VII.- MATERIALES UTILIZADOS EN LOS GENERADORES DE VAPOR

pfernandezdiez.es

Metalurgia	*259*
Estructuras cristalinas	*260*
Defectos en cristales	*261*
Defectos puntuales	*261*
Contorno de los granos; defectos volumétricos	*262*
Metalurgia física del acero	*262*
Fases	*262*
Diagrama Fe-C	*263*
Temperaturas de transformaciones críticas	*265*
Diagrama de transformaciones isotérmicas	*267*
Efecto de los elementos aleados en el diagrama Fe-Fe3C	*269*
Carbono, manganeso, molibdeno, cromo, níquel, cobalto, etc	*270*
Agentes desgasificadores, P, S	*275*
Tratamientos térmicos	*276*
Recocidos de regeneración, solubilización, estabilización, etc	*277*
Normalizado, temple, revenido y tratamientos térmicos posteriores a la elaboración	*277*
Procesos de fabricación	*278*
Operaciones de trabajo en frío	*279*
Soldadura	*280*
Metales de aportación	*281*
Factores que afectan a la calidad de la soldadura, contenido en ferrita, grafitización, tratamientos térmicos, etc	*281*
Materiales utilizados en la fabricación de calderas	*283*
Aceros calmados, semicalmados, efervescentes y microaleados	*284*
Acero (C + 0,5 Mo), Acero (C + Mo), Acero (0,5 C + 0,5 Mo), Acero (2,25 Cr +1 Mo), etc	*285*
Aleaciones altas de (Cr-Mo)	*286*
Aceros inoxidables austeníticos	*286*
Materiales bimetálicos	*286*
Fundiciones, blanca, gris, dúctil y aceros colados	*288*
Materiales cerámicos y refractarios	*290*
Envolturas y protecciones, cromado, aluminización, envolturas refundidas, galvanización	*290*
Propiedades mecánicas a baja temperatura; ensayos de tracción, dureza, tenacidad, conformación	*292*
Propiedades mecánicas a alta temperatura	*297*
Resistencia a la tracción	*297*
Ensayo de termofluencia y rotura por fluencia	*298*
Materiales para calderas.- Especificaciones ASME y tensiones admisibles	*300*
Tabla de materiales de calderas y aplicaciones típicas (unidades inglesas)	*301*
Caldera, paredes hogar, zonas de convección y economizadores, sobrecalentadores y recalentadores	*302*
Factores de selección; espesor mínimo de la pared tubular	*303*
Espesor mínimo de la pared tubular, materiales para colectores, tuberías y calderines, Aceros termoresistentes	*303*
Equipos medioambientales: Desulfuración de humos, Entrada en la torre de absorción, zona humidificada por rociado	*307*
Zona de salida y separador de humedad en la torre de absorción	*308*
Referencias	*310*

VII.1.- METALURGIA

ESTRUCTURAS CRISTALINAS.- En los sólidos, los átomos de los metales se encuentran colocados según disposiciones ordenadas llamadas redes. Un ejemplo de red puntual simple se muestra en la Fig VII.1a, en la que se presenta una celdilla unitaria; las longitudes de los ejes se definen por a, b y c y los ángulos entre ejes por α, β y γ, Fig VII.1b.

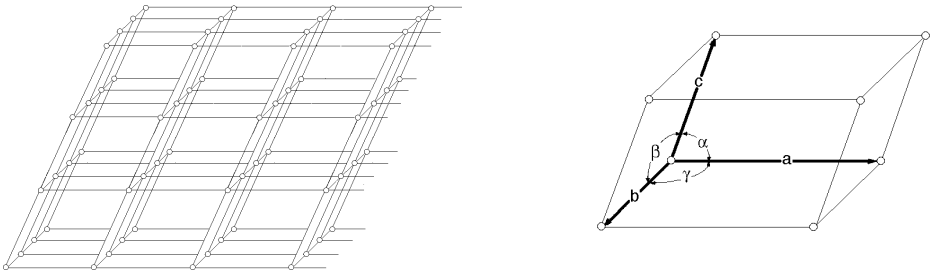


Fig VII.1.- Red puntual simple y celda unitaria

Los aceros utilizados en calderas y en recipientes a presión pertenecen a dos tipos de redes:

- *Red cúbica centrada en el centro*
- *Red cúbica centrada en las caras*

En aquellos puntos del cristal en donde existen modificaciones o interrupciones de la estructura, se producen defectos.

Algunas estructuras se componen de un cristal simple, en el que todas las celdillas unitarias tienen la misma disposición relativa y contienen pocos defectos; por ejemplo, los álabes de las turbinas de gas para altas prestaciones se fabrican con monocristales que, aun siendo muy difíciles de fabricar, resultan muy interesantes porque su resistencia está determinada mediante interacciones cerradas por los enlaces atómicos en su disposición óptima.

El comportamiento de las estructuras metálicas queda determinado por la naturaleza de los defectos presentes en las mismas. Las estructuras están constituidas por conjuntos imperfectos de cristales defectuosos siendo su resistencia menor que la correspondiente a los cristales simples perfectos.

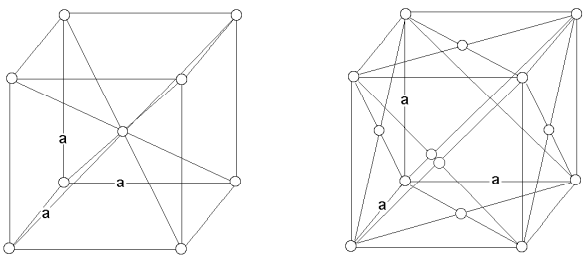


Fig VII.2.- Redes cristalinas: a) Cúbica centrada en el cuerpo; b) Cúbica centrada en las caras

DEFECTOS EN CRISTALES.- Un cristal perfecto no existe en la Naturaleza; las imperfecciones de los cristales y sus correspondientes interacciones determinan las propiedades de los materiales.

Defectos puntuales.- Los defectos puntuales comprenden:

- La carencia de átomos o lagunas reticulares

- Átomos de otro elemento (sustitucionales) en puntos de la red cristalina

- Átomos de otro elemento (intersticiales) entre puntos de la red

Siempre existen lagunas reticulares, creadas térmicamente, que reducen la energía libre de la estructura metálica, disminuyendo su entropía. No obstante, para las lagunas reticulares de origen térmico que pueden existir en un cristal, hay un equilibrio que varía con la temperatura del mismo. La presencia de lagunas reticulares permite la *difusión* o transporte de una determinada especie de átomos a través de la red cristalina de otra especie.

Las lagunas reticulares facilitan determinadas formas de deformación a lo largo del tiempo, como la *fluencia*, que es la deformación lenta que experimenta un metal cuando está sometido continuamente a solicitaciones. Las lagunas reticulares se pueden provocar por irradiación y por deformación plástica.

Cuando los átomos de dos metales se mezclan en estado líquido y luego se enfrían para lograr la solidificación, los átomos de uno de los metales pueden tomar posiciones en la estructura cristalina del otro, configurando entonces una aleación. Como consecuencia del distinto tamaño de los átomos y de la distinta solidez de unión entre átomos diferentes, las propiedades de las aleaciones pueden diferir mucho de las correspondientes al metal puro.

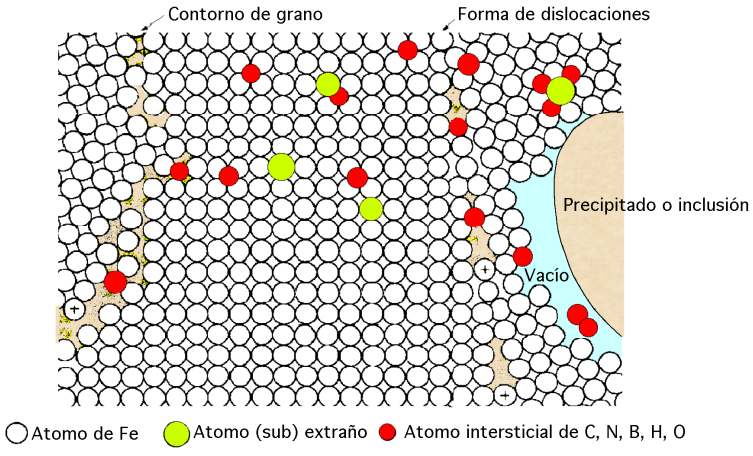


Fig VII.3.- Defectos importantes, imperfecciones comunes y defectos complejos en metales

Los átomos de C, O_2, Ni y Bo que son mucho menores que los átomos metálicos y tienen estructuras muy distintas, se pueden acomodar en los intersticios que hay entre los átomos metálicos.

La difusión de un elemento intersticial en una red cristalina metálica, depende también de la

temperatura, aunque fundamentalmente es función de la vibración reticular, que resulta ser mucho más importante (en amplitud y frecuencia) para temperaturas que superan un umbral determinado.

En la Fig VII.3 se muestran algunos defectos de cristales; esta representación es un esquema bidimensional de una red cristalina del Fe, que contiene:

- *Lagunas reticulares*
- *Átomos ajenos sustitucionales*
- *Átomos intersticiales*
- *Contorno de granos*
- *Huecos, inclusiones, precipitados*

Las dislocaciones son defectos lineales configurados por un proceso de deformación (deslizamiento o resbalamiento) entre dos placas estructurales cristalinas adyacentes.

CONTORNO DE LOS GRANOS.- Los bordes de los granos son interfaces complejas entre cristales, con orientaciones significativamente diferentes dentro de un metal.

Como las uniones atómicas en los contornos de los granos y en otros defectos cristalográficos planos, son diferentes de las que existen en el cuerpo de un cristal perfecto, se comportan de forma muy distinta frente

- *al calor*
- *a los reactivos químicos*

Estas diferencias se ponen de manifiesto en el borde de los granos y en otras características estructurales de las superficies metálicas pulidas, cuando se examinan al microscopio.

Los contornos de granos pueden tener efectos positivos o negativos, como:

- A bajas temperaturas un acero de tamaño de grano pequeño puede ser más resistente que el mismo acero con tamaño de grano grueso, porque el contorno de los granos actúa como barrera contra el deslizamiento

- A altas temperaturas, en las que se pueden presentar deformaciones activadas térmicamente, un material con estructura de grano fino puede ser más quebradizo, debido a la estructura irregular en el contorno del grano, que provoca la termofluencia local, lo que permite que los granos roten por deslizamiento sobre los contornos

Defectos volumétricos.- Están constituidos por vacíos configurados por la unión de lagunas reticulares o por la separación de contornos granulares, siendo los más corrientes las inclusiones de óxidos, sulfuros y otros compuestos, o de otras fases que precipitan durante la solidificación de los sistemas complejos.

VII.2.- METALURGIA FÍSICA DEL ACERO

Fases.- Una fase es un conjunto homogéneo de materia, que existe en una forma física bien definida; en metalurgia, para representar las fases en coordenadas temperatura-composición, se utiliza el diagrama de fases. Para un metal puro, un diagrama de fases es una línea, puesto que su

composición no varía.

Cuando participa más de un elemento, se pueden presentar una gran variedad de fases; una de estas la constituye un sistema binario, como: $\begin{cases} Cobre + Niquel\ (Cu + Ni) \\ Oro + Plata\ (Au + Ag) \\ Oro + Platino\ (Au + Pt) \\ Antimonio + Bismuto\ (Sb + Bi) \end{cases}$

El diagrama de fases de uno cualquiera de estos sistemas simples muestra dos características comunes a todas las soluciones sólidas:

- El valor de la composición puede variar lo mismo en las soluciones líquidas que en las sólidas

- En estos sistemas, el cambio de fase (de líquido a sólido) tiene lugar dentro de un determinado intervalo de temperaturas, a excepción del agua y de los metales puros, que se congelan y cambian la estructura a una temperatura determinada

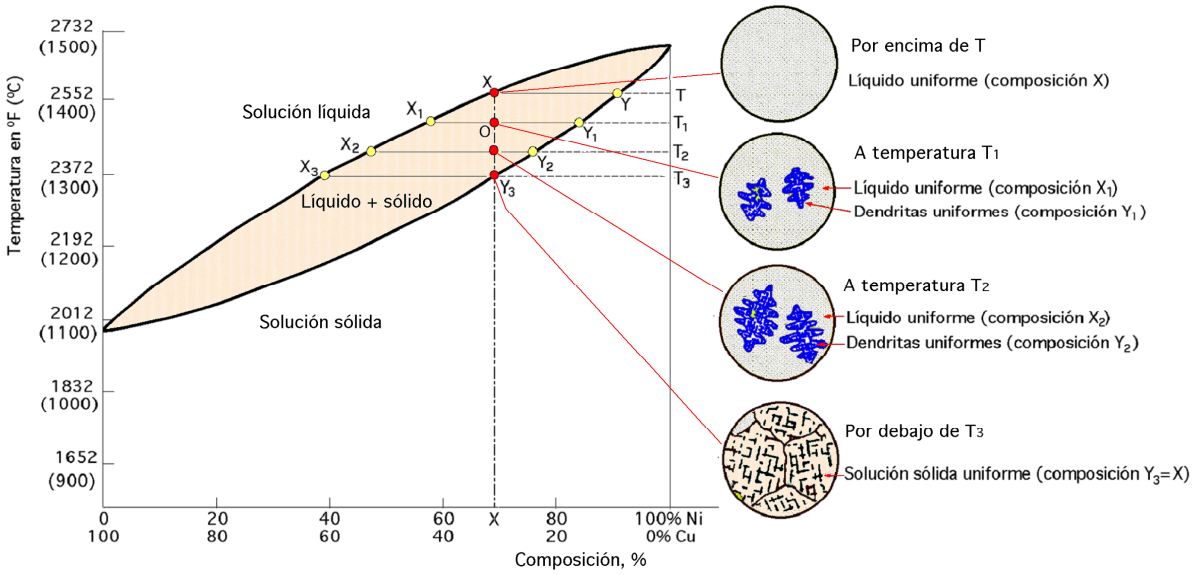


Fig VII.4.- Diagrama de equilibrio Cu-Ni

La Fig VII.4 es parte del diagrama correspondiente al sistema (Cu + Ni) que indica los elementos que precipitan desde la solución, cuando el líquido se enfría con una velocidad relativamente lenta. Son muy raras las aleaciones, en las que ambas especies son infinitamente solubles; lo más frecuente es que los elementos sean sólo parcialmente solubles y que en el enfriamiento precipiten mezclas de fases. También es normal que los elementos reaccionen entre sí, formando un compuesto químico intermetálico, que puede tener rango de composición, aunque ésto sea más propio de las soluciones sólidas. Dos sistemas que forman compuestos intermetálicos son el (Fe + Cr) y el (Fe + C).

Diagrama Fe-C.- El acero es una aleación de base férrica que suele contener Mn, C y otros elementos de aleación. Prácticamente, todos los metales usados en calderas y recipientes a presión son aceros; para los aceros al C, el Mn suele estar presente en cantidades próximas al 1% y es un elemento sustitucional de disolución sólida.

El Mn tiene poco efecto sobre la red cristalina del Fe debido a que su tamaño atómico y su estructura electrónica son similares a los del Fe, siempre que se trate de una concentración baja.

Variando el contenido en C, se obtienen amplias gamas de propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos; el diagrama Fe-C indica que la máxima solubilidad del C en el Fe-α es del 0,025%, mientras que la solubilidad en el Fe-γ es ligeramente superior al 2%; las aleaciones Fe-C, que contienen hasta un 2% C, son maleables (aceros). Las fundiciones contienen más del 2% C y son de peor calidad que los aceros en lo que respecta a maleabilidad, resistencia, tenacidad y ductilidad.

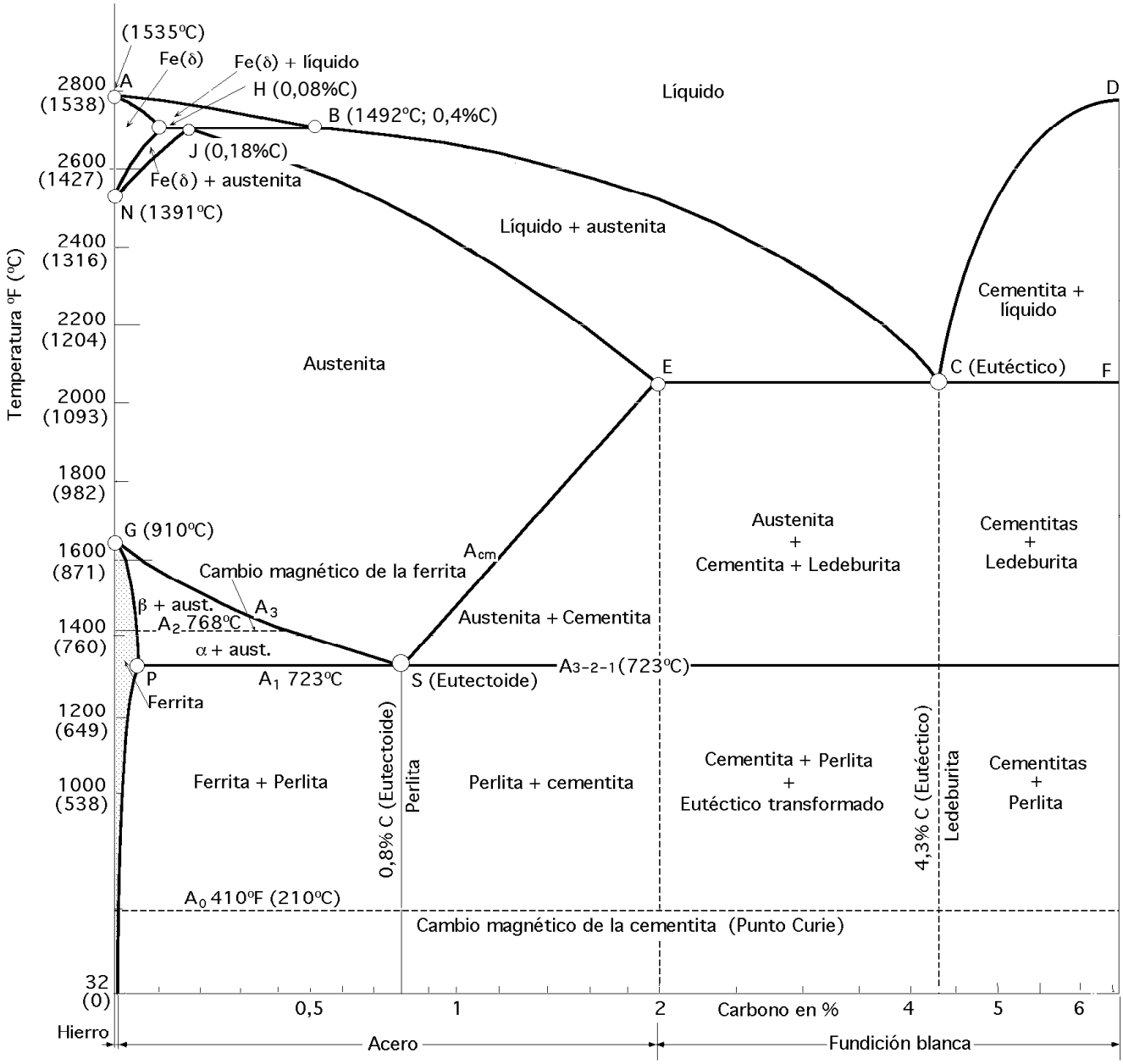


Fig VII.5.- Diagrama Fe-C

Los átomos de C son considerablemente menores que los de Fe; en el caso del Fe-α se disponen en el punto medio de las aristas del cubo y en los centros de las caras, (ferrita)

En el Fe-γ, los átomos de C se disponen en los puntos medios de las aristas del cubo y en el centro del mismo, (austenita).

