

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Centro de Investigaciones de Soldadura

TRABAJO DE DIPLOMA

**Título: Selección de Aceros para Componentes Críticos en
Calderas de Vapor**

Autor: Oel Julio Acosta Alvarez

Tutor: Alejandro Baldomero Duffus Scott

Santa Clara, junio de 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830
Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Dedicatoria:

A mis padres, por estar siempre conmigo en cuerpo y alma, gracias por su paciencia y todo el amor.

A mi hermana por todo el cariño y comprensión que me ha dado durante mi vida.

A Yaikel por brindarme todo el apoyo y ayuda posible.

Para ellos es esta tesis, pues es a ellos a quienes se la debo por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

A la Facultad de Ing. Mecánica por permitir mi formación en sus aulas, a los profesores por las enseñanzas impartidas, confianza, apoyo y dedicación.

Gracias a mi tutor el Dr. Alejandro B. Duffus Scott por su orientación y enseñanzas.

A Lisy porque como dijo nuestro apóstol, “Solo el amor convierte en milagro el barro”.

A Roberto y Armandito por compartir todos estos años juntos, por lo que vivimos y por lo que se nos pasó, gracias por todo.

Gracias a todos lo que no están en mi memoria, pero que indiscutiblemente estuvieron en mi vida.

Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio acerca de los aceros más utilizados en los componentes críticos de calderas de vapor, teniendo en cuenta la composición química, temperatura y presión de trabajo. Se hace un análisis de los principales métodos de selección de aceros tales como, el método tradicional, método gráfico y el método con ayuda de bases de datos. Se analiza la influencia de la temperatura y el tiempo en los fenómenos de fluencia y resistencia a largo plazo. Se brinda un conjunto de tablas con la composición química y propiedades mecánicas de varios aceros y su empleo para los diferentes elementos críticos utilizados en la fabricación de calderas de vapor. Por último, se establecen los criterios de equivalencia de un grupo de aceros, a partir de su composición química, propiedades mecánicas y soldabilidad, además se proporcionan algunos ejemplos prácticos de equivalentes de aceros en diferentes estándares internacionales.

Abstract

In the present work a study is made about the most used steels in the critical components of steam boilers, taking into account the chemical composition, temperature and working pressure. An analysis is made of the main methods of selection of steels such as, the traditional method, graphical method and the method with the help of databases. The influence of temperature and time on the phenomena of creep and long-term resistance is analyzed. It provides a set of tables with the chemical composition and mechanical properties of various steels and their use for the different critical elements in the manufacture of steam boilers. Finally, the equivalence criteria of a group of steels are established, based on their chemical composition, mechanical properties and weldability, and some practical examples of steel equivalents are provided in different international standards.

Índice

Introducción	1
Problema ingenieril	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Tareas de la investigación	2
Capítulo 1: Marco Teórico	3
1.1 Introducción	3
1.2 Métodos de selección de materiales	4
1.2.1 Método tradicional	7
1.2.2 Método gráfico	7
1.2.3 Método con ayuda de bases de datos	9
1.3 Características de las calderas de vapor	9
1.3.1 Componentes críticos y zonas críticas de las calderas de vapor	10
Conclusiones parciales	12
Capítulo 2: Materiales utilizados para la construcción de las calderas de vapor	13
2.1 Introducción	13
2.2 Aceros y aleaciones resistentes a altas temperaturas	14
2.2.1 Resistencia a altas temperaturas	15
2.2.2 Valoración de las propiedades de resistencia a altas temperaturas	20
2.3 Clasificación de los materiales resistentes a altas temperaturas	20
2.3.1 Aceros perlíticos y martencíticos resistentes a altas temperaturas	22
Conclusiones parciales	26
Capítulo 3: Selección de aceros equivalentes	27
3.1 Introducción	27
3.2 Aspectos a tener en cuenta para establecer la equivalencia	28
3.2.1 Composición química	28
3.2.2 Propiedades mecánicas	29
3.2.3 Soldabilidad	29
3.3 Ejemplos del uso de los aceros equivalentes	30
3.3.1 Tubos de las calderas de la central termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” afectados por termofluencia	30
3.3.2 Domo de la caldera de los bloques de 158 MW de la central termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”	31
3.3.3 Domo de caldera en el central azucarero “Majibacoa” en Las Tunas afectado por degradación estructural	33
3.3.4 Domos de diversas calderas en el país	34
Conclusiones parciales	36
Conclusiones Generales	37
Recomendaciones	38
Bibliografía	39
Anexos	42
Relación de Tablas	52
Relación de Figuras	53

Introducción

Uno de los problemas más serios que tuvieron los ingenieros al final del siglo XIX era la explosión de las calderas de vapor. El calentamiento del agua para producir vapor a presión generaba una gran cantidad de energía utilizada para mover diferentes maquinas, construidas para soportar altas presiones, se realizaron diversos tipos de recipientes y estos poseían una incontrolada presurización del vapor, estas calderas eran fabricadas principalmente de hierro, pero este material debido a su elevado peso y fragilidad ha sido sustituido gradualmente por los aceros. Para mantener el buen funcionamiento y la seguridad en las instalaciones, las calderas eran controladas diariamente en tierra y en mar tratando de evitar explosiones con terribles consecuencias, para lograr esto, la American Society of Mechanical Engineers (ASME) creó el Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión[1], publicado por primera vez en 1914, creando así un estándar de diseño, reparación y capacitación para lograr el buen funcionamiento de las calderas de vapor.

En nuestro país, existen conocimientos dispersos sobre la selección de aceros para componentes críticos en calderas de vapor, pero estos conocimientos no están organizados en un sistema que permita orientar a los especialistas en el enfrentamiento de los problemas relacionados con la selección y reparación de aceros teniendo en cuenta la componente de los cambios estructurales que estos sufren cuando están sometidos a altas temperaturas.

Otro problema que se enfrenta es la obtención de los aceros para la construcción de las calderas, debido al injusto bloqueo económico impuesto por los Estados Unidos es muy difícil obtener los aceros indicados por la norma ASME [1], por tanto es necesaria la creación de una recopilación de aceros equivalentes a los mencionados por esta norma, evitando así la mala selección de aceros para calderas debido al desconocimientos de las normas internacionales utilizadas por los proveedores de aceros.

Además, este proyecto de trabajo de diploma constituye una solicitud directa de la Fábrica de Calderas de Sagua ya que las proyecciones de AZCUBA son fabricar calderas de hasta 67 atm de presión de trabajo y 520 °C de salida del vapor

sobrecalentado, también estas calderas hoy se están manejando con inversión extranjera para las primeras bioeléctricas a instalar en ingenios del país.

Ante las situaciones mencionadas, existe la necesidad de desarrollar una guía para elegir aceros utilizados en componentes críticos de calderas, así como la selección de aceros equivalentes a los indicados por la norma ASME[1].

Problema ingenieril

Los métodos de selección de aceros para componentes críticos de calderas de vapor están muy dispersos en la literatura y no poseen los aceros equivalentes.

Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo consiste, en proporcionar una guía para la selección de los aceros para componentes críticos en calderas de vapor estableciendo un conjunto de aceros equivalentes en diferentes estándares internacionales.

Objetivos específicos

1. Establecer el marco teórico referencial del tema a investigar.
2. Proporcionar los métodos y las técnicas para la selección de aceros.
3. Listar aceros equivalentes en diferentes estándares internacionales.

Tareas de la investigación

Para lograr los objetivos del trabajo se plantean las siguientes tareas:

1. Revisión bibliográfica sobre los principales métodos de selección de materiales y los más utilizados para la fabricación de calderas de vapor.
2. Conocer las características de las calderas de vapor, teniendo en cuenta fundamentalmente: los tipos de calderas, los componentes que las constituyen, e identificar los componentes críticos con sus correspondientes zonas críticas.
3. Confección de tablas de aceros para calderas de vapor y sus equivalentes en diferentes normas internacionales.
4. Ejemplificar casos concretos de aplicación de aceros equivalentes en diferentes normas.

Capítulo 1: Marco Teórico

1.1 Introducción

La historia de los materiales se remonta en los orígenes de la humanidad. En la prehistoria, hace un millón de años aproximadamente, se divide en tres épocas importantes: Edad de Piedra, Edad de Bronce y la Edad de Hierro. En la Edad de Piedra (Paleolítico) el hombre utilizó los materiales de la naturaleza como la piedra, la madera, los huesos, el cuero y las pieles para la construcción de viviendas, diseño de vestuario, instrumentos y armas para la supervivencia. La experimentación que surgió hace más de 7000 años hoy se convierte en una investigación exhaustiva, metodológica y científica y gracias a esto surgen ciencias como la química y la física que han convertido la ciencia de los materiales en objeto de estudio[2].

En la actualidad el desarrollo tecnológico permite crear materiales con funciones específicas con un trabajo teórico-práctico obteniendo materiales con propiedades físicas, químicas, mecánicas, ópticas, magnéticas, eléctricas planteadas como requerimiento inicial[2].

La gran mayoría de avances tecnológicos logrados en la sociedad moderna, se han apoyado en el descubrimiento y desarrollo de materiales de ingeniería y proceso de fabricación usados en su obtención. Una adecuada selección de materiales y procesos, garantiza a los diseñadores de partes mecánicas el correcto funcionamiento de los componentes diseñados[2].

Según George E. Dieter de la Universidad de Maryland, la selección del material correcto para el diseño es un paso clave porque es la decisión crucial que une los cálculos del computador y las líneas en un dibujo ingenieril con un proyecto de diseño. Los materiales y el proceso industrial que convierten el material en una parte útil apuntalan todo el diseño ingenieril. La grandeza de la toma de decisiones en la selección de los materiales se da por el hecho de que hay más de 100,000 materiales para escoger. En un nivel más práctico, el típico ingeniero debe tener acceso a información de 50 a 80 materiales, dependiendo del rango de aplicaciones[3].

1.2 Métodos de selección de materiales

Desde el punto de vista práctico, la posibilidad de usar varios métodos y poderlos confrontar, garantiza una mayor eficiencia en la selección correcta del material con un fin específico, como en el caso de las partes críticas de las calderas de vapor, como se discutirá más adelante.

La mayoría de métodos parten de la disponibilidad de una amplia gama de materiales, los cuales se debe entrar a analizar y refinar, ya sea con ayuda de: recomendaciones (métodos tradicionales), mapas de materiales (método gráfico) o información escrita que se encuentra en fuentes bibliográficas o en forma de software en bases de datos virtuales. En general, el refinamiento se hace de acuerdo con las propiedades exigidas por el componente a diseñar y sustentado con criterios como: disponibilidad, facilidad de obtención, vida de servicio, factores ambientales y costos, entre otros. De esta forma, se llega a la selección de un único tipo de material, el cual debe resultar en el más apropiado para el fin pretendido[4].

La selección del tipo de material que se requiere para una aplicación determinada, es solo una de las fases en las que un diseñador o ingeniero de materiales se basa.

El conjunto de fases previas a la selección comprende:[5]

1. necesidad,
2. diseño conceptual,
3. diseño de formulación,
4. diseño en detalle
5. manufactura y montaje

Las actividades que llevan a la selección del material más adecuado se resumen en la **figura 1**.

Cabe mencionar, que para la utilización de cualquiera de los métodos de selección de materiales que existen, el diseñador o ingeniero de materiales, debe partir de la etapa conceptual, en la cual se identifica una categoría o categorías muy amplias como posibles materiales a usar[6].

El tipo y valor del esfuerzo aplicado y la forma geométrica, entre otras variables que deben considerarse, otorgan restricciones en cuanto al tipo de material a seleccionar. Por ejemplo, Está prohibido el uso de las aleaciones austeníticas para

las partes de las calderas sometidas a presión que estén mojadas por el agua durante el servicio normal, las aleaciones austeníticas son susceptibles a la corrosión intergranular y al agrietamiento por corrosión bajo tensión cuando se utiliza en aplicaciones de caldera en servicio mojada por el agua[1].

Por tanto, en la etapa de formulación del problema, se examina con mayor detenimiento cuál de los diferentes aceros se pueden usar con mayor confianza (si son aceros de bajo, medio o alto carbono o si son aceros de baja o alta aleación). La selección preliminar se puede hacer con base en los datos de propiedades dadas por los proveedores. De esta forma, se pueden identificar algunos de estos proveedores y en la selección final se trabaja con las propiedades dadas por el proveedor que facilite la consecución del material más adecuado y con mayor facilidad.

