

Capítulo 8

MATERIAL DE ENSAYOS, TENSIONES Y EFECTOS DE SERVICIO

Hoy en día se pone mucho énfasis en el diseño, en la operación y en la conveniencia de que el servicio esté disponible. A medida que el equipo se hace viejo, se emplean sistemas de predicción de vida para tratar de predeterminar cuál será la vida futura de una caldera o turbina cuando se reemplacen las piezas en mal estado.

Los operadores, inspectores y personal de mantenimiento están interesados también en el deterioro del material, ya que puede afectar al servicio futuro del equipo. Las causas del fallo del material son muchas: distorsión por adelgazamiento (debilitamiento) o sobrecalentamiento, fracturas dúctiles y frágiles iniciadas por el agrietamiento, roturas por tensiones residuales en soldaduras, roturas por fatiga cíclica, corrosión produciendo adelgazamiento y debilitamiento de paredes o pozos que actúan como puntos de concentración de tensiones, formación de ampollas causadas por sobrecalentamiento del metal, grietas producidas por tensiones derivadas de la corrosión y, en algunos casos, grietas por fragilidad de hidrógeno.

La prueba de materiales desarrolla las propiedades que un material puede tener para aplicación en calderas. Muchas de estas pruebas son exigidas por el Código ASME, los requisitos y especificaciones de la Sección II, y los operadores, inspectores y personal de mantenimiento de calderas entrarán en contacto con ellas en las funciones de su oficio.

CALDERAS Y TENSIONES

Las calderas y muchos recipientes a presión no caldeados conllevan peligros inherentes que pueden causar cuantiosos daños a la propiedad, destrucciones y pérdidas de vidas humanas. Éstas surgen como consecuencia de las presiones a que están sometidas las calderas, las elevadas temperaturas de trabajo a las que funcionan, los ciclos impuestos por el servicio que pueden conducir a fallos o roturas por fatiga, y, finalmente, el desgaste y roturas que ocurren en el material con el paso del tiempo.

Éstas son algunas de las razones por las que las distintas jurisdicciones exigen inspecciones y revisiones periódicas de las calderas.

Adicionalmente, los modernos sistemas de calderas están programados ahora para integrar, en la mayoría de los casos automáticamente, flujos de salida o cargas como caudales de combustible, aire, agua, condensados y productos de combustión en un muy estrecho abanico de rango de valores de ajuste (consignas) deseados para cada uno de ellos con el objetivo de la eficiencia y ahorro energético. Si no se detecta en el tiempo este flujo integrado de ítems, cualquier malfuncionamiento puede producir rotura y también daños posibles al equipamiento, tales como explosiones del lado del hogar, roturas de tubos, sobrecalentamiento de piezas sometidas a presión, formación de ampollas e incluso explosiones aún cuando la presión puede estar dentro de los límites de diseño. Véase la Figura 8.1.

Los fallos y roturas de las calderas son previsibles y, como cada fallo potencial implica algún tipo de tensiones, debería tenerse un buen conocimiento de las tensiones de trabajo en todo lo que se refiere al trabajo de la caldera, pruebas, inspecciones o mantenimiento. Las causas de las tensiones existentes en las calderas deberían ser comprendidas antes de que se haga un intento de calcularlas o analizarlas.

Presión interna y tensiones impuestas. La presión interna es la primera causa a considerar. La medida de presión de vapor en EE. UU. es en unidades psi (libras

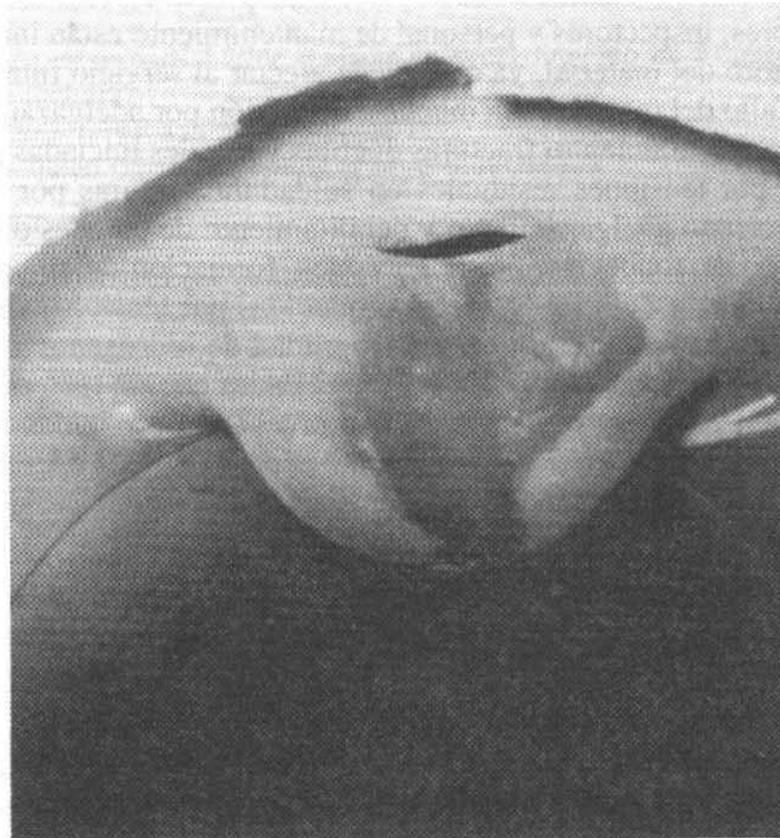


Figura 8.1. La chapa sobrecalentada del hogar de la caldera escocesa marina está combada hacia el interior a causa de la presión de la caldera. (*Cortesía de Royal Insurance Co.*)

por pulgada cuadrada) leída sobre el manómetro (presión manométrica o efectiva) y sobre la presión atmosférica (14,7 psi a nivel del mar, 1,029 atmósferas o 1,029 kg/cm²). Esta unidad de medida se conoce como presión manométrica o relativa. En algunas fórmulas y tablas de vapor se utiliza la presión absoluta. Esto significa la presión en libras por pulgada cuadrada (o atmósferas o kg/cm²) por encima del vacío absoluto, que es la presión manométrica más aproximadamente 1,029 kg/cm² (14,7 psi a nivel del mar) (es decir, la presión absoluta será la relativa o manométrica más 1,09 atmósferas) a nivel del mar.

Los hechos siguientes se relacionan con la presión unitaria, esto es, la fuerza actuante sobre 1 pulgada cuadrada o centímetro cuadrado si hablamos de presiones en España (kg/cm²). Si el área de una superficie en una caldera de vapor es de 20 pulgadas cuadradas ($20 \times 20 \times 6,4516 \text{ cm}^2 = 2.580,64 \text{ cm}^2$) y si está expuesta a una presión de vapor de 50 psi (3,5 kg/cm²), la fuerza total o carga en esa superficie será de $20 \times 20 \times 50 = 20.000 \text{ lbs}$ o bien $2.580,64 \text{ cm}^2 \times 3,5 \text{ kg/cm}^2 = 9032,24 \text{ kg}$ ($\sim 20.000 \text{ lbs} \times 0,4563 = 9072 \text{ kg}$).

Así, es fácil ver que la presión actuante sobre una gran superficie expuesta puede producir una tremenda carga o fuerza con una presión unitaria comparativamente baja. También este ejemplo aclara la falacia de creer que no hay peligro posible en una caldera de baja presión.

Otros factores. Adicionalmente a la presión actuante sobre los componentes estructurales de una caldera, otros factores a considerar son temperatura, funcionamiento cíclico, conocimiento del agrietamiento del material utilizado en servicio de alta temperatura y multitud de factores que implican propiedades de los materiales usados en la fabricación de las calderas. Con el advenimiento de la energía nuclear, se han hecho grandes progresos técnicos en el análisis sistemático de las fuerzas que pueden actuar sobre el material de un recipiente sometido a presión y los métodos o análisis de tensiones que pueden utilizarse para asegurar una vida operativa segura. Esto incluye el uso de fractura mecánica para predecir las fases de crecimiento de la grieta y determinar los ciclos de trabajo antes de que se necesiten reparaciones.

PRUEBA DE MATERIALES: FUERZA Y TENSION

Las propiedades de un material que son importantes al analizar su capacidad para resistir cargas deben revisarse previamente.

Cualquier cuerpo o material sujeto a fuerzas exteriores sobre él resistirá estas fuerzas exteriores. Esta resistencia del material viene del interior del material. La estructura interna del material está sometida a cargas intercrystalinas cuando se le aplica una fuerza externa. Así, la tensión se define como la fuerza externa por unidad de superficie en el material que resiste a las fuerzas externas que actúan sobre el material. Se expresa en unidades de fuerza por unidades de superficie (lbs/pulgada cuadrada o kg/cm²) pero la notación psi no se usa para las tensiones como lo es la notación de presión. Las tensiones siempre se expresan por los ingenieros como lbs/cm² para diferenciarla de la designación psi de presiones, que es una fuerza exterior por unidad de área del material (en EE. UU.).

Hay varias clasificaciones generales de tensiones que afectan a los materiales. Una *tensión normal* es una tensión sobre una área de un material producida por una fuerza perpendicular al área sobre la que actúa. Las tensiones normales se clasifican además en esfuerzos de tensión o esfuerzos de compresión. En la Figura 8.2a, una barra de 1" (25,4 mm) de diámetro está tensionada por una fuerza F . Esta fuerza produce una tensión normal sobre el área de la sección normal recta de la barra. Como la fuerza tiende a estirar la barra, se le denomina fuerza tensora (o de extensión). En el interior del material, la estructura intercrystalina (suponiendo que se trata de acero) está también sometida a tensiones. La fuerza extensora (de tracción) de la barra se halla por la siguiente ecuación, basada en la definición de tensión en libras por pulgada cuadrada (EE. UU.) o kg/cm^2 (Europa), o fuerza interna por unidad de área interior de la sección normal del material:

$$F = a \cdot S_T$$

donde:

F = fuerza exterior.

a = área de la sección recta del material resistente de la fuerza F .

S_T = tensión (interna) sobre el material.

De esa ecuación se deduce que la tensión S_T es:

$$S_T = \frac{F}{a}$$

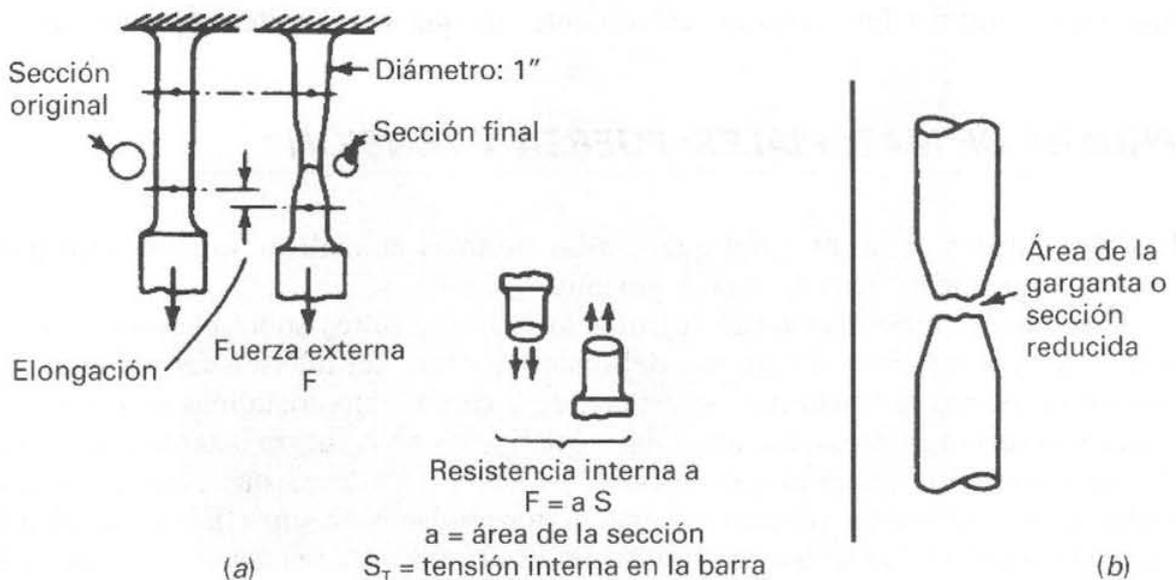


Figura 8.2. Determinación de las tensiones de tracción de una barra. (a) El espécimen se tensiona hasta que tiene lugar la rotura. (b) Área reducida tras la rotura.

Esta ecuación muestra que la tensión de tracción S_T se halla dividiendo la fuerza exterior F , que actúa normal a la sección recta de la barra, por el área de la sección recta del material que resiste el esfuerzo.