En la ferrita hay muchos más intersticios que en la austenita; en ambas estructuras, los espacios intersticiales son mucho menores que los del átomo de C lo que conduce a una distorsión total de la red cristalina y da lugar a una limitada solubilidad del C en el Fe. Los intersticios de la austenita son mayores que los de la ferrita, lo que explica la mayor solubilidad del C en la austenita.

Si la austenita tiene más del 0,125%C, y se enfría lentamente, se transforma en ferrita; el C en exceso sobre el 0,125% precipita de la solución sólida; esta precipitación no tiene lugar en forma de C puro (grafito), sino que forma un compuesto intermetálico, Fe_3C, carburo de Fe o cementita que, al igual que la mayoría de los carburos metálicos, es una sustancia dura.

La cementita no es una fase completamente estable, siendo el grafito mucho más estable; la dureza del acero aumenta con el contenido en C, incluso sin tratamiento térmico alguno.

Temperaturas de transformaciones críticas.- El punto de fusión de una aleación de Fe se reduce mediante la adición de C, hasta un contenido de 4,3%C; a mayores temperaturas que la de fusión, coexisten las fases líquida y sólida. Cuando el contenido en C alcanza un 0,1%, el valor del Fe-d se restringe y, finalmente, se elimina como una fase simple, permaneciendo algo de Fe-d hasta, aproximadamente, el 0,5% C, pero está combinado con otras fases.

Por debajo de la región del Fe-d, la austenita absorbe C hasta las composiciones que corresponden a la línea S-E, Fig VII.5, que limita la solubilidad de la disolución sólida.

La temperatura a la que existe sólo austenita decrece conforme aumenta el contenido en C, línea G-S, hasta el punto eutéctico correspondiente a 0,80% C y 1333ºF (723ºC).

La temperatura aumenta a lo largo de la línea S-E, con el contenido creciente de C, porque la austenita es inestable para absorber C adicional, excepto a temperaturas más altas.

Una reacción eutectoide es aquella transformación en la que una fase sólida simple se descompone en dos nuevas fases mediante enfriamiento o se produce la reacción inversa en caso de calentamiento. Para la composición eutectoide del 0,8% C, sólo existe austenita por encima de los 1333ºF (723ºC) y únicamente hay ferrita y cementita por debajo de dicha temperatura; ésta es la temperatura crítica inferior A_1.

Para contenidos en C menores, en la región hipoeutectoide, conforme se enfría la austenita y se alcanza A_1 (temperatura crítica superior) precipita primero la ferrita.

Cuanto más baja la temperatura por debajo de 1333ºF (723ºC) en A_1, la austenita residual se transforma en ferrita y cementita.

En la región hipereutectoide, por encima del 0,8% C, cuando la cementita se enfría hasta la línea crítica A_{cm} precipita primero la ferrita; cuando se enfría hasta 1333ºF (723ºC) la austenita residual se transforma en ferrita y cementita.

El punto A_2 es el punto Curie, que se corresponde con la temperatura a la que el Fe pierde su ferromagnetismo espontáneo. En un proceso de enfriamiento, a la temperatura A_1 toda la austenita residual se transforma en ferrita y cementita; la estructura laminar resultante es una alternancia de capas delgadas de ferrita y cementita, típica de las reacciones de descomposición eutectoide; en los aceros esta estructura es la perlita, que siempre tiene la composición eutectoide correspondiente al 0,8% C.

Cuando la perlita se mantiene a una temperatura moderadamente alta, por ejemplo 950ºF (510ºC), durante un largo período de tiempo, la cementita se descompone en ferrita y grafito:

- En primer lugar, las laminillas de Fe_3C se aglomeran en esferas y la estructura resultante se identifica como esferoidal (globular)

- Posteriormente, los átomos de Fe se repelen de las esferas, dando lugar a una estructura grafitizada.

VII.3.- DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIONES ISOTERMICAS

Cuando la austenita se enfría rápidamente, o cuando la $\begin{cases} \text{- perlita y ferrita} \\ \text{- perlita y cementita} \end{cases}$ se calientan rápidamente, las líneas correspondientes a las transformaciones que se representan en el diagrama de equilibrio de la Fig VII.5, están sujetas a desplazamientos, lo que lleva a designar con más precisión los puntos A_1 y A_3 : $\begin{cases} A_{C1} \text{ y } A_{C3} \text{ en caso de calentamiento} \\ A_{R1} \text{ y } A_{R3} \text{ en caso de enfriamiento} \end{cases}$

Los procesos de fabricación implican diversos intervalos de tiempo, que van desde algunos segundos, hasta varios días (tratamientos térmicos de grandes recipientes), por lo que es evidente que el factor tiempo es relevante en cualquier caso.

Los experimentos sobre transformaciones isotermas se utilizan para determinar los tiempos de transformación de las fases, a una temperatura particular considerada; los datos se representan en los diagramas TTT (Temperatura, Tiempo, Transformación), o curvas de las S.

El diagrama TTT de la transformación isotérmica que se representa en la Fig VII.6, relativo a un acero hipoeutectoide, muestra el tiempo para la transformación de la austenita en otros componentes, para varias temperaturas:

- El acero se calienta hasta unos 1600°F (871°C) estando la totalidad del mismo en estado austenítico

- A continuación se introduce rápidamente en un horno o en un baño de sales fundidas a 700°F (371°C), y se mantiene a esta temperatura

- La Fig VII.5 indica que la ferrita y los carburos existen a esta temperatura y la Fig VII.6 indica el tiempo de duración de la reacción correspondiente

- Si los intervalos de tiempo relativos a la duración de la transformación se proyectan tal como se indica en la Fig VII.6, en la parte superior de dicho diagrama se puede predecir que el 100% de la austenita existe durante unos 4 segundos hasta que comience la transformación

- Al cabo de unos 100 segundos se completa el 50% de la transformación y, finalmente, en 700 segundos la totalidad de la austenita se ha sustituido por un aglomerado de ferrita y cementita.

- Para temperaturas inferiores a los 600°F (316°C), la austenita se transforma en martensita, que es el componente más duro de los aceros sometidos a un tratamiento térmico. La temperatura a la que comienza la formación de la martensita se identifica con la notación M_S que decrece con el aumento de la temperatura de formación de la austenita, debido a que M_S es muy sensible al contenido en C de la austenita; una alta temperatura de austenización produce una solución más compleja de carburos.

La nariz de la curva que se encuentra en el lado izquierdo, Fig VII.6, está en este caso a unos 900ºF (482ºC), y es importante porque la transformación a esa temperatura es muy rápida; si este acero se enfría para formar martensita, debe pasar por esos 900ºF (482ºC) con toda rapidez, para impedir que la línea que determina el enfriamiento corte a la nariz de la curva, o lo que es lo mismo, para impedir que parte de la austenita se transforme en perlita, que es más blanda.

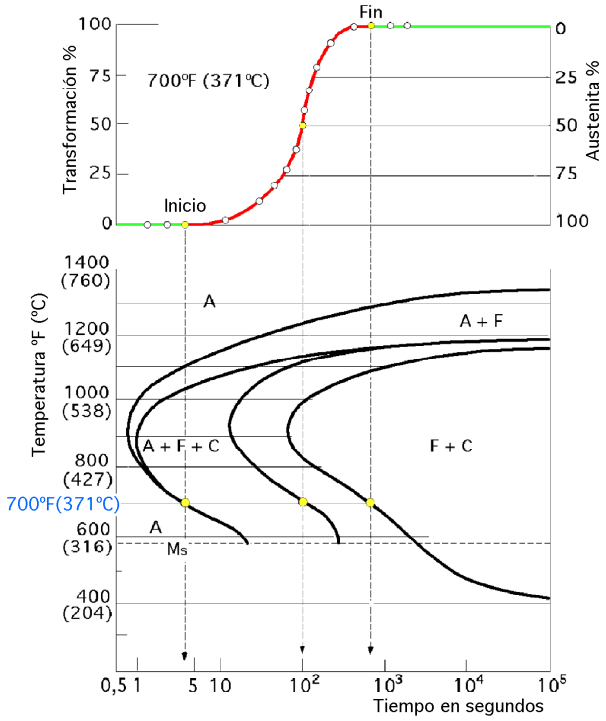


Fig VII.6.- Diagrama de transformación isoterma. Tiempo requerido en un acero, p.e. a 700°F (371°C)

La martensita es una estructura metastable superenfriada, que tiene la misma composición que la austenita, a partir de la cual se forma. Es una solución de C en Fe, que tiene una estructura cristalográfica tetragonal con red centrada en el cuerpo.

La dureza de la martensita se debe $\begin{cases} \text{- } al\ alto\ contenido\ en\ C\ sobresaturado \\ \text{- } a\ la\ distorsión\ de\ la\ red\ provocada\ por\ el\ C_{exceso}\ capturado \\ \text{- } al\ cambio\ volumétrico\ de\ la\ transformacion \end{cases}$

El volumen específico de la martensita es mayor que el de la austenita.

La formación de la martensita: $\begin{cases} \text{- } no\ se\ produce\ mediante\ nucleación\ y\ posterior\ crecimiento \\ \text{- } no\ se\ puede\ suprimir\ mediante\ el\ templado \\ \text{- } es\ un\ compuesto\ atérmico \end{cases}$

La austenita empieza a formar martensita a la temperatura M_S y conforme disminuye la temperatura aumenta la cantidad de martensita en la estructura.

Cuando se alcanza la temperatura M_F se completa la formación de la martensita. A cualquier temperatura intermedia entre las dos citadas, la cantidad de martensita a esa temperatura se forma instantáneamente y se mantiene a esa temperatura sin que se produzcan transformaciones posteriores.

Las temperaturas M_S y M_F se representan como líneas rectas en el diagrama TTT, Fig VII.7; al microscopio, la martensita tiene el aspecto de agujas lenticulares.

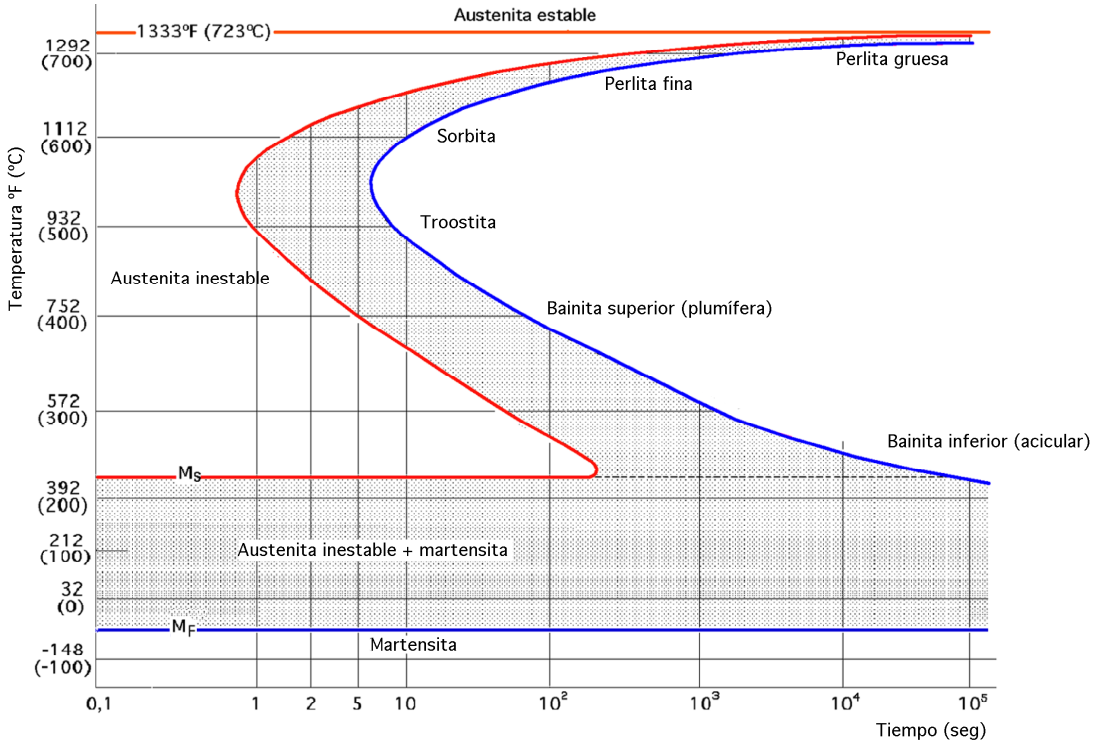


Fig VII.7.- Curvas TTT. Transformación para un acero ordinario con 0,8% C

La bainita se produce cuando tiene lugar la transformación del eutéctico a menor temperatura, aunque por encima de la M_8.

VII.4.- EFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEADOS EN EL DIAGRAMA Fe-Fe_3C

La adición de uno o más elementos a la aleación Fe-C, puede tener efectos significativos sobre el tamaño relativo que adquieren los distintos campos de fases en el diagrama Fe-cementita.

El Ni, Mn, Cu y Co son formadores de austenita, porque su adición a la aleación Fe-C incrementa la temperatura a la que se transforma la martensita en ferrita-d y rebaja mucho el A_3, Fig VII.5. Añadiendo suficiente cantidad de estos elementos, se incrementa el campo de la austenita y la estructura cristalina centrada en las caras del cubo se hace estable a la temperatura ambiente.

La mayoría de los elementos citados no forman carburos por lo que el C permanece disuelto en la austenita; de ésto se derivan muchas propiedades útiles de los materiales como $\begin{cases} alta\ estabilidad \\ resistencia \\ ductilidad \end{cases}$, incluso a elevadas temperaturas.

El Cr, Mo, W, Va, Al y Si, tienen un efecto opuesto al precedente y *son formadores de ferrita*. Estos elementos elevan la temperatura A_3 y algunos forman carburos estables, estabilizando la ferrita con red cristalina centrada en el cubo, incluso a altas temperaturas.

Los aceros son los materiales estructurales más importantes de las modernas tecnologías que pueden satisfacer cualquier necesidad en muchas aplicaciones. Sus propiedades afectan por las características de los elementos añadidos, en forma aislada o combinada, que entran a formar parte de la composición del acero, y por su comportamiento como componentes sometidos a diversas condiciones de temperatura y de tiempos de fabricación y utilización.

Por ejemplo el: $\begin{cases} - Cr\ aumenta\ la\ resistencia\ a\ la\ corrosión\ y\ a\ la\ exfoliación \\ - Mo\ aumenta\ la\ resistencia\ a\ la\ termofluencia\ a\ elevadas\ temperaturas \\ - Ni\ en\ cantidades\ apropiadas\ restituye\ la\ austenita\ del\ acero \end{cases}$

Carbono.- Es el elemento de aleación más importante del acero; un incremento del contenido en C produce una resistencia y una dureza finales mucho más altas, pero al mismo tiempo reduce la ductilidad y la tenacidad.

El C incrementa la dureza del $\begin{cases} - temple\ al\ aire \\ - soldeo \end{cases}$, especialmente en presencia de Cr.

En aceros de baja aleación y aplicaciones a alta temperatura, el contenido en C se disminuye hasta un 0,15% C para asegurar la óptima ductilidad en las operaciones de soldeo, doblado y plegado; para alcanzar una adecuada resistencia a la termofluencia no se debe bajar del 0,07% C.

Para minimizar la corrosión íntergranular provocada por la precipitación de carburos, el con-

tenido en C de los aceros inoxidables austeníticos se limita al 0,10% C; para una aceptable resistencia a la termofluencia se requiere un mínimo de 0,04% C.

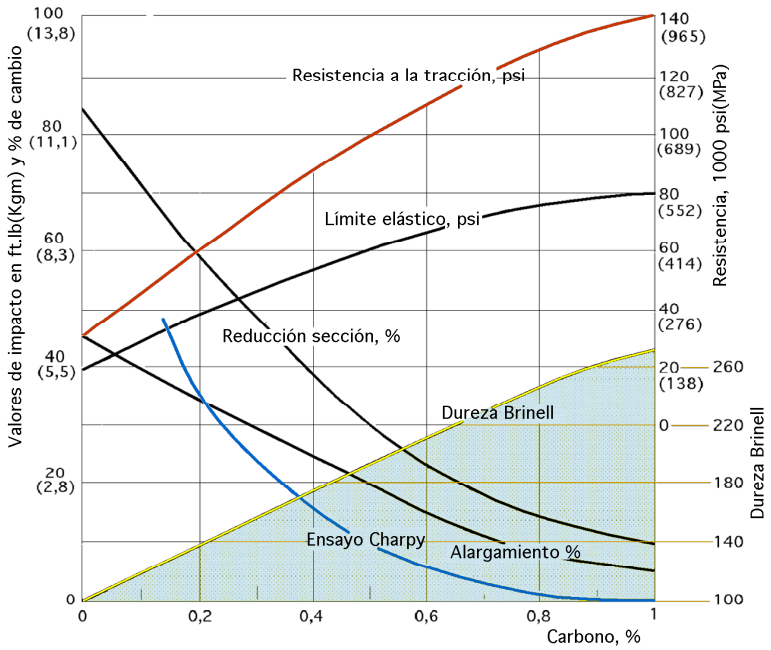


Fig VII.8.- Efecto del C sobre las propiedades mecánicas de un acero al carbono laminado en caliente

Para temperaturas inferiores a 825ºF (441ºC), la resistencia a la fluencia se incrementa cuando el contenido en C aumenta hasta el 0,04% C. Para temperaturas superiores a ésta, cuando el contenido en C se modifica, existen pequeñas variaciones en las propiedades de los materiales frente a la fluencia.

En general, un aumento en el contenido de C reduce las conductividades térmica y eléctrica del acero y se incrementa su dureza en el templado

Manganeso.- Es infinitamente soluble en la austenita y soluble en la ferrita hasta contenidos del 10% Mn; cuando el acero está fundido, el Mn se combina con el S residual, formando sulfuros de Mn, que tienen un punto de fusión muy superior al de los sulfuros de Fe

Sin el Mn se podrían formar sulfuros de Fe que funden a 1800ºF (982ºC), lo que conduciría a una fragilidad en caliente, que es el mecanismo de fallo durante las operaciones de conformación a esas temperaturas.

En consecuencia:

- El Mn facilita la maleabilidad que distingue al acero del Fe fundido

- Forma carburos estables, siendo la tendencia a la formación de éstos ligeramente superior a la de la formación de carburos de Fe, aunque no llega a ser tan importante como la de los del Cr

- Refuerza la disolución de sólidos, es mejor que el Ni y casi tan bueno como el Cr

- Se puede utilizar en los aceros austeníticos inoxidables en sustitución del Ni, como estabilizador austenítico de menor coste.

Molibdeno.- Cuando se añade al acero aumentan la resistencia, el límite elástico, la duración frente al rozamiento, las cualidades frente a impactos y la templabilidad; contribuye a la resistencia a altas temperaturas y permite calentar los aceros hasta el rojo intenso, sin pérdida de dureza.

El Mo incrementa la resistencia al ablandamiento durante el templado y limita el crecimiento del grano estructural del acero; hace que los aceros al Cr sean menos susceptibles a la fragilidad por revenido, siendo el aditivo simple más efectivo que incrementa la resistencia a la fluencia a alta temperatura.

El uso del Mo mejora la resistencia a la corrosión de todos los aceros austeníticos inoxidables, reduciendo en ciertas condiciones la susceptibilidad a la corrosión por picaduras.

Cromo.- Es el componente esencial del acero inoxidable, porque forma un óxido estable y fuertemente adherente, frente a otros elementos que son potentes formadores de óxidos.