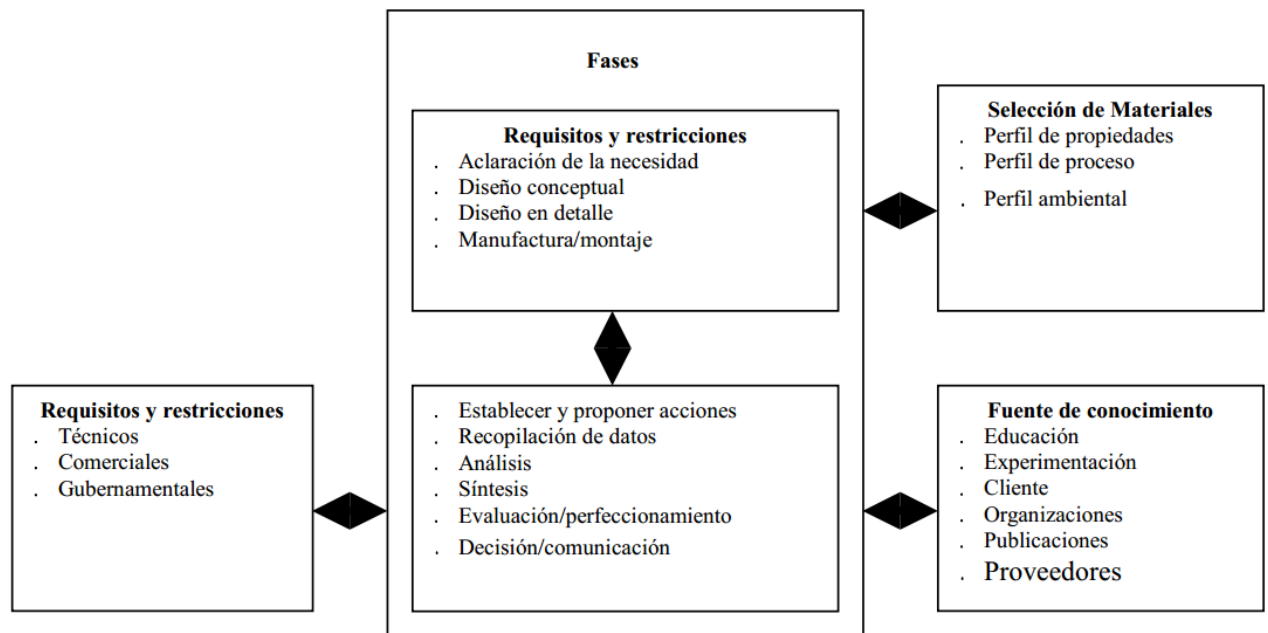


Figura 1. Etapas o fases del procedimiento para selección de materiales [6]

Un diseñador de materiales siempre está queriendo encontrar el material ideal para su componente. Se pueden mencionar, entre otras características, que un material ideal cumple con la siguiente lista de requisitos:[7]

1. Inagotable y siempre disponible para su reemplazo
2. que sea barato para refinar y producir
3. que sea fuerte, rígido, y dimensionalmente estable a diferentes temperaturas

4. que sea liviano
5. que sea resistente a la corrosión y al desgaste
6. que no tenga efectos sobre el medio ambiente o las personas
7. que sea biodegradable
8. que tenga numerosos usos

Estos requisitos hacen que el ingeniero de materiales tenga dificultad en seleccionar el material ideal. Es por esto, que se usan métodos más o menos exactos, que permiten hacer una aproximación del material más idóneo para alguna aplicación. En general, los métodos para selección de materiales se basan en una serie de parámetros entre físicos, mecánicos, térmicos, eléctricos y de fabricación que determinan la utilidad técnica de un material. Algunos de estos parámetros son mostrados en la **tabla 1**.

Tabla 1. Lista de propiedades de los materiales que suelen usarse al seleccionarlos[6, 7].

Propiedades insensibles a la microestructura	Propiedades sensibles a la microestructura
Densidad, Módulo de elasticidad, E Conductividad térmica Coeficiente de expansión térmica lineal, Punto de fusión, Tf Temperatura de transición vítrea, Tv para polímeros Costo por unidad de masa	Resistencia, (a la fluencia, a la tracción, última, etc.) Ductilidad Tenacidad a la fractura, Kic Fatiga y propiedades cíclicas, fatiga por corrosión Termofluencia Impacto Dureza
Otras propiedades	
Facilidad de colado Facilidad para tratar térmicamente Conformabilidad Maquinabilidad Soldabilidad	

Debido al alto número de factores que afectan la selección de materiales, el diseñador determina cuales son las propiedades más relevantes para la aplicación que se tiene y con base en ellas, hace la selección. En general los métodos para seleccionar materiales hacen una refinación más o menos amplia de estos parámetros. A continuación, se hace una breve descripción de tres de los métodos usados en la selección de materiales.

1.2.1 Método tradicional

Con este método, el ingeniero de materiales escoge el material que cree más adecuado, con base en la experiencia de partes que tiene un funcionamiento similar y que han mostrado buenos resultados. Este método es también conocido como materiales de ingeniería de partes similares[8].

El método mantiene buena aceptación debido a lo siguiente:

1. El ingeniero se siente seguro con un material usado y ensayado
2. En algunos casos esto contribuye a la estandarización del stock
3. Las características de proceso del acero son bien conocidas
4. La disponibilidad del acero está asegurada
5. Generalmente en un gran porcentaje de partes se usan aceros baratos, sin tratamiento térmico, evitando pérdida de tiempo en ensayos y procesos.

Sin embargo, el uso de este método, en ocasiones conduce a serios problemas, ya que no se hace un estudio real del ambiente de trabajo del componente o equipo, el cual puede ser decisivo a la hora de escoger el material.

1.2.2 Método gráfico

Este método se apoya en graficas (conocidas como mapas de materiales), en las que se relacionan por pares ciertas propiedades de los materiales. El método fue diseñado exclusivamente para ser utilizado durante la etapa conceptual de la selección de materiales. En estos mapas se puede hacer una aproximación del material más adecuado (perteneciente a una determinada familia de materiales), con base en la relación de las propiedades más importantes que debe poseer el componente. Como ejemplo de un par de propiedades que relacionan en estos mapas están el módulo de elasticidad en función de la densidad, como se muestra en la **figura 2**. Como es de esperarse, rara vez el comportamiento de un componente depende sólo de una propiedad. De igual manera, diagramas como los de Ashby[9], muestran que las propiedades de las diferentes clases de materiales pueden variar en amplios intervalos (dependiendo del estado de estos), formando grupos que se ubican en áreas cerradas, zonas o campos en tales diagramas. Eso significa, que una misma familia de materiales puede tener una apreciable variación en sus

propiedades, generando un campo o zona en los mapas. En estos mapas se relacionan entre otras, propiedades como resistencia, módulo de elasticidad, densidad, tenacidad, conductividad térmica, difusividad y expansión y costos. La escala logarítmica en la **figura 2**, también permite representar, por ejemplo, la velocidad longitudinal de una onda elástica a través del material $= (E/\rho)^{1/2}$ (o lo que es lo mismo $\text{Log } E = \text{Log.} - 2 \text{ Log.} \rho$), dibujada como líneas ocultas paralelas. Todos los campos de materiales que una línea de estas atraviere, significa que una onda se propagará por ellos con la misma velocidad. La selección de materiales con ayuda de estos mapas se hace entonces, encontrando con ayuda de cálculos de resistencia y aplicando criterios de falla de acuerdo a los esfuerzos aplicados, cuales son las combinaciones de propiedades más importantes para un componente dado.

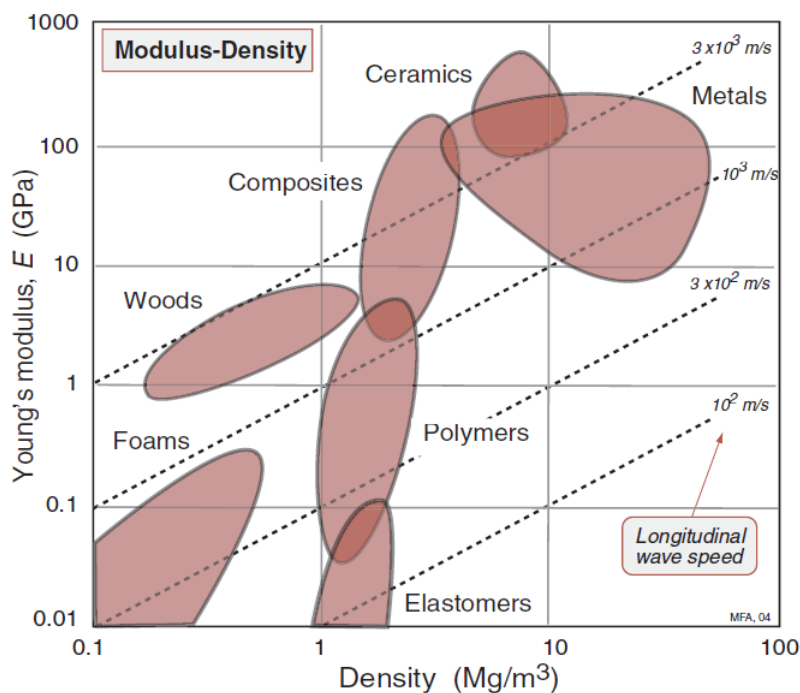


Figura 2. Gráfica en escala logarítmica que relaciona el módulo de elasticidad en función de la densidad del material, para varias familias de materiales[9].

Ubicado el diagrama que presenta esta combinación, se entra en un campo que corresponde a una familia determinada de materiales. De los materiales que pertenecen a esta familia, se puede hacer una preselección, y posteriormente una selección, teniendo en cuenta otros criterios como costos, disponibilidad, durabilidad, efecto ambiental, etc.

1.2.3 Método con ayuda de bases de datos

En la Internet existe una amplia gama de bases de datos sobre materiales[5], que han sido construidas para comercialización libre o son distribuidas por vendedores de materiales. Estas bases de datos son el resultado de investigaciones en ensayos de materiales[5]. Las bases de datos se dividen básicamente en dos categorías, numéricas y literarias o de referencias bibliográficas. Dentro de las más importantes bases de datos están el banco de datos de la ASTM, la SAE, la ASM, la AISI, la NASA, etc. Una base de datos pública que ha adquirido gran importancia por la cantidad de datos y variedad de materiales que maneja, puede ser consultada en la página web. www.matweb.com. [10] La selección de materiales con ayuda de estas bases de datos, parte del conocimiento de las principales propiedades que deben tener para un fin específico. El programa pide entonces el valor aproximado de las propiedades que debe tener el componente y lista uno o varios materiales que pueden servir. Son varias las fuentes donde se compilan bases de datos. En forma escrita, estas bases pueden ser encontradas en textos como los referenciados en la bibliografía de este artículo en los textos de referencia.

1.3 Características de las calderas de vapor

Actualmente, las calderas de vapor son instalaciones fundamentales que se utilizan en muchos procesos productivos que están asociados con la industria energética, azucarera, textil, alimenticia y con el sector de la salud.

A través de los años, en dependencia de las exigencias de los procesos productivos, se han desarrollado diferentes tipos de calderas de vapor, las cuales de acuerdo con The Babcock and Wilcox Company [11] se clasifican en:

1. acuotubulares y pirotubulares, en función de la posición relativa de los gases calientes y del agua;
2. verticales, horizontales e inclinadas, según la posición de los tubos en su interior;
3. de tubos rectos y de tubos curvados, de acuerdo a la forma de los tubos;
4. fijas, portátiles, locomóviles y marinas, por la naturaleza del servicio que desempeñan.

Con respecto a las calderas acuotubulares (**figura 8, anexo**), por el interior de los tubos circula agua o vapor mientras que los gases calientes de la combustión se encuentran en contacto con la superficie externa de aquellos. Estas calderas son empleadas por lo general cuando se requieren presiones superiores a 1 MPa y capacidades de más de 6 804 kg/h de vapor, inclusive suelen alcanzar presiones de trabajo hasta de 34 MPa en las centrales termoeléctricas según lo reporta Viswanathan [12, 13]. Una caldera acuotubular está constituida fundamentalmente por el domo, los tubos, los cabezales y el economizador [11].

En el caso de las calderas pirotubulares (**figura 9, anexo**) los gases calientes circulan por el interior de los tubos, los cuales se encuentran rodeados de agua. Las calderas pirotubulares generalmente tienen un hogar integral (denominado caja o tubo de fuego) limitado por superficies enfriadas por agua. Este tipo de caldera se utiliza para producir vapor a presión relativamente baja (hasta 1,6 MPa) y están compuestas principalmente por la cubierta, el tubo de fuego, los tubos, y las pantallas [11].

1.3.1 Componentes críticos y zonas críticas de las calderas de vapor

De los componentes que conforman a las calderas de vapor del tipo acuotubular o pirotubular se distinguen los componentes críticos, que de acuerdo a Viswanathan [13], Maia y Vianna [14], Hovinga y Nakoneczny [15], Nakoneczny [16] y a los reportes sobre incidentes proporcionados por el National Board Bulletin [17], son aquellos que provocan principalmente las siguientes consecuencias:

1. comprometen el proceso productivo por permanecer la caldera parada por largo período;
2. colocan en riesgo la vida del personal o provocan un efecto social perjudicial;
3. generan tiempos y costos elevados de mantenimiento.

Por los tres criterios mencionados y tomando en cuenta también el incremento de incidentes de las calderas de vapor con varios años en servicio reportados por Holbrook y King [18], Roland y col [19], King [20] y Eyckmans y col [21], se establece que los componentes críticos de las calderas de vapor son el domo, los colectores o

cabezales, los tubos, el economizador, el tubo de fuego, y la carcasa o cubierta **(figuras 8 y 9, anexo)**.