Si la fuerza estuviera actuando en dirección opuesta, al material se le impondría una compresión o fuerza compresora (conocida también como fuerza de compresión). Pero la fuerza de compresora se hallaría por la misma ecuación:

$$F = a \cdot S_C$$

donde: S_C = Fuerza o esfuerzo de compresión.

Véase la Figura 8.2a. Una barra redonda de 1" de diámetro soporta una fuerza de 44.000 Lbs (19.958,4 kg) de tracción en una máquina de pruebas cuando la pieza se rompe en dos como se muestra. ¿Cuál es la tensión final de tracción? Utilizando la ecuación de tensión y sustituyendo:

$$F = 44.000 \text{ Lbs (19.958,4 kg)}$$

$$a = \frac{\pi(1)^2}{4} = 0,7854 \text{ in}^2$$

$$\begin{aligned} S_T &= \frac{44.000}{0,7854} = 56,022 \text{ Lbs/in}^2 = 56.022 \text{ Lbs}/2,54^2 \text{ cm}^2 = \\ &= \frac{25.411,586 \text{ kg}}{6,4516 \text{ cm}^2} = 3.938,8 \text{ kg/cm}^2 \text{ tensión final de rotura} \end{aligned}$$

ó

$$a = \frac{\pi \cdot 2,54 \text{ cm}^2}{4} = 5,067 \text{ cm}^2$$

$$S_T = \frac{19.958,4 \text{ kg}}{5,067 \text{ cm}^2} = 3.938,8 \text{ kg/cm}^2 \text{ tensión final de rotura}$$

La Sección II del código ASME lista la *tensión de tracción* del material para su última carga de rotura. Esta tensión se utiliza al calcular la tensión de un componente de caldera, pero la *tensión admisible* está basada en dividir la tensión de rotura por un *factor de seguridad*, normalmente 4 para cálculos de chapas de virolas, calderines y tubos. La Sección II lista las tensiones admisibles de los materiales para diversas temperaturas superiores a las listadas.

Si una fuerza actúa tangente (lateralmente) a la sección de un material, se produce una tensión de cizalladura. Esto se ilustra en la Figura 8.3 de la página siguiente, en la que una fuerza F , actúa tangente al remache, es decir, tangente a su sección normal (de corte) produciendo así una tensión de cizalladura sobre el roblón o remache. La tensión de cizalladura se halla mediante la ecuación $F = a \cdot S$, donde a es

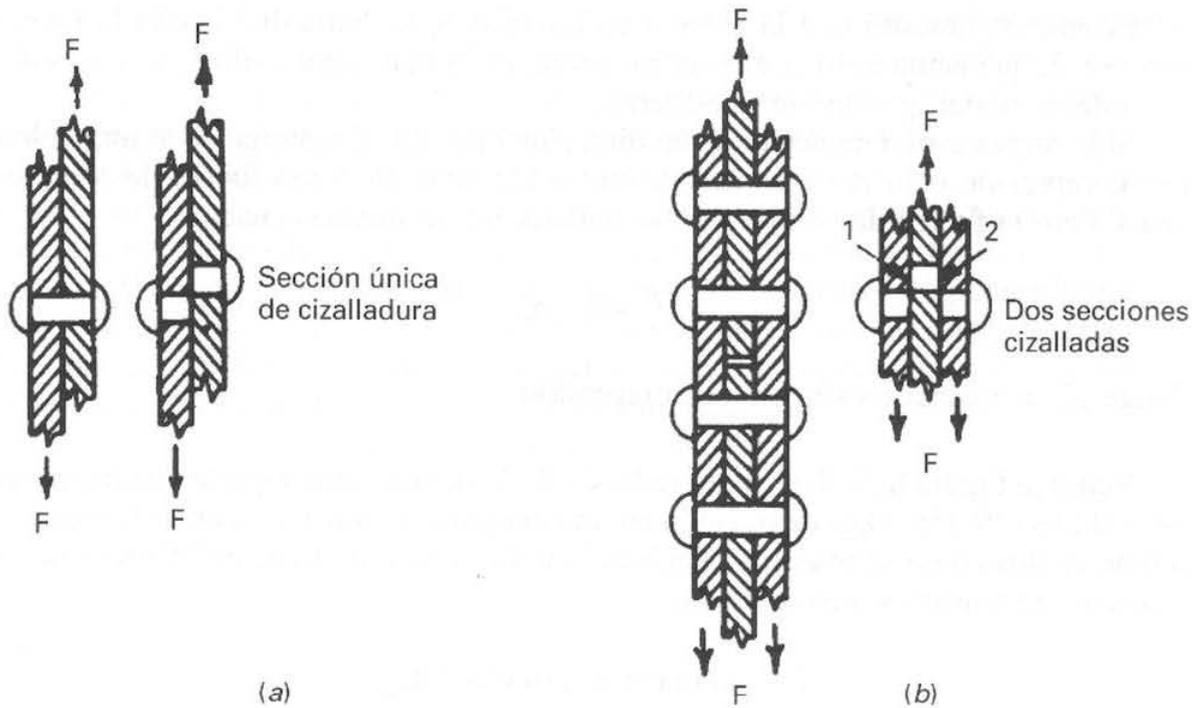


Figura 8.3. (a) Remache en cizalladura simple. (b) Remache en cizalladura doble.

la sección normal que resiste la tensión de cizalladura. En la Figura 8.3a, como sólo una sección del remache está resistiendo la fuerza exterior F , ésta actúa en *cizalladura simple*.

En la Figura 8.3b, una junta remachada a tope se muestra con juntas a tope en cada lado de las chapas extremas. Los roblones o remaches en esta ilustración están trabajando a cizalladura doble, con dos secciones del remache resistiendo la carga F . Un ejemplo ilustrará la justificación de cizalladura simple y doble.

Suponiendo que en las Figuras 8.3a y 8.3b sólo se considera para análisis un remache o roblón, pero no está trabajando a cizalladura simple, el otro está trabajando a doble cizalladura. Suponiendo que el remache o roblón es de 1" de diámetro en cada caso y la carga F es de 15.000 Lbs (6.804 kg) sobre cada remache. ¿Cuál es el esfuerzo de cizalladura en cada remache?

Remache en cizalladura *simple*:

$$S_s = \frac{F}{a}$$

$$a = 0,7854 \text{ in}^2$$

$$S_s = \frac{15.000 \text{ Lbs}}{0,7854 \text{ in}^2} = 19.099 \text{ Lbs/in}^2 = 1.343 \text{ kg/cm}^2$$

Remache en cizalladura *doble*:

$$S_s = \frac{F}{a}$$

$$a = 2 \times 0,7854 \text{ in}^2 = 1,5708 \text{ in}^2 = 12,9032 \text{ cm}^2$$

$$S_s = \frac{15.000 \text{ Lbs}}{1,5708 \text{ in}^2} = 9.549,5 \text{ Lbs/in}^2 = 671 \text{ kg/cm}^2$$

Esto demuestra que cada roblón o remache sometido a cizalladura doble es dos veces más fuerte o doblemente resistente que un roblón sometido a cizalladura simple.

Otra tensión es la debida a la flexión. Una viga soportada por sus dos extremos y cargada en el centro desarrollará una *tensión o esfuerzo flector*. La viga, cuando flexiona, actuará sometida a un esfuerzo de tracción por una cara y a un esfuerzo de compresión por la cara opuesta. Esto se ilustra en la Figura 8.4. Las chapas planas y superficies arriostradas en las calderas son algunos de los elementos sometidos a esfuerzos de flexión.

Nota. Los esfuerzos debidos a la torsión, como en un eje rotativo y transmisor de potencia, son otro tipo de tensión considerada en un análisis de resistencia de materiales. El análisis de tensiones está más allá de la visión de este libro. Sin embargo, es esencial un conocimiento de la tensión, compresión, cizalladura y flexión para comprender cómo la presión actúa en un recipiente o vasija a presión, tubería o cualquier otro aparato hecho de un material y diseñado para contener y resistir la presión dentro de unos límites seguros.

Tensión. Cuando un cuerpo o material se somete a fuerzas exteriores, las tensiones internas resisten estas fuerzas, pero siempre hay alguna deformación o extensión por la carga. Por ejemplo, una vasija de acero se alargará o extenderá cuando se la someta a una fuerza extensora exterior. El *alargamiento total* o extensión total se expresa en una medida de longitud tal como pulgadas o centímetros. El *alargamiento unitario* o por unidad se define como la longitud extendida que se produce en un cuerpo por unidad de longitud, y se expresa siempre en pulgadas por pulgada, en centímetros por centímetro, etc. Por ejemplo, supongamos que una varilla de acero de 10'' (25,4 cm) de longitud se estira por la carga de

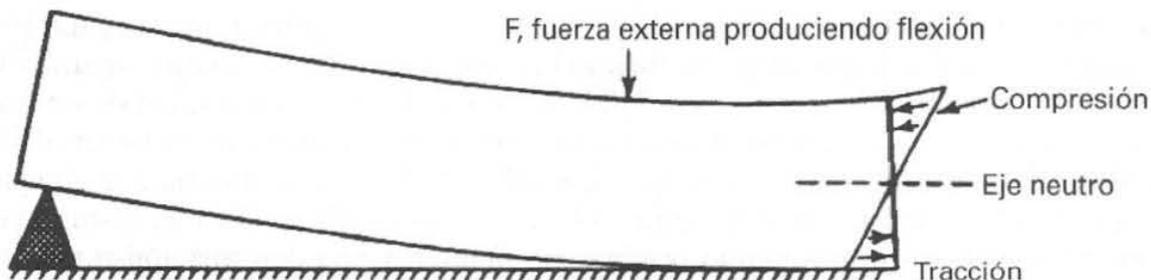


Figura 8.4. La flexión produce esfuerzos de compresión en la parte superior de la viga y esfuerzos de tracción en la parte inferior de la viga.

tracción 0,01" (0,254 mm); entonces el alargamiento unitario será de $0,01"/10" = 0,254 \text{ mm}/254 \text{ mm} = 1/1.000$.

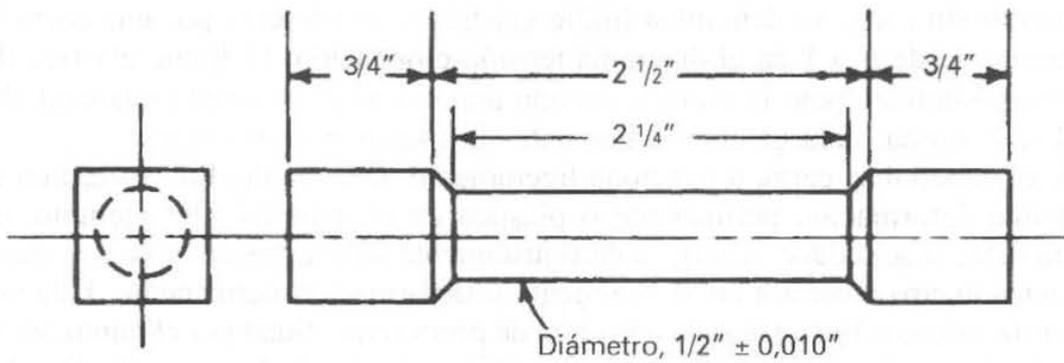
Algunas de las propiedades fundamentales de todos los materiales estructurales que pueden determinarse, se hallan por medio de diagramas de *tensión-alargamiento*. A partir del diagrama de tensión-alargamiento, se determinan las propiedades estructurales tales como *límite de proporcionalidad*, *límite elástico*, *tensión máxima*, y *módulo de elasticidad*.

La práctica moderna de ingeniería requiere las pruebas de materiales de modo que se especifiquen y se puedan determinar sus propiedades físicas. Esto es particularmente cierto para los materiales que se trata de utilizar en la construcción de calderas, recipientes a presión y reactores nucleares. Los laboratorios de los fabricantes de acero realizan pruebas y el Código de calderas nos muestra los esquemas y requerimientos para preparar muestras que sirvan para realizar pruebas de esfuerzos, de tensión y de flexión sobre los materiales de construcción de calderas.