El Cr es el único elemento altamente soluble en el Fe, pues puede llegar hasta el 20% en austenita y prácticamente infinito en ferrita. Es irreemplazable para la resistencia a la oxidación en aplicaciones a alta temperatura, y a la temperatura ambiente incrementa el límite elástico, la dureza y la ductibilidad del acero. En aceros recocidos de baja aleación, para resistencia a termofluencia, el contenido óptimo es un 2,25% Cr; cuando se incrementa el contenido en Cr, se observa una mejora permanente en la resistencia a la corrosión atmosférica y en el ataque de muchos reactivos que pueden favorecer la oxidación. Un acero que contiene más de un 12% Cr se considera inoxidable, es decir, la película formada por el Cr_2O_3 es suficiente para prevenir la formación de óxido de Fe hidratado.

En general, las propiedades químicas del acero resultan afectadas por el contenido en C; altos niveles de Cr y bajos de C conducen a mayores resistencias frente a la corrosión. La adición suficiente de Cr impide la grafitización durante prolongados períodos de servicio a altas temperaturas. La adición de más del 1% Cr puede provocar un notable templado al aire del acero en cuestión; el templado al aire es función directa de los contenidos de Cr y C, hasta un 13,5% Cr.

En los aceros de bajo contenido en C que tengan más del 12% Cr, su resistencia al impacto se reduce siendo muy pobre la ductilidad. El contenido en Cr disminuye la conductividad térmica y eléctrica. En aceros de baja aleación, el Cr se puede difundir mediante el cromado, que es un proceso de deposición química. Se pueden alcanzar altos contenidos en Cr, prácticamente inatacables por oxidación y totalmente resistentes a la exfoliación.

Níquel.- Cuando al acero se le añade Ni aumenta su tenacidad, especialmente si su contenido

es superior al 1% Ni; mejora la resistencia a la corrosión, en algunos medios, si se llega a contenidos en Ni del 5%.

El Ni es efectivo en la mejora de propiedades frente a impactos, sobre todo a baja temperatura. Su utilización más importante como elemento de aleación de los aceros, radica en su combinación con el Cr, en valores del 8% de Ni o más.

El Ni es un potente formador de austenita, ya que las aleaciones Fe-Ni-C con altos contenidos en Cr son austeníticas a temperatura ambiente. Las diversas combinaciones de Cr y Ni en el Fe producen propiedades que no se pueden obtener con contenidos equivalentes de otros elementos simples. Las combinaciones más frecuentes son, $18\%Cr/8\%Ni$, $25\%Cr/12\%Ni$, $25\%Cr/20\%Ni$, $20\%Cr/30\%Ni$, siendo estos aceros resistentes a la corrosión atmosférica y a la oxidación a alta temperatura, ofreciendo resistencias ampliamente mejoradas a la termofluencia.

En los aceros ferríticos de baja aleación, el Ni es ligeramente beneficioso para elevar las propiedades frente a la fluencia, ya que reduce el coeficiente de dilatación térmica y disminuye las conductividades eléctrica y térmica.

A temperaturas elevadas, el Ni no favorece la resistencia frente a los compuestos sulfurosos.

Cobalto.- Es el único elemento que impide el templado de los aceros, por lo que cuando se añade Co a una matriz austenítica, se convierte en un potente reforzador de la disolución y formador de carburos; mejora la resistencia a la fluencia. Las aleaciones Fe-Co tienen la inducción de saturación magnética más elevada entre todos los materiales conocidos, por lo que estas aleaciones se emplean frecuentemente en imanes permanentes.

Wolframio.- El W actúa de forma parecida al Mo, siendo un potente formador de carburos y un reforzador de disoluciones sólidas. Forma carburos resistentes a la abrasión en los aceros especiales para herramientas, desarrolla dureza frente a las altas temperaturas de templado y en algunos aceros a alta temperatura contribuye a la resistencia frente a la termofluencia.

Vanadio.- Es un agente desgasificador y desoxidante, aunque esta peculiaridad se usa poco debido a su elevado coste. En los aceros se emplea como elemento de aleación para aumentar la resistencia, la tenacidad y la dureza; forma carburos, y estabiliza la estructura, especialmente a altas temperaturas; minimiza la tendencia al crecimiento del grano lo que permite el tratamiento térmico a temperaturas más elevadas, e intensifica las propiedades de los elementos que se suelen incluir en la composición de los aceros aleados.

Pequeños contenidos en vanadio, entre $0{,}1 \div 0{,}5\%$ Va, acompañados del correspondiente tratamiento térmico, en aceros que contienen entre $0{,}5 \div 1{,}0\%$ Mo, producen notables mejoras de las propiedades frente a la termofluencia a altas temperaturas.

Titanio y Niobio.- El Ti y el Nb son los formadores de carburos más potentes que se conocen; el Ti es un buen agente desoxidante y desnitrurante. Estos elementos son mucho más efectivos en las aleaciones austeníticas de Cr-Ni (en las que reaccionan rápidamente con el C), que en las aleaciones de Cr, circunstancia que permite que el Cr quede en la disolución sólida y en la concentración necesaria para poder mantener la resistencia a la corrosión.

El (Ti, Nb), y el (Ti -Ta) se emplean mucho para reducir las tendencias al templado al aire y para incrementar la resistencia a la oxidación de los aceros con un máximo de 14% Cr.

A largo plazo, en lo que se refiere a propiedades a altas temperaturas, estos elementos tienen una influencia beneficiosa sobre los aceros inoxidables al Cr-Ni, debido a la estabilidad de sus carburos, nitruros y carbonitruros.

El Ti y el Nb se han empleado también en algunos aceros, para mejorar sus propiedades a altas temperaturas, formando un compuesto intermetálico (Ni_3Ti) que constituye una potente fase reforzadora de la resistencia.

Cobre.- Cuando al acero se le añade Cu en pequeña cantidad, se mejora la resistencia a la corrosión atmosférica y se disminuye el ataque relativo a los ácidos reductores. El Cu, al igual que el Ni, en condiciones de alta temperatura no es resistente a los compuestos sulfurosos, por lo que el Cu no se emplea en aceros de baja aleación previstos para servicios a alta temperatura, en ambientes con compuestos de S, tal como ocurre en una atmósfera de gases de combustión.

El Cu se añade a los aceros de baja aleación para construcción, con el fin de aumentar el límite elástico y la resistencia a la corrosión atmosférica.

La presencia del Cu en aceros de alta aleación incrementa la resistencia al ácido sulfúrico.

Boro.- El Bo combinado con el Mo es un potente estabilizador de la vainita; pequeñas cantidades de Bo, en presencia de Mo, impiden la formación de martensita y facilitan la completa transformación a bainita, antes de que se alcance la temperatura M_s.

La bainita mejora la resistencia y la estabilidad de los aceros al Cr-Mo, destinados a la fabricación de recipientes a presión.

El isótopo del boro B^{-10} tiene una muy alta sección eficaz de captura de neutrones, por lo que se añade habitualmente a los aceros que se utilizan en la construcción de vasijas de reactores nucleares y de recipientes de almacenamiento de combustibles y residuos nucleares.

Nitrógeno.- En aceros al C de baja aleación se emplea en casos de endurecimiento superficial, lo que se consigue mediante la difusión de N_2 naciente en la superficie del acero.

El N_2 y el C son reforzadores intersticiales en las disoluciones sólidas.

En presencia de Al o de Ti, el N_2 produce un refuerzo adicional, a causa de la formación de precipitados de los nitruros y carbonitruros.

En aceros inoxidables austeníticos, el N_2 facilita el mismo reforzamiento intersticial que el C, y sin embargo no agota el Cr en la austenita, como hace el C.

La resistencia de los aceros inoxidables que contienen N_2 es equivalente a la de los aceros inoxidables que contienen C, resistencia que se logra sin que haya susceptibilidad al ataque corrosivo en estos aceros, que proviene de la formación local de carburos en los contornos de los granos.

Oxígeno.- El O_2 no es un elemento de aleación; su presencia en el acero es un residuo procedente del proceso de fabricación del mismo; no obstante, algunos óxidos son muy buenos y estables, especialmente los de Al, Ti y To; para conseguir que estos óxidos se dispersen como partículas finas en toda la masa de la aleación, se provoca una oxidación interna mediante atmósfera de O_2 o por técnicas de polvometalotecnia.

Aluminio.- El Al es un componente secundario, propio de aceros de baja aleación. Es un eficiente desoxidante y se utiliza mucho en la producción de los llamados aceros calmados (desgasificados). Cuando el Al se añade en cantidades apreciables, puede llegar a formar escamas fuertemente adheridas de óxido refractario, aumentando la resistencia frente a la exfoliación; sin embargo resulta difícil añadir cantidades notables de Al sin que se presenten otros efectos indeseables.

Las proporciones normales del orden del 0,015÷ 0,080% Al, no mejoran la resistencia frente a las formas ordinarias de corrosión.

Como resultado de su afinidad por el O_2, los aceros altos en Al suelen contener numerosas inclusiones de alúmina, que pueden provocar corrosiones y picaduras.

El Al cuando se aplica sobre el acero como revestimiento superficial, aumenta la resistencia a la oxidación, como en el proceso de impregnación con Al o calorización.

Una excesiva cantidad de Al tiene un efecto negativo sobre las propiedades del material, frente a la termofluencia, particularmente en el caso del acero al C, lo que se atribuye a la influencia que tiene el Al sobre el afino del grano y sobre la aceleración de la esferoidización y grafitización de los carburos.

Silicio.- El Si contribuye mucho a la calidad del acero, como consecuencia de sus altas propiedades desoxidantes y desgasificadoras. La resistencia a la oxidación y la estabilidad superficial del acero se pueden mejorar mediante la adición de Si, efectos deseables que compensan parcial-

mente la tendencia del Si a reducir la resistencia a la fluencia.

Cuando el Si se añade en cantidades no superiores al 2,5% Si, la resistencia máxima del acero aumenta sin perder ductilidad; contenidos en Si superiores al 2,5% provocan fragilidad.

El Si aumenta la conductividad eléctrica del acero y disminuye sus pérdidas por histéresis, por lo que los aceros al Si se utilizan en toda clase de aparatos eléctricos.

AGENTES DESGASIFICADORES.- Los agentes desgasificadores como el Si y el Al se añaden al acero con propósito desoxidante.

El Al se usa también para controlar el tamaño de grano.

El Ca y los metales de tierras raras, cuando se añaden a un baño de fundición,

- Tienen los mismos efectos depositantes

- Forman óxidos complejos u oxisulfuros

- Pueden mejorar notablemente la conformabilidad mediante el control del perfil de los sulfuros

Fósforo.- Cuando se disuelve una cantidad menor a un 0,20% P, es un endurecedor muy efectivo. Los contenidos superiores al 0,20% P, para diversos tipos de aceros al C, reducen la resistencia al choque y disminuyen su ductilidad para trabajos en frío (acritud), debido a un tamaño ampliado del grano que provoca la segregación, efecto dañino que aumenta con el contenido de C.

El P resulta efectivo en la mejora de la maquinabilidad de los aceros mecanizables, lo que está relacionado con su efecto de fragilidad, que permite virutas susceptibles de romperse en el proceso del mecanizado.

En los aceros aleados destinados a la construcción de calderas, el contenido permisible de fósforo es menor que en los aceros mecanizables, siendo la presencia de P censurable con vistas a las operaciones de soldadura.

El P se utiliza como elemento de aleación (hasta el 0,15%) en aceros de baja aleación y en los de alta resistencia, que requieran mayor límite elástico y más resistencia a la corrosión atmosférica.

Frente a ciertos ácidos, un alto contenido en P puede aumentar la velocidad de corrosión.

Azufre.- En general, es un elemento indeseable en todos los aceros, por lo que se han desarrollado muchos procesos para evitar su presencia en los mismos. No obstante, en algunos casos se añade S al acero para aumentar su maquinabilidad, empleándolo como los demás aditivos que mejoran la mecanización, como el P, Ca, Pb, Bi, Se y Te.

Varios de estos elementos son virtualmente insolubles en el acero; tienen puntos de fusión muy bajos o forman compuestos que tienen bajos puntos de fusión, por lo que pueden dar lugar a fragilidad del metal líquido o fragilidad en caliente, incluso a temperaturas moderadamente altas.

Como la industria de pasadores y pernos se inclina siempre por el uso de aceros de fácil mecanización, dados los beneficiosos efectos que tiene tal elección sobre su fabricación, los constructores de calderas deben tener mucho cuidado al utilizar pasadores roscados a altas temperaturas.

VII.5.- TRATAMIENTOS TERMICOS

Las cualidades de los aceros se alteran modificando su estructura mediante un tratamiento térmico determinado, para:

- *Cumplimentar unos requisitos de dureza o de ductilidad*
- *Mejorar la aptitud frente al mecanizado (maquinabilidad)*
- *Afinar el grano de la estructura*
- *Aliviar tensiones internas*
- *Alcanzar mayores niveles de alta resistencia*
- *Mejorar propiedades frente al impacto, etc*

RECOCIDO.- Es un tratamiento térmico que se aplica a procesos, como el recocido de regeneración, de solubilización, de estabilización, intercrítico, isotermo e intermedio.

Recocido de regeneración.- Se realiza calentando un acero ferrítico por encima de la temperatura de transformación crítica A_3, Fig VII.5, manteniéndose a esa temperatura durante un largo tiempo, para su completa transformación en austenita y, posteriormente, se enfría controlando la velocidad en un horno hasta menos de 600ºF (316ºC) que afina la estructura granular, obteniéndose un material relativamente blando y dúctil que, prácticamente, está libre de tensiones internas.

Recocido de solubilización.- Se efectúa calentando un acero inoxidable austenítico hasta una temperatura que diluye la mayor parte de los carburos, permaneciendo a esta temperatura durante el tiempo suficiente para lograr el crecimiento del grano y enfriándose a continuación en agua o en otro líquido para templarle, impidiéndose la precipitación de la mayoría de los carburos; con este proceso de recocido de solubilización se alcanzan óptimas resistencias a la termofluencia y a la corrosión.

Para muchas aplicaciones en calderas, los aceros inoxidables austeníticos requieren una elevada resistencia del grano grueso a la termofluencia, no precisándose una alta resistencia a la corrosión acuosa ya que sólo van a estar expuestos al vapor seco y a gases de combustión, por lo que se utiliza el recocido de solubilización para completar el crecimiento del grano, no siendo necesario el templado.

Recocido de estabilización.- Se realiza en aceros inoxidables austeníticos empleados en ambientes de severa corrosión acuosa. El acero se somete a un recocido de solubilización y, posteriormente, se recalienta hasta 1600ºF (871ºC) manteniéndose a esta temperatura.

Inicialmente los carburos de Cr precipitan en los contornos de los granos que constituyen el acero y, como esos granos son complejos con contenidos en Cr muy altos, la austenita próxima a los

contornos de los granos se empobrece en Cr, por lo que el acero es susceptible de recibir un ataque corrosivo, pero al mantenerlo a 1600ºF (871ºC) el Cr residual en la solución de austenita se redistribuye dentro de los granos, restaurándose así la resistencia a la corrosión, incluso en las zonas próximas al contorno de los granos.

Recocido intercrítico y recocido isotermo.- Estos recocidos son similares, y suponen el calentamiento de un acero ferrítico hipoeutectoide, por encima de la temperatura crítica de transformación A_1, Fig VII.5, y por debajo de la crítica superior A_3, disolviendo todos los carburos de Fe, pero no transforma toda la ferrita en austenita. A partir de la temperatura alcanzada se procede a un enfriamiento lento que produce una estructura de ferrita y perlita, a través de A_1, que está libre de tensiones internas.

a) En el recocido intercrítico el enfriamiento lento del acero se continúa dentro del horno, en forma similar a lo realizado en el recocido de regeneración

b) En el recocido isotérmico el recocido se detiene justamente bajo A_1, asegurándose así la completa transformación de la ferrita y perlita y se elimina la posible formación de vainita

Recocido intermedio.- Es un recocido subcrítico que se realiza a temperaturas por debajo de la temperatura crítica inferior A_1, entre 950ºF (510ºC) y 1300ºF (704ºC); no afina el grano, ni disuelve la cementita, pero mejora la ductilidad y reduce las tensiones residuales de todos los aceros endurecidos por medios mecánicos (acritud).

Esferoidización.- Es un tipo de recocido subcrítico, utilizado para ablandar el acero y mejorar su maquinabilidad. Consiste en el calentamiento de la perlita fina durante mucho tiempo, justo por debajo de la temperatura crítica inferior del acero, seguido de un enfriamiento muy lento, lo que permite obtener perlita globular.

NORMALIZADO.- Es una variante del recocido de regeneración, ya que una vez realizado el calentamiento por encima de la temperatura crítica superior, el acero a normalizar se enfría en el aire, en lugar de hacerlo en un horno con atmósfera controlada.

En algunas ocasiones la normalización se emplea como un proceso de homogeneización para asegurar la eliminación de la historia previa de fabricación o de tratamientos térmicos anteriores.

El normalizado alivia las tensiones internas provocadas por el proceso de elaboración y produce la suficiente ductilidad y maleabilidad para una gran diversidad de aplicaciones; facilita materiales más duros y tenaces que los que salen del recocido de regeneración.

TEMPLE.- Este proceso tiene lugar cuando los aceros de alto contenido en C se calientan para producir austenita y posteriormente se enfrían rápidamente en un líquido, como agua o aceite.

En el proceso de templado la austenita se transforma en martensita a temperaturas inferiores a los 400ºF (204ºC), dependiendo del contenido en C y del tipo y cantidad de los elementos de aleación del acero. Es la forma más dura de los aceros tratados térmicamente y tiene alta resistencia y buen comportamiento frente a la abrasión.

REVENIDO.- Es un proceso que se aplica después de la normalización o del temple, en aceros enfriados al aire; es un tratamiento secundario que suprime la fragilidad permitiendo ciertas transformaciones en la estructura del acero templado; consiste en un calentamiento por debajo de la temperatura crítica inferior A_1 seguido de un enfriamiento con la velocidad que se desee.

Con el revenido se pierde algo de dureza pero se incrementa la tenacidad y se reducen y eliminan las tensiones inducidas por el temple instantáneo.

Cuanto más alta sea la temperatura del revenido, tanto más blandos y tenaces serán los aceros sometidos al proceso, que pueden llegar a ser frágiles cuando se efectúa un enfriamiento lento a partir de ciertas temperaturas; para solventar este problema, éstos aceros se someten a un enfriamiento instantáneo desde la temperatura de revenido.

Tratamientos térmicos posteriores a la elaboración.- Frecuentemente se aplican para restaurar unas condiciones más estables y libres de tensiones residuales. Entre ellos se encuentran los tratamientos posteriores al soldeo (suavizado de soldaduras), los de postconformado y el de solubilización.

VII.4.- PROCESOS DE FABRICACIÓN

El *trabajo en frío* es cualquier trabajo mecánico que se realiza sobre un metal por debajo de su temperatura de recristalización, mientras que el *trabajo en caliente* es el trabajo mecánico efectuado a una temperatura superior a la de recristalización; el recocido que se efectúa a esta temperatura, retrasa el endurecimiento provocado por los medios mecánicos (acritud).

La temperatura de recristalización depende de la velocidad de deformación. Si el material se ha formado a una temperatura menor que la de recristalización, el proceso es un trabajo en frío que incrementa la dureza, la resistencia a la tracción y el límite de fluencia del acero, reduciendo su ductilidad, o lo que es lo mismo, el alargamiento y la sección transversal.