Dentro de los componentes críticos de una caldera de vapor en explotación, por lo que reportan Nakoneczny y Col [16, 22, 23], King [24, 25] y Hendrix y col [26, 27] en su trabajos sobre la valoración de la vida de los componentes de las calderas, del estudio realizado por Dooley y Col [28] acerca de las fallas en tuberías, del artículo de Alba y Murr [29] referente a la relación de la estructura con las fallas de los tubos y del análisis que realiza Tuurna y Col [30] con respecto a la valoración de vida de los tubos de las calderas, existen áreas susceptibles en las que se presentan con mayor frecuencia e incidencia modificaciones en las propiedades mecánicas originales del material de construcción del componente, las cuales son consideradas como zonas críticas. Estas zonas críticas son: las uniones soldadas, la sección o pared del componente, los dobleces, los cambios de dirección (codos y tees), los orificios para el ensamble de accesorios de los componentes y que actúan como concentradores de tensiones, los cambios de sección, las regiones de alta temperatura y los ligamentos.

Conclusiones parciales

- 1 La sección II sobre especificaciones de materiales ferrosos del código ASME para Calderas y Recipientes a Presión, así como el Handbook número 20 de la ASM Material Selection and Design relacionan los materiales a utilizar en calderas de vapor, pero no brindan ninguna información acerca de los aceros equivalentes a los mismos.
- 2 Los principales métodos utilizados para la selección de materiales son el método tradicional, gráfico y con ayuda de bases de datos.
- 3 El método de mapas de materiales, es una herramienta computacional que combina varias condiciones para seleccionar un material.
- 4 Los principales componentes críticos de una caldera de vapor son el domo, los colectores o cabezales, los tubos, el economizador, el tubo de fuego, y la carcasa o cubierta.

Capítulo 2: Materiales utilizados para la construcción de las calderas de vapor

2.1 Introducción

Las calderas de vapor se construyen usualmente a partir de chapas de acero que generalmente son conformadas y unidas mediante soldadura.

Actualmente existen normas, códigos o reglamentos que en gran parte de los países establecen los requerimientos de diseño, construcción e inspección de las calderas, recipientes a presión y tuberías. Una gran parte adopta lo que establece el código ASME [1] para calderas y recipientes a presión ya que es uno de los códigos de mayor reconocimiento, cobertura y aceptación a nivel internacional en la industria manufacturera de las calderas de vapor [31, 32]. Además, el referido código es continuamente revisado y actualizado para incorporar los nuevos requerimientos de diseño, de construcción, montaje, operación, inspección y mantenimiento de las calderas de vapor.

El código ASME está estructurado en XI secciones, dentro de las cuales se encuentra la sección II, que se refiere a los materiales para la construcción de las calderas, la cual contiene las partes A, B y C. Y particularmente en la parte A, se proporcionan las especificaciones para los materiales ferrosos, las cuales son resumidas por Viswanathan [13] en la **tabla 22 (anexo)**, en la que distinguen tres grupos de aleaciones, que se corresponden a los aceros al carbono de baja, media y alta resistencia, las aleaciones ferríticas al C-Mo y Cr-Mo y las aleaciones al Cr-Ni que se corresponden a los aceros inoxidables austeníticos. En la referida **tabla 22**, se proporcionan las formas comunes de las aleaciones en estado de entrega, las especificaciones de acuerdo al código ASME, el grado de la aleación, las propiedades de resistencia a la fluencia y tensión mínimas, así como la composición química nominal de las aleaciones.

Por otra parte, French [33] señala que del 85-90% de los materiales utilizados en la fabricación de los componentes de las calderas de vapor acuatubulares y pirotubulares corresponden a los aceros al carbono, C-0,5Mo, 1,25Cr-0,5Mo, 2,25Cr-1Mo y 18Cr-10Ni, los cuales agrupa en la **tabla 24 (anexo)** con las respectivas

temperaturas máximas de explotación, las cuales están por debajo de las temperaturas permitidas por el código ASME e inclusive de algunos fabricantes de calderas si se compara con los ejemplos proporcionados por Viswanathan [13] en la **tabla 25 (anexo)**. La aceptación de esas temperaturas máximas por parte de los fabricantes de calderas es con el fin de estar dentro de los límites que exige el código ASME y además para prevenir cambios en las propiedades de los aceros.

De los grupos de aceros resumidos en las **tablas 24 y 25** se destacan las siguientes particularidades:

1. Según French [33], los aceros al carbono están diseñados y especificados para temperaturas máximas de servicio de 454 °C.
2. En los aceros C-0,5Mo, la temperatura máxima de servicio es de 482 °C. De acuerdo a French [34-36], Thielsch [37] y Viswanathan [12], la presencia del Mo disminuye la posibilidad de la aparición de daños por debajo de esta temperatura.
3. En el caso de los aceros 1,25Cr-0,5Mo, la adición del 1,25% de Cr incrementa la temperatura máxima de servicio, siendo ésta de 552 °C [12, 13, 35].
4. Los aceros 2,25Cr-1Mo, tienen una temperatura máxima de servicio de 580 °C, lo cual es debido a la presencia y al incremento del % del Cr y Mo [35, 37].
5. En los aceros 18Cr-10Ni (inoxidables) el incremento del %Cr y la presencia del Ni [35, 37], los hace soportar temperaturas en servicio hasta 816 °C.

2.2 Aceros y aleaciones resistentes a altas temperaturas

Se entiende por aceros y aleaciones resistentes a altas temperaturas los que poseen elevadas propiedades mecánicas bajo altas temperaturas.

Durante los últimos años, en la técnica se emplean mucho las temperaturas elevadas y las altas presiones y tensiones.

Así en los años 20 del siglo pasado, en las instalaciones de calderas, a 350 °C de temperatura del vapor y 17,5 at de presión, para obtener 1kWh de energía eléctrica había que quemar 0,7 kg de carbón. En los años 40, la temperatura del vapor en las

instalaciones de calderas se elevó hasta 400 °C y la presión hasta 80-100 at, y para obtener la misma cantidad de energía era necesario quemar 0,5 kg de carbón. Finalmente, en las calderas modernas, que producen vapor de parámetros altos, la temperatura del vapor llega a 580 °C y la presión a 300 at, y el gasto de carbón para producir 1 kWh se ha reducido a 0,3 kg.

Se ha establecido que ha temperaturas altas el metal se comporta en muchos sentidos de un modo diferente que a temperaturas normales e incluso que a 300-350 °C.

Por esto, es natural que se le haya prestado gran atención a los aceros y aleaciones resistentes a altas temperaturas.

2.2.1 Resistencia a altas temperaturas

Por resistencia a altas temperaturas se entiende la amplitud del material para soportar cargas mecánicas a elevadas temperaturas.

La tensión que provoca la rotura del metal a altas temperaturas depende mucho del tiempo durante el cual se aplica la carga.

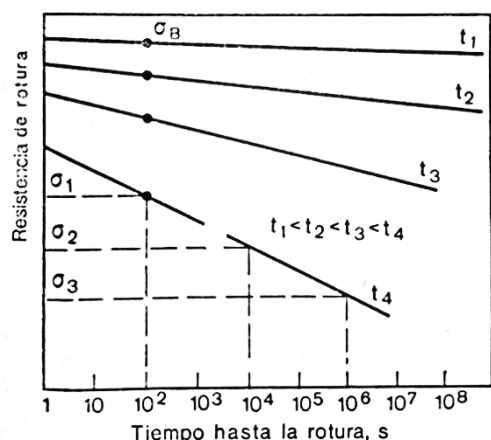


Figura 3. Dependencia de la resistencia con respecto a la duración de la prueba[38]

Puede ser grande, si la carga se aplica durante poco tiempo, y pequeña, si la carga actúa durante mucho tiempo.

Al mismo tiempo, cuanto más elevada sea la temperatura del metal, tanto menor será la tensión de rotura para una duración dada de actuación de la carga. Por consiguiente, en el caso general, la resistencia del metal a temperaturas elevadas viene determinada por dos factores: la temperatura y el tiempo.

En la **figura 3** se reproduce la forma general de la dependencia del tiempo que dura la aplicación de la carga a distintas temperaturas. Este tipo de diagramas es

correcto para muchos metales y aleaciones, de manera que la dependencia representada debe considerarse, en principio, como general para los metales. Como se ve en el diagrama, cuanto más baja es la temperatura, tanto menos la resistencia del metal depende del tiempo que dura la acción de la carga. A temperaturas altas, la dependencia de la resistencia con respecto al tiempo que dura la actuación de la carga se hace mayor como puede verse por el aumento del ángulo de inclinación de las rectas. Por encima de ciertas temperaturas, la resistencia disminuye tan rápidamente al aumentar la duración de la prueba, que carece de sentido técnico indicar solamente el valor de la resistencia, sin mencionar al mismo tiempo cuánto duró la acción de la carga.

En efecto, si a t_4 (**figura 3**) la tensión σ_3 provoca la rotura al cabo de 10^6 s, una mayor σ_4 la provocará al cabo de 10^2 s, es decir, 10000 veces antes.

De lo expuesto se deduce que a temperaturas bajas puede despreciarse la influencia del factor tiempo, pero a temperaturas altas este factor tiene una importancia decisiva.

A altas temperaturas, para valorar la resistencia del metal hay que tener en cuenta el factor tiempo. En este caso la resistencia se caracteriza por la denominada resistencia a largo plazo.

La resistencia a largo plazo es la resistencia a la rotura a una temperatura determinada, con la cual la rotura se produce al cabo de cierto tiempo de actuar el esfuerzo. La resistencia a largo plazo se designa por medio de la letra griega σ (sigma) con un subíndice que indica el tiempo que dura la acción de la carga en horas.

El proceso de fluencia se estudia en instalaciones especiales, las cuales registran automáticamente la llamada curva de fluencia, que caracteriza la deformación de la probeta con el tiempo, por la acción de la tensión constante. Una curva típica de fluencia se reproduce en la **figura 4**. En la curva de fluencia se distinguen varios tramos.

El tramo OA corresponde a la deformación elástica y plástica que se produce en el momento de aplicar la carga.

El tramo AB es el llamado no estacionario de la curva de fluencia. El metal se deforma con velocidad no uniforme retardada.

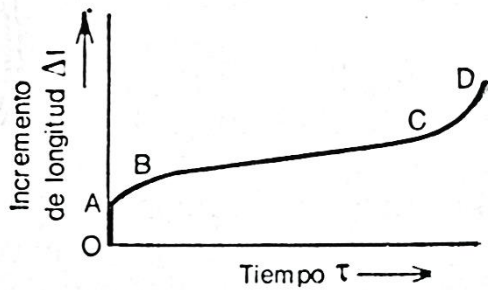


Figura 4. Curva de fluencia típica[38]

El tramo BC es el llamado de régimen de fluencia estacionario. El metal se deforma con velocidad uniforme. La tangente del ángulo de inclinación de la curva caracteriza la velocidad de fluencia.

El tramo CD es la última etapa de fluencia, que transcurre con aceleración ininterrumpida del proceso y concluye con la rotura en el punto D.

Los fenómenos que ocurren en el metal y que tienen relación con los procesos de fluencia, pueden describirse sucintamente como sigue.

La deformación plástica hace que se endurezca el metal (acritud). Si la temperatura es alta, la movilidad de los átomos es suficientemente grande y se elimina el endurecimiento (acritud) producido por la deformación plástica. Así, pues, durante el proceso de fluencia se desarrollan dos procesos que compiten entre sí: el endurecimiento del metal por la deformación plástica y su ablandamiento por la acción de la alta temperatura.

Por debajo de la temperatura a la cual transcurre con velocidad apreciable el proceso de ablandamiento (para el hierro 350 °C), el fenómeno de la fluencia prácticamente no se observa. Por consiguiente, la temperatura de ablandamiento determina el límite por encima de cual fluye el metal.

Si a una temperatura dada que puede ser mayor a la temperatura de recrystalización e valor de la tensión es inferior al límite de elasticidad del metal a dicha temperatura, es evidente que la tensión sólo producirá deformaciones elásticas. Si no hay deformación plástica, no habrá endurecimiento ni ablandamiento ni fluencia.

Por lo tanto, el fenómeno de la fluencia se pondrá de manifiesto en los casos siguientes:

- A temperaturas superiores a la de recristalización
- Con tensiones superiores al límite de elasticidad.

De esto se deduce que la velocidad de fluencia será tanto mayor, cuanto más rápidos sea el ablandamiento del metal por la acción de los procesos de recristalización definidos por la fuerza de los enlaces interatómicos y cuanto menor sea su resistencia en los ensayos de poca duración.

Par evitar totalmente el fenómeno de la fluencia hay que hacer que la temperatura de recristalización del metal sea más alta que la temperatura de trabajo o que su límite de elasticidad sea mayor que la tensión de trabajo a la temperatura dada.

Pero estas condiciones no pueden cumplirse siempre y es frecuente que en las construcciones no se consiga evitar totalmente la fluencia, sino solo retardarla. Como la velocidad de fluencia depende de la composición y de la estructura del metal, se tiende a disminuirla con una aleación o un tratamiento térmico conveniente. Con esto disminuye la velocidad de los procesos de ablandamiento a las temperaturas dadas, lo que se consigue cuando aumentan los enlaces interatómicos en el metal o disminuye la magnitud de la deformación plástica provocada por las tensiones dadas mediante la elevación de la resistencia del metal a la temperatura dada.

Ya hemos dicho antes que cuanto más elevada sea la temperatura de fusión del metal, tanto mayor será su temperatura de recristalización. Por esto, para hacer piezas resistentes a altas temperaturas se emplean metales con temperaturas de fusión elevada.

Considerando, en el aspecto histórico, el desarrollo de las aleaciones resistentes a altas temperaturas, puede llegarse a la conclusión de que para cada grupo de aleaciones se ha alcanzado ya el límite. No obstante, existen aún vías de perfeccionamiento de dichas aleaciones.

