesor. La distancia desde los tubos superiores a la virola es de 24" (609,6 mm) y $d = 3$ " (7,62 cm) [Fig. 9.11b(1)]. ¿Cuál es el área a arriostrar?

(b) La placa frontal incumple los requisitos del Código de la soldadura. Si esta placa se va a arriostrar mediante riostras diagonales de 1 1/4 (32 mm) de diámetro. ¿Cuántas riostras se precisarán si L no excede de l más de 1,15 veces y se admite una tensión de 9.500 lbs/in² (665 kg/cm²) en la sección normal de la riostra?

Solución. (a)

$$A = \frac{4(24 - 3 - 2)^2}{3} \sqrt{\frac{2(33 - 3)}{24 - 3 - 2}} - 0,608 = 768,6 \text{ in}^2 = 0,495587 \text{ m}^2$$

(b)

$$PA = 768,6 P = 0,9 naS$$

donde: n = número de riostras

a = área de cada riostra en in²: $\pi \times \frac{1,25^2}{4} = \pi \times 1,25^2/4 = 1,2272 \text{ in}^2 = 7,91 \text{ cm}^2$

S = tensión admisible, lb/in² o kg/cm²

P = presión admisible, psi o kg/cm²

Dando valores:

$$768,6(140) = 0,9(1,2272)9.500n$$

$$n = 10,26$$

Así que se colocarán 11 riostras.

Ejemplo. ¿Cuál sería el área a arriostrar según los datos del problema anterior si la placa frontal no fuese embridada?

Solución. Utilice la misma ecuación siguiente pero con $d = 0$:

$$A = \frac{4(H - d - 2)^2}{3} \sqrt{\frac{2(R - d)}{(H - d - 2)}} - 0,608$$

$$A = \frac{4(24 - 2)^2}{3} \sqrt{\frac{2(33)}{24 - 2}} - 0,608 = 998 \text{ in}^2 = 0,64387 \text{ cm}^2$$

En las antiguas calderas de hogar interior, el segmento de las chapas tubulares por encima de la fila superior de tubos requería arriostramiento. Para esto, había tres métodos comunes. En una caldera de este tipo que no excediera de 36" (914 mm) de diámetro o 100 psi (7 kg/cm²) de presión de trabajo, se remachaban angulares de acero de otras formas estructurales como úes de acero a la chapa del segmento. Estas formas estructurales salientes eran de dimensiones proporcionadas para tener suficiente resistencia a la flexión para aguantar la carga de presión.

Para calderas que excedan de 36" (914 mm) de diámetro o de 100 psi (7 kg/cm²) de presión de trabajo, el segmento plano de las placas tubulares requiere arriostramiento bien mediante riostras diagonales entre la chapa tubular y la virola o por medio de riostras que atirantan ambas placas a través de toda la longitud de la caldera (entre placas) [Fig. 9.11b(2)]. Estas últimas son normalmente preferibles, porque dejan más espacio dentro de la caldera para limpieza e inspección. Las riostras longitudinales pueden hacer bastante difícil para un operario o inspector moverse cerca de los tubos de humos en el interior de la caldera.

Había tres tipos generales de riostras diagonales para conexión mediante remaches: el Houston, el MacGregor y el Sunlly. Es importante mantener todos ellos bajo tensión.

Las riostras diagonales son situadas en posición antes de que los tubos sean instalados en la caldera. Para evitar la distorsión de la placa frontal por la tensión de las riostras, se colocan o grapan una o más barras fuertes de acero entre las chapas tubulares frontales como unas vigas, con lo que las chapas tubulares se mantienen en posición venciendo o soportado la tensión de las riostras hasta que se instalen algunos de los tubos de humos. Estas vigas se conocen como «contrafuertes».

Las modernas riostras diagonales se sueldan como se muestra en la Figura 9.11a(1).

El arriostrado de la sección de placa tubular por debajo de los tubos de humos de las calderas de hogar interior y similares está afectado por las riostras longitudinales. Estas riostras están conectadas, roscadas en su extremo anterior y articuladas sobre la placa trasera según se ve en las Figuras 9.11a(3) y 9.11b(2). Los finales frontales de estas riostras longitudinales inferiores —normalmente en número de dos— pasan a través de la placa tubular frontal con tuercas y arandelas exteriores e interiores. Se hacen estancos a las fugas por medio de empaquetaduras metálicas blandas o anilladuras de varios tipos bajo las tuercas y arandelas.

La razón de porqué los finales traseros de las riostras longitudinales no pasan a través de la placa tubular trasera sino que se articulan interiormente a dicha placa es para que el fuego o calor a elevada temperatura no dañe la tuerca y roscados finales.

Si se ha provisto de un agujero de hombre embridado por debajo de los tubos en la placa frontal o chapa delantera de caldera, el efecto del arriostrado de la brida es

suficiente para permitir una deducción de 100 pulgadas² (645 cm²) en el área frontal arriostrada (placa frontal). Sin embargo, si se utilizan riostras longitudinales a través del colector o virola total, esto será obligatorio hacerlo (a no ser que se pongan riostras diagonales entre la parte superior de la chapa frontal de amarre de tubos y la virola y, así, estas pequeñas riostras diagonales sí serían suficientes para reforzar el segmento frontal) y así no habría deducción por embridado del área a reforzar en la chapa tubular delantera.

La Figura 9.12a ilustra la superficie neta a arriostrar cuando la distribución y colocación de tubos es irregular. Las zonas adyacentes a los hogares cilíndricos, como se ve en la Figura 9.12b, pueden no necesitar arriostrado en tanto en cuanto la distancia sea igual o menor de $1\frac{1}{2}$ veces el paso, siempre que el paso esté calculado por la ecuación de la riostra roscada y se utilice el valor de C recomendado para dicha ecuación.

Vigas y riostras radiales. El tirante de arriostramiento (Fig. 9.13a) fue muy utilizado antiguamente para soportar las chapas de la bóveda del hogar de las locomotoras. Pero ha sido ampliamente reemplazado para este objetivo por la riostra radial (Fig. 9.13b). Todavía es utilizado para soportar las partes superiores de las cámaras de combustión de la caldera escocesa marina. El virotillo o tirante consta de una viga de fundición tubular con sus extremos apoyados sobre las chapas del hogar o caja de fuegos. Soporta la chapa bóveda cuasi-plana (la parte superior de la cámara de combustión) por medio de tornillos o espárragos roscados.