La magnitud del endurecimiento por acritud con el consiguiente crecimiento de los granos en la dirección de la deformación, depende de la extensión del trabajo en frío y del propio material; si el endurecimiento por acritud provocado por las operaciones de conformación llega a ser excesivo, cualquier operación mecánica posterior puede provocar la fractura del material.

Las diversas variedades que existen del trabajo en caliente, comprenden la forja, laminación,

prensado, moldeo por inyección, punzonado, recalcado, curvado y doblado. En la mayoría de estas operaciones el material se comprime hasta lograr el perfil deseado, implicando todas ellas algún grado de orientación en la estructura interna.

Si el material experimenta transformaciones de fases u otros procesos de recristalización, se mantiene algún grado de orientación y afecta a los óxidos, sulfuros y otras inclusiones no disueltas durante el trabajo en caliente o el tratamiento térmico correspondiente. Según sea el tipo de aplicación dada al acero, la orientación resultante puede que no tenga ningún efecto útil o perjudicial; por ejemplo, las chapas laminadas que frecuentemente tienen propiedades inferiores en la dirección de su espesor, debido a la retención de inclusiones segregadas en el plano medio y a la orientación predominante de sus granos en las direcciones de longitud y anchura, puede provocar un tipo de fallo conocido como desgarro laminar, si no se redirecciona convenientemente la solicitación del material.

La laminación en caliente de los aceros al C y de baja aleación, se utiliza frecuentemente para configurar las secciones de calderines y recipientes a presión, siempre a temperatura superior a A_3.

Antes de la conformación se necesitan determinadas temperaturas y tiempos de calentamiento para asegurar que los productos resultantes tengan el tamaño de grano fino deseado y, consecuentemente, una buena tenacidad y evitar que se produzca una excesiva oxidación superficial.

OPERACIONES DE TRABAJO EN FRÍO.- Se utilizan en la elaboración de componentes de calderas, y son la laminación, forja, curvado o doblado y estampado.

La *laminación* de chapas en frío para fabricar los cuerpos de calderines, viene limitada por la capacidad y diámetro del tren de laminación; este proceso se aplica en aceros al C, y una vez completada la construcción del calderín cualquier tratamiento se combina, con el suavizado de soldaduras.

El *forjado* en aplicaciones de baja presión, como la conexión de tubos al colector o al calderín, se puede hacer por abocardado del tubo en el interior de un manguito torneado interiormente en el cuerpo del colector o del calderín. Su resistencia depende de la interferencia mecánica entre el tubo expandido que se deforma plásticamente, y el manguito en el cuerpo que se deforma elásticamente.

El forjado en frío de componentes de caldera se limita normalmente a la conformación final de carcasas.

Los pasadores roscados usados en calderas pueden ser con $\begin{cases} \textit{cabeza conformada en frío} \\ \textit{los filetes de rosca elaborados en frío} \end{cases}$

El efecto de estas operaciones de conformación se minora con tratamientos térmicos, que vienen detallados en las especificaciones de los pasadores; no obstante, los tratamientos no pueden eli-- minar las diferencias microestructurales entre la parte conformada en frío y el resto del pasador, si-

tuación que es probable en $\begin{cases} \text{- } aceros\ inoxidables\ austeníticos \\ \text{- } aleaciones\ de\ Ni \end{cases}$ porque no se transforman durante el tratamiento térmico.

En determinados ambientes acuosos los pasadores elaborados con estos materiales suelen romper en la zona que se encuentra entre la cabeza, conformada en frío, y el cuerpo del pasador.

El ***curvado en frío*** se realiza en muchas construcciones de tubos y tuberías que forman parte de las calderas. Con algunas excepciones, los tubos y las tuberías de aleaciones ferríticas no se tratan térmicamente después del curvado. Los aceros inoxidables austeníticos y las aleaciones de Ni que se utilizan en las calderas de alta presión, se exponen frecuentemente a temperaturas elevadas, siendo la energía de deformación del curvado en frío suficiente para provocar, en el transcurso del tiempo en servicio, la recristalización hasta un tamaño de grano fino.

La temperatura en servicio es insuficiente para inducir el crecimiento del tamaño de grano; el material con grano de tamaño fino tiene menor resistencia (fluencia) a alta temperatura. Para impedir que al efectuar curvados en frío en estos materiales se presente esta situación, se hacen tratamientos térmicos a alta temperatura (tratamientos de disolución) para estabilizar la estructura de grano grueso.

VII.5.- SOLDADURA

La soldadura es la unión de dos o más piezas metálicas mediante la aplicación de calor y/o presión, con o sin la adición de un metal de aporte, para producir una unión local por medio de la fusión o recristalización, a través de la correspondiente interfaz. La unión de partes a presión y de partes no presurizadas con otras partes a presión, se realiza casi siempre por medio de una junta soldada, sobre todo en calderas de alta temperatura y presión, en las que las condiciones de funcionamiento son demasiado severas para la gran mayoría de las juntas o uniones mecánicas (bridas atornilladas con empaquetadura metálica) y de las juntas o uniones de bronce soldadas.

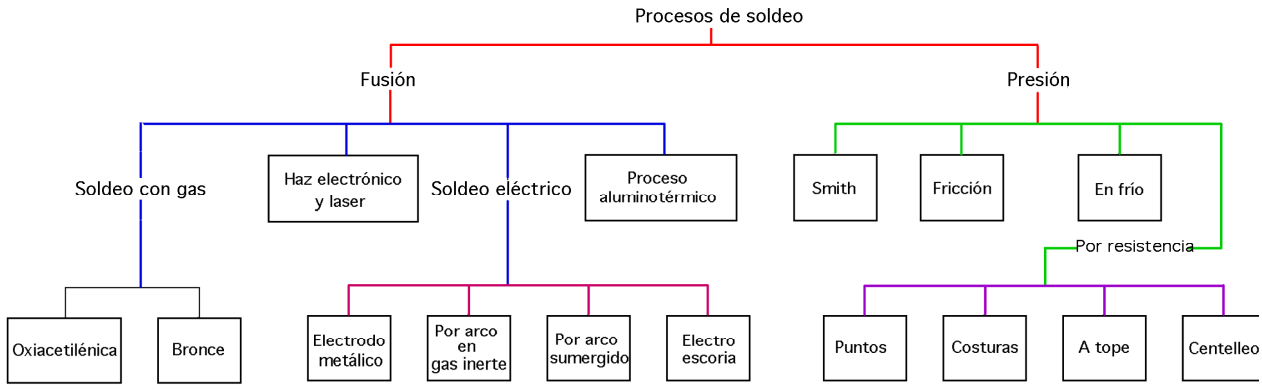


Fig VII.9.- Clasificación de los procedimientos de soldeo

Hay muchos procesos de soldeo, siendo el de fusión con aporte de metal el más utilizado para unir partes a presión, con poca o ninguna presión. En la Fig VII.9, se presenta una clasificación de los procesos de soldeo, observándose la gran variedad existente.

Metales de aportación.- A consecuencia de las características de la distribución del calor en el proceso de soldeo, la junta soldada es un compuesto heterogéneo mecánica y químicamente, que desde un punto de vista metalúrgico, consta de seis regiones distintas, Fig VII.10

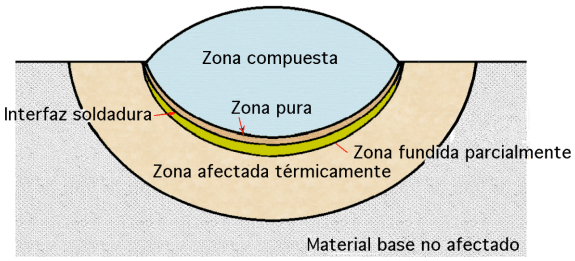


Fig VII.10.- Zonas metalúrgicas desarrolladas en una soldadura

- *Zona compuesta*
- *Zona pura*
- *Interfaz de soldadura*
- *Zona parcialmente fundida*
- *Zona afectada térmicamente*
- *Material base no afectado*

La *zona compuesta* está constituida por la mezcla totalmente fundida del metal de aporte que interviene en el proceso y del metal base del material a soldar.

La *zona pura* es una estrecha lámina alrededor de la zona compuesta, al borde del baño de fusión y con composición igual a la del metal base; forma una capa límite de metal base fundido y solidifica antes de mezclarse con la zona compuesta; el conjunto de las zonas compuesta y pura se identifica como zona de fusión.

La *interfaz de soldadura* configura una frontera que separa el metal base no fundido y el metal solidificado de la soldadura.

La *zona parcialmente fundida* se presenta en el metal base contiguo a la interfaz de soldadura, y en ella se pueden presentar algunas fusiones puntuales de componentes, con inclusiones o impurezas de bajo punto de fusión.

La *zona térmicamente afectada* es la porción de metal base en la junta de soldadura, que ha estado sometida a picos de temperatura lo suficientemente elevados como para poder producir algunos cambios microestructurales en estado sólido.

La *zona de material base no afectado* es la parte que no ha sufrido cambio metalúrgico alguno.

FACTORES QUE AFECTAN A LA CALIDAD DE LA SOLDADURA

Contenido en ferrita.- Los metales soldados con aceros inoxidables austeníticos, cuando se enfrían en estado sólido hasta unos 1800ºF (980ºC), son susceptibles de fisuras y microfisuras en caliente, que se minimizan añadiendo un pequeño porcentaje de ferrita sobre la soldadura.

Grafitización.- Durante el enfriamiento y contracción de la soldadura, se produce una de-

formación plástica y aparecen altas tensiones residuales en la junta soldada.

En los aceros al C y al C-Mo que no contienen potentes formadores de carburos, las zonas de deformación puntual afectadas térmicamente próximas a las de la soldadura, facilitan espacios que pueden asumir más fácilmente el normal incremento de volumen, debido a la descomposición de la cementita en grafito; a unos 900ºF (482ºC), los nódulos de grafito pueden precipitar en estas áreas de deformación.

Cuando se observan muestras metalográficas de secciones transversales de aceros al C-Mo, los nódulos aparecen dispuestos en forma de grafitización en cadena; en estas soldaduras la unión entre el grafito y la matriz de ferrita es muy baja, mucho menor que entre ferrita y perlita o entre ferrita y cementita. Debido a este fenómeno se han producido roturas en tuberías de vapor sobrecalentado fabricadas con estos aceros al C-Mo, fallos que se produjeron sin previo aviso, ya que no estuvieron precedidos de la clásica deformación de las juntas; los riesgos fueron significativos, por lo que se ha restringido la fabricación de tuberías con acero al C-Mo destinadas al sistema de vapor sobrecalentado.

Tratamientos térmicos posteriores al soldeo.- Una vez finalizado el proceso de enfriamiento, la junta soldada tiene tensiones residuales que, a la temperatura ambiente, son comparables al límite elástico del metal base. El suavizado de estas tensiones residuales mediante tratamiento térmico posterior al soldeo, se efectúa calentando la estructura soldada hasta una temperatura lo suficientemente alta que reduzca el límite elástico del acero a una fracción de su valor a temperatura ambiente.

Cuando un acero ya no puede soportar el nivel de las tensiones residuales, experimenta una deformación plástica hasta que las tensiones residuales se reducen al valor del límite elástico, a la temperatura correspondiente; la Fig VII.11 muestra el efecto del suavizado de tensiones en varios aceros.

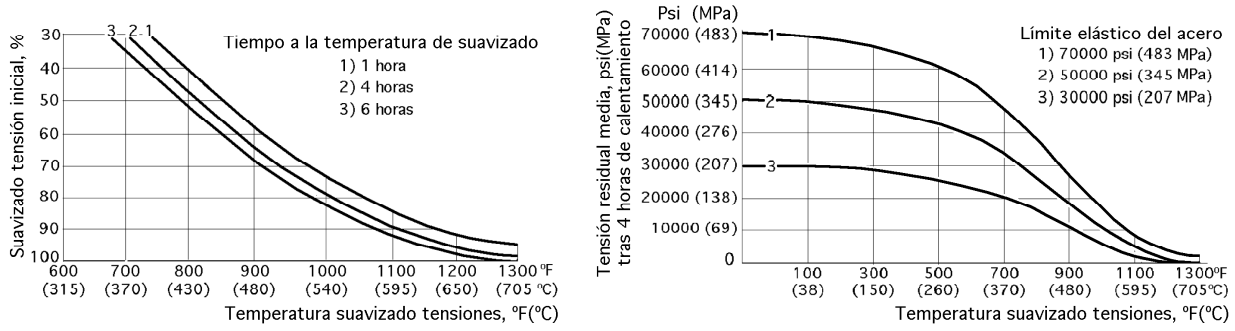


Fig VII.11.- Efecto de la temperatura y el tiempo, en el suavizado de aceros al C y en las tensiones residuales de aceros

La temperatura alcanzada durante el tratamiento térmico de suavizado tiene un efecto mucho más importante que el tiempo durante el cual se mantiene la estructura soldada a dicha temperatura. Cuanto más próxima se mantenga la temperatura de suavizado a la temperatura de recristaliza-

ción, tanto más efectiva es la disminución de las tensiones residuales, siempre que se empleen los adecuados gradientes de calentamiento y enfriamiento.

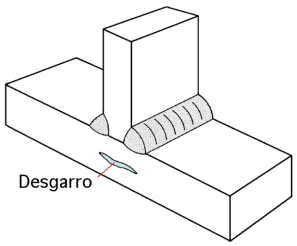


Fig VII.12.- Desgarro laminar

Desgarro laminar.- En las calderas y recipientes a presión, hay que considerar el efecto metalúrgico de las tensiones residuales, fenómeno conocido como desgarro laminar, que puede ocurrir cuando se suelda un elemento a una placa, Fig VII.12, configurando una unión en T. Esto se presenta cuando la placa contiene sopladuras, rechupes, inclusiones u otros defectos de segregación interna, paralelos a la superficie de la placa. En tales circunstancias, las tensiones residuales de la contracción pueden ser suficientes para producir un desgarro paralelo a la superficie de la placa de la unión en T configurada.

Unión de metales distintos.- En determinados casos se puede necesitar una unión soldada entre un acero austenítico y otro ferrítico; desde que se introdujeron los aceros inoxidables austeníticos en las construcciones tubulares de los sobrecalentadores en calderas, estas uniones han presentado fallos en las soldaduras.

Para reducir estos problemas, durante mucho tiempo se utilizaron materiales de aporte con base de Ni, pero ésto no se puede considerar una solución definitiva; el fallo de estas soldaduras se provoca por:

- *Las tensiones inducidas por el sistema*
- *La posición de sus componentes*
- *El curvado de elementos*

La mejor alternativa sigue siendo evitar la soldadura entre metales distintos, empleando materiales aleados ferríticos de alta resistencia, como el (9Cr +1Mo +V), para tubos y tuberías, siempre que lo permitan las condiciones particulares del proyecto.

VII.6.- MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE CALDERAS

Aceros.- Casi todos los materiales utilizados en la construcción de calderas y recipientes a presión son aceros; gran parte de los componentes se fabrican con aceros al C que se emplean para la mayoría de las partes a presión y de partes no presurizadas, como calderines, colectores, tuberías, revestimientos, conductos de aire y humos, etc.

Según su contenido en C los aceros se definen con
- *C por debajo de 0,15% C*
- *C medio-bajo entre 0,15%÷0,23% C*
- *C medio-alto entre 0,23%÷0,44% C*
- *C alto superior a 0,44% C*

Desde el punto de vista del diseño, se consideran aceros altos en C los que tienen más de 0,35%C, y no se deben utilizar en las partes a presión de construcciones soldadas.

Los aceros de bajo contenido en C tienen una utilización muy extendida en la construcción de partes de baja presión, en donde la resistencia no sea un factor significativo de diseño. En la mayor parte de las aplicaciones estructurales y en casi todas las partes a presión, predominan los aceros de C medio con unos contenidos entre 0,20% y 0,35% C.

Los aceros al C se designan también como $\begin{cases} \text{- } calmados \\ \text{- } semicalmados\ y\ efervescentes \\ \text{- } de\ efervescencia\ interrumpida \end{cases}$, según sea el punto del proceso de refino del acero en el que se haya interrumpido la reacción C-O_2.

Durante el proceso de fabricación del acero, el O_2 introducido para su refino se combina con el C para formar un gas. Si el O_2 introducido no se elimina, o se combina con adición de Si, Al u otros agentes desoxidantes, antes o durante la fundición, los productos gaseosos se continúan desprendiendo durante la solidificación en el molde correspondiente. La cantidad de gases desprendidos durante la solidificación determina el tipo de acero y el porcentaje de C que queda en el mismo.

- *Aceros calmados*.- Son los aceros que se emplean en la construcción de calderas. No se desprenden gases durante la solidificación, permaneciendo el acero líquido en reposo dentro del molde.

- *Aceros semicalmados y efervescentes*.- Son aquellos en los que, gradualmente, se produce un incremento en la cantidad de gases desprendidos.

- *Aceros microaleados*.- Son aceros al C a los que se les añade pequeñas cantidades de elementos de aleación Va y Bo (inferiores al 1%), para obtener resistencias más elevadas; estos aceros se usan muy poco para partes a presión, pero están ganando terreno como aceros estructurales.

Los elementos residuales están presentes en los aceros en pequeñas cantidades, y son distintos de los que se añaden a propósito durante el proceso de fabricación del acero, como elementos de aleación o como agentes desgasificadores; su origen está en la chatarra o mineral de Fe que se utiliza en la carga del horno de fundición; algunos elementos residuales encontrados en los aceros al C son: Cu, Ni, Cr, Va, Bo, Sb, Sn, S y P cuyas concentraciones admisibles se limitan en las respectivas especificaciones, porque degradan la ductilidad.

Los elementos residuales Sb, Sn, S y P intervienen de forma importante en la fragilidad por revenido. Antiguamente los elementos residuales no se eliminaban, con excepción del S y P, ni se indicaban en los informes analíticos, pero actualmente hay elementos residuales que tienen límites fijados en sus especificaciones.

Los aceros de baja y media aleación son los que siguen en importancia, dentro de los aceros que se usan en la construcción de calderas; se caracterizan por contenidos de Cr hasta el 11,5% y de cantidades menores de otros elementos; las combinaciones más comunes suelen ser:

$$C + \tfrac{1}{2}\,Mo\ ;\ \tfrac{1}{2}\,Cr + \tfrac{1}{2}\,Mo\ ;\ 1\,Cr + \tfrac{1}{2}\,Mo\ ;\ 1\tfrac{1}{4}\,Cr + \tfrac{1}{2}\,Mo + Si\ ;\ 2\tfrac{1}{4}\,Cr + 1\,Mo\ ;\ 9\,Cr + 1\,Mo + V + Ti + B$$

Acero (C + 0,5 Mo). - Debido a la excepcionalidad del Mo para mejorar la resistencia del acero al C, el tipo (C + 0,5 Mo) tiene muchas aplicaciones en componentes a presión, en el intervalo de temperaturas $\begin{cases} 700°F \div 975°F \\ 271°C \div 524°C \end{cases}$; hay que tener en cuenta la tendencia de estos aceros a la grafitización a temperaturas mayores de 875ºF (468ºC).

Acero (C + Mo).- En el interior de la caldera los fallos por grafitización no representan un riesgo contra la seguridad, por lo que los tubos de (C-Mo) tienen muchas aplicaciones hasta 975ºF (524ºC), por su limitada oxidación.

Dado que el Al provoca la grafitización, el acero (C-Mo) es normalmente un acero calmado por el Si y, en consecuencia, tiene una estructura de grano grueso.

Los componentes de (C-Mo) tienen tendencia a fallos por fragilidad a bajas temperaturas, lo que no constituye ningún problema durante el servicio, por cuanto las aplicaciones se realizan en el campo de las altas temperaturas.