1. La metalurgia ha introducido en la industria una serie de nuevos procesos que aseguran no sólo una elevada depuración con respecto a las impurezas nocivas, sino también una densidad mayor mediante la formación de un frente de cristalización dirigido.

2. Han aparecido y se están empezando a aplicar nuevos procesos de deformación, y algunos metales de grado de aleación y resistencia a altas temperaturas bastante elevados, que antes se tenían por inservibles para ser empleados en estado deformado, ahora pueden utilizarse.
3. Elementos que antes se consideraban exóticos y de utilización inadmisibles, pueden emplearse ahora, aunque a escala limitada, claro está, como componentes de aleación y como base de aleaciones (tantalio, renio, hafnio, niobio y otros).
4. Han aparecido ideas nuevas en principio de creación de piezas de aleaciones resistentes a altas temperaturas (de materiales compuestos, monocristalinos, de materiales en polvo y otros).
5. Se han ensanchado y profundizado los conocimientos sobre la naturaleza de los materiales metálicos, sobre la naturaleza de la resistencia en general y de la resistencia a altas temperaturas; se perfeccionan los métodos de ensayo.

La utilización de los nuevos procesos tecnológicos de producción y elaboración de las aleaciones proporciona el aumento de dicha resistencia si al mismo tiempo se cambia la composición química.

Así, por ejemplo, a igualdad de composición, atendiendo a los componentes de aleación principales, la resistencia a altas temperaturas del metal más puro, obtenido al vacío, no aumenta, sino que incluso disminuye un poco, pero su plasticidad es mayor y permite aumentar el volumen de la fase dispersa endurecedora y de ese modo lograr que su resistencia sea mayor a altas temperaturas. Es de suponer que este hecho se deba a que la solubilidad de la fase endurecedora en el metal puro es mayor y se forma un volumen mayor de inclusiones dispersas que elevan la resistencia a altas temperaturas.

Así, pues, las propiedades de resistencia a altas temperaturas vienen determinadas en primer lugar por la naturaleza del componente principal del metal, después, por su aleación, y finalmente, por los regímenes del tratamiento térmico precedente que hacen que la aleación tome una u otra estructura.

2.2.2 Valoración de las propiedades de resistencia a altas temperaturas

Las propiedades de resistencia a altas temperaturas no pueden caracterizarse con un solo parámetro cualquiera, ya que las condiciones que se imponen a los materiales que las tienen son diversas.

En la actualidad se aceptan las siguientes características de resistencia a altas temperaturas:

El límite de fluencia (σ_{fl}), (o carga límite de fluencia), es la carga que provoca una velocidad de deformación dada a una temperatura también dada. Por ejemplo, el límite de fluencia puede caracterizarse por la carga que provoca una deformación total del 1% en 300h (en el tramo OAB, véase la **figura 4**).

Para las piezas que trabajan durante plazos largos (años), el límite de fluencia debe caracterizarse por una deformación pequeña producida por la aplicación de la carga durante largo tiempo. En estos casos se tiene en cuenta la deformación acumulada solamente en la zona en que la velocidad de fluencia es estable (en el tramo BC, véase la **figura 4**). Para este tramo también se establece el límite de deformación tolerable, por ejemplo, el 1% en 10000h o el 0,1% en 100000h u otro.

Es evidente que en este último caso las tensiones correspondientes al límite de fluencia serán mucho menores que, por ejemplo, cuando se da el 1% de deformación en 300h. Cuanto mayor sea la temperatura y menor la deformación tolerada, tanto menor será el valor límite de fluencia.

La resistencia a largo plazo (σ_t), se define como la carga que provoca la rotura a una temperatura determinada en un plazo de tiempo dado.

Si este tiempo se toma igual a 100h, la carga que provoca la rotura en este intervalo de tiempo será la resistencia al cabo de 100h. La carga que provoque la rotura al cabo de 300h será, evidentemente, menor que aquella que la produzca al cabo de 100h.

2.3 Clasificación de los materiales resistentes a altas temperaturas

Conviene recordar que las propiedades mecánicas de distintas aleaciones a una temperatura dada pueden no conservarse en la misma proporción a otras temperaturas. El proyectista, al elegir el material, debe saber que una aleación

determinada es la óptima, por sus propiedades de resistencia, en el intervalo de temperaturas de trabajo dado.

En la **figura 5** se da la resistencia mecánica a corto plazo (resistencia a la rotura) de varios grupos de aleaciones a temperaturas diferentes.

Por debajo de los 300 °C tienen más resistencia los aceros de construcción simples 1, tratados para que tengan una resistencia alta. El fenómeno de la fluencia no se observa a temperaturas inferiores a 350-300 °C, de modo que si las temperaturas de trabajo son inferiores a 300 °C no es necesario utilizar aceros o aleaciones especiales resistentes a altas temperaturas.

Para trabajos en el intervalo 350-500 °C son óptimos por sus cualidades los aceros relativamente poco aleados de las clases perlítica y ferrítica 2. Cuando la temperatura aumenta hasta 500-650 °C, la resistencia de los aceros de este tipo disminuye bruscamente, cediendo ante los aceros de clase austenítica 3, y a 650-900 °C los aceros de clase austenítica ceden el primer puesto a las aleaciones ricas a base de cobalto y de níquel 4. A temperaturas mayores de 900 °C ocupan el primer puesto las aleaciones a base de metales de alta temperatura de fusión (molibdeno, cromo, etc.).

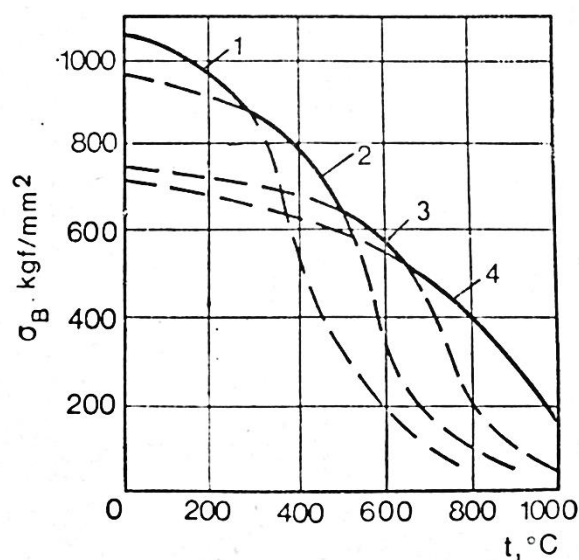


Figura 5. Resistencia a la rotura (instantánea) de diversas aleaciones en dependencia de la temperatura de ensayo

1, acero al cromo-níquel de construcción; 2, acero ferrítico resistente a altas temperaturas; 3, acero austenítico resistente a altas temperaturas; 4, acero al níquel resistente a altas temperaturas[38]

Los límites indicados solo pueden servir de orientación. Disminuyendo la carga de trabajo puede ensancharse la región de empleo de las aleaciones que de ordinario se utilizan a temperaturas más bajas, hasta temperaturas más elevadas, lo que a veces resulta conveniente por razones tecnológicas y de economía.

2.3.1 Aceros perlíticos y martencíticos resistentes a altas temperaturas

Los aceros que en la construcción de calderas se utilizan principalmente para hacer las tuberías conductoras de vapor, los recalentadores, las piezas de sujeción y otras sometidas a cargas mecánicas de larga duración a temperaturas moderadamente altas, no mayores de 500-600 °C. Estos son aceros de la clase perlítica, martencítica (bainítica) y ferrítica. Para todos estos aceros es común el tener como base solución sólida α y como fase excesiva, carburos de diversa estructura y procedencia.

La composición de los aceros de este tipo más empleados en calderas se recoge en la **tabla 26 (anexo)**. Todos los aceros que se dan en la mencionada **tabla 26** contienen menos del 0,15-0,18% de C, porque de ellos se hacen principalmente tubos que han de someterse a soldadura a tope (el aumento del contenido de carbono empeora como se sabe la soldabilidad).

En los aceros de clase perlítica, la introducción de una pequeña cantidad de molibdeno eleva la temperatura de recristalización de la ferrita y por esto mismo eleva su resistencia a las altas temperaturas. De forma análoga, aunque más débilmente actúa el cromo.

Los aceros de clase perlítica son relativamente de baja aleación y con el 0,12% de C contienen un 0,5 o 1% de Cr y un 0,3 o un 0,5% de Mo. La adición de vanadio afina el grano y eleva también la resistencia a las altas temperaturas. Después de enfriar las piezas al aire se obtiene estructura perlítica con carburo de M_3C , y después del temple en aceite, martensita + bainita. El tratamiento térmico ordinario consiste en el temple en aceite o en el normalizado seguido del revenido (en ambos casos) a 720-750 °C ($A_{c1} = 760$ °C). Los aceros de clase perlítica, como contienen poca cantidad de cromo, es natural que no tengan una gran resistencia a las altas temperaturas y no deben utilizarse cuando las temperaturas sean superiores a 550-580 °C.

El aumento del contenido de cromo eleva la resistencia a altas temperaturas y hace que el acero pase a ser de la clase martensítica. Los aceros de esta clase pueden templarse tanto al aire como en aceite. Después del temple es necesario un revenido a alta temperatura, que debe ser superior a la de trabajo.

En virtud del alto contenido de cromo, en estos aceros no solo se eleva la resistencia a la formación de cascarilla, sino también la resistencia a las altas temperaturas, debido a que se eleva la temperatura de recristalización y se forman carburos especiales ($M_{23}C_6$), que coagulan más despacio que la cementita M_3C .

La adición de wolframio, molibdeno o vanadio al acero con el 12% de Cr, eleva la resistencia a altas temperaturas, pero sólo hasta un límite determinado, ya que si el contenido de estos elementos es mayor, el acero pasa a ser semiferrítico y en él la transformación $\alpha \leftrightarrow \gamma$ se efectuará de un modo incompleto, lo cual puede influir negativamente en las propiedades.

Los índices principales de las propiedades de resistencia a altas temperaturas de estos aceros se dan en las **tablas 27 y 28 (anexo)**.

El acero que posee las propiedades más bajas de resistencia a altas temperaturas es el perlítico al carbono no aleado (**véase tabla 27**). La aleación con un 1% de Cr y un 0,5% de Mo eleva sensiblemente su resistencia a 500 °C. El acero de clase martensítica (con el 12% de Cr) tiene más resistencia a altas temperaturas, pero a 600 °C o más es preferible el acero austenítico.

Una información más detallada acerca de las propiedades de resistencia a alta temperaturas del acero para calderas de una de las marcas (12XMΦ), puede obtenerse de los datos que proporciona la **figura 6**.

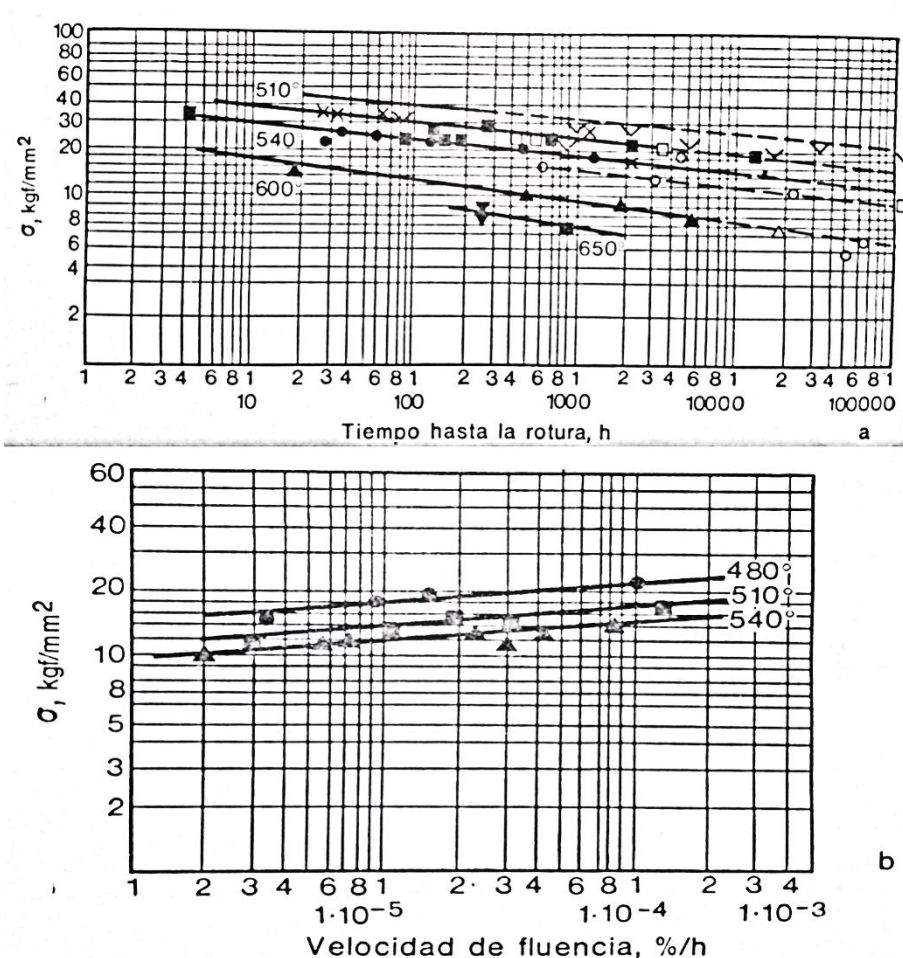


Figura 6. Características de resistencia a altas temperaturas del acero (12XMΦ)[38]

Aunque después del temple y del revenido todos los aceros adquieren una estructura próxima a la del equilibrio (ferrita + carburos), un calentamiento prolongado puede causar variaciones adicionales que empeoren la resistencia a altas temperaturas y la plasticidad. De este tipo son los procesos de globalización de los carburos y su grafitización (que disminuye la resistencia a altas temperaturas) y también la segregación de fases excesivas bordeando los granos (lo que conduce al desarrollo de la llamada *fragilidad térmica*). Estos fenómenos pueden evitarse eligiendo acertadamente el tratamiento térmico (incluso después de cierto tiempo de servicio, para restablecer las cualidades).

