

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES EN SOLDADURAS DE TUBERÍAS  
QUE CONDUCCEN VAPOR, A TEMPERATURAS MAYORES DE 800° F**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**BYRON ELÍAS FUENTES OROZCO**  
ASESORADO POR EL ING. OSCAR WILSON GIRÓN LARA  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

Guatemala, MAYO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Sanabria Solchaga
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES EN SOLDADURAS DE TUBERÍAS QUE CONDUCEN VAPOR, A TEMPERATURAS MAYORES DE 800° F.**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 9 de Junio de 2004 No. EIME. 228.2004



Byron Elias Fuentes Orozco

Guatemala 15 de marzo de 2009

Ing. Julio César Campos Paiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente.

Respetable Ing. Campos.

De la manera más atenta me dirijo a usted deseándole éxitos es sus labores.

El motivo por el cual me dirijo a usted es para presentarle el informe del trabajo de graduación del estudiante universitario: Byron Elías Fuentes Orozco, que se identifica con carné 97-12504 titulado **ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES EN SOLDADURAS DE TUBERÍAS QUE CONDUCEN VAPOR A TEMPERATURAS MAYORES A 800 °F.** Mismo que tuve a bien revisar y asesorar a solicitud del interesado el cual pongo a su disposición para darle el visto bueno y así continuar con los tramites respectivos.

Agradeciendo de antemano su atención brindada me suscribo muy atentamente

f.)   
Ing. Oscar Wilson Girón Lara  
Colegiado: 5503  
Ing. Oscar Wilson Girón Lara  
Col. 5503

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES EN SOLDADURAS DE TUBERÍAS QUE CONDUCCEN VAPOR A TEMPERATURAS MAYORES DE 800°F**, del estudiante **Byron Elías Fuentes Orozco**, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

*Carlos Humberto Pérez Rodríguez*  
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL  
Colegiado 3071

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
**Coordinador de Área**

Guatemala, marzo de 2009.

/behdei

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria, al Trabajo de Graduación titulado ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES EN SOLDADURAS DE TUBERÍAS QUE CONDUCCEN VAPOR, A TEMPERATURAS MAYORES DE 800° F, del estudiante **Byron Elías Fuentes Orozco**, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, mayo de 2009

JCCP/behdei

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.141.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES EN SOLDADURAS DE TUBERÍAS QUE CONDUCEN VAPOR, A TEMPERATURAS MAYORES DE 800<sup>o</sup>F**, presentado por el estudiante universitario **Byron Elías Fuentes Orozco**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, mayo de 2009

/cc

## ACTO QUE DEDICO A

DIOS	Todopoderoso, por proveerme la sabiduría, conocimiento e inteligencia, y a quien dedico toda la gloria.
MIS PADRES	Jaime Elías Fuentes Orozco. Rosalinda Miguelina Orozco de Fuentes. Por su amor, apoyo y esfuerzo todos estos años, hasta alcanzar la meta, que les dedico con gratitud.
MIS HERMANOS	Brendy, Lady, Abigail (D.E.P). Por su apoyo, esfuerzo, entusiasmo, amor y ejemplo.
MI ESPOSA E HIJO	Wendi e Isaac. Por su amor, comprensión y apoyo emocional.
MIS ABUELOS	Félix Fuentes, Victorina de Fuentes (D.E.P). Estanislao Orozco (D.E.P), Lorenza de Orozco Por el apoyo recibido al estar lejos de casa.
MI PRIMO	Alangumer Fuentes. Por los sabios consejos, y buen ejemplo.
MI SOBRINA	Alejandra, por su ternura.



## **AGRADECIMIENTOS A**

Al Ing. Oscar Wilson Girón Lara. Por su dedicación y apoyo para la finalización de este trabajo.

Mi cuñado Wilver Orozco por compartir buenos momentos.

La apreciable señora Sonia Jiménez. Por los consejos y atención brindada durante todos estos años de estudio.

Mi abuelo Félix Fuentes. Por compartir siempre la gran palabra de Dios que dice:

"Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas."

Josué 1:9

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	III
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	V
<b>GLOSARIO</b>	VII
<b>RESUMEN</b>	IX
<b>OBJETIVOS</b>	XI
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XIII
<b>1. FUNDAMENTOS NECESARIOS DE LÍNEAS DE VAPOR</b>	
1.1 Tubos de acero al carbono	1
1.2 Materiales que se usan en la manufactura de tuberías de vapor	2
1.3 Tubos de acero al carbono – molibdeno	5
1.4 Tubos de acero al cromo molibdeno	5
1.5 Selección de tuberías según las condiciones de operación	6
1.6 Fatiga admisible en las tuberías	12
<b>2. MAQUINARIA PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS POR MEDIO DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS CONTROLADAS</b>	
2.1 Componentes de la máquina	15
2.2 Máquina para tratamiento térmico	16
2.3 Graficador	19
2.4 Resistencias	21