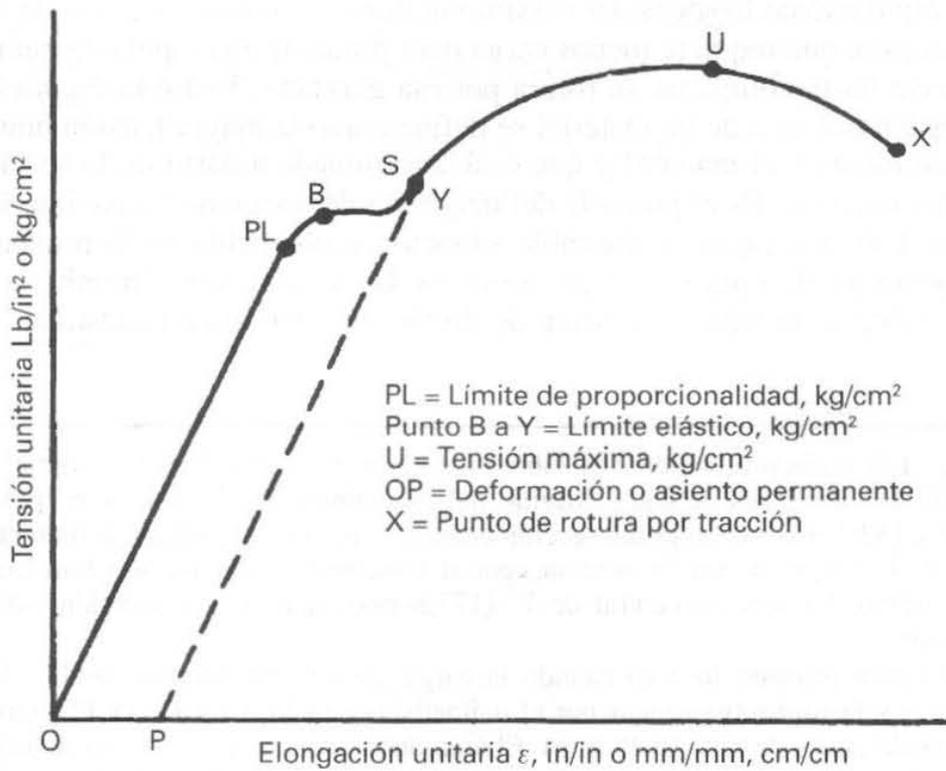
Pruebas de tracción. Una muestra o espécimen de un tipo de acero especificado se corta de una bobina laminada de chapa con el fin de realizar una prueba. Un espécimen para una prueba o extensión se muestra en la Figura 8.5a. Los extremos cuadrados se sitúan o fijan sobre las mandíbulas o mecanismos de sujeción de una máquina de pruebas de tracción. La parte central de la pieza cilíndrica de 1/2" (12,7 mm) de diámetro y longitud aproximada de 2" (50,8 mm) se le acopla un extensiómetro de 2" (50,8 mm) de longitud calibrada. La máquina de tracción tiene un dial o reloj indicador de la fuerza F o esfuerzo tractor aplicado a la pieza de prueba. Se le va aplicando una fuerza gradualmente creciente. A cada incremento de esfuerzo, se registra F , así como la longitud total l incrementada (para cada aumento de carga). Este procedimiento se sigue hasta que ocurra la rotura de la pieza espécimen. Se tabulan los datos registrados y así, de la relación F/A , donde A es la sección original de 1/2" (12,7 mm) de diámetro, se obtienen las tensiones para cada incremento de carga.

El alargamiento unitario o elongación se obtiene por cálculo a partir de la longitud original de 2" (50,8 mm) hasta obtener la elongación unitaria ϵ . Estos valores se sitúan como en la Figura 8.5b, mostrando el diagrama tensión-alargamiento para el acero dúctil.

El diagrama tracción-elongación presenta una línea recta que va desde cero hasta el punto señalado con PL . La razón es que a medida que la carga aumenta, se incrementa la tensión (tracción) S impuesta, como también lo hace la elongación ϵ . El incremento para ambas está en la misma relación, lo que significa que si se duplica la carga, se duplica la tracción y lo mismo la elongación. Esto es lo que significa la línea recta (no curva) de proporcionalidad. El límite de proporcionalidad de un material es pues la máxima tensión unitaria que puede desarrollarse en el material sin producir desviación de la ley de proporcionalidad de la tensión unitaria a la elongación unitaria. De incluso mayor significado, ello implica que si la carga disminuye, el material volverá a su longitud original sin mantener una deformación o asiento permanente como resultado de la carga. El material no quedará permanentemente deformado, sino que volverá a su forma original en tanto en cuanto no se exceda el límite de proporcionalidad.



(a)



(b)

Figura 8.5. (a) Espécimen o probeta preparada para ensayo de tracción. (b) Diagrama tensión-alargamiento obtenido de una prueba tensora para un material dúctil.

A medida que se aumenta más la carga sobre el espécimen, produciendo una tensión o tracción mayor que el límite proporcional, se llega a una tensión unitaria en cuyo punto el material continuará alargándose sin aumento de carga, suponiendo que se trata de un material dúctil. La tensión unitaria a la que tiene lugar este es-

tiramiento sin carga se denomina límite elástico y se presenta por una corta línea horizontal desde B a Y en el diagrama tensión-elongación. El límite elástico de un material se define como la mínima tensión unitaria en el material en la cual el material se deforma o alarga apreciablemente sin incremento de carga.

Si el material se carga o tracciona ligeramente más allá del límite elástico tiene lugar una deformación permanente o plástica en el material. Por ejemplo, en la Figura 8.5b, si se reduce la carga a cero justamente habría pasado el límite elástico, el extensiómetro mostrará un alargamiento o deformación permanente. Ésta se obtiene trazando una línea paralela a la recta de proporcionalidad por el punto $S(Y)$ y la deformación permanente sobre nuestro espécimen será la longitud de O a P por unidad de longitud del espécimen (alargamiento permanente unitario).

Si se aumenta la carga sobre nuestro espécimen, como se indica por la curva S a U , se alcanza un punto de máxima tensión unitaria (el máximo de la curva). En dicho punto, la tensión unitaria empieza a disminuir con una ligera carga adicional y se alarga hasta que se rompe. Esto es particularmente cierto para el material dúctil, que adelgaza rápidamente después del máximo de tensión unitaria a causa de la reducción de sección, que requiere menos carga para producir una rápida disminución de sección recta hasta completar su rotura por esa garganta. Véase la Figura 8.2b.

La tensión máxima de un material se define como la mayor tensión unitaria que puede alcanzarse en el material y que está determinada a partir de la sección recta original del material. Es el punto U del diagrama de tracción-elongación. La curva desde U a X es una rápida e inestable situación o condición de la prueba, con el punto X denominado punto de rotura en carga. La máxima tensión unitaria es en el punto U , y ésta es la tensión máxima de diseño del material en cuestión.

Ejemplo. Los datos proporcionados sobre un espécimen de prueba son: longitud total 19" (482,6 mm); las secciones de cada extremo del espécimen son 1" x 1" x 6" (25,4 mm x 25,4 mm x 152,4 mm) de longitud; sección central, 7/16" (11,1125 mm) de diámetro por 7" (177,8 mm) de longitud con la sección central concéntrica con las secciones cuadradas de cada extremo. La sección central de 7" (177,8 mm) tiene una marcación calibrada de 2" (50,8 mm).

El espécimen probado ha roto cuando la carga alcanzó un máximo de 11.274,75 Lbs (5.118,74 kg) y la rotura tuvo lugar por el diámetro original de 7/16" (11,11 mm). Pero el diámetro quedó ahora de 1/4" (6,35 mm). El área de la sección de una barra de 6/16" es de 0,15033 in² (96,987 mm²). La longitud de la sección central de 2" (50,8 mm) se ha alargado a 2,55" (64,77 mm).

1. Hallar la tensión máxima del material.
2. ¿Cuál es la tensión máxima en libras por pulgada cuadrada (kg/cm²) de la sección de 1" x 1" de cada extremo?
3. ¿Cuál es el porcentaje de elongación en la sección de la zona de 2"?

Solución.

1. En este problema la rotura fue en la sección de 7/16" de diámetro así que la tensión S es de:

$$S = \frac{F}{a}$$

donde: a = sección recta original.

Es decir:

$$S = \frac{11.274,75 \text{ Lbs}}{0,15033 \text{ in}^2} = 75.000 \text{ Lbs/in}^2$$

$$S = \frac{5.118,74 \text{ kg}}{0,96987 \text{ cm}^2} = 5.277,76 \text{ kg/cm}^2$$

2. La tensión máxima en la sección de $1'' \times 1''$ es la misma ($7.500 \text{ lb/in}^2 = 5.278 \text{ kg/cm}^2$) porque es el mismo material. No rompe por esta sección porque el área es mayor que en la sección de $7/16''$ de diámetro.
3. El porcentaje de elongación se halla como sigue:

$$\frac{(\text{Longitud final} - \text{longitud original}) \times 100}{\text{Longitud original}} = \% \text{ de elongación}$$

$$\frac{(2,55 - 2) \times 100 \%}{2} = \frac{0,55 \%}{2} = 27,5 \%$$

El *módulo de elasticidad* también conocido como *módulo de Hooke* (Ley de Hooke) establece que la tensión unitaria de un material es proporcional a la elongación unitaria acompañante, supuesto que la tensión unitaria no excede del límite de proporcionalidad. En otras palabras, establece que la relación de tensiones a elongación para un determinado material es siempre constante, y se denomina E , o módulo de elasticidad, o dicho en forma de ecuación:

$$E = \frac{\text{Tensión}}{\text{Elongación}} = \frac{S}{\varepsilon} = \text{constante}$$

Para el acero, el módulo de elasticidad se toma usualmente como $30.000.000$ y se escribe $30 \times 10^6 \text{ Lbs/in}^2$ ($2.109.210 \text{ kg/cm}^2$ o $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$). Éste es el módulo de elasticidad para cargas normales o axiales. Hay también un módulo elástico de cizalladura. Para el acero es de $12 \times 10^6 \text{ Lbs/in}^2$ (843.684 kg/cm^2).

Los dinamómetros, diales de tensión o relojes tensores se utilizan para determinar las tensiones o tracciones en secciones críticas de calderas, reactores nucleares y recipientes a presión para los cuales no puede hacerse un cálculo exacto de tensiones. Con las siguientes relaciones entre tensión, elongación y módulo de elasticidad del material pueden calcularse los esfuerzos. Es mucho más fácil de medir la elongación (alargamiento) o la deformación de un material bajo carga, que medir tensiones o esfuerzos.

Hemos dicho que las tensiones para cargas normales son F/a , donde F = carga impuesta y a = área original o sección resistente a la carga del material en cuestión. También decimos que la elongación unitaria ϵ es e/l , donde ϵ = elongación en cms/cm, e = aumento de longitud a partir de la longitud original y l = longitud original.

Así que $E = \text{Tensión}/\text{Elongación}$ y sustituyendo los valores de arriba obtenemos:

$$E = \frac{F/a}{e/l} = \frac{S}{e/l}$$

siendo:

$$S = \frac{F}{a}$$

Reescribiendo esto en términos de la tensión S :

$$S = \frac{E \times e}{l} = E \times \epsilon$$

ya que:

$$\frac{e}{l} = \epsilon$$

Ejemplo. Una sección anormal de una caldera fue diseñada de modo que no se podía calcular exactamente la tensión impuesta a ella. El acero tenía un módulo de elasticidad de 30×10^6 Lbs/in² ($2.109.210$ kg/cm²). Se marcó una longitud de $8''$ ($203,2$ mm). Desde la ausencia de carga hasta la plena carga, esta longitud aumentó a $8,009''$. ¿Cuál fue la tensión en esta sección de la pieza?

Solución. Utilicemos $S = E \cdot \epsilon$ con

$$\epsilon = e/l = 0,009/8 \quad \text{y} \quad E = 2.109.210 \text{ kg/cm}^2$$

$$S = (0,009/8) \times 2.109.210 \text{ kg/cm}^2 = 2.372,9 \text{ kg/cm}^2$$

Puede verse que si se mide la elongación, puede calcularse la tensión conociendo el módulo de elasticidad del material, que normalmente es una constante para la clase de material que se considere.

El módulo de elasticidad es una medida de rigidez del material. Por ejemplo, si un material tiene un módulo de elasticidad doble que el de otro material, la elongación unitaria en el primer material, para una tensión unitaria dada, será la mitad que en el otro material. Así pues, un material se considera doble de rígido que el otro. Algunos valores normales de E son: acero = 30×10^6 lbs/in² ($2,1 \times 10^6$ kg/cm²); fundición = 15×10^6 lbs/in² ($1,05 \times 10^6$ kg/cm²); aluminio = 12×10^6 lbs/in² (843.684 kg/cm²); hormigón = 3×10^6 lbs/in² (210.921 kg/cm²).