Además de los aceros complejos, se utilizan simples aceros al 12% de cromo, que sólo se diferencian por su contenido de carbono. Estos aceros se utilizan principalmente como inoxidables, pero en algunos casos, también como resistentes a altas temperaturas.

La **figura 7** reproduce las gráficas de la resistencia a largo plazo (100000h) de diversos aceros resistentes a altas temperaturas para piezas que han de trabajar durante mucho tiempo y muestra como aumentó la resistencia a temperaturas elevadas de los aceros para calderas desde 500 °C hasta 700 °C ($\sigma_{100 \cdot 800} = 12 \text{ kgf/mm}^2$) en 40 años.

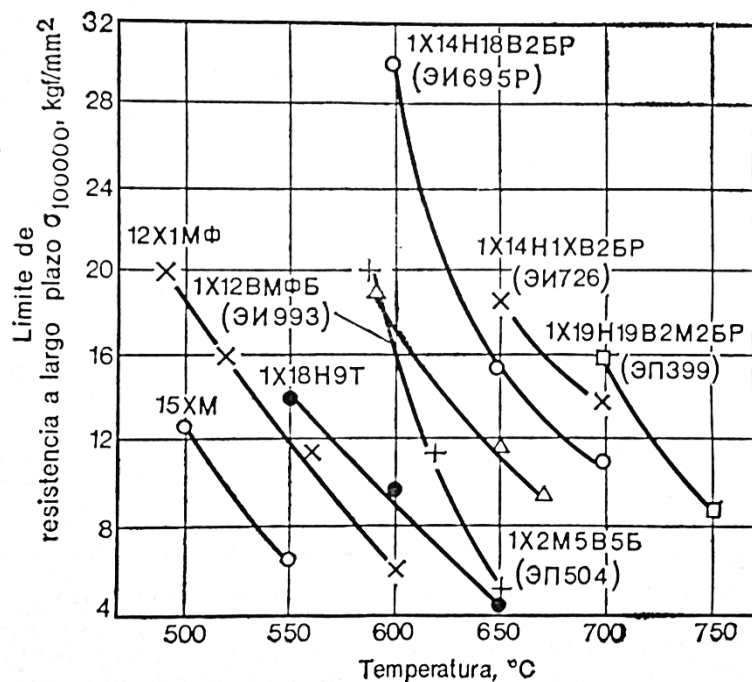


Figura 7. Dependencia de la resistencia a largo plazo (100000h) de los aceros para calderas con respecto a la temperatura[38]

Los aceros citados en la **tabla 26 (anexo)** son, en general, para calderas y se emplean principalmente en forma de tubos.

Conclusiones parciales

1. Existen normas, códigos o reglamentos que en gran parte de los países establecen los requerimientos de diseño, construcción e inspección de las calderas, recipientes a presión y tuberías, una gran parte adopta lo que establece el código ASME para calderas y recipientes a presión.
2. Del 85-90% de los materiales utilizados en la fabricación de los componentes de las calderas de vapor acuotubulares y pirotubulares corresponden a los aceros al carbono constituidos por, C-0,5Mo, 1,25Cr-0,5Mo, 2,25Cr-1Mo y 18Cr-10Ni.
3. Los elementos de aleación que fundamentalmente incrementan la temperatura de trabajo de varios aceros son el Cr y el Mo en determinados porcentajes.
4. Los aceros de clase perlítica con contenido de carbono entre 0,15-0,18% con un 0,5 o 1% de Cr y un 0,3 o un 0,5% de Mo poseen buena soldabilidad; la adición de vanadio a estos aceros afina el grano y eleva también la resistencia a las altas temperaturas.
5. Los aceros que en la construcción de calderas se utilizan principalmente para hacer las tuberías conductoras de vapor, los recalentadores, las piezas de sujeción y otras sometidas a cargas mecánicas de larga duración a temperaturas moderadamente altas, no mayores de 500-600 °C son aceros de la clase perlítica, martencítica (bainítica) y ferrítica.

Capítulo 3: Selección de aceros equivalentes

3.1 Introducción

El aumento del comercio internacional, el abastecimiento global, fabricación e ingeniería, han dado lugar a una mayor necesidad de una mejor comprensión de las diferentes especificaciones internacionales del acero. Debido al hecho de que las normas no son equivalentes e intercambiables, por ejemplo, las normas europeas, las de EE.UU. y las de Japón, decidir qué aceros son equivalentes requiere una cuidadosa consideración de múltiples factores.

Los principales factores para calcular la equivalencia incluyen la composición química, método de fabricación, método de acabado, la forma del producto, propiedades mecánicas y físicas. Factores adicionales, tales como el método de desoxidación, dureza, corrosión y resistencia al calor y otras propiedades también pueden tener una influencia significativa sobre la equivalencia de acero y la intercambiabilidad potencial.

Aceros equivalentes de todo el mundo se suelen agrupar en función de la composición química y, en cierta medida, las propiedades mecánicas. Las tablas de referencia cruzada de los aceros equivalentes a menudo provienen de las recomendaciones de las organizaciones de desarrollo de los estándares, sin embargo, incluso cuando provienen de recomendaciones, aceros equivalentes no tienen por qué tener precisamente la misma composición química o precisamente la misma resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia y sus mismas propiedades físicas, lo que significa que no son absolutamente equivalentes y esto implica la necesidad de una cuidadosa consideración de si se pueden sustituir uno por otro.

Es importante reconocer que un juicio sobre la equivalencia de dos aceros es un proceso muy delicado y propenso a errores, que depende fuertemente de las circunstancias de cada caso en particular, como el tratamiento térmico, estado de entrega, condiciones de servicio, etc. También el número de posibles criterios para la comparación y las condiciones asociadas es muy grande. En consecuencia, definir las equivalencias de aceros requiere un estudio cuidadoso de las especificaciones[39].

3.2 Aspectos a tener en cuenta para establecer la equivalencia

Los aspectos a tener en cuenta para establecer una equivalencia son aquellos que definen la igualdad de un acero a otro en la estimación, estos aspectos en los aceros para calderas por su importancia serían la composición química, las propiedades mecánicas y la soldabilidad.

Por lo tanto, un acero sería equivalente a otro si su composición química, propiedades mecánicas y soldabilidad son lo más cercanas posibles a las de otro acero, garantizando que uno y otro puedan ser utilizados para las mismas aplicaciones manteniendo un desempeño similar.

3.2.1 Composición química

La composición química define al acero ya que dependen de ella en mayor grado las demás propiedades tanto mecánicas como físicas, no es casualidad que las denominaciones de los aceros los agrupen en base a su composición.

La adición de elementos puede crear nuevos constituyentes en el metal, que afectan sus propiedades mecánicas, un aspecto muy importante es la resistencia a la corrosión. Un material mal seleccionado en función de la corrosión acarreará problemas como la reposición del equipo por deterioro de la vida útil de un componente debido a la corrosión. Otro problema es la sobredimensión del diseño dado que para materiales poco resistentes a la corrosión siempre hay que dejar un excedente en el espesor lo que conlleva a un aumento en el precio de fabricación, en el peso, además de no ser siempre la mejor solución. Otra situación generada por la corrosión es el mantenimiento preventivo de los equipos, ya que por causa de la corrosión y para evitar futuras fallas siempre se debe monitorear las condiciones del material teniendo en cuenta que un recipiente corroído debe ser inmediatamente sacado de operación trayendo consigo pérdidas en la producción. Otra situación muy importante es la contaminación del producto almacenado por causa de la corrosión lo que es siempre muy costoso. Sumado a todo esto también se sabe que la corrosión causa debilitamiento de las paredes sometidas a altas presiones, disminuyendo en gran medida la resistencia del material, lo que puede causar lesiones a las personas que se encuentran cerca del equipo.[40]

3.2.2 Propiedades mecánicas

La importancia de los materiales y sus propiedades es más importante de lo que talvez la mayoría se imagina. Prácticamente cada objeto está fabricado con algún material tomando en cuenta sus características mecánicas.

Las propiedades mecánicas, describen la forma en que el material responde a una fuerza aplicada, muchos materiales cuando están en uso se someten a cargas y fuerzas, un ejemplo de ello son las calderas de vapor, lo importante de un material que se somete a presiones constantes o variables para estos tipos de componentes es que tenga alta resistencia a la tensión, un alto punto de cedencia, un alto porcentaje de alargamiento con la mínima reducción de área. Usando estas propiedades se establece el diseño del recipiente.[40]

3.2.3 Soldabilidad

Según AWS la soldabilidad no es más que “la capacidad de los materiales para ser soldados bajo las condiciones de fabricación impuestas dentro de una estructura específica, diseñada adecuadamente, y de comportarse satisfactoriamente durante el servicio para el que se destina”[41].

La influencia de los elementos de aleación que componen el acero sobre el carbono equivalente (Ceq), según el Instituto Internacional de Soldadura se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+V+Mo}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$$

La fórmula anterior es válida si los contenidos de aleación presentes en el acero son inferiores a:

0.50 % de C, 1.60% de Mn, 3.50% de Ni, 0.60% de Mo, 1.00% de Cr y 1.00% de Cu.

En general se considera que aquellos aceros con una Ceq. igual o inferior a 0.45% presentan buena soldabilidad, mientras que los que presentan un Ceq superior a 0.45% presentan soldabilidad limitada.

Es importante que los materiales que se utilicen para la fabricación de calderas de vapor posean una buena soldabilidad debido a que, generalmente, la mayoría de sus

componentes son de construcción soldada; sin embargo, si se utilizan diferentes tipos de materiales en la construcción debe tenerse en cuenta que sean compatibles en cuanto a soldabilidad se refiere. Un acero entre más elementos de aleación diferentes posea más precaución hay que tener, además mientras mejor soldabilidad tenga un material mejor será su capacidad de ser reparado por soldadura.

3.3 Ejemplos del uso de los aceros equivalentes

3.3.1 Tubos de las calderas de la central termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” afectados por termofluencia.

Según las especificaciones técnicas, el material de los tubos actuales de las calderas de la CTE “Carlos M. de Céspedes” es un acero de resistencia media que se corresponde con el acero de la ASME (The American Society of Mechanical Engineers): SA-210 A1[42]. La composición química y propiedades mecánicas del acero SA-210 A1 es:

Tabla 2. Composición química del acero de los tubos de las calderas de la CTE “Carlos Manuel de Céspedes”

C	Mn	P	S	Si
0,27	0,93	0,048	0,058	0,10 (Min)

Tabla 3. Propiedades mecánicas del acero de los tubos de las calderas de la CTE “Carlos Manuel de Céspedes”

Propiedades Mecánicas	SA 210 Grado A1
Límite elástico (Mpa)	≥ 255
Resistencia a la tracción (Mpa)	≥ 415
Alargamiento (%)	≥ 30

Para la reparación de estas tuberías lo ideal sería la utilización de un tubo del mismo material, pero ya que este material es fabricado en los Estados Unidos de América, para nuestro país debido al bloqueo se nos hace muy difícil su importación, por lo cual es necesario utilizar un acero equivalente.

Siguiendo los parámetros mencionados anteriormente en el **epígrafe 3.2** los aceros seleccionados fueron los siguientes:

Tabla 4. Composición química de aceros equivalentes al SA-210 Grado A1

Composición química	Normas equivalentes		
	NMX-B-189-A1	NBR-5592-A1	SB 46 (JIS)
C	0,27	0,27	0,28
Mn	0,93	0,93	0,9
P	0,035	0,048	0,035
S	0,035	0,058	0,040
Si	0,1(Min)	0,1	0,15-0,3
NMX (Norma Mexicana); NBR (Norma Brasileña); JIS (Instituto Japonés del Acero)			

Tabla 5. Propiedades mecánicas de aceros equivalentes al SA-210 Grado A1

Propiedades mecánicas	Normas equivalentes		
	NMX-B-189-A1	NBR-5592-A1	SB 46 (JIS)
Límite elástico (Mpa)	≥ 255	≥ 260	≥ 245
Resistencia a la tracción (Mpa)	≥ 413	≥ 420	450-590
Alargamiento (%)	≥ 30	≥ 30	≥ 19
NMX (Norma Mexicana); NBR (Norma Brasileña); JIS (Instituto Japonés del Acero)			

Como se ve en las tablas anteriores los valores de composición química y las propiedades mecánicas están dentro de un rango donde no se afecta la equivalencia de estos aceros.