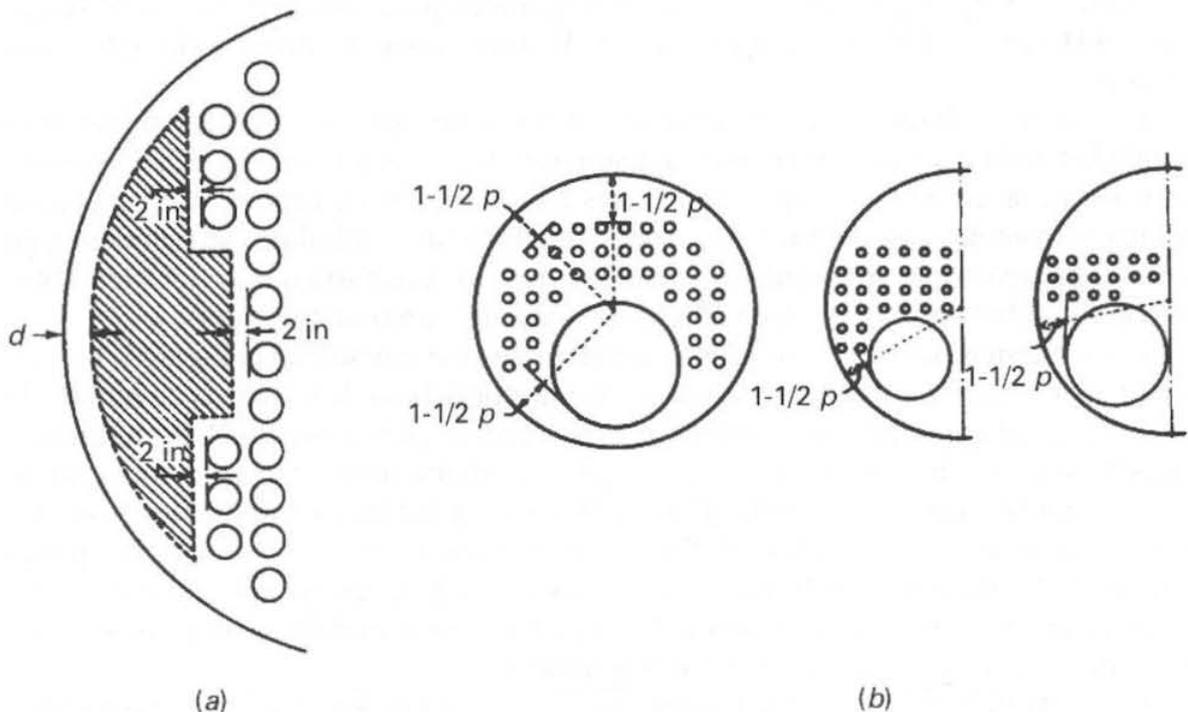


Figura 9.12. (a) Área a arriostrar cuando el modelo de disposición tubular es irregular. (b) Las zonas adyacentes a los hogares cilíndricos pueden diseñarse por la ecuación del tensor roscado con un paso máximo permitido como el señalado en la figura.

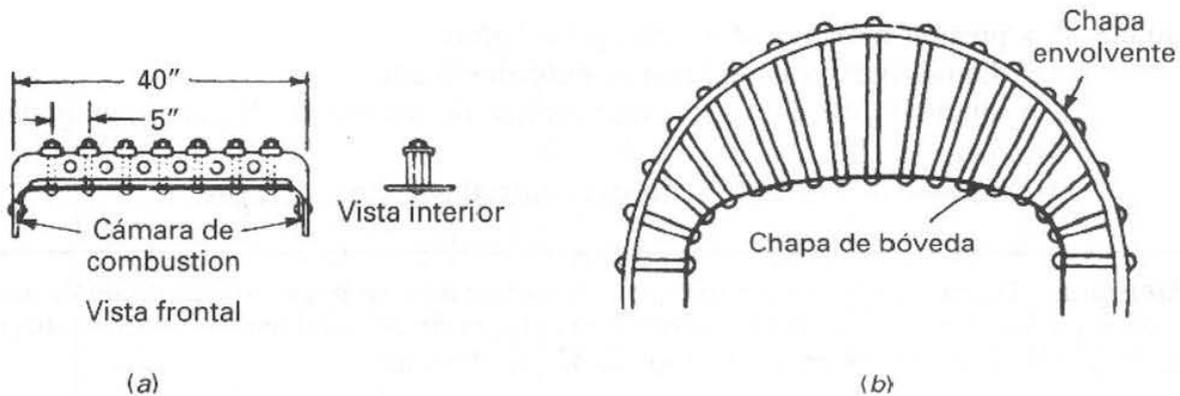


Figura 9.13. (a) Un tirante viga o virotillo se utiliza para soportar la bóveda de la caja de fuego (hogar) de locomotoras y calderas escocesas del hogar interior (marinas). (b) Tirantes radiales.

Los tirantes radiales son más flexibles y tienden a acumular menos recubrimientos (o depósitos) de circulación que los virotillos. Casi la única ventaja de los tirantes viga o virotillos es que pasan rectos a través de las chapas mejor que en ángulo como los tirantes radiales. El código ASME de calderas tiene ejemplos sobre el uso de ecuaciones especiales para los virotillos.

ARRIOSTRADO DEL HOGAR CONTRA SU COLAPSO

Las chapas del hogar de una caldera y de otras partes internas de calderas deben resistir la presión sobre las superficies externas que tienden a producir el colapso (reventón). Esta tendencia al colapso se resiste mediante el arriostamiento del hogar o arriostando la virola con tirantes y virotillos.

Un hogar que no sobrepase los 38" (965 mm) de diámetro exterior puede ser autosoportante, y la utilización de riostras puede eliminarse supuesto que el espesor del hogar es suficiente para rigidizar y que la luz del hogar no es demasiado grande.

Método anterior a 1986. El código ASME de calderas proporciona las dos fórmulas siguientes para hogares circulares autosoportantes, no arriostados y de no más de 4,5 diámetros de longitud de hogar. Cuando la longitud no excede de 120 veces el espesor de la chapa utilice:

$$P = \frac{51,5(300t - 1,03L)}{D} \quad (9.3)$$

Cuando la longitud excede de 120 veces el espesor de la chapa, utilice la ecuación siguiente:

$$P = \frac{1,09(10^6)(t^2)}{LD} \quad (9.4)$$

donde: P = presión máxima admisible, psi o kg/cm^2 .

D = diámetro exterior del hogar, pulgadas o cm.

L = longitud total del hogar entre centros de soldaduras de placas, pulgadas o cm.

t = espesor de la chapa del hogar, pulgadas o cm.

Ejemplo. Determinar la presión admisible de trabajo para un hogar no arriostrado de una caldera pirotubular siendo el diámetro exterior del hogar de 26" (660 mm), espesor de chapa de 7/16" (11,11 mm) y longitud del hogar de 42" (1.066,8 mm).

Solución.

$$130 \times 0,4375 = 52,38$$

Se aplica la Ecuación 9.3 (longitud menor de $120t$):

$$P = \frac{51,5(300t - 1,03L)}{D}$$

donde: $t = 0,4375''$

$L = 42''$

$D = 26''$

$$P = \frac{51,5[300(0,4375) - 1,03(42)]}{26} = \frac{51,5(87,99)}{26} = 174,3 \text{ psi (12,2 kg/cm}^2\text{)}$$

Método posterior a 1986. Este método necesita utilizar diagramas de presión externa para determinar la presión admisible, algo parecido al método de los tubos de humos visto anteriormente.

Usando los mismos datos que en el ejemplo anterior y refiriéndonos a la Figura 9.4:

Longitud del hogar, $L = 42''$ (1.066,8 mm).

Diámetro exterior del hogar, $D_0 = 26''$ (660,4 mm).

Espesor de chapa del hogar, $t = 0,4375''$.

El material del hogar es acero SA-210C con un límite elástico de 40.000 lbs/in^2 (2.800 kg/cm^2). Deben obtenerse las siguientes relaciones o ratios para obtener el factor A de la Figura 9.4:

$$\frac{L}{D} = \frac{42}{26} = 1,62 \quad ; \quad \frac{D_0}{t} = \frac{26}{0,4375} = 59,4$$