El límite elástico es el máximo esfuerzo unitario que puede desarrollarse en el material sin causar una deformación permanente. Los resultados de las pruebas

muestran que para la mayoría de los metales estructurales, el límite elástico del material tiene casi el mismo valor que el límite proporcional, y en la mayor parte de la literatura técnica los límites elástico y proporcional se consideran idénticos. Una pequeña diferencia aparece en las pruebas, pero para los efectos y propósitos técnicos pueden tratarse como cantidades idénticas.

Tensiones sobre virolas cilíndricas y tubos. La presión interna en una virola cilíndrica cerrada en cada extremo tiende a reventar o colapsar la vasija a lo largo de dos ejes distintos. Primero, la presión total actuando sobre la virola tiende a producir la ruptura a lo largo del eje longitudinal. La presión total actuando sobre los fondos tiende a causar la fractura de la virola alrededor de su circunferencia.

Los cilindros de paredes delgadas, significando esto que el espesor de la virola no excede de la mitad del radio interior, tienen dos tensiones, *tensión longitudinal* y *tensión circunferencial*. A esta última a veces se la denomina *tensión transversal*. Los cilindros de paredes de gran espesor tienen también estas tensiones pero se determinan de un modo diferente. Ambas tensiones se conocen por estos nombres a causa de la carga que resisten en un cilindro. Ambos son fundamentalmente esfuerzos de tracción o tensiones de tracción.

La Figura 8.6a de la página siguiente muestra un cilindro sin costura con un diámetro interior D , espesor de virola t , longitud L y con una presión uniforme P actuando dentro del cilindro. La presión actúa sobre las paredes del cilindro, de modo que la fuerza resultante creada tiende a separar el cilindro a lo largo de su eje. Así pues, el primer esfuerzo a considerar es la tensión longitudinal que resiste la fuerza tendente a separar el cilindro a lo largo de este eje. La presión actúa en todas direcciones. Pero si nosotros cortamos el cilindro como en la Figura 8.6b, que muestra la fuerza externa sobre un lado y también la tensión interna del material resistiendo a esta fuerza externa, lo siguiente tiene lugar para que exista la condición de equilibrio.

La fuerza tendente a separar el cilindro es la sección por la presión. Esto es:

$$D \times L \times P = \text{fuerza actuando sobre un lado}$$

donde $D \times L =$ área efectiva proyectada. La fuerza interna del material que resiste a este esfuerzo es:

$$\text{Tensión} \times \text{área del material}$$

o

$$S_L \times t \times L \times 2 = \text{fuerza resistente}$$

donde $t \times L =$ una sección del material. Pero como son dos áreas materiales resistiendo la fuerza, esto está multiplicado por dos. Igualando las dos fuerzas dadas:

$$D \times L \times P = S_L \times t \times L \times 2$$

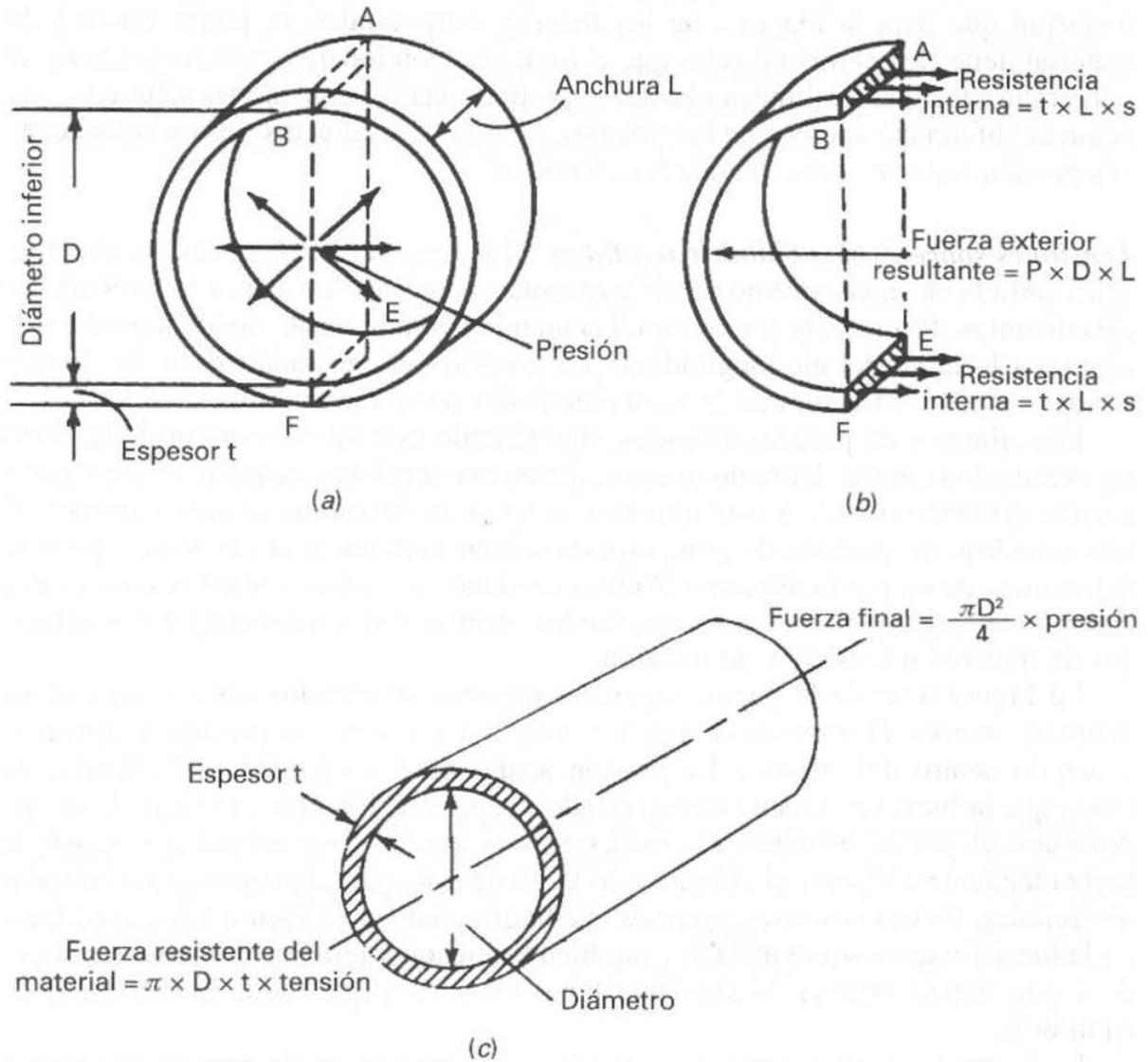


Figura 8.6. (a) y (b) La fuerza longitudinal con la presión actuando sobre el lateral del cilindro tiende a separar el cilindro a lo ancho. (c) La presión sobre el fondo del cilindro tiende a separar el cilindro circunferencialmente.

De aquí se deduce que:

$$\text{Tensión longitudinal, } S_L = \frac{P \times D}{2t}$$

La fuerza tendente a separar la tapa final del cilindro, o alrededor de su circunferencia, se muestra en la Figura 8.6c. La presión actuando sobre cada tapa final crea una fuerza que es igual al área circular multiplicado por la presión o:

$$\frac{\pi D^2}{4} \times \text{presión} = \text{Fuerza final}$$

El material resiste con una fuerza igual al área final del material multiplicada por la tensión, es decir:

$$\pi DtS_C = \text{Fuerza resistente}$$

donde S_C es la tensión circunferencial. Igualando las dos fuerzas para su equilibrio da:

$$\frac{\pi D^2}{4} \times P = \pi DtS_C$$

Resolviendo por eliminación, resulta para la tensión circunferencial:

$$S_C = \frac{PD}{4t}$$

Si comparamos esto con la tensión longitudinal, encontramos que la tensión circunferencial es la mitad de la longitudinal.

Las dos ecuaciones de las tensiones longitudinal y circunferencial son las ecuaciones fundamentales de la resistencia del material. Ambas se modifican algo por el Código de calderas y recipientes a presión para tener en cuenta factores y experiencias de fabricación.

Las ecuaciones desarrolladas son para construcciones sin costura (sin soldadura), significando ello que no hay junta soldada, ni roblonada, ni junta de ningún otro tipo de ligamento. Los capítulos mostrarán cómo la eficacia de la junta tiene que considerarse para modificar estas ecuaciones. Nótese que las ecuaciones para ambas tensiones longitudinal y circunferencial (debidas a la presión) son independientes de la longitud del recipiente. Pero si un recipiente es muy largo, la tensión debida a la flexión tendrá que añadirse a la tensión debida a la presión. Esto es especialmente cierto para un recipiente lleno con una sustancia de peso considerable.

La significación de la tensión circunferencial por ser la mitad de la tensión longitudinal en un cilindro conlleva muchos problemas en el diseño y cálculo de una caldera. Por ejemplo, las viejas calderas y en las juntas circunferenciales roblonadas no tienen que ser tan fuertes en esta dirección como han de serlo en la junta longitudinal. Pero para muchos cálculos es extremadamente importante comprobar un cilindro en ambas direcciones longitudinalmente y circunferencialmente, de modo que se esté seguro de que la tensión circunferencial es la mitad al menos de la tensión longitudinal. Esto se verá en otro capítulo.

Efectos de la temperatura. La temperatura por encima de los límites diseñados tiene el efecto inmediato de rebajar la tensión admisible en un material. Por ejemplo, una chapa de acero al carbono calidad caja de fuegos (hogar) grado A, SA-30 tiene una tensión admisible de 12.000 Lbs/in² (843,7 kg/cm²) para temperaturas entre -20 a 400 °F (-6,7 °C a 204 °C). A 900 °F (482 °C) la tensión admisible es de sólo 5.000 Lbs/in² (352 kg/cm²). Suponiendo la misma presión a ambas temperaturas, puede verse que en una caldera diseñada para 12.000 Lbs/in² (843,7 kg/cm²), la

tensión normal será rebajada a 5.000/12.000, o 41,7 por 100 de su tensión original para un incremento térmico hasta 900 °F (482 °C).

Ciertas partes de una caldera, particularmente los tubos, chapas o placas de los tubos, hogares de calderas escocesas marinas y piezas de fundición en calderas de hierro fundido son muy susceptibles a la temperatura o daño por sobrecalentamiento. Un gran aumento de temperatura en un material acompañado de una bajada de los niveles de tensión admisible es una de las causas más comunes de daños y roturas en calderas. El nivel de agua bajo, la circulación pobre y los materiales depositados son algunas de las causas de recalentamiento del material más allá de sus niveles de tensión de seguridad. No nos olvidemos de que el lado del fuego de las calderas está suficientemente caliente como para fundir el acero. Y con la presión existente sobre el lado del agua o vapor, no se requiere mucho sobrecalentamiento para producir roturas, ampollas y otras deformaciones. De este modo, si se tensiona el material por encima de su tensión elástica a elevada temperatura, se alcanza el nivel de la tensión de rotura del material a elevada temperatura, conduciendo a una rotura de las partes afectadas de la caldera.

Las tensiones y esfuerzos sobre las piezas de la caldera pueden también producirse por dilatación térmica a causa de los aumentos o subidas de temperatura y son pronunciadas si las piezas están constreñidas a causa de las restricciones o por uniones metálicas con diferencia de espesor que se unen abruptamente sin secciones de transición. La temperatura produce la dilatación del acero, que puede calcularse como sigue:

$$e = n \cdot l \cdot (T_2 - T_1)$$

donde: e = cambio de longitud

l = longitud original

T_1 = temperatura original, °F (o °C)

T_2 = temperatura final, °F (o °C)

n = coeficiente de dilatación (cambio o incremento de longitud por unidad de longitud y por grado (centígrado) de temperatura.

Ejemplo. El acero tiene un coeficiente de dilatación térmica de 0,0000065" por pulgada por °F. Para mostrar la posible tasa de dilatación a considerar, suponer que una riostra en una caldera de retorno horizontal tubular (HRT) de humos tiene una longitud de placa tubular a placa tubular de 30 ft (9 mts). ¿Cuanto dilatará este tirante (redondo) con un cambio de temperatura de 70 °F a 300 °F (21 °C a 149 °C), suponiendo que dilata libremente?

Sustituyendo en la ecuación:

$$e = n \cdot l \cdot (T_2 - T_1)$$

obtenemos:

$$e = 0,0000065 \cdot (30 \cdot 12) \cdot (300 - 70) =$$

$$= 0,5382" \text{ (13,67 mm), que es más de } 1/2" \text{ (13 mm)}$$

Si suponemos que el redondo está fijado a cada placa extrema y que las flechas o placas de fijación de los tubos no cedan sino que aguanten en sus dimensiones y posición. ¿Qué tensión de compresión S_c se impondrá al tirante o riostra depreciando el efecto-columna de una riostra larga?