Tabla 6. Valores del Carbono equivalente para los aceros equivalentes al SA-210-A1

	Acero ASME SA-210-A1	Aceros equivalentes		
		Norma Mexicana	Norma Brasileña	Norma Japonesa JIS
		NMX-B-189-A1	NBR-5592-A1	SB 46
Carbono equivalente	0,42	0,42	0,42	0,43

3.3.2 Domo de la caldera de los bloques de 158 MW de la central termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

El Domo es un cilindro colector formado por 4 rolos, de diámetro exterior $\varnothing$ 1924 x 124 mm, y 2 casquetes con una longitud total de la parte recta de 12 800 mm, el material es el acero ASME SA 299, para su posible reparación sería necesario usar este mismo material, pero por su difícil obtención sería necesario utilizar otros equivalentes.

Tabla 7. Composición química del domo de los bloques de 158 MW de la CTE “Carlos Manuel de Céspedes”

C	Mn	P	S	Si
0,26	1,4	0,025	0,025	0,15-0,4

Tabla 8. Propiedades mecánicas del domo de los bloques de 158 MW de la CTE “Carlos Manuel de Céspedes”

Propiedades Mecánicas	SA 299
Límite elástico (Mpa)	≥ 275
Resistencia a la tracción (Mpa)	515-655
Alargamiento (%)	≥ 19

Aceros equivalentes:

Tabla 9. Composición química de aceros equivalentes al SA 299

Composición química	Normas equivalentes	
	NMX-B-275-CE	NBR-5000-G 415
C	0,27	0,26
Mn	1,2	1,6
P	0,035	0,040
S	0,040	0,050
Si	-	0,4

Tabla 10. Propiedades mecánicas de aceros equivalentes al SA 299

Propiedades mecánicas	Normas equivalentes	
	NMX-B-275-CE	NBR-5000-G 415
Límite elástico (Mpa)	≥ 265	≥ 415
Resistencia a la tracción (Mpa)	441-579	≥ 520
Alargamiento (%)	15	≥ 16

Tabla 11. Valores del Carbono equivalente para los aceros equivalentes al SA-299

	Acero ASME SA-299	Aceros equivalentes	
		Norma Mexicana	Norma Brasileña
		NMX-B-275-CE	NBR-5000-G 415
Carbono equivalente	0,49	0,47	0,52

3.3.3 Domo de caldera en el central azucarero “Majibacoa” en Las Tunas afectado por degradación estructural

El material del que está fabricado el domo (**figura 10, anexo**) es el acero alemán 19Mn5 producido bajo la norma DIN 17155-2 (1959), con más de 27 años de trabajo.

Tabla 12. Composición química del domo de la caldera del central azucarero “Majibacoa”

C	Mn	P	S	Si	Cr
0.23	1.3	0.05	0.05	0.6	0.3

Tabla 13. Propiedades mecánicas del domo de la caldera del central azucarero “Majibacoa”

Propiedades mecánicas	19Mn5
Límite elástico (Mpa)	≥ 320
Resistencia a la tracción (Mpa)	≥ 520-620

Aceros equivalentes:

Tabla 14. Composición química de los aceros equivalentes al 19Mn5

Composición química	Normas equivalentes	
	NBR-6655-LN 28	NMX-B-277
C	0,22	0,22
Mn	1,2	1,25
P	0,035	0,040
S	0,035	0,050
Si	-	-
NBR (Norma Brasileña); NMX (Norma Mexicana)		

Tabla 15. Propiedades mecánicas de los aceros equivalentes al 19Mn5

Propiedades mecánicas	NBR-6655-LN 28	NMX-B-277
Límite elástico (Mpa)	≥ 328	≥ 343
Resistencia a la tracción (Mpa)	410-560	≥ 481

Tabla 16. Valores del Carbono equivalente para los aceros equivalentes al 19Mn5

	19Mn5 (Norma DIN)	Aceros equivalentes	
		Norma Mexicana	Norma Brasileña
		NMX-B-277	NBR-6655-LN 28
Carbono equivalente	0,44	0,43	0,42

3.3.4 Domos de diversas calderas en el país

Muchos domos de calderas en Centrales Azucareros en el país se han visto afectados por la degradación estructural debido al largo periodo de servicio de estos domos, los que aquí se tratan están compuestos por el acero de origen soviético 20K fabricado bajo la norma GOST 5520 (1979).

La composición de este acero y sus propiedades mecánicas son:

Tabla 17. Composición química del acero 20K norma GOST 5520 (1979)

C	Mn	P	S	Si
0.16-0.24	0.35-0.65	0.04	0.04	0.15-0.3

Tabla 18. Propiedades mecánicas del acero 20K norma GOST 5520 (1979)

Propiedades mecánicas	20K
Límite elástico	216 Mpa
Resistencia a la tracción	402 Mpa
Alargamiento	23 %
Reducción de área	50 %

Aceros equivalentes:

Tabla 19. Composición química de aceros equivalentes al acero 20K norma GOST 5520 (1979)

Composición química	Normas equivalentes	
	SA-203-GB	NBR-7006-GB
C	0,21	0,21
Mn	0,7	0,6
P	0,035	0,040
S	0,035	0,040
Si	0,15-0,4	0,1-0,4
SA (Norma ASME); NBR (Norma Brasileña)		

Tabla 20. Propiedades mecánicas de aceros equivalentes al 20K norma GOST 5520 (1979)

Propiedades mecánicas	Normas equivalentes	
	SA-203-GB	NBR-7006-GB
Límite elástico (Mpa)	≥ 275	≥ 235
Resistencia a la tracción (Mpa)	485-620	≥ 400-490
Alargamiento (%)	21	≥ 20

Tabla 21. Valores del Carbono equivalente para aceros equivalentes al 20K

	20K (Norma GOST)	Aceros equivalentes	
		Norma Norteamericana (ASME)	Norma Brasileña
		SA-203-GB	NBR-7006-GB
Carbono equivalente	0,34	0,32	0,31

Todos los aceros analizados cuyo carbono equivalente (Ceq) sean menor que 0,45, se consideran que presentan buena soldabilidad, mientras los que poseen un Ceq superior a 0,45 presentan una soldabilidad limitada, significando que para ser soldados requieren entre otros aspectos tecnológicos, precalentamiento, electrodo de bajo hidrógeno etc...

Conclusiones parciales

1. Los aceros equivalentes que se presentan en tablas, han sido seleccionados fundamentalmente en base a criterios de composición química, propiedades mecánicas y sugerencias de firmas reconocidas.
2. Los aceros equivalentes para el domo fabricado de acero 20K son el SA-203-Grado B y el NBR-7006-Grado B.
3. El domo del central azucarero Majibacoa, Las Tunas, fabricado con un acero del tipo 19Mn5 según norma alemana, posee los aceros equivalentes NBR-6655-LN 28 y NMX-B-277.
4. Las tuberías conectadas al domo de la caldera de los bloques de 158 MW de la central termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”, son fabricadas con el acero SA-210-A1 y el domo con un acero SA-299, los equivalentes de estos aceros son:
 - Para el SA-210-A1 los aceros NMX-B-189-A1, el NBR-5592-A1 y el SB 46
 - Para el SA 299 el NMX-B-275-Clase E y el NBR-5000-Grado 415

Conclusiones Generales

- 1 La sección II sobre especificaciones de materiales ferrosos del código ASME para Calderas y Recipientes a Presión, así como el Handbook número 20 de la ASM Material Selection and Design relacionan los materiales a utilizar en calderas de vapor, pero no brindan ninguna información acerca de los aceros equivalentes a los mismos.
- 2 Del 85-90% de los materiales utilizados en la fabricación de componentes críticos de calderas de vapor acuatubulares y pirotubulares corresponden a los aceros al carbono constituidos por, C-0,5Mo, 1,25Cr-0,5Mo, 2,25Cr-1Mo, los cuales poseen buena soldabilidad y trabajan a temperaturas no mayores de 500-600 °C.
- 3 Los aceros equivalentes que se presentan en el trabajo, han sido seleccionados fundamentalmente en base a criterios de composición química, propiedades mecánicas, carbono equivalente y sugerencias de firmas reconocidas.
- 4 Algunos domos de los centrales azucareros San Germán y Majibacoa, en Holguín y Las Tunas respectivamente, que aún están en servicio, fueron fabricados con acero 20K y 19Mn5, el primero de procedencia soviética y el segundo alemán, sus equivalentes son:
 - Para el acero 20K son el SA-203-Grado B y el NBR-7006-Grado B.
 - Y para el 19Mn5 el NBR-6655-LN 28 y NMX-B-277.
- 5 Las tuberías conectadas al domo de la caldera de los bloques de 158 MW de la central termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”, son fabricadas con el acero SA-210-A1 y el domo con un acero SA-299, los equivalentes de estos aceros son:
 - Para el SA-210-A1 los aceros NMX-B-189-A1, el NBR-5592-A1 y el SB 46
 - Para el SA 299 el NMX-B-275-Clase E y el NBR-5000-Grado 415

Recomendaciones

1. Continuar la búsqueda de aceros equivalentes de calderas de vapor instaladas en el territorio nacional.
2. Seguir el estudio de la selección de materiales mediante el método gráfico conocido como mapas de materiales.

Bibliografía

- [1] ASME, "Código ASME 2010 para Calderas y Recipientes a Presión," in *Reglas para la construcción de Calderas de Potencia*, ed. Three Park Avenue • New York, NY • 10016 USA: Comité ASME para Calderas y Recipientes a Presión en Calderas de Potencia, 2010.
- [2] C. Mejía Gómez, "METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE MATERIALES," MAESTRÍA EN INGENIERÍA, ÁREA DE MECÁNICA APLICADA – ESPECIALIDAD EN DISEÑO DE MATERIALES, UNIVERSIDAD EAFIT, MEDELLÍN, 2011.
- [3] ASM, International, ASM International Handbook Committee, Ed., *Materials Selection and Design*. 1997, p.^pp. Pages.
- [4] Shaefer, Xasena, Antolovick, Sanders, and Warner, "Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería," 2000.
- [5] H. Álvaro González and D. Hernán Mesa, "La Importancia del Método en La Selección de Materiales," *Scientia et Technica*, 2004.
- [6] P. L. Mangonon, "Ciencia de Materiales: Selección y Diseño," *Ed Prentice Hall, México*, 2001.
- [7] T. F. Kilduff, "Engineering Materials Technology: Structures, Processing, Properties and Selection," *Ed Prentice Hall, 3ra Ed, Ohio*, 1997.
- [8] R. F. Kern, "Steel Selection: A Guide for Improving Performance and Profits," *Ed. John Wiley & Sons, New York*, 1979.
- [9] M. F. Ashby, "Materials Selection in Mechanical Desing," *Ed Pergamon Press, Oxford*, 1992.
- [10] www.matweb.com. *Base de Datos de Materiales online*.
- [11] "The Babcock and Wilcox Company, Steam its generation and use," vol. 41st edition, 2005.
- [12] R. Viswanathan, "Coal-Fired Power Plants, Advanced Materials and Processes," August 2004.
- [13] R. Viswanathan, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," *ASM International*, 1993.
- [14] P. Maia and C. Vianna, "Seminario Nacional "Evaluación y Gestión de la Vida Restante de Equipos y Plantas Industriales"," presented at the Material Didáctico, México, 1996.
- [15] M. N. Hovinga and G. J. Nakoneczny, "Standard Recommendations for Pressure Part Inspection During a Boiler Life Extension Program, Babcock and Wilcox," presented at the Babcock and Wilcox, ICOLM (International Conference on Life Management and Life Extension of Power Plant, 2000.
- [16] G. J. Nakoneczny, "Boiler Fitness Survey for Condition Assessment of Industrial Boilers," ICOLM (International Conference on Life Management and Life Extension of Power Plant) May 2000.
- [17] N. B. Bulletin, "Ten Years of Incident Reports Underscore Human Error as Primary Cause of Accidents," vol. Volume 57, Number 2, Summer 2002.
- [18] H. Brian P and K. James P, "Recent Experience in the Inspection and Assessment of Boiler Header and Steam Drum Cracking," Third Conference on Fossil Plant Inspections, EPRI-Baltimore Gas and Electric Company, August 1991.