Refiriéndonos a la Figura 9.4 y utilizando estos ratios, se obtiene el factor $A = 0,00124$. Con este factor conocido y refiriéndonos ahora a la Figura 9.14 para hallar el factor B una temperatura de material mínima de 700 °F (371 °C), resulta un factor $B = 9.000$ de la derecha del gráfico. El código ASME proporciona la siguiente ecuación para la presión de trabajo admisible:

$$\text{Presión admisible } p = \frac{4B}{3D_0/t}$$

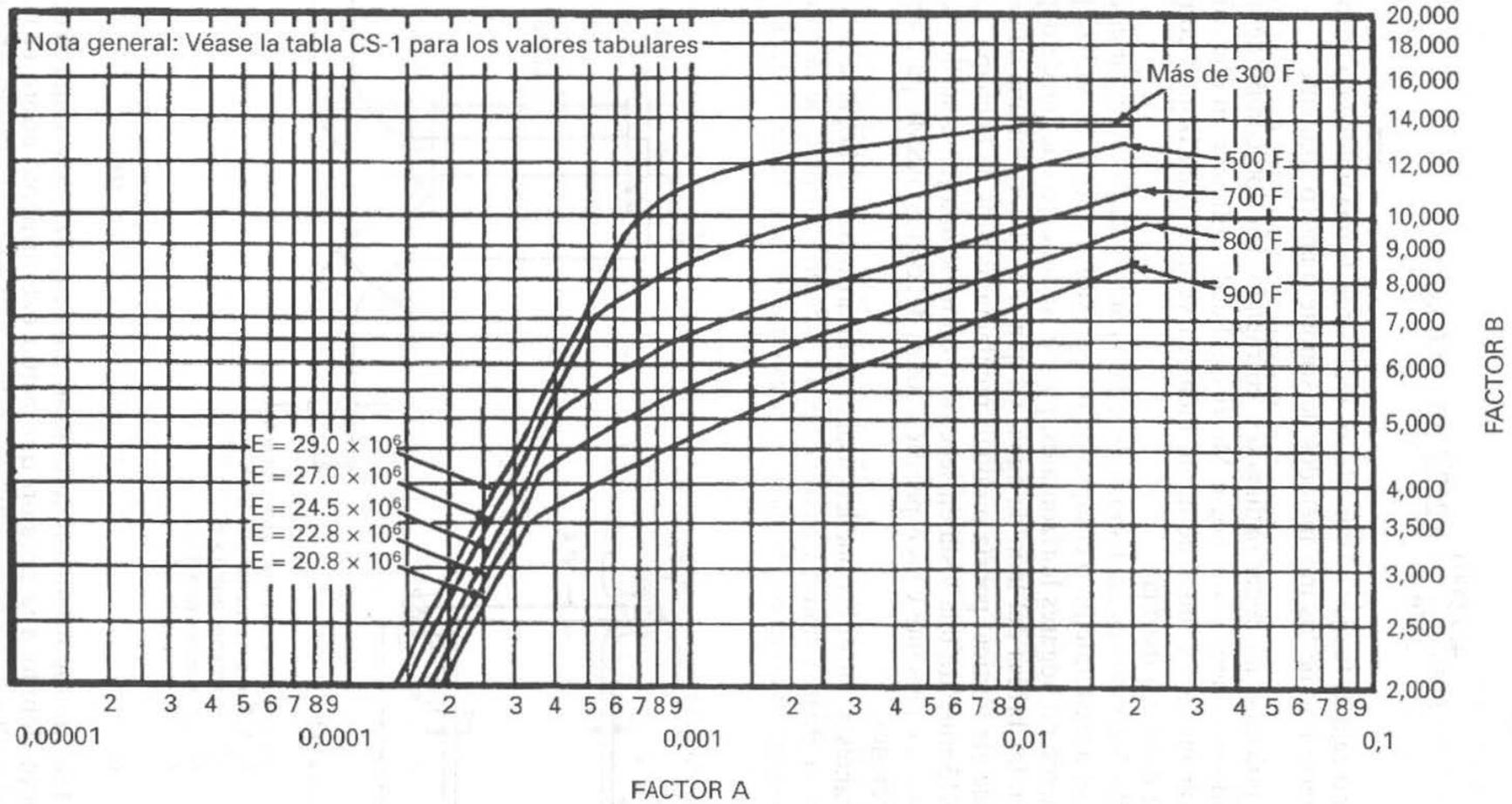


Figura 9.14. Tabla de la Sección II, parte D del código ASME para determinar el Factor B para tubos de calderas pirotubulares, chimeneas y hogares sometidos a presión externa y construidos de acero al carbono o de baja aleación con un límite elástico mínimo de 30.000 psi (2.100 kg/cm²) y superiores. (Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.)

y sustituyendo valores:

$$p = \frac{4(9.900)}{3(59,4)} = 222,2 \text{ psi (15,6 kg/cm}^2\text{)}$$

Si un hogar o caja de fuegos no cumple los requisitos de una unidad no arriostrada puede utilizarse uno de los tres métodos de soporte o apoyo siguiente:

1. Puede utilizarse un hogar ondulado o corrugado. Un tipo común de hogar ondulado se conoce como hogar Morrison. Puede utilizarse en una caldera de hogar interior y tubos de humo bien sea vertical u horizontal como la caldera escocesa marina.
2. El anillo Adamson es un dispositivo usado para rigidizar un hogar circular contra el aplastamiento o colapso bajo la presión exterior. Se utiliza principalmente en hogares horizontales, para el sedimento que puede depositarse en las bridas del lado de agua, ya que si estuviera en una caldera y hogar de eje vertical podría producir recalentamientos de la chapa. La Figura 9.15 muestra una vista en sección o corte de una junta-anillo Adamson pasada y presente y las especificaciones del código ASME para ver sus proporciones.
3. Los tirantes y virotillos pueden usarse para arriostrar el hogar a la virola exterior o chapa cilíndrica envolvente. El tamaño y el paso de las riostras tiene mucho que ver con la máxima presión admisible en la caldera.

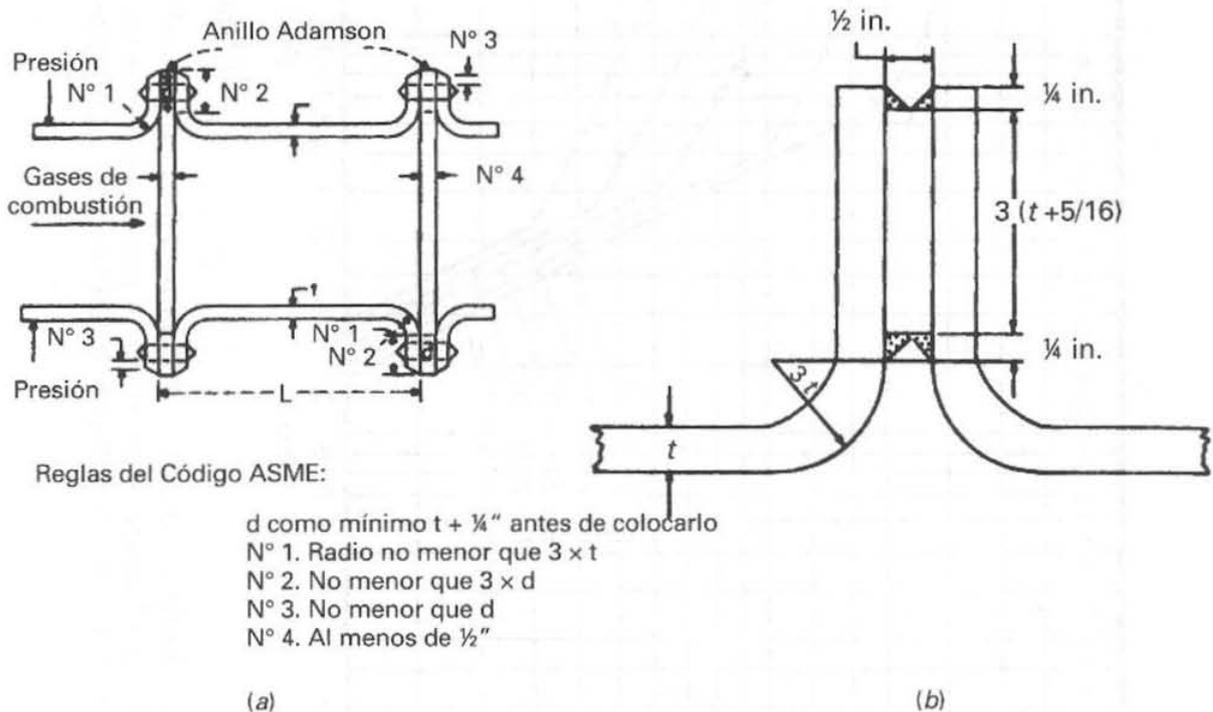


Figura 9.15. Los anillos Adamson se utilizan para rigidizar los hogares contra el aplastamiento debido a la presión que actúa exteriormente sobre el hogar. (a) Detalles del anillo Adamson según el Código existente. (b) Anillo Adamson montado con soldadura y detalles para este tipo de construcción.