La resistencia a la oxidación de los aceros de baja aleación se incrementa con el contenido en Cr

Acero (0,5 C + 0,5 Mo).- Este es el más común, dentro de la familia del (Cr-Mo), que tiene la misma resistencia que el (C-Mo) al que ha sustituido en muchas aplicaciones; se desarrolló en respuesta a los fallos por grafitización que se presentaban en tuberías de (C-Mo) y se ha comprobado que basta la adición de 0,25% Cr para inmunizar el acero frente a la grafitización.

Aceros $\begin{cases} 1\,Cr + 0,5\,Mo \\ 1,25\,Cr + 0,5\,Mo + Si \end{cases}$.- La familia de aceros de la serie (Cr-Mo), está formada por estos dos aceros casi idénticos; el que lleva Si es más resistente a la oxidación. Un análisis detallado indica que el (1 Cr + 0,5 Mo) es más resistente entre $\begin{cases} 800°F \div 1050°F \\ 427°C \div 566°C \end{cases}$, por lo que en este intervalo de temperaturas desplaza al (1,25 Cr + 0,5 Mo + Si).

Acero (2,25 Cr +1 Mo).- Este acero constituye la aleación óptima para resistencia a las altas temperaturas, en el intervalo $\begin{cases} 975°F \div 1115°F \\ 524°C \div 602°C \end{cases}$

Aceros $\begin{cases} 3\,Cr + 1\,Mo \\ 5\,Cr + 0,5\,Mo \\ 9\,Cr + 1\,Mo \end{cases}$.- Estas aleaciones que contienen del 3 al 9% Cr son menos resistentes, y se aplican cuando se desea una mayor resistencia a la oxidación y tolerar menores solicitaciones. La mayor templabilidad al aire de estos aceros, que crece con el contenido de Cr, complica los procesos de fabricación y encarecen su utilización.

Las aleaciones (Mn-Mo) y (Mn-Mo-Ni) tienen una limitada utilización en generadores de vapor que queman combustibles fósiles; su resistencia es ligeramente mayor que la de los aceros al C, lo que induce a su empleo en grandes componentes, con una importante relación (resistencia/pe-

so); su mayor tenacidad los ha hecho muy populares en su aplicación para vasijas de reactores nucleares.

Aleaciones altas de (Cr-Mo).- Como consecuencia de su tendencia a la fragilidad, los aceros martensíticos $\begin{cases} 9\,Cr + 1\,Mo \\ 12\,Cr + 1\,Mo \end{cases}$, no se han aplicado mucho en la construcción de recipientes a presión y tuberías de vapor sobrecalentado en plantas energéticas; el (9 Cr+1 Mo) tiene mayor resistencia, tenacidad y soldabilidad, a temperaturas hasta 1200ºF (649ºC), gracias a la adicción de elementos aleados y a la microestructura totalmente bainítica resultante del normalizado y revenido, para utilizarlo en los tubos de generadores de vapor, que trabajan con líquidos refrigerantes en reactores nucleares reproductores.

La aleación (9 Cr + 1 Mo + Va + Ti + B) tiene el doble de resistencia que la (2,25 Cr + 1 Mo) a 1000ºF (539ºC) por lo que la está desplazando en las aplicaciones para colectores de alta presión; los recipientes construidos con este acero:

- Son más delgados

- Tienen tensiones residuales más reducidas

- Dan lugar a menor número de fallos asociados a la fatiga por fluencia, en comparación con los aceros para colectores $\begin{cases} 2{,}25\,Cr + 1\,Mo \\ 1{,}25\,Cr + 1{,}25\,Mo + Si \end{cases}$

- Son más resistentes que el inoxidable austenítico hasta los 1125°F (607°C), por lo que este acero se está sustituyendo también en aplicaciones para tubos de alta presión

En la industria europea de calderas se utilizan con frecuencia el $\begin{cases} 12\,Cr + Mo \\ 12\,Cr + Mo + Va \end{cases}$

Todas las tentativas que se han hecho para reducir el uso de aceros inoxidables en calderas, por su alto coste, se han desechado porque la resistencia a la corrosión que ofrecen los hacen favoritos. Los aceros inoxidables aportan la posibilidad de operar a temperaturas superiores a 1100ºF (583ºC), aunque el acero (9 Cr + 1 Mo + Va + Ti + B) puede restringir tal posibilidad.

Para temperaturas algo inferiores, del orden de 1050ºF (566ºC), los aceros inoxidables desplazan con frecuencia a los aceros ferríticos (Cr-Mo), en aquellos casos en que se utilice una menor caída de presión, por tener menor espesor las paredes de los componentes.

ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.- Las aleaciones comunes de aceros inoxidables que se utilizan en *partes de calderas a presión*, son:

304 (8 Cr + 8 Ni) ; 321 (18 Cr + 8 Ni + Ti) ; 347 (18 Cr + 8 Ni + Nb) ; 316 (16 Cr + 12 Ni + 2 Mo) ; 309 (25 Cr + 12 Ni) ; 310 (25 Cr + 20 Ni) ; 800 (20 Cr + 30 Ni)

Desde el punto de vista tecnológico, la aleación (20 Cr + 30 Ni) no es ferrosa ya que tiene me-

nos del 50% de Fe; sin embargo, como es similar a los demás aceros inoxidables, se puede considerar como uno más del grupo. Como a alta temperatura la resistencia mecánica de estos materiales depende de un moderado contenido en C y de un tamaño de grano grande, los materiales con estas cualidades se especifican para servicios a alta temperatura.

Las aleaciones anteriores, tras una prolongada exposición a temperaturas comprendidas entre $\begin{cases} 1050°F \div 1700°F \\ 566°C \div 972°C \end{cases}$, son susceptibles de formar la fase sigma, que disminuye la tenacidad y la ductilidad, pero no tiene influencia sobre la resistencia mecánica o la corrosión.

El acero (18 Cr + 8 Ni + Ti) es un acero estabilizado y tiene importantes aplicaciones a baja temperatura, pero la estabilidad del carburo de Ti hace muy difícil cualquier tratamiento térmico; además se suele obtener una estructura que tiene, a la vez:

- Grano grueso para resistencia a la fatiga por fluencia a alta temperatura

- Carburos estabilizados para resistencia de sensibilidad

Se le puede aplicar un tratamiento térmico de estabilización a baja temperatura, 1300ºF, (704ºC), seguido de un tratamiento de la disolución para lograr una buena resistencia a la fluencia.

En el acero (18 Cr + 8 Ni + Nb) la estabilidad de los carburos de Nb es mejor; esta aleación se puede tratar térmicamente para alcanzar resistencia a la fluencia, por lo que se emplea mucho en altas temperaturas.

El contenido en Mo del acero (16 Cr + 8 Ni + 2 Mo) incrementa la resistencia a la corrosión alveolar o picado a bajas temperaturas; este acero tiene buena resistencia a la termofluencia, pero no se suele usar por su elevado coste.

Todas estas aleaciones de aceros aleados austeníticos, si se utilizan a temperaturas superiores a 1000ºF, (538ºC), requieren de un tratamiento térmico a alta temperatura después de su conformado en frío. La energía de deformación durante el trabajo en frío puede llevar en algunos casos a la recristalización y a un grano fino con una modesta resistencia a la fluencia. Estos aceros son susceptibles de fractura por corrosión en ciertos ambientes acuosos, por lo que está prohibida su utilización en superficies mojadas por agua.

Los tipos (25 Cr + 12 Ni) y (25 Cr + 20 Ni) tienen prácticamente la misma resistencia y el mismo comportamiento frente a la corrosión.

Las aleaciones altas en Ni están más afectadas por los ataques de sulfuración.

Aceros que se utilizan en partes no presurizadas:

- Aceros inoxidables ferríticos que contienen al menos un 10% Cr y tienen una estructura de C + ferrita

- Aceros inoxidables martensíticos que son ferríticos en las condiciones del recocido, y martensíticos des-

pués del enfriamiento rápido desde la temperatura superior hasta la crítica

Ningún tipo de acero inoxidable ferrítico se utiliza en partes a presión, o en partes que soporten cargas de los componentes de generadores de vapor a elevada temperatura, a la que tienen buena resistencia a la oxidación. Estos aceros se utilizan en espárragos y clavos para sujetar refractarios y protuberancias de absorción de calor (escudos térmicos); son difíciles de soldar sin que se produzcan fisuras.

Se han desarrollado aceros dúplex con una mezcla de estructuras austenítica y ferrítica, que se usan en aplicaciones para hacer frente a la corrosión a baja temperatura, como la que se presenta en los equipos de desulfuración húmeda, empleados como lavadores de gases de calderas.

MATERIALES BIMETÁLICOS.- Existen componentes bimetálicos, de una cierta aleación, como componente principal para soportar cargas (chapa y tubos), junto con una chapa de revestimiento exterior de otra aleación como elemento resistente a la corrosión.

También se han desarrollado técnicas para revestir la soldadura de una aleación, con otra aleación diferente.

Los primeros tubos bimetálicos, que tuvieron un amplio uso en calderas, estaban formados por un $\begin{cases} \text{- } \textit{material base de aleación (50\%Cr + 50\%Ni)} \\ \text{- } \textit{revestimiento de aleación (20\%Cr + 30\%Ni)} \end{cases}$

Una combinación usada actualmente como tubo bimetálico, en las *calderas de licor negro y de recuperación en la industria papelera*, está compuesta por $\begin{cases} \text{- } \textit{acero al C como base} \\ \text{- } \textit{acero (8 Cr + 8 Ni) el resto} \end{cases}$

Otra combinación de tubos bimetálicos habitual en las *calderas que queman residuos urbanos*, está compuesta por un $\begin{cases} \textit{acero al C con (1,5 Cr + 1,5 Mo) como base} \\ \textit{revestimiento de aleación (42 Ni + 21,5 Co + 5 Mo + 2,3 Cu)} \end{cases}$

FUNDICIONES.- Los tipos de fundición de Fe empleados en las partes a presión de las calderas, puede ser de tres tipos: fundición blanca, fundición gris y fundición dúctil.

Fundición blanca.- Se denomina así por la estructura plateada que presenta la superficie de su fractura; el C está presente en forma de cementita (Fe_3C) y es el responsable de su dureza, fragilidad y difícil mecanización.

El Fe moldeado difiere de la fundición blanca en el proceso de fabricación, pero su comportamiento es similar. El Fe moldeado se funde en el interior de moldes metálicos, que provocan un rápido enfriamiento en las superficies de contacto, con la consiguiente formación de cementita en dichas superficies, por lo que la estructura de la fundición blanca, o del Fe moldeado, se caracteriza por su gran resistencia al desgaste y la abrasión. Existen aleaciones que contienen una serie de fun-

diciones blancas enriquecidas con Ni, que se emplean en molinos pulverizadores y en partes de otros equipos que requieren resistencia al desgaste; siempre se han distinguido por una muy notable uniformidad y muy alta calidad (ELVERITE).

La VAM-20 es una fundición blanca con 20% Cr, con carburos en una matriz martensítica, siendo de gran dureza y excelente ductilidad en comparación con otras fundiciones blancas, al tiempo que su dureza y resistencia al desgaste es superior a la de las aleaciones ELVERITE. Siempre se la aplica un tratamiento térmico que garantice su buena ductilidad y uniformidad y se usa en pulverizadores de molinos de carbón.

El Fe fundido maleable es una fundición blanca tratada térmicamente para cambiar la cementita en C libre, o en C revenido (nódulos de grafito).

Fundición gris.- Es la más utilizada; en ella el C se encuentra en estado libre, en forma de escamas de grafito, que forman una multitud de entalladuras y discontinuidades en la matriz de Fe. El aspecto de su superficie de fractura es de color gris, porque quedan a la vista escamas de grafito. La resistencia mecánica del Fe aumenta conforme decrece el tamaño de grano del grafito y crece la cantidad de cementita.

La fundición gris es fácilmente mecanizable, ya que el C está en forma de grafito:

- Cuando esta fundición se mecaniza se comporta como un lubricante

- Facilita las discontinuidades que rompen las microplaquetas en cuanto éstas se forman

Las fundiciones grises actuales tienen un amplio campo de resistencias a la tracción en el intervalo $\begin{cases} 20.000 \div 90.000\ psi \\ 38 \div 621\ MPa \end{cases}$, siendo aptas para alearse con Ni, Cr, Mo, Va y Cu

Fundición dúctil.- Es un producto férreo con alto contenido en C tratado con Mg, en el que existe grafito en forma esferoidal o en partículas encastradas; es similar a la fundición gris, en cuanto al punto de fusión, fluidez y mecanización, pero posee propiedades mecánicas superiores; está especialmente indicada para el moldeo por inyección y fundición centrifugada.

Mediante métodos especiales se puede obtener una superficie resistente a la abrasión, contiene carburos y el interior es muy dúctil.

No se utiliza en las partes a presión de las modernas calderas de vapor para plantas de generación de energía, pero sí en equipamientos complementarios, como componentes de alimentadores y anillos de molienda de pulverizadores.

Aceros colados.- Los aceros colados, o fundidos, se utilizan en muchas aplicaciones de accesorios propios de soportes y alineación de calderas y para algunas partes a presión que tengan perfiles muy complejos. Las aleaciones de acero fundido cubren un campo que va desde el acero al C y

(2,25 Cr + 1 Mo), hasta (25 Cr + 12 Ni) y (50 Cr + 50 Ni).

MATERIALES CERÁMICOS Y REFRACTARIOS.- Se usan por sus propiedades aislantes y resistentes a la abrasión. Muchos de los antiguos diseños de hogares estaban conformados con paredes de ladrillos que en la actualidad se han sustituido por paredes membrana de acero; sin embargo, existen un gran número de instalaciones de paredes membrana, que cuentan con una protección de refractario que puede estar apisonado, enlucido o fundido sobre ellas.

Los revestimientos de refractario se utilizan en hogares que, durante su funcionamiento, están expuestos a manipular cenizas fundidas.

En las calderas con $\begin{cases} \textit{- quemador ciclón (hogar ciclón)} \\ \textit{- cenizas fundidas} \end{cases}$ se utilizan productos refractarios, cuya base es el carburo de Si, alúmina o Cr, que se aplican proyectados o enlucidos.

Existe un producto cerámico de alúmina de alta densidad utilizado en los codos de tuberías que conducen *aire primario + carbón pulverizado* $\begin{cases} \textit{- como revestimiento contra la erosión} \\ \textit{- en componentes internos de pulverizadores de carbón} \\ \textit{- en válvulas mariposa de los molinos} \end{cases}$ con vistas a reducir la abrasión y el coste de mantenimiento (Cera-VAM).

En los equipos de filtrado de gases calientes en las plantas de ciclo combinado, se introducen productos cerámicos que eliminan o separan las partículas en suspensión que llevan los humos de las calderas de lecho fluidificado, antes de que entren en la turbina de gas.

VII.7.- ENVOLTURAS Y PROTECCIONES

Sobre las partes metálicas de una caldera se pueden aplicar por chorreado muchos tipos de delgadas envolturas metálicas, protecciones y revestimientos que, generalmente, suelen contener diversos carburos. Estas envolturas se pueden aplicar también sobre otras partes de calderas expuestas a la erosión y a la corrosión causadas por los productos de la combustión, mediante:

- *Metalización por soplete*
- *Plasma*
- *Procesos especiales de combustión de alta velocidad de un combustible con* O_2

Una aplicación particular es la relativa a las superficies de las calderas de lecho fluidificado, expuestas a la erosión por partículas sólidas que arrastran los gases a alta velocidad.

Estos procedimientos son de mantenimiento, para proteger y reparar componentes que hayan experimentado desgastes; para ello hay que $\begin{cases} \textit{- proteger la superficie} \\ \textit{- efectuar un cuidadoso control del proceso} \end{cases}$, para garantizar que las envolturas queden bien adheridas, de forma que en toda la superficie tratada, se tengan la densidad adecuada y el espesor recomendable.

Cromado.- Consiste en obtener una superficie, resistente a la $\begin{cases} \text{- oxidación} \\ \text{- exfoliación} \end{cases}$ con alto contenido en Cr. Las partes a presión que conducen vapor a alta temperatura, sufren siempre oxidación en su superficie interna; cuando la capa de óxido alcanza el espesor suficiente, el óxido se desprende de la superficie y sus partículas se pueden arrastrar a la turbina de vapor, provocando daños por erosión que conducen a pérdidas de rendimiento y a situaciones de riesgo en los equipos. Para minimizar estos efectos, no se precisa un cromado perfecto y total de la superficie interna de las tuberías, ya que con cromar el 95% de la superficie susceptible de exfoliarse, se puede lograr una reducción importante de partículas exfoliadas, del orden de la vigésima parte de las presentes sin cromado.

En los procesos de cromado por deposición de vapores químicos, las superficies a envolver se cubren con una mezcla que contiene un polvo metálico que constituye la envoltura; por ejemplo, el Cr va en una sal halógena y el polvo refractario utilizado es alúmina; cuando la mezcla y la parte a tratar se calientan a una temperatura suficientemente alta, la sal se descompone y el polvo metálico reacciona con el haluro para formar un gas, $CrCl_2$ ó $CrBr_2$, produciéndose sobre la superficie una reacción de intercambio mediante la cual un átomo de Fe sustituye al Cr en el gas y el Cr se deposita en la superficie. El proceso se mantiene durante el tiempo y temperatura necesarios, para que el Cr se difunda en la superficie del material.

Cuanto más Cr se deposite en la superficie, más se incrementa la estabilidad de la base ferrítica por lo que el frente de dilución avanza en la matriz, produciendo una zona de difusión con un contenido en Cr casi constante; el espesor de esta zona de difusión es de $\begin{cases} 0{,}002" \div 0{,}025" \\ 0{,}051\ mm \div 0{,}640\ mm \end{cases}$

A la temperatura de cromado el (2,25 Cr + 1 Mo) es austenítico; en un sustrato, la capa de difusión tiene un contenido mínimo del 13% Cr.

En la actualidad el cromado se aplica a las superficies exteriores de las partes de calderas a presión, para reducir y prevenir la corrosión y los daños por fatiga, requiriéndose una envoltura prácticamente perfecta, con espesores mucho mayores, que resista ambientes externos hostiles.

Aluminización.- Es un proceso de deposición de vapores químicos, similar al cromado, que se ha empleado para proteger diversos componentes de recipientes a presión instalados en plantas de procesos petroquímicos. Como la alúmina es soluble en el vapor a alta presión y temperatura, se puede a-rrastrar por éste hacia la turbina, en la que se produciría su deposición al producirse la caída de presión y temperatura en el proceso de expansión del vapor, lo que no es conveniente.

Envolturas refundidas.- Para la protección contra la corrosión se utilizan envolturas metálicas refundidas, que son revestimientos aplicados con pistola. El material de estas envolturas está constituido por carburos de W-Cr, y se aplica en las paredes tubulares de membrana, o en los revestimientos básicos de hornos para afinar aceros con O_2, etc.

Galvanización.- Consiste en aplicar una capa de cinc por { *- inmersión en un baño de este metal* / *- técnicas de electrodeposición* } a componentes estructurales externos de la caldera, cuando el montaje de la misma tiene lugar en una atmósfera marina o en complejos petroquímicos; para evitar daños estructurales debidos a la fragilidad del plano de exfoliación del cinc, los componentes galvanizados se deben mantener alejados de las zonas de alta temperatura.

VII.8.- PROPIEDADES MECÁNICAS A BAJA TEMPERATURA

En las calderas se utilizan aceros que deben tener unas propiedades determinadas, que satisfagan las necesidades de fabricación y de funcionamiento del componente que lo incorpora, por lo que hay que realizar ensayos para demostrar que el acero en cuestión tiene estas propiedades.