- [19] R. Roland, J. P. King, and D. P. Kalmanovitch, "Failure Analysis Study of a Cracked Superheater Outlet Header," presented at the Fourth Conference on Fossil Plant Inspections, 1994.
- [20] J. P. King, "Recent Experience in Condition Assessment of Boiler Piping Components and Supports," presented at the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 1995.
- [21] M. Eyckmans, C. Laire, and L. D'ambros, "Evaluating the Condition and Remaining Life of Older Power Plants," *Failure Analysis & Material Assessment in Plants*, 2000.
- [22] G. J. Nakoneczny and C. C. Shultz, "Life Assessment of High Temperature Headers," presented at the American Power Conference, 1995.
- [23] G. J. Nakoneczny and R. D. Murphy, "Application of EPRI/B&W Developer EMAT Systems for Assessing Boiler Tubes," presented at the ICOLM (International Conference on Life Management and Life Extension of Power Plant)), Xi'an, P. R, China, May 2000.
- [24] J. P. King, "Recent Experience in Condition Assessment of Boiler Header Components and Supports," presented at the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, July 1996.
- [25] J. P. King, "Condition Assessment of Boiler Piping and Header Components," presented at the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, July 2000.
- [26] R. Hendrix and J. P. King, "Condition Assessment Programs for Boiler and Piping Components at the Big Cajun II Power Station," presented at the Power-Gen'97 International Conference, November 1997.
- [27] R. Hendrix, J. M. Khoury, J. P. King, and B. Ryder, "Evaluation of Hot Reheat Steam Piping, Including a Test Spool Piece, at The Big Cajun II Station," presented at the Power-Gen'96 International, 1996.
- [28] Dooley, Barry, McNaughton, and W. P., "Don't Let Those Boiler Tubes Fail Again," *Power Engineering*, vol. Part 2, 1997.
- [29] J. de Alba, L. E. Murr, and C. S. Niu, "Observations of Power Plant Tube Failures and Related Microstructures," *Journal of Materials Science Letters* 1998.
- [30] S. Tuurna, O. Cronvall, L. Heikinheimo, M. Hänninen, H. Talja, and O. Tiihonen, "State of the Art Report Life Time Analysis of Boiler Tubes," VTT Technical Research Centre of Finland 2003.
- [31] "Babcock and Wilcox, Plant Service Bulletin," 1987-2004.
- [32] "Vogt Power International, Technical Bulletin," 1999-2004.
- [33] S. D. David N. French, "The Metallurgy of Power Boilers," *National Board Bulletin* October 1990.
- [34] D. N. French, "Microstructural Degradation," *National Board Bulletin*, January 1991.
- [35] D. N. French, "Creep and Creep Failures," *National Board Bulletin*, July 1991.
- [36] D. N. French, "Failures of Boilers and Related Equipment, Failure Analysis and Prevention.," *Metals Handbook, ASM*, vol. Vol 11, 2002.
- [37] H. Thielsch, "Defectos y roturas en recipientes a presión y tuberías," *Urmo, S. A. de ediciones*, 1982.
- [38] A. P. Guliaev, *Metalografía* vol. 2, 1983.
- [39] www.totalmateria.com. Base de Datos de Materiales online.

- [40] A. P. Q. Carrascal, "DISEÑO MECÁNICO DE UN GENERADOR DE VAPOR TIPO ACUOTUBULAR DE PRESIÓN SUBCRÍTICA Y BAJA PRODUCCIÓN DE VAPOR," Ingeniería Mecánica, UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL CARIBE, Barranquilla, Colombia, 2013.
- [41] A. W. Society(AWS), "Structural Welding Code," in *Steel* vol. AWS D1.1/D1.1M:2015, ed. United States of America: American Welding Society, 2015.
- [42] M. Rivero Castellanos, "Estimación de la Vida Útil de los tubos de las Calderas de la CTE "Carlos Manuel de Céspedes" para diferentes materiales de los tubos.," Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos Rafael Rodríguez, Cienfuegos, Cuba, 2012.
- [43] D. N. French, "The Metallurgy of Power Boilers," *National Board Bulletin* October 1990.

Anexos

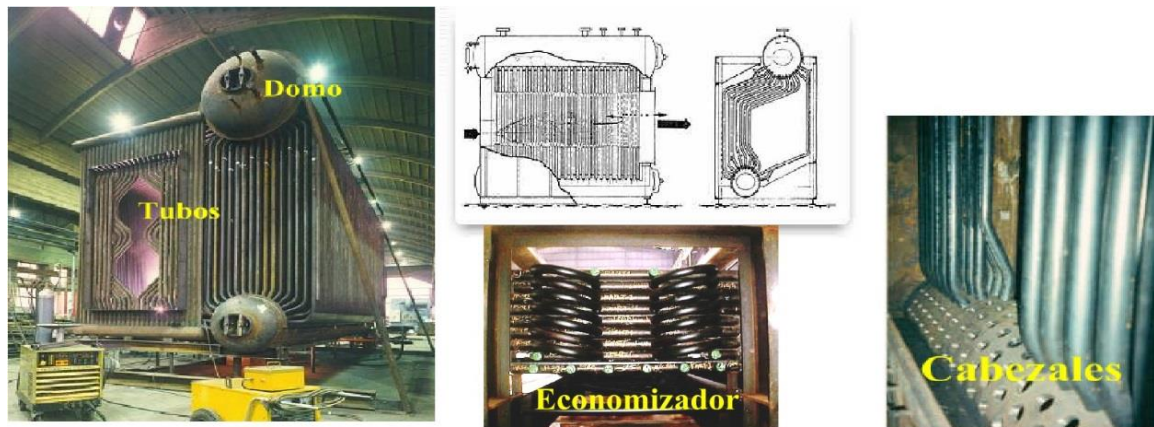


Figura 8. Caldera acuotubular



Figura 9. Caldera pirotubular



Figura 10. Sección del domo de la caldera del central azucarero "Majibacoa" en la provincia de Las Tunas

Tabla 22. Materiales utilizados en la construcción de calderas[13]

Aleación	Forma del producto	Especificación ASME o ASTM	Grado	Resistencia mínima a la tensión MPa(ksi)	Resistencia mínima a la fluencia MPa (ksi)	Composición química (%)							
						C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
Aceros al carbono													
Baja resistencia	Tubos	SA-192	-	324 (47)	175 (26)	0,06-0,18	0,27-0,63	0,048	0,058	0,25	-	-	-
	Tubos (EWR)	SA-178	A	-	-	0,06-0,18	0,27-0,63	0,050	0,060	-	-	-	-
	Tubos (EWR)	SA-226	-	324 (47)	175 (26)	0,06-0,18	0,27-0,63	0,035	0,035	0,025	-	-	-
Resistencia intermedia	Tubos	SA210	A1	414 (60)	255 (37)	0,27	0,93	0,048	0,058	0,10 Min.	-	-	-
	Tubos (EWR)	SA-178	C	414 (60)	255 (37)	0,35	0,30	0,050	0,060	-	-	-	-
	Tubería	SA-106	B	414 (60)	242 (35)	0,30	0,29-1,06	0,048	0,058	0,10 min.	-	-	-
	Fundiciones (b)	SA-126	WCA	414 (60)	207 (30)	0,25	0,70	0,040	0,045	0,60	-	-	-
	Formas estructurales	SA36	-	400 (58)	249 (36)	0,26	-	0,040	0,05	-	-	-	-
Alta resistencia	Tubería	SA-106	C	483 (70)	276 (40)	0,35	0,29-1,06	0,048	0,058	0,10 Min.	-	-	-
	Chapa	SA-299	-	518 (75)	276 (40)	0,30	0,86-1,55	0,035	0,040	0,13-0,33			
	Chapa	SA-515	70	483 (70)	262 (38)	0,35	0,90	0,035	0,04	0,13-0,33	-	-	-
	Forjados	SA-105	-	483 (70)	249 (36)	0,35	0,60-1,05	0,040	0,050	0,35	-	-	-
	Fundiciones (b)	SA-216	WCB	483 (70)	249 (36)	0,30	1,0	0,040	0,045	0,60	-	-	-

Tabla 22. Materiales utilizados en la construcción de calderas (continuación) [13]

Aleación	Forma del producto	Especificación ASME o ASTM	Grado	Resistencia mínima a la tensión MPa (ksi)	Resistencia mínima a la fluencia MPa (Ksi)	Composición química (%)							
						C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
Aceros ferríticos													
C-0,5Mo	Tubos	SA-209	T1	280 (55)	207 (30)	0,10-0,20	0,30-0,80	0,045	0,045	0,10-0,50	-	-	0,44-0,65
1Cr-1/2Mo	Forjados	SA-336	F12	483 (70)	276 (40)	0,10-0,20	0,30-0,80	0,040	0,040	0,10-0,60	-	0,80-1,10	0,45-0,65
	Tubos	SA-213	T12	414 (60)	207 (30)	0,15	0,30-0,61	0,045	0,045	0,50	-	0,80-1,5	0,44-0,65
	Tubería	SA-335	P12	414 (60)	207 (30)	0,15	0,30-0,61	0,45	0,045	0,50	-	0,80-1,25	0,44-0,65
	Chapa	SA-387	12	449 (65)	276 (40)	0,17	0,36-0,69	0,035	0,040	0,13-0,32	-	0,74-1,21	0,40-0,65
	Forjados	SA-182	F12C2	483 (70)	276 (40)	0,10-0,20	0,30-0,80	0,040	0,040	0,10-0,60	-	0,80-1,25	0,44-0,65
	Forjados	SA-182	F12C1	483 (70)	276 (40)	0,10-0,20	0,30-0,80	0,040	0,040	0,10-0,60	-	0,80-1,25	0,44-0,65
1,25Cr-0,5Mo	Tubos	SA-213	T11	414 (60)	207 (30)	0,15	0,30-0,60	0,030	0,030	0,50-1,00	-	1,00-1,50	0,44-0,65
	Tubería	SA-335	P11	414 (60)	207 (30)	0,15	0,30-0,60	0,030	0,030	0,50-1,00	-	1,00-1,50	0,44-0,65
	Chapa	SA-387	11C12	518 (75)	311 (45)	0,17	0,36-0,69	0,035	0,040	0,44-0,86	-	0,94-1,56	0,40-0,70
	Forjados	SA-182	F11	483 (70)	276 (40)	0,10-0,20	0,30-0,80	0,040	0,040	0,50-1,00	-	1,00-1,50	0,44-0,65
	Fundiciones (b)	SA-217	WC6	486 (70)	276 (40)	0,20	0,50-0,80	0,040	0,045	0,60	-	1,00-1,50	0,45-0,65
2,25Cr-1Mo	Tubos	SA-213	T22	414 (60)	207 (30)	0,15	0,30-0,60	0,030	0,030	0,50	-	1,90-2,60	0,87-1,13
	Tubería	SA-335	P22	414 (60)	207 (30)	0,15	0,30-0,60	0,030	0,030	0,50	-	1,90-2,60	0,87-1,13

Tabla 22. Materiales utilizados en la construcción de calderas (continuación) [13]

Aleación	Forma del producto	Especificación ASME o ASTM	Grado	Resistencia mínima a la tensión MPa (ksi)	Resistencia mínima a la fluencia MPa (ksi)	Composición química (%)							
						C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
	Chapa	SA-387	22C11	414 (60)(c)	207 (30)(c)	0,17	0,27-0,63	0,035	0,035	0,50	-	1,88-2,62	0,85-1,15
		SA-387	C12	518 (75) (d)									
	Forjados	SA-182	F22	518 (75)	311 (45)	0,15	0,30-0,60	0,040	0,040	0,50	-	2,00-2,50	0,87-1,13
	Fundiciones (b)	SA-217	WC9	483 (70)	276 (40)	0,18	0,40-0,70	0,040	0,045	0,60	-	2,00-2,75	0,90-1,20
5Cr-0,5Mo	Tubos	SA-213	T5	414 (60)	207 (30)	0,15	0,30-0,60	0,030	0,030	0,50	-	4,00-6,00	0,45-0,65
9Cr-1Mo	Tubos	SA-213	T9	414 (60)	207 (30)	0,15	0,30-0,60	0,030	0,030	0,25-1,00	-	8,00-10,00	0,90-1,10
Aceros austeníticos													
18Cr-8Ni	Tubos	SA-213	TP304H	518 (75)	207 (30)	0,04-0,10	2,0	0,040	0,030	0,75	8,0-11,0	18,0-20,0	-
	Tubería	SA-376	TP304H	518 (75)	207 (30)	0,40-0,10	2,0	0,040	0,030	0,75	8,0-11,0	18,0-20,0	-
	Chapa	SA-240	304	518 (75)	207 (30)	0,08	2,0	0,045	0,035	1,00	8,0-10,5	18,0-20,0	-
		SA-240	304H	518 (75)	207 (30)	0,04-0,10	2,0	0,045	0,030	1,00	8,0-12,0	18,0-2,0	-
	Forjados	SA-182	F304H	518 (75)	207 (30)	0,04-0,10	2,0	0,040	0,030	1,00	8,0-11,0	18,0-20,0	-
18Cr-10Ni-Ti	Tubos(e)	SA-213	TP321H	518 (75)	207 (30)	0,04-0,10	2,0	0,040	0,030	0,75	9,0-13,0	17,0-20,0	-
18Cr-10Ni-Cb	Tubos(f)	SA-213	TP347H	518 (75)	207 (30)	0,04-0,10	2,0	0,040	0,030	0,75	9,0-13,0	17,0-20,0	-

Tabla 22. Materiales utilizados en la construcción de calderas (continuación) [13]

Aleación	Forma del producto	Especificación ASME o ASTM	Grado	Resistencia mínima a la tensión MPa (ksi)	Resistencia mínima a la fluencia MPa (Ksi)	Composición química (%)							
						C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
16Cr-12Ni-2Mo	Tubos	SA-213	TP316	518 (75)	207 (30)	0,040-0,10	2,0	0,040	0,030	0,75	11,0-14,0	16,0-18,0	2,0-3,0
	Tubería	SA-376	TP316H	518 (75)	207 (30)	0,040-0,10	2,0	0,040	0,030	0,75	11,0-14,0	16,0-18,0	2,0-3,0
	Forjados	SA-182	F316H	518 (75)	207 (30)	0,040-0,10	2,0	0,04	0,030	1,00	10,0-14,0	16,0-18,0	-
	Chapa	SA-240	316H	518 (75)	207 (30)	0,040-0,10	2,0	0,045	0,030	1,00	10,0-14,0	16,0-18,0	2,0-3,0
	Lámina estructural	A167	316L	486 (70)	173 (25)	0,03	2,0	0,045	0,030	1,0	10,0-14,0	16,0-18,0	2,0-3,0
22Cr-12Ni	Fundiciones	SA-351	CH20	486 (70)	207 (30)	0,20	1,5	0,040	0,040	2,0	12,0-15,0	22,0-26,0	-

(a) Los valores sencillos mostrados son máximos. (b) Elementos residuales que no exceden el 1,0%. (c) Recocido. (d) Normalizado. (e) Contenido del Titanio no menor que cuatro veces el contenido del carbono y no mayor que el 0,60%. (f) Cb + Ta no menor que ocho veces el contenido de carbono y no mayor que el 1,0%.