El lector debería consultar la normativa (tanto americana, ASME; como española, Normas UNE) para una especificación más completa para hogares no arriostrados, cuyos detalles no se dan por no tener cabida en el espacio de este libro, y los cuales dan énfasis a los métodos de análisis para determinar la presión admisible.

REFUERZO DE ABERTURAS DE VIOLAS

Al abrir un agujero de hombre en la virola de una caldera, es necesario compensar el metal retirado. Esto se hace instalando un bastidor de refuerzo o brida de refuerzo cuando se necesita.

El mínimo agujero de hombre elíptico permitido por el código ASME es de 11" × 25" (280 mm × 381 mm). Al cortar la chapa de virola para hacer un refuerzo del agujero de este tamaño, el eje menor de la elipse se coloca a lo largo del eje longitudinal de la caldera de modo que se requiere menos material de refuerzo para reemplazar en este eje direccional más débil.

Al considerar un plano de la sección recta de la chapa de la virola de caldera en las proximidades del corte del agujero de hombre es necesario hallar el área total del metal que se ha «quitado», incluyendo orificios de remaches, y suministrando y poniendo un refuerzo o marco del hueco que tenga igual sección recta de corte en el mismo plano de la virola si el espesor de la virola no tiene exceso de espesor.

El Código de calderas de potencia ha detallado requisitos sobre corte de aberturas en virolas o calderines y cómo calcular el refuerzo alrededor de la abertura o marco-bastidor del hueco si es necesario. Se aplica generalmente el siguiente procedimiento (véase la Figura 9.16 de la página siguiente). El área requerida para ser restaurada por la abertura acotada d es:

$$A = d \times t_r \times F$$

donde: d = diámetro de la abertura terminada en el plano, pulgadas o cm.

t_r = espesor necesario de la chapa sin costura para la presión.

F = factor que considera el eje del tubo o tubuladura que entra en la abertura, usualmente 1,00.

Para determinar si hay suficiente metal disponible de la virola, tubo o tubuladura, soldaduras o refuerzo, el Código proporciona las ecuaciones 9.5 y 9.6 (véase la Figura 9.16 para el significado de los símbolos y los límites).

Para determinar el material disponible o necesario de la *virola*:

$$A_1 = (t_s - Ft_{rs})d \quad \text{o} \quad A_1 = 2(t_s - Ft_{rs})(t_s - t_n) \quad (9.5)$$

Se usa el valor mayor.

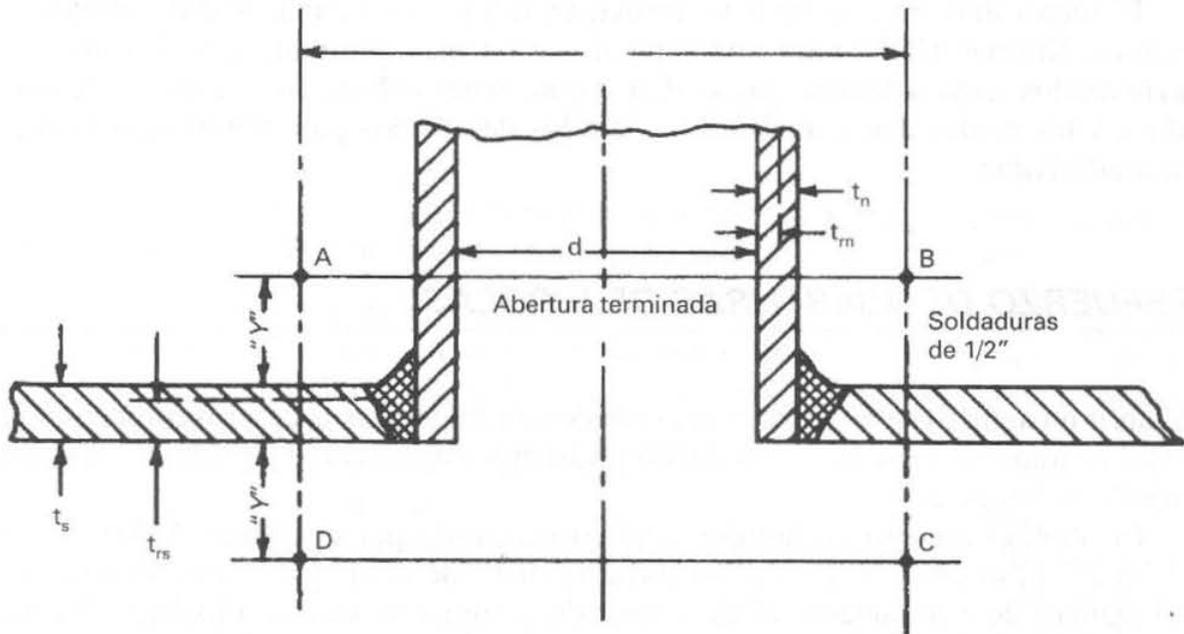


Figura 9.16. Los límites de refuerzo disponible en una conexión soldada de una tubuladura sobre una virola es el exceso de material disponible de la Virola, tubuladura, y cualquier anillo de refuerzo y soldaduras dentro de los límites del rectángulo ABC. Las distancias X e Y se especifican en el código y están ilustradas por el ejemplo del texto.

Para determinar el metal disponible o necesario del tubo o tubuladura insertado en la *abertura*:

$$A_2 = (t_n - t_{rn})5t_s \quad \text{o} \quad A_2 = (t_n - t_{rn})(5t_n) \quad (9.6)$$

Se utiliza el valor más pequeño.

Ejemplo. Una tubuladura de 5" (127 mm) extra-pesada de acero SA-52 de grado S/A está soldada en una virola similar a la mostrada en la Figura 9.16 con soldaduras de 1/2". La virola tiene un diámetro interior de 30" (762 mm), un espesor de 7/16" (11,11 mm) y una presión de trabajo de 200 psi (14 kg/cm²). Todas las soldaduras cumplen los requisitos normativos. Esto incluye la soldadura resistente. El tubo de 5" tiene un espesor de 0,375" (9,64 mm) con un diámetro exterior de 5,563". Usando los cálculos de la Sección I para el refuerzo de la abertura, demostrar si el refuerzo cumple los requisitos del Código para una presión de trabajo de 200 psi (14 kg/cm²).

Solución. De la tabla de la Figura 3.9, la tensión admisible para el material de la virola es de 13.800 lb/in² (966 kg/cm²) y la tensión admisible para el material del tubo es de 12.000 lbs/in² (840 kg/cm²). Se usa la misma ecuación para determinar el espesor de la virola y del tubo utilizado la ecuación del cilindro sin costura, pero con él, el *factor C omitido*, o sea:

$$t = \frac{PR}{SE} - (1 - y)P$$

donde: t = espesor requerido, pulgadas o cm
 P = presión admisible, psi o kg/cm^2
 S = tensión admisible del material, Lbs/in^2 (o kg/cm^2)
 $E = 1$
 $y = 0,4$

Para la virola:

$$t_{rs} = \frac{200(15)}{13.800(1) - (0,6)(200)} = 0,219'' (5,57 \text{ mm})$$

Para el tubo:

$$t_m = \frac{200(2,407)}{12.000(1) - 0,6(200)} = 0,04052'' (1,029 \text{ mm})$$

El área de refuerzo requerido es:

$A = d \times t_{rs} \times F$; con $F = 1$, ya que el tubo está insertado normalmente en la virola.

$$d = 5,563 - 2 \times 0,375 = 4,813''$$

$$A = 4,813(0,219)(1) = 1,054 \text{ in}^2$$

Áreas de refuerzo disponibles:

De la virola: $A_1 = (t_s - F \times t_{rs})d = 4,813 (7/16 - 1 \cdot 0,219) = 1,052 \text{ in}^2$

Del tubo: $A_2 = (t_n - t_m)5 t_s = (0,375 - 0,040) \cdot 5 \cdot 0,375 = 0,628 \text{ in}^2$

De las soldaduras: $A_3 = (1/2 \times 1/2 \times 1/2) \times 2 = 0,25 \text{ in}^2$

Área total del refuerzo = $\varepsilon = 1,932 \text{ in}^2$ que exceden del valor del área de refuerzo exigible ($A = 1,054 \text{ in}^2$) aunque el área de refuerzo cumple los requisitos del Código.