Las normas ASTM establecen la { *estandarización de las especificaciones de las muestras a ensayar* / *metodología de ensayos* / *frecuencia de los mismos* }

ENSAYO DE TRACCIÓN.- Con él se determina la carga máxima que puede soportar un material antes de romper; la relación entre la carga por unidad de sección transversal (tensión) y el correspondiente alargamiento, (aumento de longitud en % de la longitud primitiva), se representa en un diagrama de coordenadas tensión-alargamiento, Fig VII.13 y 14. El metal en forma de probeta de material dúctil, con composición homogénea y sección recta uniforme, sometido a un esfuerzo longitudinal, empieza a alargarse y durante un intervalo de carga creciente se registra un alargamiento proporcional a la tensión correspondiente.

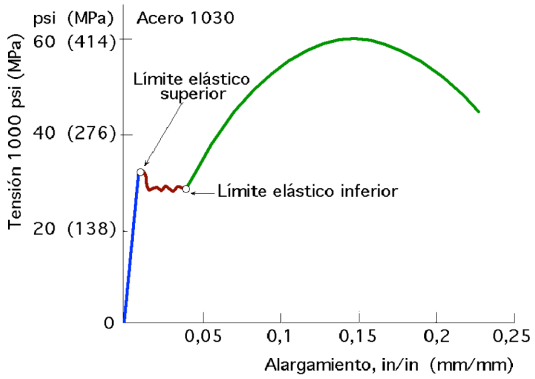


Fig VII.13.- Diagrama de tracción (tensión / alargamiento), para el acero al C 1030

La zona correspondiente a este intervalo es el campo elástico y en él el material cumple la ley de Hooke; el alargamiento es proporcional a la tensión, siendo la constante de proporcionalidad el módulo de elasticidad E (módulo de Young).

Para el acero, el módulo de Young es del orden de 30.10^6 psi, a la temperatura ambiente.

Si en cualquier punto de la región elástica cesa la tensión, la probeta de ensayo adquiere prácticamente las dimensiones iniciales.

Cuando la tensión se incrementa por encima de un cierto valor, el material no tiene un comportamiento elástico, adquiere un alargamiento permanente y tiene un comportamiento plástico, no existiendo una relación lineal entre la tensión y el alargamiento. El valor que separa las regiones elástica y plástica es el límite elástico teórico, que se define como la máxima tensión que se puede aplicar antes de que se presente un alargamiento permanente.

Cuando el material tiene un punto bien definido a partir del cual continúa el alargamiento sin incremento de la carga, se identifica como punto de fluencia (relajamiento). Muchos aceros no tienen punto de fluencia y a veces, en los que lo tienen, no se identifican con exactitud ni éste, ni el límite elástico.

El límite de fluencia se define como la tensión con la que la probeta metálica alcanza un alargamiento del 0,2% de la longitud inicial, Fig VII.14, aunque existen aceros en los que el campo plástico comienza antes de llegar a este valor.

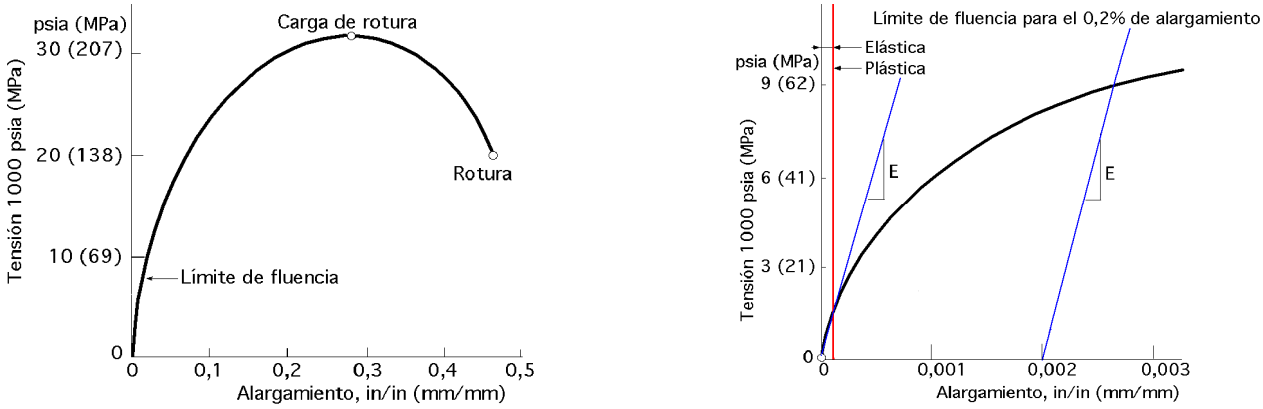


Fig VII.14.- Diagrama de tracción (tensión / alargamiento), para el Cu-policristalino y región elástica e inicial plástica (límite elástico 0,2%)

Si se sigue aplicando tensión después de la fluencia, el material se alarga uniformemente, disminuye la sección transversal hasta el punto de carga máxima, a partir del cual, en la sección más debilitada se presenta el fenómeno de la estricción, que es un estrechamiento local transversal en forma de huso, produciéndose a continuación la rotura.

En los materiales dúctiles se presenta un apreciable incremento del alargamiento en la sección más estrecha de la probeta; cuanto más dúctil es el acero, mayor es el alargamiento antes de la rotura.

En algunos materiales no se produce la estricción y la sección transversal se reduce más o menos uniformemente a lo largo de toda la longitud de ensayo, hasta la rotura.

La carga máxima de rotura necesaria para romper la probeta por tracción, dividida por el área de su sección inicial, es la tensión o coeficiente de rotura.

Los materiales frágiles no presentan fluencia o deformación plástica, por lo que en ellos, prácticamente, coinciden el límite de fluencia y la tensión de rotura.

ENSAYOS DE DUREZA.- La dureza es la resistencia $\begin{cases} \textit{a la penetración bajo una carga} \begin{cases} \textit{estática} \\ \textit{dinámica} \end{cases} \\ \textit{al rayado, a la abrasión o al taladrado} \end{cases}$

La dureza indica el efecto de unos $\begin{cases} \text{- } \textit{determinados tratamientos térmicos} \\ \text{- } \textit{procesos de fabricación específicos} \end{cases}$, y su valor es un indicativo de la resistencia a la rotura de los aceros.

La dureza se determina mediante los ensayos Rockwell C (cono), Rockwell B (bolas), Brinell (bolas), Vickers (pirámide), basados en la medida de la resistencia a la penetración bajo cargas estáticas. La presión se aplica empleando una carga fija durante un tiempo determinado, midiéndose a continuación la huella con un microscopio. El resultado se expresa como un número que indica la dureza según el método utilizado, existiendo una equivalencia entre los resultados de los diferentes ensayos.

La dureza se puede medir también mediante un ensayo dinámico con escleroscopio (ensayo Poldi), en el que se mide la altura de rebote que alcanza un peso metálico que cae vertical y perpendicularmente sobre la probeta o material a ensayar; a mayor huella menor altura de rebote y menor dureza.

ENSAYO DE TENACIDAD.- La tenacidad es una propiedad que representa la aptitud de un material para $\begin{cases} \text{- } \textit{absorber tensiones locales mediante deformación plástica} \\ \text{- } \textit{redistribuir las tensiones sobre un mayor volumen de material} \end{cases}$, antes de que éste falle.

La aptitud depende de $\begin{cases} \textit{la velocidad de aplicación de la carga} \\ \textit{el grado de concentración de las tensiones locales} \end{cases}$

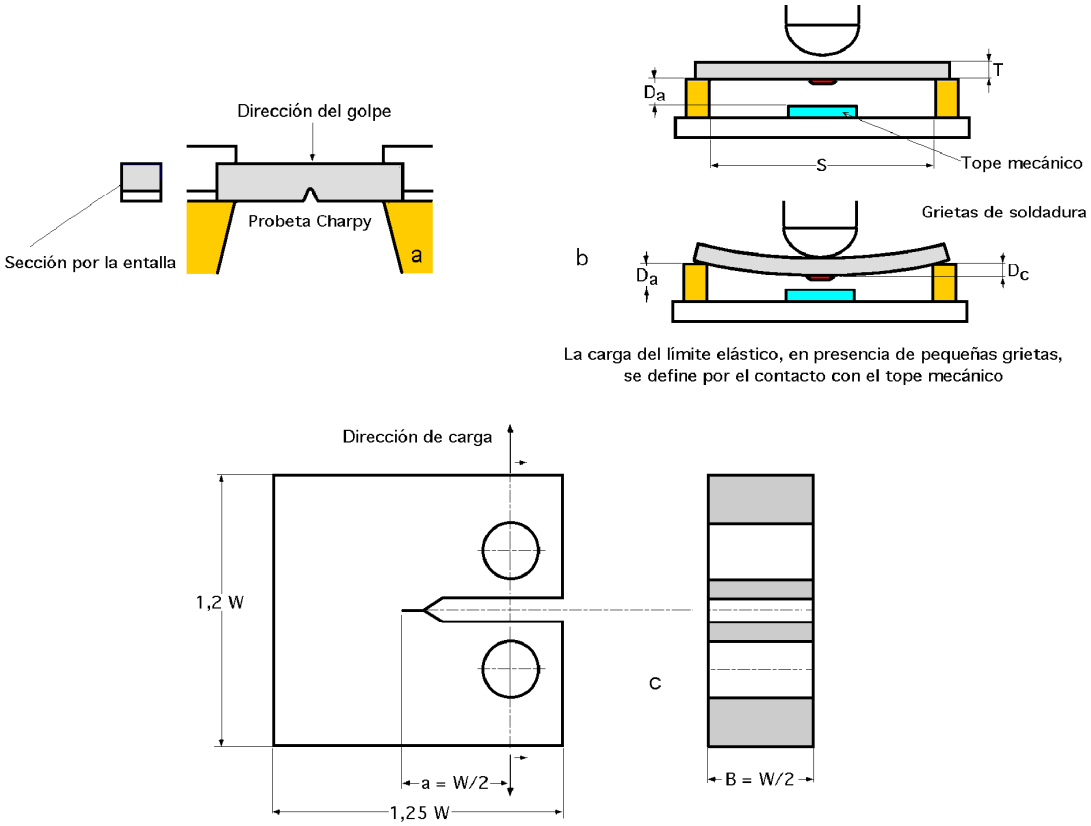
En la mayoría de los casos la tenacidad depende de la temperatura, aumentando con ésta, aunque no linealmente; la tenacidad puede ser $\begin{cases} \text{- } \textit{absoluta} \\ \text{- } \textit{relativa} \end{cases}$

Un ensayo de tenacidad relativa lo constituye cualquier ensayo de impacto o de resiliencia sobre una probeta con entalla en posición horizontal y apoyada en sus extremos, que es golpeada con un péndulo (ensayo Charpy) en su punto medio por la parte contraria a la entalla, Fig VII.15a.

La energía absorbida por la probeta en su rotura está en razón inversa de la altura que alcanza el péndulo después de romperla. La probeta se examina también para:

$$\begin{cases} \text{- } \textit{determinar el estado de la sección de rotura} \\ \text{- } \textit{cuantificar sobre esta sección lo que corresponde a } \begin{cases} \text{- } \textit{cizallamiento} \\ \text{- } \textit{desgajamiento} \end{cases} \end{cases}$$

La resiliencia se puede expresar en tres unidades diferentes: $\begin{cases} \text{- } \textit{energía absorbida, (ft.lb)} \\ \text{- } \textit{extensión lateral, } (10^{-3}\,\textit{in}) \\ \text{- } \textit{cizallamiento porcentual, (\%)} \end{cases}$, valores que dependen de $\begin{cases} \text{- } \textit{el material} \\ \text{- } \textit{la temperatura} \\ \text{- } \textit{el tamaño de la probeta} \end{cases}$, por lo que la comparación de materiales y ensayos sólo tiene sentido cuando las $\begin{cases} \text{- } \textit{geometrías de las probetas} \\ \text{- } \textit{condiciones de ensayo} \end{cases}$, son idénticas.



a) Probeta Charpy; b) Probeta para ensayo de temperatura de transición ductilidad nula; c) Probeta para ensayo de resiliencia

Fig VII.15.- Tipos de probetas para ensayos de resiliencia

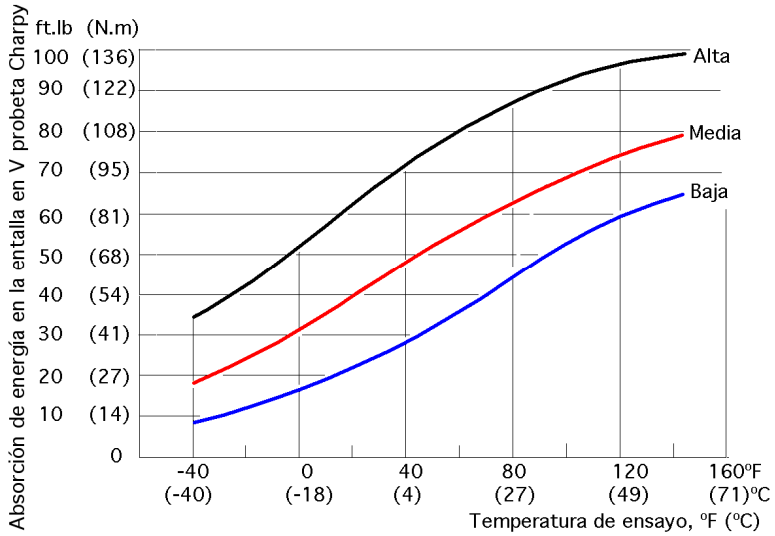


Fig VII.16.- Diagrama de absorción de energía-temperatura, en probetas Charpy con entalla en V, sobre material de chapa SA 299 de grano fino con diversas resiliencias

Otro ensayo de tenacidad es el relativo a la caída libre de un peso; la probeta se representa en la Fig VII.15b; un peso conocido se deja caer desde una altura fija e impacta sobre la probeta a ensayar; el ensayo se repite sobre una serie de probetas a diversas temperaturas, en tramos de 10ºF (6ºC), para discriminar finalmente entre rotura sí y rotura no. Si el impacto provoca una fisura sus-

ceptible de propagarse a partir de la entalla hasta la cara opuesta al impacto, se considera que rompe a la temperatura correspondiente. La menor temperatura a la que falla la probeta define la temperatura de transición de ductilidad nula, en la que se representa un histograma a partir de 20 temperaturas diferentes de calentamiento, sobre un acero de grano fino.

La Fig VII.17 muestra la variación de la resiliencia en función de la temperatura en 22 escalones de temperatura, sobre probetas de un determinado acero al C de grano fino, determinándose la resiliencia por el ensayo Charpy; este material muestra una transición gradual entre las altas y bajas resiliencias.

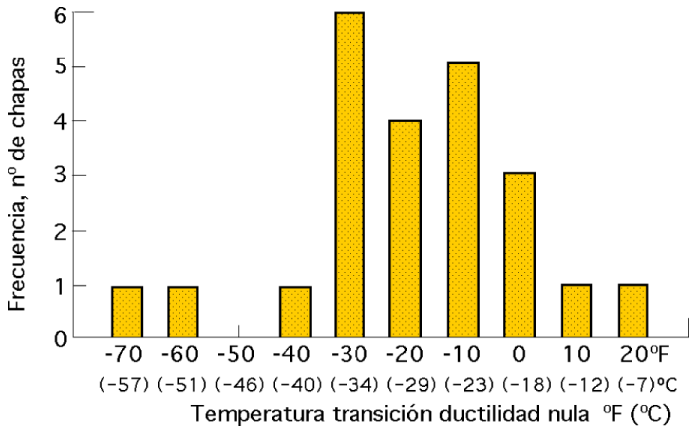


Fig VII.17.- Histograma de temperatura de transición de ductilidad nula, de una probeta de material SA-299 de grano fino a lo largo de una distribución de 20 calentamientos

Los ensayos de resiliencia a la fractura miden las características y propiedades reales de un metal; estos ensayos son complejos y las probetas costosas. Sin embargo, facilitan valores que se pueden utilizar en el cálculo de tensiones, para determinar el tamaño crítico de defectos a partir de los cuales se pueden propagar con pequeños o nulos incrementos de la carga.

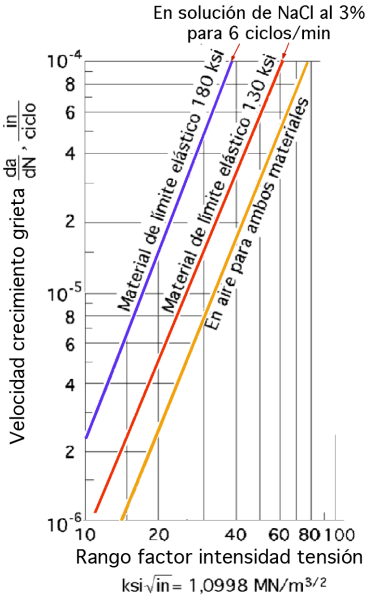


Fig VII.18.- Tasas de crecimiento de grietas de fatiga por corrosión, en un acero

Una probeta para este ensayo de resiliencia es la representada en la Fig VII.15c; para determinar el comportamiento del desarrollo de grietas de fatiga se utiliza la misma probeta.

La Fig VII.18 indica, para un acero revenido, la diferencia entre la velocidad de crecimiento de una grieta en el aire y en una solución salina, con dos niveles de tensiones.

ENSAYOS DE CONFORMACIÓN.- Para determinar el comportamiento de un material durante el proceso de fabricación, se emplean ensayos de deformación, como doblado, aplastamiento, abocardado y embutición, que determinan la capacidad del material para soportar diversas operaciones de conformación.

VII.9.- PROPIEDADES MECÁNICAS A ALTA TEMPERATURA

Los datos de $\begin{cases} \text{- } la\ resistencia\ a\ la\ rotura \\ \text{- } el\ límite\ de\ fluencia \end{cases}$, se determinan a temperatura ambiente y no se pueden extrapolar como referencia de las propiedades mecánicas de los metales a altas temperaturas.

La deformación lenta (termofluencia) tiene lugar:

- Para aceros ferríticos a temperaturas superiores a 700°F (371°C)

- Para aceros austeníticos a temperaturas superiores a 1000°F (538°C)

Las tensiones máximas de trabajo permisibles para materiales férreos en calderas energéticas, se basan en ensayos de larga duración sobre rotura por termofluencia. El Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión, Sección I Calderas energéticas, establece que los valores máximos de tensión admisible para partes a presión no deben superar el menor de los seis supuestos siguientes:

- El 25% de la mínima resistencia a la tracción que se haya especificado

- De 1,1 hasta 4 veces la resistencia a la tracción para la temperatura que se haya considerado

- El 67% del mínimo límite elástico especificado a temperatura ambiente

- El 67% del límite elástico a la temperatura considerada para los aceros perlíticos, y el 90% del mismo para los aceros austeníticos y aleaciones de base níquel

- Una media conservadora de resistencia, para dar un gradiente de termofluencia del 0,01% para 1000 horas (1% en 100.000 horas)

- El 67% de la media, o el 80% de la mínima tensión de rotura en 100000 horas

La tensión admisible a mayor temperatura no puede exceder de la que corresponde a una temperatura menor, de modo que no se tiene ventaja alguna en el comportamiento del envejecimiento por deformación plástica o maduración mecánica; la tensión admisible es, en consecuencia, el límite inferior de los involucrados en estos criterios.

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN.- El diseño de equipos para altas temperaturas requiere la utilización de ensayos de termofluencia, rotura por fluencia, y ensayos de tracción de corta duración, que facilitan propiedades de la resistencia de los metales hasta que se llega al valor de fluencia del material. Los ensayos a tracción de corta duración proporcionan información sobre las características de ductilidad que ayudan en el proceso de fabricación.