Esto se calcula a partir de la ecuación del módulo de elasticidad

$$S = E \cdot \varepsilon$$

donde ε = elongación/unidad de longitud. Así:

$$\begin{aligned} S &= (30.000.000 \text{ Lbs/in}^2) \cdot \frac{0,5382}{30 \cdot 12} = \\ &= 44.850 \text{ Lbs/in}^2 = 3.153 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Este ejemplo ilustra la importancia de considerar los efectos de la temperatura en el diseño de una caldera y el rápido crecimiento de las tensiones cuando una pieza o parte de la caldera se recalienta accidentalmente por encima de las condiciones de diseño. Recuerde que la tensión desarrollada no se calcula tan sencillamente como se ha demostrado por la ilustración dada. Por ejemplo, hemos supuesto que la virola y las placas *no* dilatan por efecto de la temperatura.

Se usan *calibres* para medir la elongación o dilatación de una cierta longitud de un material. Usando la ecuación del módulo de elasticidad para el material, puede calcularse la tensión sobre un componente utilizando:

$$S = E \cdot \varepsilon$$

Si un tubo pierde por la junta de laminación pero no pandea ni se abomba es señal de que la fuerza expansora es mayor que la tensión o fuerza de unión de la junta laminada. Las juntas laminadas son equivalentes a los *encajes forzados* (a prensa) dependientes de la fricción de las áreas o zonas de contacto para mantener los tubos estancos en o con una chapa tubular. La excepción, por supuesto, son los tubos soldados, donde se genera una tensión de cizalladura por la dilatación.

Efectos de la concentración de tensiones. Si un material o pieza estructural tiene un cambio de sección brusco, por ejemplo, una chapa plana que contenga una abertura o una esquina puntiaguda como se muestra en la Figura 8.7a, la distribución de tensiones no es uniforme a lo largo de toda la sección recta del material. Cerca del cambio repentino, la tensión es mucho mayor que la calculada. De la sección afectada se dice que tiene una «concentración de tensiones» en la zona o área, y la relación por la que tiene que multiplicarse la tensión normal, K en la Figura 8.7a, se llama *factor de concentración de tensiones*.

La concentración de tensiones juega un papel importante en las piezas de estructuras sujetas a un repetido tipo de cargas, para el que la concentración de tensiones puede llevar a grietas y fallos de rotura por fatiga. Si la concentración de tensiones es bastante severa (incluso con carga normal o nominal), pueden inducirse tensiones por encima del nivel esperado de tensiones. Los ángulos afilados en las

uniones soldadas y otras formas puntiagudas deben evitarse. De este modo, los cortes de las aberturas en las chapas deben reforzarse para fortalecer los bordes alrededor de la abertura contra la concentración de tensiones.

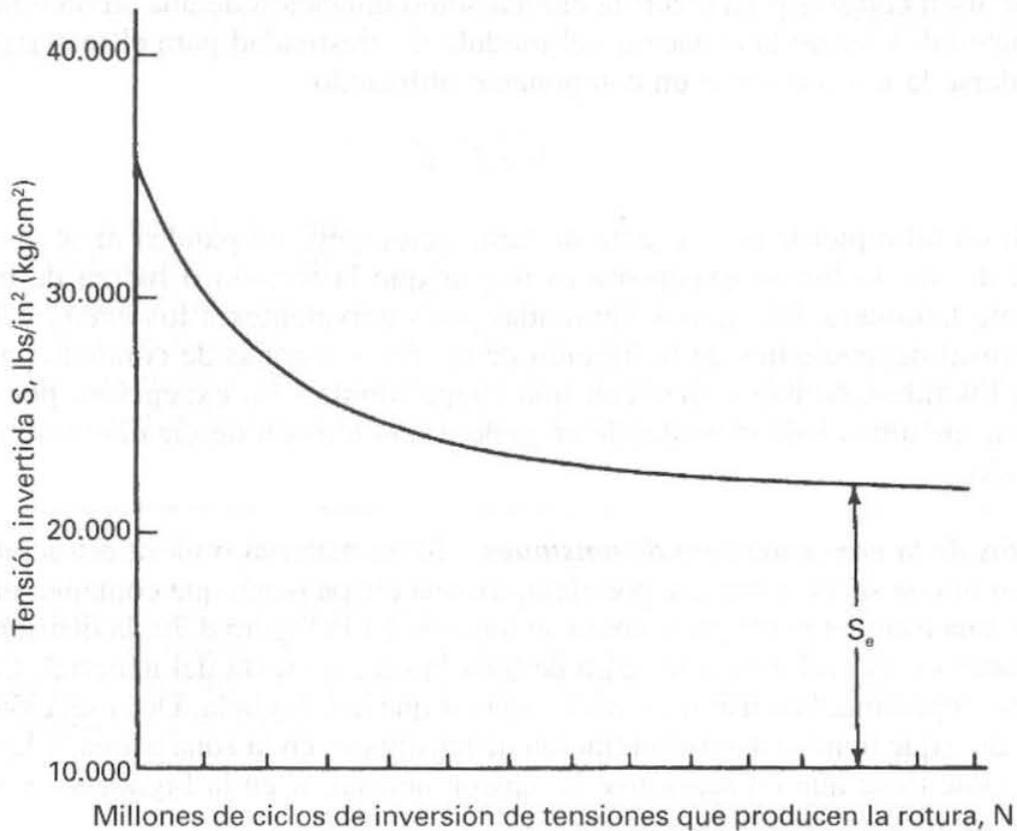
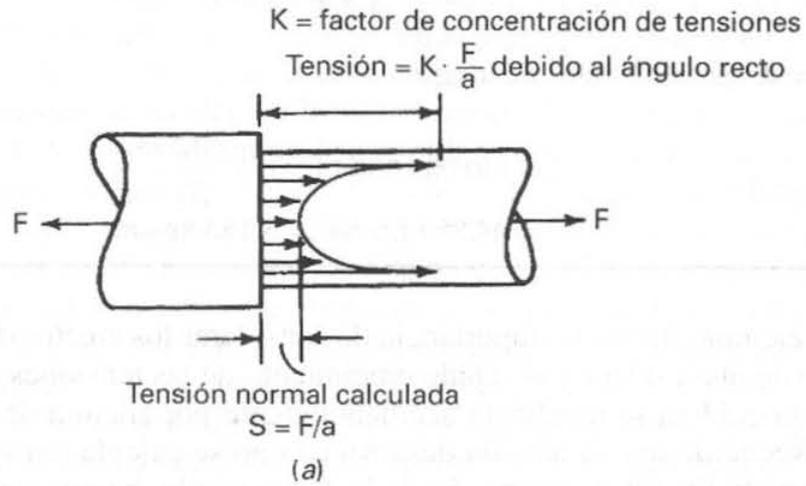


Figura 8.7. (a) Los ángulos rectos producen concentración de tensiones que aumentan las tensiones normales de cálculo. Éstas deben multiplicarse por un factor de concentración de tensiones para hallar la verdadera tensión en el cambio de sección brusco. (b) Los diagramas S-N son usados para determinar el límite de duración de los diversos materiales.

El Código de calderas especifica las conexiones permisibles de una junta para evitar la concentración de tensiones. Los radios de los refuerzos se especifican de modo formal. Las aberturas se calculan según las reglas del Código. En el trabajo analítico y de diseño, las concentraciones de tensiones se determinan por *métodos fotoelásticos*, por el *método de la capa o pintura de tensiones* y por el *método del medidor de elongaciones* utilizando el control de medida de resistencia eléctrica.

Límite de resistencia. En vasijas o recipientes nucleares uno debe diseñar cuidadosamente los elementos por el límite de agotamiento y otros métodos de análisis de tensiones. El límite de agotamiento (también conocido como *límite de fatiga*) es la máxima tensión unitaria que puede componerse y repetirse sobre un material a través de un ciclo definido, o rango de tensiones, por un número indefinidamente grande de veces sin producir la rotura del material.

¿Cómo se determina el límite de resistencia? Probando el material a través de una inversión completa de tensiones. Cuando el material haya sido tensionado cerca de su límite de ruptura (o de resistencia), el espécimen romperá después de unos pocos ciclos. Si una segunda muestra del mismo material se prueba de nuevo y se tensiona ligeramente menos que antes, puede imponerse un mayor número de inversiones o ciclos. Esto continúa hasta un valor límite, conocido como *límite de duración o resistencia*, que se alcanza cuando se impone un número casi indefinido de ciclos de tensión, sin producir rotura.

La Figura 8.7b muestra un diagrama *S-N*, donde se dibujan en un eje las tensiones hasta la rotura y el número de ciclos hasta el fallo en el otro. La línea horizontal asintótica obtenida es la tensión de resistencia (de duración) para el material. En la Figura 8.7b este valor es de 22.500 Lbs/in² (1.582 kg/cm²). Los límites de duración o resistencia se usan con profusión en el trabajo de diseño de las maquinas, y con la adopción del Código de Recipientes Nucleares, Sección III, recibirá mayor atención en el Código. Los límites de resistencia duradera de los materiales pueden modificarse considerablemente por las condiciones ambientales, oscilaciones de temperatura, efectos corrosivos, fragilidad de hidrógeno y otras condiciones similares que generalmente implican estudio de fatigas de metales. Por ejemplo, las discontinuidades o factores de concentración de tensiones como los ángulos agudos o grietas pueden minorar o modificar los límites de resistencia o durabilidad, como pueden hacerlo los ambientes corrosivos sobre una pieza tensionada.

Crecimiento de la grieta: fractura mecánica. La tasa de crecimiento de la grieta por fatiga ha sido cuantificada como resultado de un intenso trabajo de desarrollo en el campo del análisis de tensiones espacial y nuclear. Si se asume que existe una grieta en un material y si este material, supuesto que es acero, está sometido a tensión se desarrollará una deformación plástica sobre el extremo de la grieta. La grieta puede crecer por deformación plástica a medida que la carga o tensión aplicada crece. La distancia a que el frente de la grieta avanza con cada ciclo de carga es una función de la intensidad de la tensión aplicada al borde de la grieta, que se expresa como factor de intensidad de la tensión ΔK . La tasa de crecimiento de la grieta en pulgadas (o mm) por ciclo de aplicación de tensión, se expresa como:

$$\frac{d(a)}{d(N)}$$

donde: a = tensión de la grieta en pulgadas (o mm) y N = vida de fatiga o número de ciclos de tensión antes del fallo. Una ecuación para la tasa de crecimiento de la grieta usada en análisis de rotura o fallo es:

$$\frac{d(a)}{d(N)} = C(\Delta K)^m$$

donde: C = constante del material determinada por pruebas para el tipo de material (para acero a temperatura ambiente, se usa 4×10^{-24}).

m = constante del material deducida de pruebas (para material ferroso, se utiliza 4).

Véase la Figura 8.8a. Los datos de propagación de la grieta pueden utilizarse para determinar la intensidad de la tensión ΔK que puede tolerarse para un diseño particular. También el número de ciclos requerido para extender una grieta inicial de tamaño a_1 , a lo que se considera tamaño crítico de grieta, a_2 , puede establecerse usando la ecuación de propagación de la grieta por fatiga, $d(a)/d(N)$.

Los mecanismos de rotura y los métodos NDT se están utilizando para determinar si un defecto necesita reparación inmediata o si todavía se pueden aplicar muchos más ciclos de tensión hasta que el defecto haya crecido hasta un tamaño que precise reparación o reemplazo de la pieza. En las últimas décadas ha habido una gran cantidad de actividad de investigación dirigida a este método de predicción de fallos aplicado como mecanismo básico de fenómenos de rotura en sólidos. La determinación de la tasa de crecimiento de grieta ayuda al establecimiento del número de ciclos que pueden tolerarse antes de que se necesiten medidas correctivas. Los métodos de pruebas NDT se utilizan para comprobación periódica del desarrollo del defecto en conjunción con los métodos de fractura mecánica.

La prevención de los fallos por fatiga asegura la contención del crecimiento de la grieta dentro de lo que se considera límites seguros. Cuando son posibles las inspecciones en servicio, se establece un intervalo de servicio seguro entre inspecciones. Cuando no son factibles las inspecciones en servicio, se necesita un diseño más conservador de modo que cualquier defecto anticipado no crecerá hasta un tamaño peligroso durante la vida esperada del componente.