IDENTIFICACIÓN DEL CÓDIGO DE CALDERAS

Los Estados y las autonomías exigen un sello o estampación identificatoria sobre las calderas de potencia. El Comité National Board de estampillado americano es suficiente para pasar y aprobar las normas y regulaciones de construcción en prácticamente todas las secciones de los EE. UU. Este sello consta de un símbolo ASME encima del número de serie del fabricante, el nombre del fabricante o abreviatura aprobada, la máxima presión para la cual la caldera ha sido construida, la superficie de calefacción y producción máxima y el año de construcción*.

En EE. UU., la placa del «National Board» seguida por un número de serie está situada para control de los inspectores del National Board de calderas y recipientes a presión. Es un requisito legal del código ASME de calderas de potencia, y una copia con los datos sobre la construcción se archivan con esta placa y número de serie. El

* *N. del T.*: En España, además de la placa con los datos del fabricante, producción, número de serie, habrá otra Placa Oficial de la Delegación del Ministerio de Industria con la presión efectiva máxima de servicio correspondiente a la instalación y las fechas y presiones periódicas de retimbrado de la instalación.

sello del National Board indica que la caldera está construida según el código ASME y que su construcción fue controlada por un inspector cualificado.

Sobre las calderas de tubos de humos horizontales (calentados por hogar exterior), el sello o placa debería estar situado en el centro del frente de la placa de tubos encima de la fila superior de tubos. Sobre las calderas horizontales de tubos de humos del tipo de hogar interior, la placa debería estar situada encima del centro, a mano derecha del hogar o encima del agujero o abertura de servicio manual al fondo trasero del hogar. Sobre las calderas verticales de tubos de humos, la placa o estampado debería estar situada sobre la portezuela del hogar. Las calderas de tubos de agua tienen la placa sobre el calderín encima de la brida del agujero de hombre.

Es muy importante cuando se adquiere o se cambia de situación a una caldera averiguar la legislación estatal sobre calderas. Muchos estados exigen cumplimentar un formulario especial y seguir un procedimiento definido antes de volver a instalar una caldera*.

USO DE LAS ECUACIONES NORMATIVAS

Los cálculos del Código revisados en este capítulo fueron diseñados para mostrar cómo se obtiene la presión admisible para los diferentes componentes o piezas de una caldera. Aquellos lectores que se estén preparando para los exámenes de operador o inspector deberían anotar y tener en cuenta el método de ataque requerido para resolver problemas de resistencia de componentes de caldera basándose en las fórmulas o ecuaciones del Código. Deben también darse cuenta que el método ilustrado no sólo se aplica en las calderas de nueva construcción. Los operadores de calderas y los inspectores así como los reparadores deberían revisar las ecuaciones y requisitos del Código (en España, las UNE) cuando se enfrenten a problemas existentes en las instalaciones actuales. Utilizando las ecuaciones adecuadas para el componente o pieza que requiera revisión debe alcanzarse u obtenerse una decisión sobre las adecuadas reparaciones según el Código que restablezca la resistencia de la pieza, si es que se hubiese visto afectada. Es posible también determinar tasas de desgaste sobre componentes o piezas por comparación del espesor actual, por ejemplo, con el requerido según los métodos ilustrados en este capítulo. Esto ayudará a calcular la vida remanente de las piezas o componentes y puede incluso implicar el cambio de la presión admisible hasta que se hagan las correspondientes reparaciones. La intención de este capítulo es mostrar cómo se calculan las presiones admisibles de modo que pueda tomarse una decisión de ingeniería sobre cómo proceder cuando surjan unas condiciones o situación cuestionables.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Cuáles son las principales desventajas de una junta solapada longitudinal?

RESPUESTA: La mayor desventaja de una junta longitudinal remachada o soldada a solape longitudinal es que la chapa está solapada; o sea que el calderín o virola no forma

* *N. del T.*: Análogamente en España se exige una inspección y retimbrado por Industria.

realmente un verdadero círculo. Puede tener lugar un cierto grado de tensión de flexión a lo largo del solape de unión cuando la virola se somete a presión. Esto produce una concentración de tensiones que eventualmente puede dar lugar a fatiga y rotura de la chapa, provocando así una desastrosa explosión de caldera.

Acerca de las únicas «ventajas» de la junta remachada o soldada con solape digamos que son su bajo coste, simplicidad, mínima anchura y mínimo espesor total donde la unión se expone al calor, como en uniones solapadas de algunas calderas pirotubulares.

2. ¿Cuál es el máximo diámetro y presión que puede permitirse en una caldera cuya unión longitudinal está soldada por fusión al arco y no ha sido reconocida o radiada por rayos X, ni descargada de tensiones residuales?

RESPUESTA: 16" (400 mm) de diámetro interno y 100 psi (7 kg/cm²) de presión. Las especificaciones de construcción son las de calderas pequeñas (miniatura).

3. Una caldera de tubos de agua aprobada y de acuerdo al Código, tiene 52" (1.320 mm) de diámetro interno, con un espesor de chapa del calderín de 2" (50,8 mm) en la zona de unión del citado calderín. El material o acero de la chapa es del tipo SA-515 Gr70 con una tensión admisible para trabajar por debajo de 650 °F (343 °C) de 17.500 lbs/in² (1.225 kg/cm²). ¿Cuál es la mínima eficiencia requerida para la soldadura para una presión admisible de 600 psi (42 kg/cm²)?

RESPUESTA: La ecuación de la Sección I para construcción soldada o tubo sin costura:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

con: R = radio interior del cilindro = 26"
 t = espesor mínimo requerido = 2"
 C = factor de calderín o virola = 0
 y = factor según temperatura para < 900 °F = 0,4
 P = presión máxima admisible = 600 psi
 S = máxima tensión admisible = 17.500 lbs/in²

Despejando E y sustituyendo:

$$E = \frac{P[R + (1 - y)(t - C)]}{S(t - C)}$$

$$E = \frac{600[26 + (1 + 0,4)(2)]}{17.500(2)} = 0,466 = 46,6 \% \text{ de eficiencia}$$

4. ¿Cuál es la mayor abertura permitida en una virola sin cálculo de refuerzo en una unión soldada?

RESPUESTA: Un tubo de 2" de diámetro.

5. Un fondo curvado cóncavo a presión tiene 5/8" (15,9 mm) de espesor y 26" (660,4 mm) de diámetro. ¿Cuál es la longitud mínima de unión o brida permitida cuando la unión es soldada a la virola o calderín?

RESPUESTA: El radio del ángulo no debe ser menor de 3 veces el espesor del fondo o en ningún caso menor del 6 por 100 del diámetro de la virola, o sea:

$$3 \times \frac{5}{8} = \frac{15}{8} = 1 \frac{7}{8}, \text{ o bien, el } 6\% \text{ de } 26'' = 1,56''$$

La unión debe ser al menos de $1 \frac{7}{8}''$ (valor mayor).

6. En la fabricación de una caldera pequeña (miniatura) de construcción totalmente soldada, que no está radiada con rayos X ni eliminadas sus tensiones residuales y que se utiliza para una presión de trabajo máximo de 100 psi (7 kg/cm²), ¿qué presión debe usarse para probar esta caldera hidrostáticamente?

RESPUESTA: 300 psi (21 kg/cm²) según el Código.