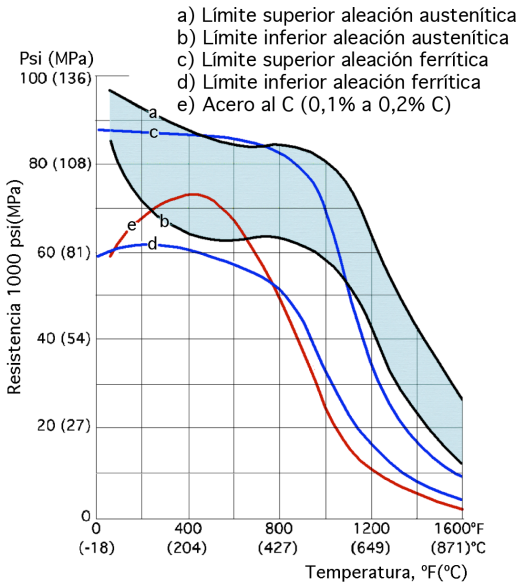


Fig VII.19.- Resistencia a la tracción de algunos aceros hasta temperaturas de 1500°F (816°C)

En la Fig VII.19 se muestran las cargas de rotura de un acero al C y de unos aceros aleados, en el intervalo de temperaturas entre 100ºF (38ºC) y $\begin{cases} 1300°F \div 1500°F \\ 704°F \div 916°C \end{cases}$

Los resultados indican que la resistencia disminuye cuando se incrementa la temperatura, aunque hay una región para los aceros austeníticos entre $\begin{cases} 400°F \div 900°F \\ 204°C \div 428°C \end{cases}$, en la que la resistencia es casi constante

Si estos ensayos se realizasen a temperaturas más elevadas, los datos no serían adecuados para el diseño de equipos que funcionasen un gran tiempo a esas temperaturas, por cuanto la aplicación continuada de carga produce una deformación lenta y continua, que puede ser importante y apreciable en un determinado período de tiempo y que, algunas veces, puede conducir a la fractura.

Una excepción a la norma expuesta es el aumento de resistencia, con la consiguiente reducción en la ductilidad que se observa a temperatura ambiente para el acero al C y muchos aceros aleados, en un intervalo de temperatura de $\begin{cases} 100°F \div 600°F \\ 38°C \div 318°C \end{cases}$.

Si la temperatura supera los $\begin{cases} 600°F \div 750°F \\ 316°C \div 400°C \end{cases}$ la resistencia del acero al C y de la mayoría de los aceros aleados de baja aleación, disminuye y se hace menor que la que corresponde a la temperatura ambiente, todo ello con el correspondiente aumento de la ductilidad.

Ensayo de termofluencia y rotura por fluencia.- Ciertos materiales no metálicos como el vidrio, cuando se encuentran sometidos a tensiones experimentan con el tiempo una lenta y continua deformación. La rotura de un material metálico puede ocurrir cuando se somete a tensiones a alta temperatura durante un tiempo suficientemente largo, incluso aunque la carga aplicada sea considerablemente menor que la correspondiente al ensayo de rotura a la misma temperatura.

El ensayo de rotura por termofluencia se emplea para determinar a una temperatura dada:

- *La velocidad de deformación*
- *El tiempo hasta la rotura*

La probeta a ensayar se mantiene a una temperatura constante y se somete a una tensión estática fija; en el ensayo se miden su deformación y el tiempo hasta la rotura. La duración del ensayo se puede extender desde 1000 a 10000 horas, e incluso más.

En la Fig VII.20 se representa el diagrama característico de la correlación deformación-tiem-

po, de una probeta a lo largo del ensayo. La curva representativa de la termofluencia se divide en tres etapas:

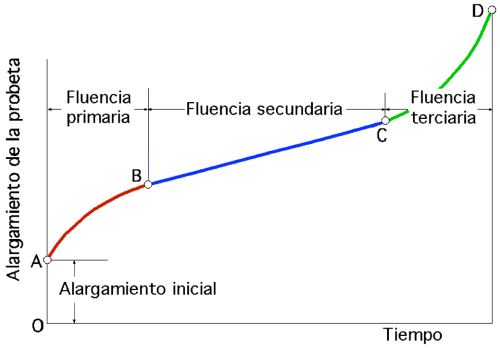


Fig VII.20.- Esquema de ensayo de termofluencia para carga y temperatura constantes

- La primera etapa de la curva de fluencia (A-B), termofluencia primaria, se caracteriza por una velocidad decreciente de la deformación a lo largo del período

- La segunda etapa de la curva de fluencia (B-C), termofluencia secundaria, se caracteriza por variaciones muy pequeñas de la velocidad de deformación con un gradiente de termofluencia constante

- La tercera etapa de la curva de fluencia (C-D), termofluencia terciaria, se caracteriza por una velocidad de deformación creciente, que conduce a la rotura.

La curva se inicia tras el alargamiento inicial (O-A), que es la medida de la deformación provocada por la carga. La magnitud del alargamiento inicial depende de las condiciones del ensayo y se incrementa cuando crecen la carga y la temperatura.

Algunas aleaciones muestran una termofluencia secundaria muy limitada, e incluso inexistente, por lo que durante la mayor parte del ensayo la termofluencia es terciaria.

Para simplificar las aplicaciones prácticas de los datos de termofluencia para un material a una temperatura determinada, se pueden establecer dos tipos de resistencia que facilitan magnitudes de la fluencia de un 1% de alargamiento tras 10.000 y 100.000 horas de ensayo, debiéndose realizar varios ensayos de rotura por fluencia a cualquier temperatura y cargas diversas.

La velocidad de la fluencia en la etapa de termofluencia secundaria, se determina a partir de estas curvas y se representa gráficamente en función de la carga. Cuando estos datos se representan en coordenadas logarítmicas, los puntos relativos a cada probeta están dispuestos sobre una línea que tiene una ligera curvatura.

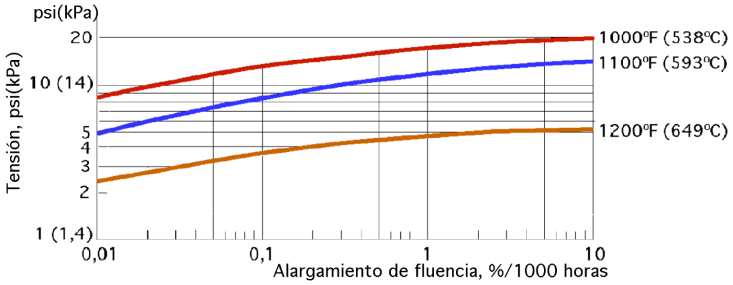


Fig VII.21.- Curvas de alargamiento para un acero 2,25 Cr + 1 Mo

En la Fig VII.21 se presentan unas curvas de velocidades de termofluencia para un acero a diversas temperaturas. El perfil de estas curvas depende de la

- composición química
- microestructura cristalina del metal
- carga aplicada
- temperatura del ensayo

La resistencia a la rotura por termofluencia es $\frac{\textit{Carga aplicada}}{\textit{Area de la sección de rotura}}$ en un tiempo deter-

minado, y en atmósfera de aire a la temperatura del ensayo.

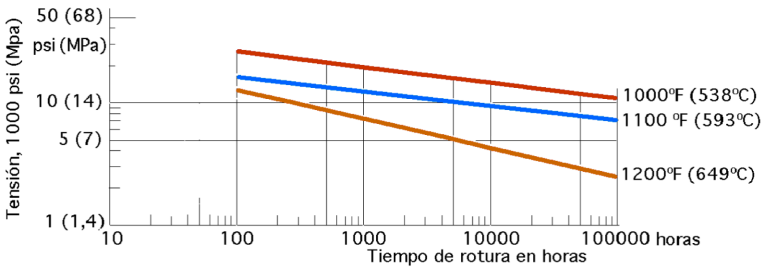


Fig VII.22.- Curvas de rotura por termofluencia del acero 2,25 Cr + 1 Mo

El tiempo de rotura a una temperatura dada depende de la carga aplicada.

La Fig VII.22 indica las curvas de la correlación tensión-tiempo de rotura de un acero, en coordenadas logarítmicas:

- Las grandes velocidades de alargamiento indican una fractura dúctil (transgranular), en la que hay superficie oxidada

- Las pequeñas velocidades de alargamiento son propias de una fractura frágil (intergranular), en la que sólo hay oxidación visible intercristalina o no hay oxidación alguna

De las discontinuidades producidas por la presencia de óxidos intercristalinos, el tiempo de rotura se reduce, apreciablemente, para una determinada combinación de carga y temperatura.

Se observa que la pendiente de la curva para 1200ºF (649ºF) es mayor que las pendientes correspondientes a temperaturas menores, por cuanto es una temperatura mayor que el límite normal de temperatura de máxima resistencia a la corrosión del acero en cuestión, produciéndose una excesiva exfoliación en los ensayos de rotura de larga duración a 1200ºF (649ºC).

Un ensayo completo de rotura por termofluencia, para un acero dado, consiste en una serie de ensayos a temperatura constante y con probeta sometida a diferentes niveles de carga. Como los ensayos no se suelen prolongar más allá de las 10.000 horas, los valores correspondientes a tiempos de rotura superiores a esa cifra se estiman por extrapolación.

VII.10.- MATERIALES PARA CALDERAS

Especificaciones ASME y tensiones admisibles.- La mayor parte de las calderas industriales y energéticas se diseñan de acuerdo con la Sección I del Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión, Calderas Energéticas (calderas para plantas de producción de energía eléctrica).

Las especificaciones se listan en la Sección II, que comprende: { *- parte A, materiales férreos* ; *- parte B, materiales no férreos* }

En la parte C, figuran las especificaciones para los materiales aptos para soldadura, como varillas de soldar, electrodos, metales de aportación, etc.

En la parte D, figuran los valores admisibles para las solicitaciones de diseño

La configuración de los productos metálicos utilizados en las partes a presión son los tubos, chapas, piezas forjadas y piezas fundidas.

Tabla VII.1.- Materiales de calderas y algunas aplicaciones (unidades inglesas)

Nº	Especifi-cación	Composición nominal	Forma producto	Tracción mínima ksi	Fluencia mínima ksi	Otras paredes y cerram.	Sobrecal Recalent Economiz.	Tuberías no calentadas Diám. ext. < 10,75"	Colectores y tuberías Diám. ext. > 10,75"	Calde-rines	Máxima temper. uso ºF	Notas
1	178[a]	C	tubo ERW	47	26	X	X				950	1-2
2	192		tubo sin costura	47	26	X	X	X			950	1
3	178C		tubo ERW	60	37	X	X				950	2
4	210AA1		tubo sin costura	60	37	X	X	X			950	
5	106B		tubo sin costura	60	35			X	X		950	3
6	178D		tubo ERW	70	40	X	X				950	2
7	210C		tubo sin costura	70	40	X	X	X			950	
8	106C		Tubería sin cost.	70	40			X	X		950	3
9	216WCB		Fundido	70	36	X	X	X	X		950	
10	105		Forjado	70	36	X	X	X	X		950	3
11	181-70		Forjado	70	36	X	X	X	X		950	3
12	266C12		Forjado	70	36				X	X	800	
13	516-70		Chapa	70	38				X		800	
14	266C13		Forjado	75	37,5				X	X	800	
15	299		Chapa	75	40						800	
16	250T1A	C+Mo	tubo ERW	60	32	X	X				975	4-5
17	209T1A		tubo sin costura	60	32	X	X	X			975	4
18	335P1		Tubería sin cost.	55	30			X			875	
19	250T2	0,5Cr+0,5Mo	tubo ERW	60	30		X		X		1025	6-7
20	213T2		tubo sin costura	60	30		X				1025	6
21	250T12	1 Cr+0,5Mo	tubo ERW	60	32		X				1050	5-7
22	213T12		tubo sin costura	60	32		X				1050	8
23	335P12	0,5Cr+0,5Mo	Tubería sin cost.	60	32				X		1050	8
24	250T11	1,25Cr+0,5Mo+Si	tubo ERW	60	30		X				1050	5
25	213T11		tubo sin costura	60	30		X				1050	
26	335P11		Tubería sin cost.	60	30			X	X		1050	
27	217WC6	1,25Cr+0,5Mo	fundido	70	40	X	X	X	X		1100	
28	250T22	2,25Cr+1 Mo	tubo ERW	60	30		X				1115	5-7
29	213T22		tubo sin costura	60	30		X				1115	
30	335P22		Tubería sin cost.	60	30			X	X		1100	
31	217WC9		fundido	70	40		X	X	X		1115	
32	182F22A		forjado	60	30		X		X		1115	
33	336F22A		forjado	60	30				X		1100	
34	213T91	9 Cr+1 Mo+V	tubo sin costura	85	60		X				1200	
35	335P91		Tubería sin cost.	85	60			X	X		1200	
36	182F91		forjado	85	60		X				1200	
37	336F91		forjado	85	60				X		1200	
38	213TP304H	18 Cr+8 Ni	tubo sin costura	75	30		X				1400	
39	213TP347H	19 Cr+10 Ni+Cb	tubo sin costura	75	30		X				1400	
40	213TP310H	25 Cr+20 Ni	tubo sin costura	75	30		X				1500	
41	407-800H	Ni+Cr+Fe	tubo sin costura	65	25		X				1500	
42	423-825	Ni+Fe+Cr+Mo+Cu	tubo sin costura	85	35		X				1000	

1- Los valores ksi en los números 1 y 2 son mínimos esperados

2- Se requiere inspección especial, si se usa al 100% de su capacidad, por encima de 650ºF

3- Limitado a un máximo de 800ºF para tubería de diámetro exterior > 10,75" y para el exterior de la caldera

4- Limitado a un máximo de 875ºF para el exterior de la caldera

5- Requiere inspección especial, si se usa al 100% de su capacidad

6- La temperatura máxima del diámetro exterior es de 1025ºF. La media máxima para cálculos por Código es 1000ºF

7- Actualmente se requiere usar los casos particulares del Código

8- La carga mínima de fluencia de 32 ksi requiere usar el Caso 2070 del Código

9- Los números 1 a 40 son "SA". Los números 41 y 42 son "SB"

La Tabla VII.1 muestra algunas especificaciones de materiales comunes para partes a presión utilizados en calderas que queman combustibles fósiles, las propiedades mínimas exigibles, las temperaturas máximas recomendadas para el servicio y las aplicaciones sugeridas.

La temperatura de servicio máxima recomendada es una de las posibilidades de limitación, y se debe tomar como la más alta de entre las siguientes: $\begin{cases} \textit{- la de la tensión indicada en la Sección I} \\ \textit{- la del límite de oxidación a largo plazo} \\ \textit{- la de una posible grafitización} \\ \textit{- la de la práctica comercial normal} \end{cases}$

Caldera, paredes hogar, zonas de convección y economizadores.- Las superficies de caldera, paredes de agua del hogar y del cerramiento del paso de convección, se construyen generalmente con tubos de acero al C, aceros (C-Mo) y acero (0,5Cr + 0,5Mo), con costura soldada por resistencia eléctrica, y sin costura.

Los tubos que tienen costura soldada por resistencia eléctrica, son los habituales en las aplicaciones muy críticas de las calderas de recuperación de calor en procesos de la industria papelera, en los que una fuga de agua implica siempre explosiones, derivadas del contacto entre el agua y el material fundido. En las zonas de elevado aporte de calor, para evitar el riesgo de grafitización, se usan aceros bajos en C y los aleados con (0,5 Cr + 0,5 Mo); en esas zonas la temperatura del metal puede estar sujeta a algunas fluctuaciones.

Los aceros altos en C y los (C-Mo) se usan en los suelos y partes altas del hogar, en las superficies de cerramiento de la zona de convección y en los economizadores.

Sobrecalentadores y recalentadores.- Las temperaturas máximas en las partes a presión se presentan en el sobrecalentador y en el recalentador, por lo que los tubos de estos componentes deben estar fabricados con materiales que tengan propiedades y resistencia a la corrosión a altas temperaturas. El acero al C es un material económico y adecuado para temperaturas del metal que no excedan de $\begin{cases} 850°F \div 950°F \\ 454°C \div 510°C \end{cases}$, dependiendo también de la presión.

Por encima de estos valores, se precisan aceros aleados y aceros inoxidables, ya que los aceros al C tienen baja resistencia a la oxidación y menores tensiones admisibles.

En la construcción de *sobrecalentadores* se utilizan aceros aleados con dos o más elementos:

- Los aceros de baja aleación, como el acero al C y el (C-Mo), se emplean en las secciones de entrada

- Los aceros (Cr-Mo) de media o baja aleación se usan en las secciones de salida, en las que las temperaturas del metal y del vapor se incrementan

-

Los tubos de acero inoxidable se emplean en las secciones más calientes del sobrecalentador, aunque ya comienzan a sustituirse por el acero (9Cr + 1Mo + V) (Croloy 9V), que es un aero ferrítico

de alta resistencia que se desarrolló inicialmente para componentes de los reactores rápidos reproductores y que se ha aplicado en calderas que queman combustibles fósiles, por su alta resistencia y excelente tenacidad. Gracias a su estructura ferrítica, con el empleo de este acero en lugar de los inoxidables, se eliminan los riesgos de los fallos propios de las soldaduras que se presentan entre metales diferentes.

VII.11.- FACTORES DE SELECCIÓN

Sobrecalentadores.- Para un sobrecalentador se pueden tener en cuenta:

- *Factores operativos:*
  - *área de la superficie requerida para la termopermutación*
  - *temperatura final del vapor*
  - *caudal másico total que pasará por los tubos*
  - *equilibrio de caudales en los distintos circuitos*
- *Factores mecánicos:*
  - *presión interna*
  - *temperatura de diseño*
  - *sistemas de soporte*
  - *tensiones de dilataciones térmicas relativas*
- *Factores medioambientales*
- *Resistencia a la oxidación por vapor y a la corrosión (picaduras), sobre la superficie interna de los tubos en los períodos de fuera de servicio*
- *Resistencia a la oxidación, corrosión y erosión por la ceniza del combustible, en la superficie exterior de los tubos*

Tensiones.- La Tabla VII.2 muestra las tensiones admisibles para una serie de tubos sin costura, que se pueden utilizar en un sobrecalentador de caldera para generación de energía eléctrica.

Tabla VII.2.- Tensiones admisibles de varios materiales para tubos sin costura
Fuente: Sección I, Código ASME para Calderas y Recipientes a presión

N°	Material	Temperaturas de metal que no excedan de, °F										
		700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
1	SA-210C	16,6	14,8	12	7,8	5	3	1,5	-	-	-	-
2	SA-209T1A	15	14,8	14,4	14	13,6	8,2	4,8	-	-	-	-
3	SA-213T2	15	14,8	14,4	14	13,7	9,2	5,9	-	-	-	-
4	SA-213T12	14,8	14,6	14,3	14	13,6	11,3	7,2	4,5	2,8	1,8	1,1
5	SA-213T11	15	14,8	14,4	14	13,6	9,3	6,3	4,2	2,8	1,9	1,2
6	SA-213T22	15	15	15	14,4	13,6	108	8	5,7	3,8	2,4	1,4
7	SA-213T91	20	19,4	18,7	17,8	16,7	15,5	14,3	12	10,3	7	4,3
8	SA-213TP304H	15,9	15,6	15,2	14,9	14,7	14,4	13,8	12,2	9,8	7,7	6,1

El espesor mínimo “e” de la pared tubular se calcula con la expresión:

$$e = \frac{p\,D}{2\,\sigma + p} + 0{,}005\,D\ ,\ \text{en la que:}$$

- p es la presión de diseño
- D es el diámetro exterior del tubo
- σ es la tensión admisible

El peso del tubo por unidad de longitud en ft, se calcula mediante la siguiente expresión, que incluye un factor de sobreespesor (1,11), normal para tubos sin costura:

$$\frac{Peso\ del\ tubo}{Longitud\ del\ tubo} = 10{,}69\,(D - 1{,}11\,e)\,1{,}11\,e$$

La Tabla VII.3 muestra los espesores mínimos de pared para la superficie de sobrecalentadores correspondientes a siete materiales, para un tubo de 2,5" (63,5 mm) y presión de diseño de 2975 psi (205 bar). Estas cifras ponen de relieve que sólo tres o cuatro materiales podrían ser los seleccionados para el sobrecalentador previsto: el SA-210C, el SA-213T12, el SA-213T22 y el SA-213T91.