Corrosión por tensiones. La acción simultánea de una pieza sometida a tensiones repetitivas y a alguna forma de ataque por el medio en el que la pieza debe trabajar puede producir un fallo o rotura como consecuencia de la corrosión por fatiga. El efecto combinado de estos dos factores es mucho mayor que el efecto de uno u otro en solitario. La rotura normalmente comienza por defectos superficiales, poros o irregularidades. Estos puntos actúan como puntos de concentración de tensiones con el medio corrosivo intensificando la acción del picado. Cuando más repetitiva sea la tensión, más rápida será la acción del picado, que de nuevo incrementará la concentración de tensiones. Un efecto acumulativo puede materializar lo que producirá un fallo muy por debajo de la tensión prevista por resistencia o duración.

Los poros formados por la acción simultánea de la tensión y la corrosión son siempre más agudos y profundos que los poros formados al mismo tiempo bajo

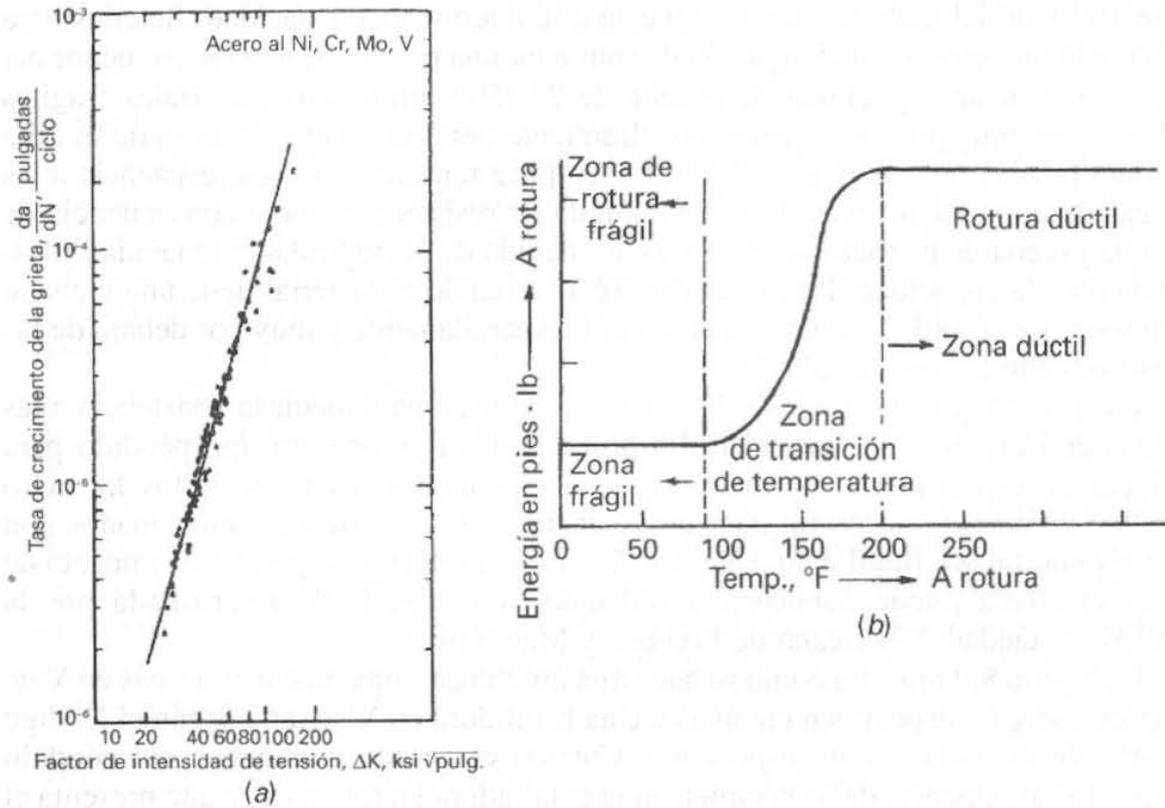


Figura 8.8. (a) Tasa de crecimiento de la grieta por fatiga en función de la intensidad en el borde de la grieta para un acero al níquel-cromo-molibdeno. (b) La zona de transición de temperatura es importante para ciertos aceros para determinar las propiedades de la rotura frágil y dúctil con el cambio de temperatura.

condiciones sin tensiones. Cuanto más repetitivas sean las tensiones, más rápida será la acción de picado. A una tensión repetitiva de ciclo bajo, el picado procederá enteramente por corrosión normal, y la sección fallará por rotura normal por tensión o cuando el área resistente se debilite de modo que la tensión crezca proporcionalmente, suponiendo una carga constante.

La *corrosión por tensiones* es, pues, producida fundamentalmente por las tensiones repetitivas de alta frecuencia en un medio corrosivo, desembocando en un picado causado por la tensión y corrosión. El picado pues desarrolla puntos de elevada concentración de tensiones que conduce a la rotura por fatiga.

No hay datos experimentales disponibles para determinar la extensión a la que se reduce el límite de resistencia o durabilidad para la mayoría de los materiales en combinación con soluciones o medios corrosivos. Pero para calderas y recipientes a presión, la precaución obvia a tomar contra la corrosión por tensiones es asegurarse de que el agua o medio confinado está libre de tendencias corrosivas. Esto se determina por análisis del agua a intervalos regulares por personal experto en análisis periódicos internos de las piezas sometidas a presión y el examen de las superficies en busca de evidencias de picadura y corrosión.

Pruebas de muesca en V de Charpy. *Materiales frágiles* son aquellos que comparativa o selectivamente son débiles en resistencia o tensión. La fragilidad es una

característica del material que es opuesta a la ductilidad y tenacidad. Se considera frágil a un material si su elongación de rotura en una prueba de tensión es menor del 5 por 100 en un espécimen de prueba de 2" (50,8 mm). Los materiales frágiles fallarán con muy poca elongación o estiramiento antes de romper a causa de su falta de ductilidad. Los materiales frágiles tienen poca tenacidad o poca resistencia a las cargas de impacto, a veces denominada falta de resistencia; como consecuencia de ello, la prueba de impacto se utiliza como medida de la fragilidad o tenacidad (descrita como la capacidad de absorber energía). Cuando el material tiene una incisión o muesca y es frágil, la rotura puede venir inesperadamente y muy por debajo de las tensiones admisibles de cálculo.

Las pruebas con *muecas en V de Charpy* se usan para medir la resistencia a las cargas de impacto o la fragilidad. La prueba utiliza un aparato tipo péndulo para golpear en especímenes, normalmente con una muesca o entalla, y los kg·m (o pie-lbs) de energía necesaria para producir una fractura están correlacionados con que el material sea frágil o no. Una descripción completa de la prueba de impacto de barra entallada puede conocerse estudiando la norma E-23 desarrollada por la ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales).

La Figura 8.9 muestra cómo se hace una prueba de impacto con muescas en V de Charpy sobre un espécimen entallado. Una hendidura en V se talla según el Código en una de las caras de un espécimen. Cuando el pesado contrapeso del péndulo golpea la cara opuesta del espécimen en la entalladura en forma de V que presenta el espécimen, los kg·m necesarios (o pie-lbs) para causar la rotura se calculan por las relaciones del brazo de la palanca y el peso. Los aceros al carbono con resistencia en frío a la rotura por impacto son usualmente aceros calmados, o sea aceros que han sido desoxidados en su fabricación de modo que no haya evolución gaseosa durante la colada y solidificación. Los aceros al níquel de 3,5 ó 9 por 100 se consideran

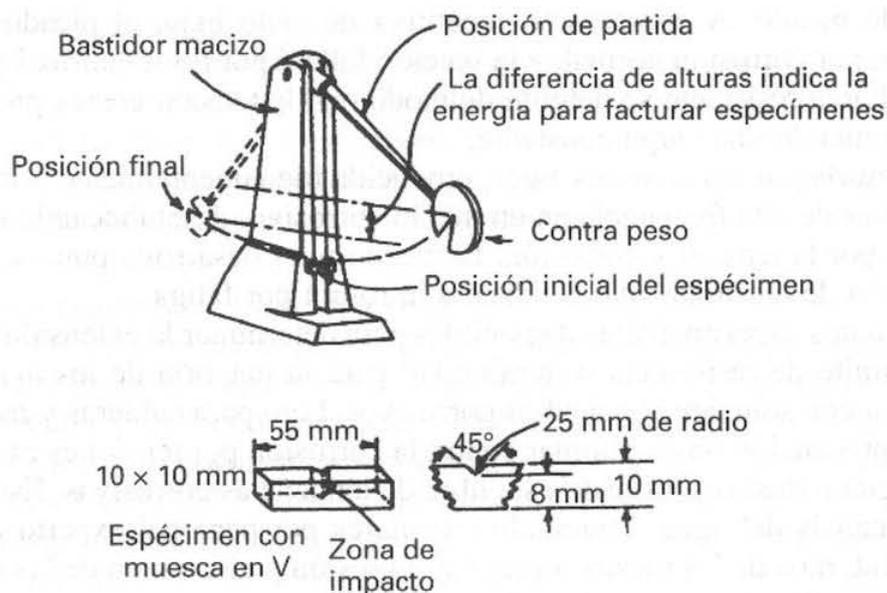


Figura 8.9. El test de Charpy sobre un espécimen con entalladura en V se utiliza para determinar la tenacidad contra la fractura frágil. (Cortesía de Power magazine.)

aceros de superior resistencia al impacto, como aceros austeníticos inoxidables que son.

Temperatura de nula ductilidad. El efecto de la temperatura alterando o cambiando la naturaleza frágil de un material se pone de manifiesto dramáticamente en la Segunda Guerra Mundial cuando los barcos mercantes se agrietaban inesperadamente. Fue digno de tener en cuenta que esto ocurría en aguas frías, pero no en aguas cálidas. Se estableció desde este momento (por estos fallos) que los metales podían mostrar un comportamiento dúctil en un ambiente normal pero actuar de un modo frágil si las características del medio ambiente, como la temperatura, cambiaban. La rotura por tensiones y corrosión puede ser también de naturaleza frágil como resultado de la acción combinada de tensiones, material susceptible y un medio ambiente corrosivo.

Los aceros de bajo contenido en carbono y las aleaciones de baja ley frecuentemente muestran una zona de transición del comportamiento dúctil al fallo frágil en un punto o rango de temperaturas denominado la *temperatura de nula ductilidad* (véase la Figura 8.8b). Cualquier fallo del material agravará la tendencia de un material con una característica de *ductilidad nula* a actuar de manera frágil por debajo de la temperatura de transición.

HAZ. La soldadura puede causar cambios en un material que lo hace actuar de modo frágil en la soldadura metálica o zona afectada por el calor (HAZ). Es pues importante determinar y considerar las temperaturas de transición de nula ductilidad del material a utilizar en calderas y recipientes a presión para estar seguro de que esta temperatura no será experimentada durante ningún servicio (no serán temperaturas a las que las calderas o recipientes a presión pueden estar expuestas, incluso durante posibles pruebas con anomalías de operación). Una de estas posibilidades es la *prueba hidrostática* con el agua que puede estar por debajo de la temperatura de nula ductilidad. La otra son las pruebas que se realizan cuando la temperatura ambiente puede ser demasiado baja, como puede ocurrir en invierno. Los fallos son debidos a la fragilidad por no considerar el efecto de las transiciones de temperatura sobre las propiedades del material que hayan podido ocurrir en el equipo durante las pruebas hidrostática de presión y otras partes del equipo como las torres de enfriamiento de agua.

Otros efectos sobre los materiales. El *acortamiento* bajo tensión se define como la deformación lenta del material que tiene lugar a elevada temperatura sin incremento de la tensión. Las pruebas modernas de materiales incluyen la determinación de cuánto acortamiento o deformación permanente puede esperarse en un espacio de tiempo de modo que el diseño puede reflejar estos factores en la predicción de vida del recipiente a presión. Las propiedades o características del acortamiento bajo tensión se consiguen por imposición de una carga o tensión sobre un espécimen a una temperatura constante y después midiendo la elongación a intervalos de tiempo. Los datos se llevan a una gráfica para obtener unas curvas de tensión constante del acortamiento o elongación (alargamiento) o curvas a intervalos de tiempo constantes de elongación-tensión. Utilizando los datos de la elongación, el diseñador trata de establecer la vida en servicio esperada y los correspondientes cantidades de defor-

mación que pueden tolerarse. Una vez establecidas estas condiciones, puede seleccionarse la tensión que satisfaga estas condiciones.

La *fragilidad de hidrógeno* puede tener lugar bajo condiciones de trabajo de calderas y recipientes a alta presión y alta temperatura. El ataque del hidrógeno sobre los aceros puede dar lugar a pérdidas severas de ductilidad con desarrollo de grietas que pueden conducir a roturas inesperadas por fragilidad. El efecto es más severo sobre los aceros a elevada temperatura en las que el hidrógeno se difunde en el metal como hidrógeno atómico. Se recombina en el metal como hidrógeno molecular en las proximidades del grano y produce elevadas presiones en estos «vacíos» o «huecos» intercrystalinos, dando como resultado abultamiento o ampollas. El hidrógeno también se combina con el carbono en el acero bajo elevadas presiones y temperaturas y descarboniza al acero, teniendo lugar o sobreviniendo la fragilidad. Con frecuencia se utilizan los aceros al cromo-molibdeno allí donde se requiere resistencia a la fragilidad de hidrógeno.