7. Un calderín de caldera está taladrado para conectar los tubos en una serie de filas paralelas a su eje; los tubos circunferencialmente están alineados. El diámetro de los agujeros de los tubos es de 4,03125'' (102,4 mm) y están igualmente espaciados en cada fila en grupos de 13,5'' (342,9) entre centros [tubos con paso alternativo de $7 \frac{1}{2}''$ (190,5 mm) y 6'' (152,4 mm)]. Determinar la eficiencia o rendimiento de la unión E y el mínimo paso circunferencialmente.

RESPUESTA: Utilice:

$$E = p - \frac{nd}{p}$$

con: $p = 13,5''$

$n = 2$

$d = 4,03125''$

Sustituyendo valores:

$$E = \frac{13,5 - 2(4,03125)}{13,5} = 0,403 = 40,3\%$$

Para hallar el paso en la dirección circunferencial, utilizamos la misma ecuación resuelta en P ; es decir $pE = p - nd$, $p = p(1 - E)$ o sea $p = nd/1 - E$ con los valores siguientes: $E = 0,403/2 = 0,202$ y $n = 1$ ya que los tubos están alineados, o sea:

$$P = \frac{nd}{1 - E} = \frac{1(4,03125)}{1 - 0,202} = 5,05''$$

paso circunferencial = 5,05'' (128,3 mm)

8. ¿Cuál es el espesor mínimo requerido para una chapa tubular de un calderín de caldera de tubos de agua con las siguientes especificaciones?

Presión de trabajo: 675 psi (47,25 kg/cm²)

Radio interior: 27'' (685,8)

Eficiencia del taladro circunferencial del calderín: 31,1 %

Eficiencia del taladro longitudinal del calderín: 46,6 %

Eficiencia de la junta o unión circunferencial: 100 %

Material: acero SA-515-70.

Temperatura: 650 °F (343,3 °C)

Tensión admisible: 17.500 lbs/in² (1.225 kg/cm²) para este material.

RESPUESTA:

$$t = \frac{PR}{SE - (1 - y)P} = \frac{675 \times 27}{17.500(0,466) - (1 - 0,4)(675)} = 2,35'' (59,69 \text{ mm})$$

basado en la eficiencia del taladrado longitudinal.

9. (a) ¿Por qué son ovales las tapas de los agujeros de hombre y agujeros de servicio manual?
 (b) ¿Por qué se usa agua en vez de vapor o aire para probar una caldera?
 (c) ¿Qué precauciones es necesario tomar sobre las válvulas de seguridad y tubos de vapor cuando se hace la prueba hidrostática a una caldera en batería?

RESPUESTA:

- (a) Para permitir al operador retirarlas de la caldera y acceder a su interior. Un agujero de hombre oval también proporciona la mayor abertura de entrada con la mínima eliminación de material. El eje mayor del agujero de hombre debería estar cruzado o periférico en la virola.
 (b) La incompresibilidad del agua (líquida) evita explosiones.
 (c) Utilizar bridas de prueba o retirar las válvulas de seguridad y taponar los bridas o tuercas ciegas. Desconectar válvulas de cierre y taponar los finales de las tuberías de vapor.
10. (a) ¿Qué efecto produce una chapa o perfil conformado en un cilindro para conservar su forma?
 (b) ¿Cuál es la máxima distorsión permisible en un calderín soldado de caldera de tubos de agua?

RESPUESTA:

- (a) El arriostrado y tensado de la fibra exterior de la chapa hasta su límite elástico.
 (b) 1 por 100 del diámetro medio.
11. (a) En una caldera, ¿por qué se limita la presión hidrostática a 1,5 veces la máxima presión de trabajo admisible?
 (b) ¿Qué virtudes tiene esta prueba?
 (c) ¿Por qué hay una temperatura mínima y máxima para el agua durante la prueba hidrostática? ¿Cuáles son las temperaturas mínima y máxima?

RESPUESTA:

- (a) Porque una presión mayor puede dañar la chapa de la caldera produciendo una deformación permanente.
 (b) Prueba la hermeticidad (estanqueidad) de las partes o piezas de la caldera y su tensión.
 (c) Porque las piezas y zonas de la caldera y agua estarán aproximadamente a la misma temperatura. La temperatura no debe ser menor de 70 °F (21 °C) para evitar

condensaciones. Esto podría enmascarar una fuga a través de un defecto, y la temperatura del metal no debe pasar de 50 °C (120 °F) para poder examinar de cerca las soldaduras y zonas de unión similar.

12. Determinar la presión de trabajo admisible en un fondo hemisférico no arriostrado de construcción soldada con las siguientes especificaciones: 48" (1.219 mm) de diámetro interno, la presión se ejerce sobre el lado cóncavo, espesor de la chapa = 3/8" (9,53 mm), eficiencia de la soldadura = 100 por 100; material: acero SA-285C con una presión admisible de 13.800 lbs/in² (966 kg/cm²).

RESPUESTA: Utilice la ecuación:

$$t = \frac{PL}{(1,6)S}$$

Despejado P y sustituyendo, se obtiene:

$$P = \frac{1,6St}{L} = \frac{1,6(13.800)(0,375)}{24} = 345 \text{ psi} = 24,15 \text{ kg/cm}^2$$

13. ¿Cuál es el mínimo espesor requerido permitido para un fondo plano circular forjado integralmente sobre un colector que cumple todos los requisitos del Código? El diámetro D es de 22" (558,8) y la presión requerida es de 150 psi (10,5 kg/cm²). La máxima tensión admisible S es 11.000 lbs/in² (770 kg/cm²).

RESPUESTA: Tenga en mente que $C = 0,17$:

$$t = D \sqrt{\frac{CP}{S}} = 22 \sqrt{\frac{0,17(150)}{11.000}} = 1,059" (26,9 \text{ mm})$$

14. (a) Cite dos características importantes a resaltar en relación con una abertura de hombre conformada con rebordeado (bridado) de la chapa del calderín (hacia adentro) de una caldera.
(b) ¿Por qué es preferible que los fondos soldados a tope a la virola tengan un faldón o brida cuando se unen por soldadura de fusión?

RESPUESTA:

- (a) La chapa debe estar conformada o solapada hasta una profundidad de no menos de tres veces el espesor y las superficies de apoyo de la junta no deben ser menores de 11/16" (17,46 mm).
(b) Para evitar la concentración de tensiones en el borde de la brida.
15. ¿En qué tanto por ciento puede adelgazarse (disminuir su espesor) el borde de un fondo curvado al conformarlo en la prensa?

RESPUESTA: No más de un 10 por 100.

16. Las riostras en la caja de fuegos (hogar) de una caldera tipo locomotora están espaciadas horizontalmente 7" (178 mm) y verticalmente 6 1/2" (165 mm) y son de un diámetro de 1 1/4" (31,75 mm) con 12 pasos de rosca en V por pulgada. El espesor de chapa es de 1/2". Los extremos de los tornillos-riostras están taladrados con orificios de seguridad de 3/16" (4,763 mm) y el área del orificio de seguridad es de 0,0276 in² (619,35 mm²).

¿Cuál es la presión admisible de trabajo en el hogar? Se dan los datos siguientes: Chapa de acero SA-285 grado C y a 600 °F (315 °C); tensión admisible, 13.700 lb/in² (959 kg/cm²); área del tornillo riostra con el fondo de la rosca, 0,960 in².

RESPUESTA: Utilice la ecuación del tornillo-riostra:

$$(p^2 - a)P = \frac{(a - 0,0276)S}{1,1}$$

donde: a = área del tornillo-riostra.

p = área de soporte paso máximo, in².