Tabla VII.3.- Espesor mínimo de pared (in) en función de la temperatura de los materiales para sobrecalentador, tubos de diámetro 2,5" y presión de diseño = 2975 psi; (--), material no permitido para la temperatura de referencia

Nº	Material	Temperatura									
		700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150
1	SA-210C	0,218	0,241	0,288	0,413	0,586	0,841	--	--	--	--
2	SA-209T1A	0,238	0,241	0,247	0,253	0,259	0,396	0,604	--	--	--
3	SA-213T2	0,238	0,241	0,247	0,253	0,257	0,36	0,516	0,922	--	--
4	SA-213T12	0,238	0,238	0,241	0,25	0,267	0,31	0,472	0,678	--	--
5	SA-213T22	0,238	0,238	0,238	0,247	0,267	0,31	0,413	0,523	0,666	--
6	SA-213T91	0,185	0,191	0,197	0,205	0,217	0,231	0,248	0,271	0,328	0,451
7	SA-213TP304H	0,226	0,23	0,235	239	0,242	0,247	0,256	0,284	0,342	0,417

El paso del SA-210C al SA-213T12 se puede situar entre los $\begin{cases} 750°F \div 800°F \\ 399°C \div 427°C \end{cases}$

La sustitución del SA-213T12 por el SA-213T22 se puede realizar a una temperatura que depende del flujo de vapor que circula por el sobrecalentador, lo que ocurre entre $\begin{cases} 1000°F \div 1050°F \\ 538°C \div 566°C \end{cases}$

La sustitución del SA-213T22 por el SA-213T91 puede tener lugar entre $\begin{cases} 1050°F \div 1100°F \\ 566°C \div 593°C \end{cases}$

Como resultado de todo ésto, se podría necesitar sólo una pequeña longitud de SA-213T22, por lo que el diseño podría eliminar una soldadura, y pasar directamente del SA-213T12 al SA-213T91, a 1050 ºF, (566ºC).

Las Fig VII.23a.b.c. indican para diversos materiales, las curvas (tensión admisible-temperatura) en los principales campos de utilización de los mismos. Una consideración de diseño, que se deduce de estas familias de curvas, es la sensibilidad a las variaciones de la temperatura final que superen a la de diseño; los materiales con una baja reducción de resistencia cuando aumenta la temperatura, son mucho más tolerantes, con desvíos ocasionales sobre las especificaciones de servicio, que conduzcan a temperaturas que lleguen a superar la temperatura final de diseño.

En algunos casos, las consideraciones de una probable corrosión por la ceniza del combustible puede obligar a la utilización de aceros más aleados, en intervalos de temperaturas más bajas, lo

que es bastante frecuente en las calderas recuperadoras que se usan en procesos industriales, y en las calderas que queman basuras, porque generan gases y cenizas con elevado potencial corrosivo.

Por ejemplo, la aleación 825, SB-407-825 (42 Ni + 21,5 Cr + 3 Mo + 2,25 Cu + 0,9 Ti + resto Fe), se utiliza en zonas altamente corrosivas de los sobrecalentadores de calderas que queman basuras, incluso para temperaturas inferiores a 1000ºF, (538ºC).

En casos extremos, se han utilizado tubos bimetálicos con un núcleo de material para soportar la presión y un revestimiento de aleación resistente a la corrosión.

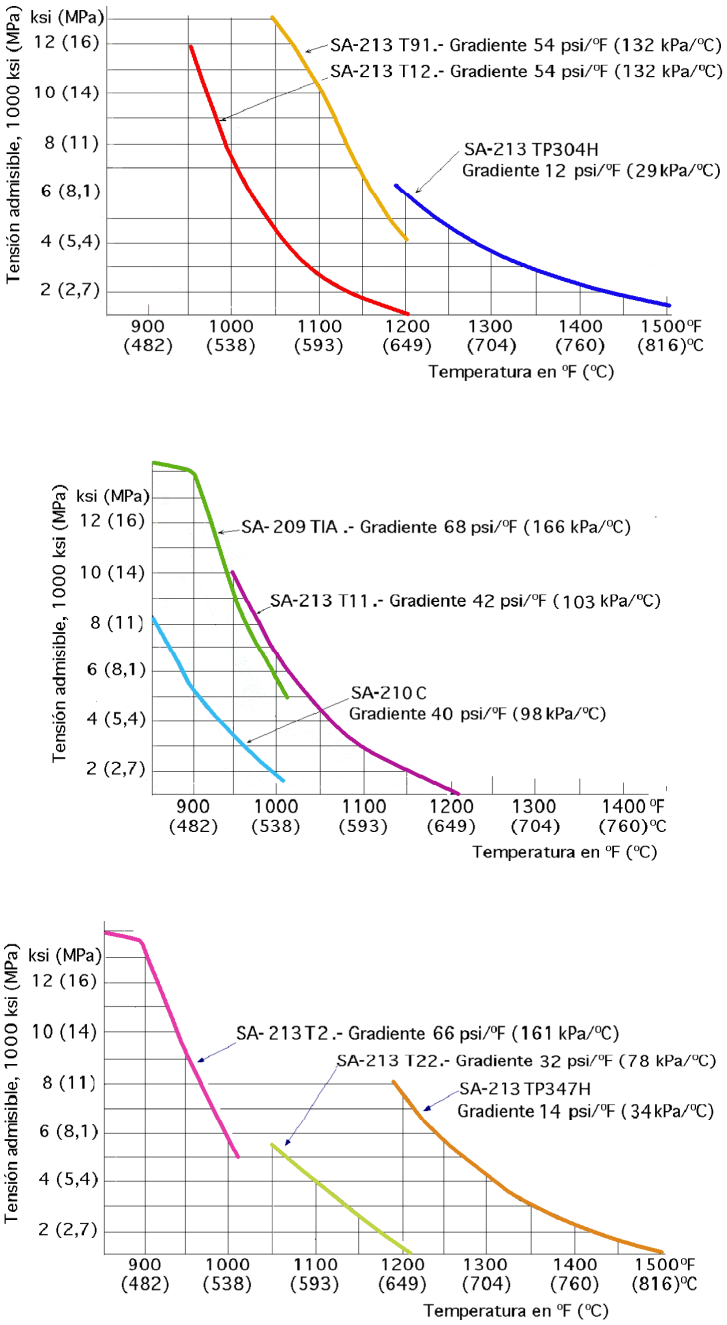


Fig VII.23a.b.c.- Sensibilidad de la tensión admisible con cambios de temperatura

Colectores y tuberías.- Las especificaciones de la mayoría de las tuberías que se utilizan normalmente, están recogidas en la Tabla VII.1. Los componentes de colectores y tuberías no se ubican dentro del flujo de gases por lo que no están calentados por éstos directamente, por lo que el parámetro de diseño, salvo la resistencia mecánica, es la resistencia a la oxidación por el vapor.

Para evitar la grafitización en el exterior del generador de vapor, los aceros al C no se emplean por encima de los 800ºF, (427ºC)

Los aceros al (C-Mo) se limitan a aplicaciones de tamaño pequeño, diámetros menores de 10,75" (273 mm), y por debajo de 875ºF, (468ºC)

La aleación (9Cr + 1Mo + Va) está sustituyendo al acero (2,5Cr + 1Mo) en los colectores de salida de sobrecalentadores, ya que en la mayoría de los componentes de calderas, no opera dentro del campo de fluencia, incluso para temperaturas de diseño comprendidas entre $\begin{cases} 1000°F \div 1050°F \\ 538°C \div 566°C \end{cases}$

Esta circunstancia y su elevada resistencia conducen a componentes más delgados, que son menos susceptibles de fallos provocados por la fatiga de fluencia observada en antiguos colectores fabricados con el (1,5Cr + 1,5Mo + Si) y con el (2,5Cr + 1Mo).

El empleo de conexiones de salida forjadas, en lugar de soldadas, reduce posibles fallos de estas grandes conexiones tubulares.

Calderines.- En la fabricación de calderines se utiliza el acero al C. Para calderines con paredes gruesas > 4" (101,6 mm), se emplea el acero de grano fino SA-299, con una resistencia a la tracción de 75.000 psi (517,1 MPa), idóneo para alcanzar una buena tenacidad.

En paredes de menor espesor 1,5" < e < 4", se utiliza el SA-516-Gr70 con grano fino y resistencia a la tracción de 70.000 psi (482,7 MPa).

En carcasas delgadas se usa el acero fundido de grano grueso SA-515-Gr79.

Aceros termoresistentes para partes no presurizadas.- Los materiales termoresistentes de alta aleación se utilizan en algunas partes de la caldera expuestas a altas temperaturas y que no se pueden refrigerar por agua o por vapor; estas partes están fabricadas con aleaciones tipo (Cr-Ni-Fe) resistentes a la oxidación y elevada resistencia a la tracción; muchas de estas fundiciones se destinan a configurar accesorios como deflectores, soportes y colgantes.

También se construyen con estos aceros termoresistentes los impulsores de los mecheros de aceite y las abrazaderas y colgantes-soporte del sistema de sopladores de hollín. El deterioro de estos componentes se manifiesta por la conversión de sus capas superficiales en óxidos, sulfuros o sulfatos, y en este supuesto se dice que está quemado u oxidado.

Los aceros (25 Cr + 12 Ni) y (25 Cr + 20 Ni) facilitan una vida de servicio buena, dependiendo

de la ubicación que la parte considerada tenga en el flujo de gases y de las características del combustible.

La temperatura a la que estas partes pueden estar expuestas varía entre $\begin{cases} 1000°F \div 2800°F \\ 538°C \div 1538°C \end{cases}$, evitándose las soldaduras de estas fundiciones austeníticas con tubos de aleaciones ferríticas, para minimizar los fallos en soldaduras entre metales distintos.

La vida de estos componentes se acorta si los aceros citados se exponen a los gases de combustión, especialmente si proceden de la combustión de aceites con alto contenido en Va.

Los sulfuros que se forman en la combustión de combustibles que tienen un elevado contenido en S, son dañinos y, por supuesto, reducen la vida de servicio; estos sulfuros pueden reaccionar, especialmente en presencia de Va, y provocar una velocidad de ataque del metal muy grande, si la temperatura de éste excede de 1700ºF, (649ºC).

La combinación de compuestos de Na, S y Va funde a 1050ºF (566ºC); los depósitos y deposiciones de estos compuestos son muy corrosivos cuando se funden, a causa de su acción escorificante; para hacer frente a esta corrosión lo mejor es utilizar las fundiciones (30Cr + 50Ni) ó (60Cr + 40Ni).

VII.12.- EQUIPOS MEDIOAMBIENTALES

Desulfuración de humos.- Se utiliza para reducir las emisiones de SO_2 en las calderas que queman combustibles fósiles. La depuración y lavado del SO_2 contenido en los gases de combustión se realiza por medio de la saturación de los gases con una lechada de un producto altamente reactivo, en torre de absorción, con flujos en contracorriente.

Entrada en la torre de absorción.- La entrada a la torre de absorción se considera zona *húmeda/seca*, porque está expuesta a ambos ambientes, $\begin{cases} \text{- el flujo entrante seco de gases calientes} \\ \text{- los rociadores de lechada del reactivo} \end{cases}$, y está ubicada en la zona en la que las condiciones de corrosión son más severas.

En la interfaz húmeda/seca se presentan, a veces, condiciones muy ácidas, en particular con altos niveles de cloruros y fluoruros. Para esta interfaz, debido a las altas temperaturas presentes, se seleccionan metales aleados con Ni, en lugar de los revestimientos no metálicos como:

C-276 = 2,5 máx Co + 15,5 Cr + 16 Mo + 3,75 W + 5,5 Fe + resto Ni
C-22 = 2,5 máx Co + 4 Fe + 21 Cr + 13,5 Mo + 0,3 V + 3 W + resto Ni

Zona humidificada por rociado en la torre de absorción.- Esta zona de la torre de absorción es la única que está expuesta a condiciones corrosivas y abrasivas. Los rociadores de lechada dentro de la torre de absorción, están dispuestos de forma que se garantice la cobertura de toda el área de la sección transversal y, por tanto, de que se elimine el establecimiento de cualquier circulación de flu-

jo no tratado a través de los rociadores. En la fabricación de las torres de absorción se utilizan aceros austeníticos inoxidables que contienen Mo.

Sin embargo, los niveles de solución de cloruros exceden de los valores en los que son efectivos los aceros inoxidables, por lo que los únicos materiales viables para esta zona de la torre de absorción humidificada por rociado, son aceros: $\begin{cases} \text{- } \textit{inoxidables dúplex} \\ \text{- } \textit{al C forrados con} \begin{cases} \textit{elastómero clorobutil ó} \\ \textit{plástico reforzado con fibra de vidrio} \end{cases} \\ \text{- } \textit{altos en Ni} \end{cases}$

Dado el alto precio de los aceros inoxidables y de los aceros altos en Ni, se prefiere utilizar el acero al C forrado con láminas de elastómero clorobutil o plástico reforzado con fibra de vidrio, soldadas a las chapas de acero al C.

Tanque de recirculación en la torre de absorción.- El tanque de recirculación está integrado en la estructura de la torre; los materiales para el mismo son similares a los de la zona húmeda de rociadores de la torre de absorción. Los aceros inoxidables, o los que contienen Mo, proporcionan un excelente servicio dependiendo de la química del sistema, pero una inversión mínima inicial implica utilizar revestimientos plásticos reforzados con fibra de vidrio, siendo la alternativa de mejor coste la que corresponde al empleo de un revestimiento de elastómero clorobutilo. El inconveniente de estos revestimientos radica en su vida limitada ($10 \div 15$ años), siendo ambos tipos de revestimiento susceptibles de admitir una capa de ladrillo superpuesta.

Colectores con rociadores internos.- Las tuberías de los sistemas de desulfuración de humos son las únicas que deben tener resistencia a la abrasión, lo mismo por su superficie interior como por la exterior. Se han empleado también tuberías de acero al C, revestidas y recubiertas de elastómeros, pero resultan caras y es difícil determinar la extensión de una corrosión en el sustrato. En la actualidad se utiliza una tubería de plástico reforzada con fibra de vidrio y resina sintética.

Separadores de humedad.- Los sistemas antiguos de depuración de humos, utilizaban separadores de humedad fabricados con aceros inoxidables, debido a la variación de las temperaturas.

Una vez mejorada la $\begin{cases} \text{- } \textit{fiabilidad de las torres de absorción} \\ \text{- } \textit{estabilidad de las temperaturas} \end{cases}$, la tendencia ha evolucionado hacia los separadores de humedad construidos en plástico, que mejoran la resistencia a la corrosión, resultando frecuentes los separadores de humedad fabricados con fibra de vidrio, reforzados con resinas termoplásticas.

Zona de salida y separador de humedad en la torre de absorción.- Esta zona está expuesta a un medio ambiente distinto de los anteriores, por cuanto no predomina la lechada abrasiva de recirculación de cloruros; para el lavado del separador de humedad existe un agua blanda que se combina con el SO_2 residual de los gases, para formar ácido sulfúrico SO_4H_2. En esta zona, como la resis-

tencia a la abrasión no constituye un factor preponderante, no es necesario utilizar un forro de elastómero, siendo suficiente un acero al C revestido de plástico reforzado con vidrio en escamas.

Flujo de gases aguas abajo del by-pass.- En algunas unidades de depuración de gases de combustión, se instala un by-pass que rodea la torre de absorción, conectando la salida de la torre con el flujo aguas arriba de la misma; la salida del bipaso está expuesta al ambiente altamente corrosivo de los gases lavados y calientes. Como las temperaturas son del orden de 300ºF (149ºC), en esta sección de los conductos de humos se suelen utilizar, entre otros, revestimientos con bloques de vidrio celular de borosilicato.

REFERENCIAS CAP VII.- METALURGIA, MATERIALES Y ENSAYOS UTILIZADOS EN LOS GENERADORES DE VAPOR

Bain E.C., Paxton H.W.- ALLOYING ELEMENTS IN STEEL.- American Society for Metals.- Metals Park, Ohio.- 1961

Swaling R.A.- THERMODYNAMICS OF SOLIDS.- Wiley, New York.- 1962

Hayden H.W.- THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MATERIALS.- Vol.III, Mechanical Behavior.- Wiley, New York.- 1965

McGannon H.E.- THE MAKING, SHAPING AND TREATING OF STEEL.- 9^{th}.Edition, United States Steel, Pittsburgh.- 1970

Long C.J., DeLong W.T.- THE FERRITE CONTENT OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL WELD METAL.- Welding Journal, Research Supplement, pp. 2818-2978, Vol. 52 (7).- 1973

Gold M.- THE EFFECT OF VARYING DEGREES OF COLD CORK ON THE STRESS-RUPTURE PROPERTIES OF 304 STAINLESS STEELS.- Trans. ASME.- J. Eng. Materials and Technology, (1975)

Higgings R.A.- PROPERTIES OF EMGINEERING MATERIALS.- Hodder and Staughton, London (1979)

Benjamin D.- PROPERTIES AND SELECTION: STAINLESS STEELS, TOOL MATERIALS AND SPECIFIC PURPOSE METALS.-Metals Handbook, 9^{th}. Edition, Vol. 3, American Society for Metal, Ohio, (1980)

Weisman C.- WELDING HANBOOK.- 7^{th} Edition, Vol. 1, p.272, American Welding Society, Florida (1981)

Sikka V.K.- MODIFIED 9Cr+1Mo STEEL AN IMPROVED ALLOY FOR STEAM GENERATOR APPLICATION.- Ferritic Steels for High Temperature Applications, Proceedings of ASM International Conference, Pennsylvania (1981)

Barna J.L., Daniel P.L.- FURNACE WALL CORROSION IN REFUSE-FIRED BOILERS.- American Society of Mechanical Engineers, 12^{th}. Biennial National Waste Processing Conference, Colorado, (1986)

Rudd A.H., Tanzosh J.M.- DEVELOPMENTS APPLICABLE TO IMPROVED COAL-FIRED POWER PLANTS.- 1^{st} EPRI International Conference, California, Electric Power Research Institute (1986)

Barson J.M., Rolfe S.T.- FRACTURE AND FATIGUE CONTROL IN STRUCTURES.- 2^{nd}.Edition, Prentice-Hall, New Jersey , (1987)

Viswanathan R.- LIGAMENT CRAKING AND THE USE OF MODIFIED 9Cr+1Mo ALLOY STEEL (P91) FOR BOILER HEADERS.- ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Tennessee, American Society of Mechanical Engineers, New York, (1990)

Prager M., Cantzlereds C.- NEW ALLOYS FOR PRESSURE VESSELS AND PIPING.- ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Tennessee, American Society of Mechanical Engineers, New York, (1990)

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40^{th}.Edition, Chapter 6, The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, USA, (1992)