Las vasijas y recipientes a presión nucleares pueden estar sometidas a la irradiación de neutrones de su acero. Es necesario evitar las impurezas del acero así como los grandes tamaños del grano para limitar cualquier «vacío» o «hueco» en el material. La teoría dice que la radiactividad existente en los recipientes nucleares promueve la formación de helio, que, con el tiempo, se recoge y sitúa en las proximidades del grano para debilitarlo y disminuir la ductilidad del acero. El control de la calidad es pues más exigente sobre las vasijas y recipientes nucleares, de modo que las cavidades u oquedades deben ser eliminadas.

TENSIONES ADMISIBLES Y FACTOR DE SEGURIDAD

Las *tensiones admisibles* se usan para el diseño de estructuras o piezas de maquinaria. La tensión admisible se denomina también a veces tensión de trabajo admisible. Es la máxima tensión que se considera segura cuando el material está sometido a las cargas de servicio que deberían ser resistidas por el mismo. En las aplicaciones de calderas, el término *presión admisible* se utiliza a menudo. Actualmente, la tensión admisible se determina por aplicación de fuerzas que actúan sobre el material y calculando después la presión admisible a partir de la tensión admisible sobre el material.

La tensión admisible se halla a partir de la tensión máxima del material (o de la carga de rotura) dividida por un factor de seguridad. El factor de seguridad utilizado en el cálculo de modernas calderas es de 4. Sin embargo, ciertos elementos de las viejas calderas como las juntas roblonadas tienen que diseñarse con un factor de seguridad de 5. Otras partes o piezas tienen que diseñarse con un factor de seguridad tan elevado como 12,5, como en el caso de los remaches o roblones que sujetan tirantes sobre vigas o soportes en una caldera piro-tubular horizontal.

En la utilización de cálculos para calderas, el factor de seguridad es la tensión máxima S_u dividida por la tensión admisible S_a . En forma de ecuación:

$$\text{factor de seguridad} = \frac{S_u}{S_a}$$

Otro método de expresar el factor de seguridad es dividiendo la presión de rotura por la presión admisible. Este método se utiliza en los informes de inspección y en los datos de los informes ASME. Puesto en forma de ecuación:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Presión de rotura}}{\text{Presión admisible}}$$

En el diseño y utilización de calderas y otras estructuras críticas donde están en juego vidas humanas y daños a propiedades, hay una necesidad definida de seleccionar tensiones de trabajo y cargas que sean considerablemente menores que la tensión máxima o la carga de rotura por las siguientes razones:

1. Hay siempre algún grado de incertidumbre o riesgo en los materiales utilizados, en cómo se fabricaron, cómo se montaron y dónde y cuándo se unieron con otros materiales.
2. Hay siempre algo de riesgo e incertidumbre acerca de cómo una estructura, pieza o parte de ella va a ser cargada (con qué exactitud), cómo va a resistir o soportar las cargas y cómo se va a abusar de ella en el trabajo o servicio normal o extremo o de punta).
3. Los cálculos de todas las tensiones posibles en una estructura a construir nunca son todo lo exactos que uno considera cuando se estudian las variables que pueden surgir en un servicio con el transcurso de los años.

Ciertos materiales frágiles como la fundición no tienen un punto de rotura definido y determinado. De modo que las últimas normativas usan las tensiones máximas porque es mucho más fácil utilizarlas y aplicar un factor de seguridad para así obtener la tensión admisible. En algunos países de Europa el *límite elástico* es la base del diseño. El Código americano de recipientes nucleares (*Nuclear Vessel Code*) utiliza el límite elástico o límite de resistencia o ambos como base de diseño. Con el incremento del cambio tecnológico el Código de calderas puede también variar en esta materia y más en los tiempos que corren actualmente.

Sobre las instalaciones existentes, las cuestiones del factor de seguridad y la presión admisible afloran muy a menudo. Por ejemplo, ¿puede una caldera que fue diseñada originalmente con un factor de seguridad de 5, trabajar con un factor de seguridad de 4, ya que la última normativa de seguridad permite este factor de seguridad? Normalmente permanece el factor de seguridad original de 5. El factor de seguridad de 4 fue puesto principalmente para las calderas de acero estirado sin soldadura o para calderas soldadas que cumplan los registros de seguridad más severos de control e inspección de calidad. Las viejas calderas pueden no cumplir este requerimiento, pero el factor de seguridad original de 5 rige la presión admisible.

Si una caldera está timbrada para una presión admisible de 19 kg/cm² (275 psi) y la válvula de seguridad está tarada para 10,5 kg/cm², ¿cuál es el factor de seguridad? Se asume o supone que se cumplen los requisitos del Código de calderas y del último código de soldaduras y que el diseño original tiene un factor de seguridad de 4. La

presión de rotura de esta caldera sería de $4 \times 19,25 \text{ kg/cm}^2 = 77 \text{ kg/cm}^2$. De este modo:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Presión de rotura}}{\text{Presión admisible}} = \frac{77}{10,5} = 7,33$$

Esta cuestión nos lleva a una consideración importante y es de qué presión utilizar en el cálculo de los factores de seguridad en instalaciones de calderas existentes. Por ejemplo, en esta cuestión, ¿se utilizaría la carga de ajuste de presión de la válvula de seguridad o se usaría la presión de timbre admisible? Si el ajuste de la válvula de seguridad está *por debajo* de la presión de trabajo máxima timbrada, úsese la cifra de ajuste de la válvula *de seguridad*. Si por casualidad la válvula o válvulas de seguridad están taradas a un valor más elevado que la presión admisible (por encima del límite del Código), en ese caso hay una situación de riesgo o peligro porque la válvula de seguridad siempre debe estar tarada por debajo de la presión admisible o presión de trabajo timbrado sobre la caldera.

El ajuste de la válvula de seguridad se utiliza en los cálculos allí donde la presión de timbre admisible está por encima del valor de ajuste de la válvula de seguridad y entonces la presión admisible en calderas es la de ajuste de la válvula de seguridad (es igual o menor, $P_{\text{admisible}} \leq P_{\text{válvula seguridad}}$). Se supone o asume que la caldera no trabaja por encima de esta presión de ajuste de la válvula de seguridad. Si se necesita un aumento de presión, otros ítems como tarado de válvulas y accesorios de unión tendrán que comprobarse antes de que la presión se aumente hasta el máximo de presión admisible timbrada sobre la placa de caldera. De ese modo puede necesitarse una válvula de seguridad nueva. También tendrá que comprobarse todo lo relativo al Código sobre tarado de válvulas y conexiones de los niveles para ver si cumplen los requisitos para la nueva presión.

La cuestión de si un factor de seguridad tiene continuidad o validez sobre una vieja caldera debe considerarse muy a menudo, especialmente allí donde debe evaluarse el coste de reparación o alteración de características del nuevo equipamiento a cambiar. La continuidad del factor de seguridad de una caldera depende del tipo de caldera, las condiciones en que se encuentra e incluso el estado o sitio donde está emplazada. Suponiendo que la inspección exterior e interior son satisfactorias, la Normativa Americana establece que:

1. Las solapas y juntas longitudinales de calderas trabajando a más de 50 psi ($3,5 \text{ kg/cm}^2$) pueden operar a esta presión durante 20 años. Después, se permiten $3,5 \text{ kg/cm}^2$ o menos; pero si la caldera se cambia de emplazamiento sólo se permite una presión de trabajo baja (menor).
2. Para calderas de construcción por soldadura a tope, al final del año 25 y después cada 5 años, el factor de seguridad debe aumentarse en 0,5 (50 por 100) a no ser que se realice un test o prueba hidrostática a 1,5 veces la presión admisible; si esta prueba es satisfactoria, no es necesario ningún aumento del factor de seguridad.

La mejor regla a seguir en cualquier cambio del factor de seguridad es comprobarlo con un inspector de calderas o de la jurisdicción de industria. *Nunca* suponga

que la caldera puede trabajar a mayor presión por cambiar las válvulas de seguridad, incluso si la caldera está timbrada a una presión mayor. Hay otros requisitos a cumplir que deben tenerse en cuenta sobre agua de alimentación, purgado, conexiones de niveles y sus columnas de agua, corte por bajo nivel de agua en caldera y tarados de servicio de válvulas. Al determinar la presión admisible sobre una caldera, los cálculos de tensión deben hacerse como se muestra en los siguientes capítulos.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS

1. ¿Cómo definiría el límite elástico de un material matemáticamente, siendo S = límite elástico en kg/cm^2 ; F = carga de rotura en kg/cm^2 ; a_f = sección final del espécimen (cilíndrico) en el punto de rotura; y a_i = sección inicial del espécimen (cilíndrico) en el punto de rotura?

RESPUESTA:

$$S = \frac{F}{a_i}$$

La sección inicial se utiliza para la tensión del límite elástico.

2. Defina matemáticamente ductilidad, siendo los datos:

A = porcentaje de reducción de la sección.

a_i = sección inicial del espécimen.

a_f = sección final del espécimen.

RESPUESTA:

$$A = \frac{a_i - a_f}{a_i} \times 100 \%$$

3. Señale la diferencia entre rotura del material por fatiga de baja frecuencia y de alta frecuencia.

RESPUESTA: La fatiga de baja frecuencia es una fatiga de tipo rotura que ocurre después de un relativamente bajo número de tensiones repetidas; por debajo de 10.000 ciclos es el rango normalmente aceptado. El fallo por fatiga de alta frecuencia requiere ciclos mayores de tensión repetitiva, normalmente por encima de los 100.000 ciclos de tensiones.

4. ¿Qué es tensión?

RESPUESTA: Tensión es la resistencia a una fuerza externa que un material proporciona dentro de su estructura cristalina; se expresa en libras por pulgada cuadrada o en kg/cm^2 de área de la sección recta de corte.

5. ¿Cuál es la prueba más contundente utilizada para medir la resistencia de un material, su elasticidad y su ductilidad?

RESPUESTA: La prueba de tracción es el test mecánico más comúnmente utilizado para determinar estas propiedades de un material.

6. ¿Qué es elongación referida a una prueba de material?

RESPUESTA: Elongación es la medida de la deformación de un material bajo carga y se expresa como un incremento de longitud por unidad de longitud original de la pieza.

7. ¿Cuál es la denominación constante de proporcionalidad que existe entre la tensión y la deformación elástica?

RESPUESTA: Esta constante para una clase determinada de material se llama módulo de elasticidad E .

8. ¿Cómo definiría la máxima tensión elástica?

RESPUESTA: La máxima tensión elástica es la tensión que un material experimenta en una maquina de pruebas bajo la máxima carga soportada en la prueba. La máxima tensión se obtiene dividiendo esta carga máxima por el área original o sección recta del material o espécimen de prueba.

9. ¿Qué es la sensibilidad de impacto?

RESPUESTA: La sensibilidad de impacto o resistencia de impacto de un metal es su resistencia al inicio y propagación de una grieta en la base de una entalla normalizada. La sensibilidad al impacto se mide por la cantidad de energía absorbida en pies-libras o $\text{kg} \cdot \text{m}$ por un espécimen que se rompe bajo el impacto de un golpe de martillo que se produce por un péndulo de contrapeso normalizado. Los materiales frágiles absorberán poca energía en la rotura.

10. ¿Qué se entiende por fatiga?

RESPUESTA: Fatiga es la tendencia de un material a romper bajo condiciones de tensiones repetidas de tipo cíclico que son considerablemente menores que el límite elástico del material.

11. ¿Cómo se define la ductilidad?

RESPUESTA: La ductilidad de un metal es la cantidad de deformación permanente o elongación que puede soportar antes de que la rotura tenga lugar. Se usan dos métodos para definir o medir la ductilidad: el porcentaje de elongación y la reducción de sección de un espécimen probado bajo tensión. Las soldaduras se prueban para constatar su ductilidad mediante una prueba de doblado a flexión. Esta prueba consiste en el doblado o flexado de una muestra hasta una cantidad específica de flexión sobre un soporte normalizado de radio definido. El incremento de distancia entre dos marcas o señales hechas en el lado tensado del espécimen se anota, y el cambio o ganancia se expresa como porcentaje de elongación.

12. ¿Qué son materiales frágiles?