Despejando P y sustituyendo valores:

$$P = \frac{(a - 0,0276)S}{1,1 \times (p^2 - a)} = \frac{(0,96 - 0,276)13.700}{1,1(7 \times 6,5 - 0,96)} = 264,5 \text{ psi (18,5 kg/cm}^2\text{)}$$

También es necesario calcular la presión admisible, basándonos en el espesor de la chapa entre riostras. Utilice:

$$P = \frac{St^2C}{6,5 \times 7} \quad \text{con } C = 2,2$$

Sustituyendo:

$$P = \frac{13.700(0,5)^2(2,2)}{6,5 \times 7} = 165,6 \text{ psi (11,6 kg/cm}^2\text{)}$$

Ésta será la presión admisible.

17. ¿Qué presión hidrostática se requiere para un calderín de caldera de tubos de agua soldado con una eficiencia de soldadura longitudinal del 100 por 100, espesor de la chapa de 1 5/16" (30,4 mm) en esta junta con un radio interior de 27,25" (692,15). La chapa tubular es de un espesor de 1 15/16" (49,21 mm) con un radio interior de 26 15/16" (684,21 mm). La eficiencia de la unión tubular es 0,304 circunferencial y 0,429 longitudinal. El material de la chapa es acero SA-515 grado 70, trabajando a 650 °F (343 °C) con una tensión admisible de 17.500 lbs/in² (1.225 kg/cm²).

RESPUESTA: Nótese que la eficiencia de la unión circunferencial es mayor que un medio de la eficiencia de la unión longitudinal de 0,429; por tanto, la presión admisible está basada en esta eficiencia de unión longitudinal y en los datos de la chapa tubular. Usando la ecuación de la chapa, con $C = 0$:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)}$$

donde $C = 0$ y $y = 0,4$.

$$P = \frac{17.500(0,429)1,9375}{26,9375 + (1 - 0,4)(1,9375)} = 517,64 \text{ psi (36 kg/cm}^2\text{)}$$

Según el Código la presión hidrostática de prueba requerida es de $1,5 \times 518 = 777$ psi (54,4 kg/cm²).

18. ¿Cuál sería el radio de curvatura de un fondo no arriostrado si la chapa es de 1/2" (12,7 mm) de espesor y el diámetro del calderín es de 48" (1.219,2 mm)?

RESPUESTA: $48 \times 0,06 = 2,88''$ (73,15 mm).

19. ¿Por qué las superficies planas en una caldera están arriostradas o reforzadas?

RESPUESTA: Una chapa plana sometida a presión tiende a asumir la forma esférica, así que las riostras o tirantes se utilizan para impedirlo y mantenerla en su sitio.

20. ¿Cómo se taladrarían los agujeros de seguridad en los tornillos-riostras?

RESPUESTA: Los tornillos macizos de 8" (203,2 mm) y menos de longitud deberán taladrarse con orificios de seguridad al menos de 3/16" (4,76 mm) de diámetro a una profundidad al menos de 1/2" (12,7 mm) más allá del interior de la chapa.

21. ¿Por qué el paso de los tirantes o tornillos riostras en una caldera tubular vertical se toma desde el interior del hogar (cajas de fuego) en vez desde el exterior de la virola?

RESPUESTA: La chapa del hogar es la chapa que normalmente requiere arriostramiento; por tanto, el paso se toma desde el interior del hogar.

22. Cite tres métodos utilizados para reforzar un hogar para resistir el colapso o aplastamiento.

RESPUESTA: Sobre una caldera tubular vertical mediante tornillos riostras o tirantes riostras, sobre hogares horizontales mediante la utilización de anillos Adamson; y mediante corrugaciones u ondulaciones.

23. ¿Qué es un anillo Adamson, dónde se usa y para qué propósito?

RESPUESTA: Es una junta tipo brida entre dos o más secciones de un hogar cilíndrico. Se coloca en algún punto a lo largo de la longitud del hogar, puede haber uno en el centro o varios separados a intervalos a no menos de 18" (457 mm) por parte o zona (arriostrada). Sirve como refuerzo, rigidizando el hogar contra la presión de aplastamiento o colapso. El anillo entre bridas también sirve como relleno para la estanqueidad.

24. Un agujero de paso de hombre de 16" (406 mm) de diámetro interior, tubular (del tipo soldado), está localizado sobre un calderín soldado. Los datos pertinentes son (véase la Figura 9.16):

Espesor del cuello soldado (garganta de soldadura), 3/4" (19,05 mm).

Espesor de la chapa de calderín, 1 1/8" (28,75 mm).

Diámetro interior de la chapa o virola del calderín, 48" (1.219 mm).

Presión de trabajo, 500 psi (35 kg/cm²).

Temperatura de trabajo, no superior a 600 °F (315,6 °C).

La soldadura utilizada cumple con el Código de calderas.

La tubuladura está soldada al calderín interior y exteriormente con filetes de soldadura de 3/4" x 3/4".

El anillo de refuerzo en el interior del calderín es de 1" de espesor, con un diámetro interno de 21,5" (596,1 mm) y un diámetro exterior de 36" (914,4 mm).

La parte interior (del anillo) soldada al calderín con filetes de soldadura es de 1" x 1" (25,4 mm x 25,4 mm).

El material de la tubuladura del calderín y el anillo de refuerzo tienen una tensión de diseño de 15.000 lbs/in² (1.050 kg/cm²).

Suponer que la soldadura cumple los requisitos del Código y demostrar por cálculo que el refuerzo es adecuado para cumplir los requisitos del Código.

RESPUESTA: Para la virola:

$$t_{rs} = \frac{PR}{SE - (1 - y)P} = \frac{500(24)}{15.000 - (1 - 0,4)(500)} = 0,816'' \text{ (20,726 mm)}$$

Para la tubuladura:

$$t_{rs} = \frac{500(8)}{15.000 - 0,6(500)} = 0,272'' \text{ (6,9 mm)}$$

El área de refuerzo requerida es

$$A = d \times t_{rs} \times F = 16 \times 0,816 \times 1 = 13,056 \text{ in}^2 \text{ (84,232 cm}^2\text{)}$$

El área de refuerzo que se coloca es:

$$\begin{aligned} A_1 \text{ (virola)} &= [(1 \times t_s) - F \times t_{rs}] d = [1,125 - 1 \times 0,816] \times 16'' = 4,94 \text{ in}^2 \\ A_2 \text{ (tubuladura)} &= (2 \times t_s - F t_{rs}) \times (t_s - t_{rs}) = 2 (1,125 + 1,125) (0,75) (0,75 - 0,272) + \\ &+ 2 \times 0,75^2 = 2,918 \text{ in}^2 \\ A_3 \text{ (soldaduras)} &= 2 \times t^2 + F \times t_{\text{anillo}} = 2 \times 0,75^2 + 1 \times (1,00)^2 = 2,125 \text{ in}^2 \\ A_4 \text{ (anillo)} &= 1,0 \times (32 - 21,5) = F (\varnothing_{\text{ext.anillo}} - \varnothing_{\text{int.anillo}}) = 10,500 \text{ in}^2 \\ A_{\text{total}} &= 20,487 \text{ in}^2. \end{aligned}$$

La construcción cumple con los requerimientos del Código.

25. Una caldera de alta temperatura pesa 50.000 lbs (22.700 kg) y está soportada por columnas con vigas de soporte y arriostamiento. Las calderas tienen los adecuados puntos de conexión en cuatro puntos para recibir tornillos en U, que están suministrados con arandelas y tuercas; la tensión admisible es de 6.000 lbs/in² (420 kg/cm²) sobre estos tornillos ¿Cuál es el diámetro de estos tornillos en su sección más débil (roscada)?

RESPUESTA: Cada tornillo debe cargar 50.000 lbs dividido por 4, o sea, 12.500 lbs. Así pues, el área de la sección del tornillo reducido será 12.500 lbs dividido por la tensión admisible, 6.000 lbs/in², es decir, 2083 in² = A. El diámetro del tornillo requerido será la raíz cuadrada de A dividida por $\pi/4 = 0,7854$ o sea 1,628'' por lo que los tornillos serán de 1 5/8'' (41,27 mm) de diámetro.