Tabla 23. Aceros equivalentes

ASME	NORMAS EQUIVALENTES							USO
	JIS	DIN	NMX	NBR	GB	KS	IRAM	
SA-36	SB410	ST44-2		NBR 8261-C	Q235A			
SA-106-B				NBR-161-B	LF415K1		IRAM-161-B	6
SA-106-C			NMX-B-178-C	NBR-6321-C			IRAM-161-C	6
SA-178-A			NMX-B-137-A				IRAM-119-A	6
SA-178-C			NMX-B-137-C	NBR-5595-C				6
SA-182-F 11 C1			NMX-B-194-T11	NBR-180-T11			IRAM-180-T11	6
SA-182-F 11 C2	SFHV23B		NMX-B-241-F11					6
SA-182-F 12 C1			NMX-B-194-F12					6
SA-182-F 12 C2	SFHV22B		NMX-B-241-F12					6
SA-182-F 22V					12Cr2Mo1VR			6
SA-192	STB23	ST 35-8	NMX-B-138					2-4
SA-209-T1	STBA12	15Mo3	NMX-B-193-T1		STFA 12	STHA 12		2
SA-210-A1	STB42	ST42-8	NMX-B-189-A1	NBR-5592-A1				1-2
SA-210-C	STPT49	-						1-2
SA-213-T2	STBA20	-						3-4
SA-213-T5	STBA25	12CrMo195	NMX-B-194-T5	NBR-180-T5	STFA 25		IRAM -180-T5	4
SA-213-T9	STBA26	X9CrMo91	NMX-B-194-T9	NBR-180-T9	STFA 26	STHA 26	IRAM-180-T9	4
SA-213-T11	STBA23	-		NBR-180-T11			IRAM-180-T11	2-3
SA-213-T12	STBA22	13CrMo44	NMX-B-194-T12					3-4
SA-213-T22	STBA24	19CrMo910	NMX-B-194-T22	NBR-180-T22			IRAM-180-T22	2-3
SA-213-TP304H	SUS304G	X2CrNi189	NMX-B-194-TP304H		07Cr19Ni10	STS304HFB		3-4
SA-213-TP310	SUS310S	X12CrNo2521						
SA-213-TP316H	SUS316H	X5CrNiMo1812						
SA-213-TP321H	SUS321H	X10CrNiTi189	NMX-B-194-TP321H	NBR-133-TP321H	07Cr19Ni11Ti			3-4
SA-213-TP347H	SUS347H	X10CrNiNd189		NBR-7543-347H	07Cr18Ni11Nb			3-4
SA-216-WCB			NMX-B-356-WCB	NBR-8966-LCB				7
SA-217-WC6	SCPH21			NBR-7544-WC6		SCPH21		7
SA-217-WC9			NMX-B-141-WC9	NBR-7544-WC9				7

SA-226				NBR-NM 119			IRAM-NM 119	6
SA-240-T304		X5CrNi1810			06Cr19Ni10			
SA-268-TP446								
SA-299-B			NMX-B-260-B		T 713 22Mng			5
SA-335-P11			NMX-B-194-T11	NBR-180-T11			IRAM-180-T11	6
SA-335-P22			NMX-B-194-T22	NBR-180-T22			IRAM-180-T22	6
SA-336-F12	SFHV22B		NMX-B-241-F12					
SA-376-TP304H	SUS304HTB		NMX-B-194-TP304H	NBR-7543-304H	G3261-304HTP	STS304HTB		6
SA-515-G70	-	-				SB 480		5
SA-516-G70	SGV480		NMX-B-260-G70	NBR-5001 BT-27				

Usos: 1) Pared de agua; 2) Economizador; 3) Sobrecalentador; 4) Recalentador; 5) Domo y cabezales; 6) Tuberías; 7) Válvulas, bridas y accesorios

Normas: ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos); JIS (Instituto Japonés del Acero); DIN (Instituto Alemán de Normalización);

NBR (Norma Brasileña); NMX (Norma Mexicana); IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Certificación); KS (Norma Koreana)

Tabla 24. Aceros más frecuentemente utilizados en las calderas de vapor[43]

Tipo de acero	Especificación	Temperatura máxima °C
Carbono	SA36, SA178, SA192, SA210, SA106, SA515, SA516	454
Carbono-0,5Mo	SA209	482
1,25Cr – 0,5Mo	SA213 T-11, SA335 P-11	552
2,25Cr – 1Mo	SA213 T-22, SA335 P22	579
18Cr – 10Ni	SA213 TP304(H), 321(H), 347(H)	815

Tabla 25. Temperaturas máximas del tubo de metal permitidas por el código ASME y fabricantes de calderas[13]

Tipo de acero del tubo	Especificación ASME	ASME °C (°F)	Babcock y Wilcox °C (°F)	Combustión Engineering °C (°F)	Riley Stocker °C (°F)
Acero al carbono	SA-178 C	538 (1000)	510 (950)	454 (850)	454 (850)
	SA-192	538 (1000)	510 (950)	454 (850)	454 (850)
	SA-210 A1	538 (1000)	510 (950)	454 (850)	454 (850)
Acero al C-Mo	SA-209 T1	538 (1000)	-	482 (900)	482 (900)
	SA-209 T1a	538 (1000)	524 (975)	-	-
Aceros Cr-Mo	SA-213 T11	649 (1200)	566 (1050)	552 (1025)	552 (1025)
	SA-213 T22	649 (1200)	602 (1115)	580 (1075)	580 (1075)
Aceros inoxidables	SA-213 321H	816 (1500)	760 (1400)	-	816 (1500)
	SA-213 347H	816 (1500)	-	704 (1300)	-
	SA-213 304H	816 (1500)	760 (1400)	704 (1300)	-

Tabla 26. Composición (%) de los aceros resistentes a altas temperaturas para calderas

Tipo de acero (Cr, %)	Marca	C	Cr	Mo	Nb	V
Perlíticos						
1,0	12MX	0,09-0,16	0,4-0,6	0,4-0,6	-	-
	12XMΦ	0,08-0,15	0,4-0,6	0,25-0,35	-	0,15-0,30
	12XM	0,09-0,16	0,8-1,1	0,4-0,6	-	-
	12X1MΦ	0,08-0,15	0,9-1,2	0,25-0,35	-	0,15-0,30
Martensíticos						
2,0	12X2MΦCP	0,08-0,15	1,6-1,9	0,5-0,7	-	0,20-0,35
	12X2MΦБ	0,08-0,12	2,1-2,7	0,5-0,7	-	0,20-0,35
5,0	X5BΦ	0,15	4,0-6,0	-	0,4-0,7	0,4-0,6
Martensito-ferríticos						
12,0	15X11MΦ	0,12-0,19	10-11,5	0,6-0,8	-	0,20-0,40
	1X12BHMΦ	0,12-0,18	11-13	0,5-0,7	0,7-1,1	0,15-0,30
	1X12B2MΦ	0,10-0,17	11-13	0,6-0,9	1,7-2,2	0,15-0,35
Observación. En todos los aceros: < 0,04% de S; < 0,04% de P; 0,4-0,7% de Mn; 0,17-0,37% de Si (excepto en el de marca 12X2MΦCP, que contiene 0,4-0,7 de Si y 0,002-0,005 de B); < 0,3% de Ni (excepto los aceros con el 12% de Cr, que contienen 0,4-0,8% de Ni). El acero 12X2MΦБ contiene 0,5-0,8% de Nb y el acero 1X12BHMΦ 0,5-0,8% de Ni.						

Tabla 27. Propiedades de resistencia a altas temperaturas de los aceros perlíticos, martensíticos y austeníticos

Contenido de elementos	Resistencia a largo plazo $\sigma_t/100000$ kgf/mm ² a la temperatura °C						
	400	450	500	550	600	650	700
Perlíticos							
1% de Cr; 0,5% de Mo	16	10	5	-	-	-	-
	-	-	15	7	-	-	-
Martensíticos							
12% de Cr; 1% de Mo, V, W	-	-	20	15	6	-	-
Austeníticos							
16% de Cr; 13% de Ni; 0,5% de Nb	-	-	-	16	11	8	4

Tabla 28. Propiedades de resistencia a altas temperaturas (kgf/mm²) de los aceros perlíticos y martensíticos

Marca del acero	520 °C		550 °C		600 °C	
	σ_t en 10000h	σ_{fl} 1% en 10000h	σ_t 1% en 10000h	σ_{fl} 1% en 10000h	σ_t en 10000h	σ_{fl} 1% en 10000h
12MX	18	12	-	-	-	-
12XMΦ (12MXΦ)	19	10	-	-	-	-
15XM	18-20	-	-	-	-	-
12XHМΦ (12XMΦ)	-	-	13	9	8,5	-
12X2MΦCP	-	-	11,5	7,5	9,5	7
15X12BMΦ (3И802)	-	-	15-19	-	14-16	-
12X12B2MΦ (3И756)	-	-	17	-	15	-
1X13	22	9,5	-	-	-	-

Relación de Tablas

Tabla 1. Lista de propiedades de los materiales que suelen usarse al seleccionarlos[6, 7].	6
Tabla 2. Composición química del acero de los tubos de las calderas de la CTE "Carlos Manuel de Céspedes"	30
Tabla 3. Propiedades mecánicas del acero de los tubos de las calderas de la CTE "Carlos Manuel de Céspedes"	30
Tabla 4. Composición química de aceros equivalentes al SA-210 Grado A1	31
Tabla 5. Propiedades mecánicas de aceros equivalentes al SA-210 Grado A1	31
Tabla 6. Valores del Carbono equivalente para los aceros equivalentes al SA-210-A1	31
Tabla 7. Composición química del domo de los bloques de 158 MW de la CTE "Carlos Manuel de Céspedes"	32
Tabla 8. Propiedades mecánicas del domo de los bloques de 158 MW de la CTE "Carlos Manuel de Céspedes"	32
Tabla 9. Composición química de aceros equivalentes al SA 299	32
Tabla 10. Propiedades mecánicas de aceros equivalentes al SA 299	32
Tabla 11. Valores del Carbono equivalente para los aceros equivalentes al SA-299	32
Tabla 12. Composición química del domo de la caldera del central azucarero "Majibacoa"	33
Tabla 13. Propiedades mecánicas del domo de la caldera del central azucarero "Majibacoa"	33
Tabla 14. Composición química de los aceros equivalentes al 19Mn5	33
Tabla 15. Propiedades mecánicas de los aceros equivalentes al 19Mn5	33
Tabla 16. Valores del Carbono equivalente para los aceros equivalentes al 19Mn5	33
Tabla 17. Composición química del acero 20K norma GOST 5520 (1979)	34
Tabla 18. Propiedades mecánicas del acero 20K norma GOST 5520 (1979)	34
Tabla 19. Composición química de aceros equivalentes al acero 20K norma GOST 5520 (1979)	34
Tabla 20. Propiedades mecánicas de aceros equivalentes al 20K norma GOST 5520 (1979)	34
Tabla 21. Valores del C_{eq} para aceros equivalentes al 20K	35
Tabla 22. Materiales utilizados en la construcción de calderas[13]	43
Tabla 23. Aceros equivalentes	47
Tabla 24. Aceros más frecuentemente utilizados en las calderas de vapor[43]	49
Tabla 25. Temperaturas máximas del tubo de metal permitidas por el código ASME y fabricantes de calderas[13]	49
Tabla 26. Composición (%) de los aceros resistentes a altas temperaturas para calderas	50
Tabla 27. Propiedades de resistencia a altas temperaturas de los aceros perlíticos, martensíticos y austeníticos	50
Tabla 28. Propiedades de resistencia a altas temperaturas (kgf/mm^2) de los aceros perlíticos y martensíticos	51

Relación de Figuras

Figura 1.Etapas o fases del procedimiento para selección de materiales [6]	5
Figura 2.Gráfica en escala logarítmica que relaciona el módulo de elasticidad en función de la densidad del material, para varias familias de materiales[9].	8
Figura 3.Dependencia de la resistencia con respecto a la duración de la prueba[38]	15
Figura 4. Curva de fluencia típica[38].....	17
Figura 5. Resistencia a la rotura (instantánea) de diversas aleaciones en dependencia de la temperatura de ensayo.....	21
Figura 6. Características de resistencia a altas temperaturas del acero (12XMΦ)[38]	24
Figura 7. Dependencia de la resistencia a largo plazo (100000h) de los aceros para calderas con respecto a la temperatura[38]	25
Figura 8. Caldera acuotubular	42
Figura 9. Caldera pirotubular	42
Figura 10. Sección del domo de la caldera del central azucarero "Majibacoa" en la provincia de Las Tunas	42