RESPUESTA: Éstos son materiales que pueden deformarse muy poco sin que tenga lugar la rotura. Ésta se caracteriza normalmente por un repentino y quebradizo tipo de rotura. La fundición, el hormigón, el ladrillo genérico y el vidrio son ejemplos de materiales frágiles.

13. ¿Qué son materiales resilientes?

RESPUESTA: Éstos son materiales que pueden absorber grandes cantidades de energía sin experimentar deformación permanente. Para expresarlo de otro modo, vuelven a su forma original después de reducirse la carga. Los materiales con bajo módulo de elasticidad y alto límite elástico producirían elevada resiliencia.

14. Defina los materiales tenaces.

RESPUESTA: Los materiales tenaces pueden absorber grandes cantidades de energía sin romper. Esta cualidad se relaciona con los materiales de alta resistencia y alta ductilidad o flexibilidad. La tenacidad es una medida útil de la capacidad de un material para absorber cargas de choque o golpes repentinos sin ruptura.

15. Cite algunas impurezas ambientales que puedan entrar a una caldera de vapor o al sistema de agua y que pueden producir grietas o tensiones de corrosión en un acero de elevada resistencia de una turbina.

RESPUESTA: Las siguientes materias han sido identificadas como posibles causas de grietas de corrosión por tensión en álabes de turbina:

1. Utilización del tratamiento con fosfato descoordinado con un control impropio o inadecuado, que puede producir causticidad libre, que a su vez puede atacar el metal.
2. Sodio introducido en el agua de caldera a partir de una pérdida de tubos del condensador.
3. Agua tratada inadecuadamente y utilizada en los atemperadores para control del realimentador o sobrecalentador.

16. ¿Qué produce tensiones térmicas?

RESPUESTA: Las tensiones térmicas se producen cuando un material no está libre para dilatarse o contraerse por efecto de los cambios de temperatura a los que el material en servicio puede estar sometido. La tensión resultante que se desarrolla puede hallarse mediante la ecuación:

$$S = E \cdot a \cdot (t_2 - t_1)$$

donde, E = módulo de elasticidad del material.

a = coeficiente de dilatación del material.

t_1 y t_2 = temperaturas inicial y final, respectivamente.

17. ¿Cuál puede ser el efecto de la deformación bajo tensión en una estructura metálica?

RESPUESTA: La deformación por efecto de las tensiones produce unos planos por deslizamiento o movimiento lento en la estructura cristalina de un material que también son función del tiempo. Este movimiento lento o resbalamiento puede producir suficiente deformación como para originar una rotura repentina incluso cuando la tensión aplicada es mucho menor que la que normalmente podría originar una rotura bajo condiciones normales de carga.

18. ¿Qué relación define el término *factor de concentración*?

RESPUESTA: El factor de concentración de tensiones es la relación de la tensión real existente sobre un plano de una pieza bajo carga a la tensión de cálculo necesaria para resistir esa carga sin tener en cuenta la discontinuidad que producen las tensiones normales al ser magnificadas (aumentadas) por el factor de concentración de tensiones.

19. ¿Cómo se define la relación de Poisson?

RESPUESTA: Por debajo del límite elástico, un material sometido a carga se alargará longitudinalmente por la tensión y disminuirá su sección diametral (sección recta). La relación de la tensión unitaria normal a la sección recta normal a la tensión unitaria en la

dirección del esfuerzo longitudinal se denomina *relación de Poisson*, y se expresa como sigue:

$$\text{Módulo de Poisson} = \text{relación de Poisson} = u = \frac{e_t}{e_s}$$

donde: e_t = tensión unitaria en dirección normal al esfuerzo.
 e_s = tensión unitaria en la dirección del esfuerzo.

20. ¿Una barra cilíndrica de 1/2" (12,7 mm) de diámetro estira 0,00195" (0,04953 mm) en una longitud de 2" (50,8 mm) y disminuye 0,000162" ($4,1148 \times 10^{-3}$ mm) de diámetro cuando se la somete a una tensión (tracción) de 2.000 Lbs (908 kg). ¿Cuál es la relación o módulo de Poisson?

RESPUESTA:

$$e_s = \frac{0,04953}{50,8} = 0,000975$$

$$e_t = \frac{0,0041148}{12,7} = 0,000324$$

$$\text{Relación de Poisson} = \frac{e_t}{e_s} = \frac{0,000324}{0,000975} = 0,332$$

21. Calcular la tensión unitaria del espécimen de la pregunta anterior.

RESPUESTA:

$$s = \frac{P}{a} = \frac{908 \text{ kg}}{\pi \cdot (1,27^2/4) \text{ cm}^2} = \frac{908}{1,266 \text{ kg/cm}^2} = 716,8 \text{ kg/cm}^2$$

22. Un espécimen tiene un módulo de elasticidad de 6,5 millones (455.000 kg/cm^2). ¿Cuál es la máxima carga axial que puede aplicarse a una barra de 1/2" (12,7 mm) de diámetro sin deformarla (sin estirarla) 1/16" (1,5875 mm) en una longitud de 6 ft (1,8288 m).

RESPUESTA: Utilizando:

$$E = \frac{F/a}{e/l} \quad F/a = \frac{E \cdot e}{l} \quad F = \frac{E \cdot e \cdot a}{l}$$

y resolviendo para F :

donde: F = carga

$$a = \text{área de la barra} = \pi \varnothing^2/4 = \pi 12,7^2/4 = 126,677 \text{ mm}^2 = 1,266 \text{ cm}^2$$

$$e = 1/16" = 25,4/16 \text{ mm} = 1,5875 \text{ mm} = 0,1587 \text{ cm}$$

$$l = 1,8288 \text{ m} = 1.828,8 \text{ cm}$$

$$F = (455.000 \text{ kg/cm}^2 \cdot 0,1587 \text{ cm} \cdot 1,266 \text{ cm}^2)/1.828,8 \text{ cm} = 500,03 \text{ kg}$$

$$F = (6.500.000 \text{ lbs/in}^2 \cdot 1/16 \text{ in} (\pi \cdot 0,5^2/4) \text{ in}^2)/(6 \cdot 12) \text{ in} = 1.107,31 \text{ lbs}$$

23. ¿Cuánto cambia el diámetro de una barra cilíndrica de 2" (50,8 mm) de diámetro si se le impone una carga axial de 6.000 lbs (27.240 kg) y la relación o módulo de Poisson es de 0,30?

RESPUESTA:

$$S = \text{Tensión axial} = 27.240 \text{ kg} \frac{\pi \cdot 5,08^2}{4 \text{ cm}^2} = \frac{27.240}{20,268 \text{ kg/cm}^2} = 1.343,97 \text{ kg/cm}^2$$

Utilizando $E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$ para el acero:

$$E = \frac{S}{\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \text{elongación axial} = \frac{S}{E} = \frac{1.343,97 \text{ kg/cm}^2}{2.100.000 \text{ kg/cm}^2} = 6,39985 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Módulo de Poisson} = u = \frac{e_t}{e_s}; \quad e_t = u \cdot e_s = 0,3 \cdot 6,39985 \cdot 10^{-4} = 1,919955 \cdot 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} \text{Cambio o disminución en } 2'' \text{ de diámetro} &= 50,8 \text{ mm} \cdot u = \\ &= 50,8 \text{ mm} \cdot 1,919955 \cdot 10^{-4} = 0,00975 \text{ mm} \end{aligned}$$

24. ¿Cómo se determina el límite de tenacidad de un material?

RESPUESTA: El límite de tenacidad de un material se determina en varios especímenes de prueba a cargas repetidas, que producen tensiones completas (con vuelta al estado original) de valores conocidos y registrados; es el número de tensiones con vuelta al estado original que cada espécimen resiste antes de romperse. Cada espécimen se somete a una tensión menor que la precedente y también rompe al cabo de un gran número de ciclos de tensión. Finalmente, se busca una tensión que no produce rotura sin tener en cuenta el número de ciclos aplicados. Esta tensión se denomina límite de tenacidad del material sometido a prueba.

25. ¿Qué carga, además de la tensión interna, hay que evaluar según el código ASME de calderas de alta presión?

RESPUESTA: Las cargas que deben considerarse incluyen el efecto del peso del agua y tensiones impuestas o aplicadas a una caldera durante la prueba hidrostática, así como cualquier carga adicional que incrementará la tensión media por encima de la presión de trabajo y tensiones inducidas en más del 10 por 100 de la tensión de trabajo admisible. Estas cargas pueden incluir viento, nieve y cargas sísmicas como se especifica en las normativas nucleares. También incluyen la reacción de los pilares soporte, anillos, apoyos y tipos similares de soporte.

26. ¿Quién debe preparar los informes de tensiones para las vasijas y recipientes a presión nucleares?

RESPUESTA: El fabricante del recipiente a presión es responsable de la preparación del informe de tensiones y debe ser revisado por el propietario de la planta y, en la mayoría de los casos, por una agencia de inspección.

27. ¿Qué grandes líneas directrices hay que estipular para hacer un informe de tensiones?

RESPUESTA: El informe de tensiones debe prepararse y firmarse por ingenieros profesionales expertos en diseño de recipientes a presión. Generalmente tiene tres secciones: análisis térmico, análisis estructural y evaluación de fatiga. Es de interés el hecho de que

deben contemplarse en el informe aquellas zonas de condiciones de las más severas tensiones en algún régimen transitorio, incluyendo los valores de las tensiones.

28. ¿Cuál es el objeto de la prueba de tensiones en la sección reducida, de la prueba de doblado o flexión libre, de la prueba de flexión de la soldadura raíz y de la prueba de flexión frontal y flexión lateral?

RESPUESTA: Estas pruebas se requieren para cualificar procedimientos de soldadura y de soldadores según los registros del código ASME:

- a) Una prueba de sección reducida es un procedimiento de cualificación. Cuando la sección rompe en tensión tendrá una resistencia de tracción al menos del mínimo del rango de la chapa que se va a soldar o ha sido soldada, y su elongación o alargamiento será del 20 por 100 mínimo en 2" (50,8 mm).
- b) Una prueba de flexión o doblado libre es un procedimiento de cualificación. Consiste en la flexión o doblado de un espécimen en frío; las fibras exteriores de la soldadura tendrán una elongación al menos del 20 por 100 antes de que ocurra la rotura.
- c) Una prueba de flexión de soldadura raíz se hace para la cualificación de los soldadores. Consiste en el doblado de un espécimen contra o por la parte interior de la soldadura.
- d) Una prueba de cara o de flexión frontal se efectúa para cualificación de soldadores. Consiste en la flexión del espécimen contra o por la superficie de la soldadura.
- e) Una prueba de flexión lateral se hace para cualificar soldadores. Consiste en el doblado flector del espécimen contra o por la parte lateral de la soldadura.

29. ¿Cómo se define la corrosión por fatiga?

RESPUESTA: Ésta es una rotura producida por la acción combinada de tensiones repetitivas sobre un material y en un ambiente corrosivo pero a menores niveles de tensiones o menor número de ciclos de los que se requerirían para producir una rotura por fatiga sin la presencia de un ambiente corrosivo.

30. ¿Cite tres pruebas de dureza aplicada a metales que se han soldado?

RESPUESTA: Brinell, Rockwell y Vickers.

31. ¿Qué tipo de fractura se analiza normalmente mediante la prueba de impacto sobre espécimen con muesca?

RESPUESTA: Las pruebas de impacto se usan para analizar las posibilidades de fallo de los aceros ferríticos por rotura frágil.

32. Enumere las pruebas destructivas normalmente llevadas a cabo sobre aceros ferríticos para investigar la temperatura de transición de nula ductilidad para determinar las propiedades de ductilidad de los aceros ferríticos a baja temperatura.

RESPUESTA: La prueba del golpe de contrapeso se usa para determinar la resistencia a la rotura del acero de 3/4" (19 mm) de espesor y superiores a diferentes temperaturas con el acero al que se le ha practicado una muesca donde se pueda iniciar la fractura.

33. ¿Qué es una prueba de Charpy con muesca en V?

RESPUESTA: Esta prueba sirve para determinar la resistencia de un material a las cargas de impacto por choque o fallo por rotura frágil, iniciada por una muestra en V que tiene

el espécimen. La prueba determina la energía requerida para romper un espécimen normalizado con muestra en V central que está soportado en sus dos extremos y que así se compara con la normativa establecida. El código ASME de calderas exige esta prueba para muchos materiales de construcción de calderas como se especifica en la Sección II.

34. ¿Cómo se define una rotura por tensión-corrosión?

RESPUESTA: La rotura se produce bajo carga y tensión mantenida con una acción acompañante corrosiva que produce una rotura muy por debajo de la tensión normal del material.