26. Una vieja caldera horizontal de tubos de humos (HRT) de 72'' (1.829 mm) de diámetro y de 1/2'' (12,7 mm) de espesor de chapa de virola, con un límite elástico de 55.000 lbs/in² (3.850 kg/cm²), eficiencia de junta longitudinal del 87,5 por 100, factor de seguridad de FS = 5, ha estado operando a 133 psi (9,31 kg/cm²). La inspección reveló que el fondo de la virola de su primera parte medía sólo 5/16'' (7,9 mm) de espesor debido a una corrosión bastante importante.
- (a) ¿Cuál debería ser la presión admisible basada en esas zonas más debilitadas?
- (b) ¿A qué factor de seguridad, FS, estuvo trabajando la caldera?

RESPUESTA:

(a) Como la corrosión tiene lugar en la chapa, utilice:

$$E = 1$$

$$S = \frac{55.000}{5} = 11.000 \text{ lbs/in}^2 = 770 \text{ kg/cm}^2$$

$$R = \frac{\varnothing}{2} = \frac{72''}{2} = 36'' (914,4 \text{ mm})$$

$$t = \frac{5}{16''} = 0,3125'' (7,94 \text{ mm})$$

$$y = 0,4$$

Así que:

$$P = \frac{SE(t - C)}{R + (1 - y)(t - C)} = \frac{11.000(1)(0,3125)}{36 + (1 - 0,4)0,3125} = 94,99 \text{ psi (6,6 kg/cm}^2)$$

(b) Use 55.000 lbs/in² en la misma ecuación de la virola y resuelva o despeje FS con $p = 133 \text{ psi}$:

$$FS = \frac{SEt}{p(R + (1 - y)t)} = \frac{55.000(1)(0,3125)}{133[36 + 0,6(0,3125)]} = 3,57 \text{ en vez de } FS = 5$$

27. Una caldera horizontal pirotubular con hogar interior de 66'' × 16'' (1.676 mm × 406 mm) trabajando a 125 psi (8,75 kg/cm²), tiene 66 tubos de 3 1/2 de diámetro galga 11 (88,9 mm). ¿Cuál es la superficie de calefacción si uno usa la media de la virola e ignora los fondos?

RESPUESTA:

$$S_{\text{calefactora de virola-hogar}} = \pi \times \varnothing \times \frac{L}{2} = \frac{66 (3,14) (16)}{12 \cdot 2} = 138 \text{ ft}^2$$

$$S_{\text{calefactora de los tubos de humo}} = \frac{3,14 \times 66 \times 16 \times 3,26}{12} = 901 \text{ ft}^2$$

$$\text{Total superficie de calefacción} = 1.039 \text{ ft}^2 (93,51 \text{ m}^2)$$

Además se exigen dos o más válvulas de seguridad.

28. ¿Quién tiene la responsabilidad para establecer y mantener un sistema de control de calidad en la fabricación de calderas?

RESPUESTA: El fabricante y/o responsable del montaje de conjunto o destinatario del certificado de autorización ASME.

29. Explique brevemente qué información debe conservar el fabricante en el registro de seguimiento del control de calidad.

RESPUESTA: En general, un seguimiento debería incluir lo siguiente:

1. Dibujos y planos del recipiente o caldera que se está fabricando o montando.
 2. Cálculos demostrativos del cumplimiento del Código en lo que se refiere a espesor, materiales y requisitos similares.
 3. Identificación del material a utilizar, incluyendo dimensiones y calidad a suministrar por los siderúrgicos u otros suministradores.
 4. Inspecciones realizadas sobre material y fabricación durante los controles designados.
 5. Cualificación de todo personal que lleve a cabo cualquier prueba o examen NDE.
 6. Cualificación de todo soldador que realice soldaduras y procedimientos escritos aplicables de soldaduras.
 7. Requisitos de pruebas NDE sobre radiografías u otras pruebas no destructivas.
 8. Reparaciones de pruebas hidrostáticas realizadas y un registro de hojas de datos de la caldera o del recipiente (calderín, calderines, etc.).
30. (a) ¿Quién es responsable de mantener registros de todo recipiente construido de acuerdo con el código ASME?
 (b) ¿Cuánto tiempo deben conservarse estos registros?

RESPUESTA:

- (a) El fabricante o quien realice el ensamblaje o montaje y sea responsable por tanto de obtener los certificados y permisos oficiales, excepto con vasijas nucleares, donde la responsabilidad es del propietario de la central nuclear, según la normativa NCR y ASME.
- (b) Al menos durante cinco años por el fabricante; indefinidamente para vasijas y recipientes nucleares por el propietario de la central.
31. ¿Cuál es la presión admisible sobre un fondo de 1.200 mm, convexo, de 48" de diámetro que no está arriostrado y que lleva una abertura de hombre de 48" de diámetro, radio de bombeo 36" (914 mm), tensión admisible de 13.750 lbs/in² (963 kg/cm²) y espesor del fondo de 1,0625"?

RESPUESTA: Debe usarse la ecuación del segmento esférico a causa del agujero de hombre y el espesor debe reducirse un 15 por 100 o $t = \frac{1,0625}{1,15} = 0,924"$. También según el

Código, a los fondos convexos se les permite sólo un 0,6 de la presión admisible de los cóncavos. Así pues, sustituyendo valores en la ecuación:

$$P = \frac{4,8 St}{5L} = \frac{4,8(13,750)(0,924)(0,6)}{5(38,4)} = 190,58 \text{ psi (13,3 kg/cm}^2\text{)}$$

$L = \text{radio} = R = 0,8(48) = 38,4$, ya que el fondo elíptico es menor que 0,8 veces el diámetro del fondo y el Código exige que un fondo elíptico sea construido al menos equivalente al fondo con un radio de 0,8 veces el diámetro del fondo.

32. Una caldera pirotubular necesita que 374 in² de superficie plana sea arriostrada con tornillos-riostas. La disposición muestra un espaciado de tornillos de $5 \frac{1}{4}" \times 5 \frac{1}{2}"$ cubriendo el área. Si el material de arriostramiento tiene una tensión admisible de 11.300 lbs/in² (791 kg/m²) y los tornillos-riostas con agujeros de seguridad de 3/16" de diámetro. ¿Cuántos tornillos-riostas y de qué diámetro se requieren para una presión admisible de 150 psi (10,5 kg/m²)?

RESPUESTA: El número de tornillo requerido es:

$$\frac{374}{5,25 \times 5,25} = 13$$

Con a = área neta de la parte inferior del tornillo taladrado y área del orificio de seguridad = 0,0276, utilizamos la ecuación del tornillo-riostra para despejar a como sigue:

$$(p^2 - a)P = \frac{S(a - 0,0276)}{1,1}$$

$$[(5,25)(5,50) - a]150 = 11.300 \left[\frac{a - 0,0276}{1,1} \right]$$

Resolviendo:

$$a = 0,442 \text{ in}^2 (2,85 \text{ cm}^2)$$

Un tornillo roscado de 15/16" en V(12) tiene un área de 0,494 cm² que menos 0,0276 del taladro da un área neta de 0,466 in² luego puede utilizarse el tornillo de 15/16" de rosca en V.

33. Una placa tubular de una caldera pirotubular tiene un diámetro de 72" con una distancia desde los tubos de humos superiores al interior de la chapa-virola de 30". ¿Cuál es el área a arriostrar?

RESPUESTA: Con $d = 0$ y $R = 36$ ":

$$A = \frac{4(H - d - 2)^2}{3} \sqrt{\frac{2(R - d)}{H - d - 2}} - 0,608$$

$$A = \frac{4(30 - 2)^2}{3} \sqrt{\frac{2(36)}{30 - 2}} - 0,608 = 1.464,7 \text{ in}^2 (9.4499,6 \text{ cm}^2 = 0,9945 \text{ m}^2)$$