2.5	Unidad soldadora de termocoplas	22
2.6	Funcionamiento de la máquina	27

### **3. INFORMACIÓN INCLUIDA EN EL CÓDIGO ASME B**

#### **31.1 Necesaria Para Tratamientos Térmicos**

3.1	Agrupación de tubería según su composición	31
3.2	Tratamiento térmico a realizarse según la composición del material	33

### **4. APLICACIÓN EN TUBERÍA PARA TURBO-GENERADOR DE 15 MW. DEL INGENIO MADRE TIERRA**

4.1	Alivio térmico para tubería	37
4.2	Búsqueda del grupo de tubería según su composición para TG. 15 MW	41
4.3	Tratamiento térmico a tubería para TG. 15 MW	41
4.4	Curva de alivio de esfuerzos en tubería	45

<b>CONCLUSIONES</b>	49
---------------------	----

<b>RECOMENDACIONES</b>	51
------------------------	----

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	53
---------------------	----

<b>APÉNDICE</b>	55
-----------------	----

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Fuerzas en una sección de tubería	6
2	Máquina para alivios térmicos	16
3	Programador de temperaturas	19
4	Graficador de temperaturas	21
5	Resistencias calefactoras	22
6	Soldadura de termocoplas por descarga capacitiva	23
7	Máquina TIG	25
8	Máquina soldadora MIG	26
9	Soldadura al arco	27
10	Aplicación de material de aporte	28
11	Zona afectada por la soldadura	37
12	Diagrama de equilibrio Fe – C. hasta 6.67 %C	40
13	Tubería tratada térmicamente de turbo generador 15 MW	45
14	Gráfica temperatura vrs. Tiempo tratamiento tubería A 335 P11	48

### TABLAS

I.	Aleación cromo- molibdeno a utilizar según la temperatura de operación	6
II.	Cédula y espesor de tubería	11
III.	Valores del coeficiente de temperatura “y”	13
IV.	Componentes para tratamiento térmico	15
V.	Guía de colores	20
VI.	Agrupación de tubería por composición y temperatura crítica	31
VII.	Tiempos y temperaturas para tratamiento a tubería A335 P11	44



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>AC</b>	Corriente alterna.
<b>Amp</b>	Amperios.
<b>DC</b>	Corriente continúa.
<b>Hz</b>	Hertz.
<b>F</b>	Fuerza
<b>MW</b>	Abreviatura de megavatios.
<b>kW</b>	Abreviatura de kilovatios.
<b>P</b>	Presión.
<b>N/m<sup>2</sup></b>	Newton por metro cuadrado.
<b><math>\sigma</math></b>	Esfuerzo a la tracción.
<b>t</b>	Espesor de tubería.
<b>D</b>	Diámetro de tubería
<b>T</b>	Temperatura
<b>°F</b>	Grados fahrenheit
<b>°C</b>	Grados centígrados.
<b>FS</b>	Factor de seguridad.
<b>TG</b>	Turbo generador.
<b>Pig</b>	Pulgadas
<b>Pt</b>	Presión de trabajo.
<b>lb/pulg<sup>2</sup></b>	Libra por pulgada cuadrada.
<b>t<sub>m</sub></b>	Espesor mínimo de pared
<b>y</b>	Coefficiente de temperatura.
<b>A</b>	Área
<b>Mo</b>	Molibdeno.
<b>Cr</b>	Cromo.

<b>Si</b>	Silicio.
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>Psig</b>	Presión atmosférica (14.695 psi)
<b>cm</b>	Centímetro
<b>mm</b>	Milímetro

## GLOSARIO

<b>Aleación</b>	Es la unión sólida homogénea de dos o más metales, o de uno o más metales con algunos elementos no metálicos.
<b>ASME</b>	American Society of Mechanical Engineers. Es una asociación profesional, que además ha generado un código de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos. Entre otros, calderas y recipientes a presión. Este código tiene aceptación mundial y es usado en todo el mundo.
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials. Es una de las mayores organizaciones del mundo que desarrollan normas voluntarias por consenso, aplicables a materiales, productos, sistemas y servicios.
<b>Cédula</b>	Se refiere al espesor de la pared de una tubería, con la cual se puede calcular las presiones a la que puede ser sometida.
<b>Coopermaster</b>	Empresa que distribuye material para tratamiento térmico.
<b>Ductilidad</b>	Propiedad que presentan algunos metales y aleaciones cuando bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse sin romperse.
<b>Esfuerzo</b>	Conjunto de fuerzas aplicadas sobre el área de una sección.
<b>Factor de seguridad</b>	Número que se utiliza en ingeniería para cálculos de diseño de elementos, que es un sobre dimensionamiento del



componente que se justifica por posibles errores o corrosión en las propiedades del material.

**Fatiga de materiales**

Se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas.

**Fuerza resultante**

Es la sumatoria vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo.

**MIG**

Metal inerte en gas, tipo de soldadura en el cual el arco eléctrico está protegido por un flujo de gas que garantiza una unión limpia y en buenas condiciones.

**Plasticidad**

Propiedad mecánica de un material de deformarse permanentemente cuando es sometido a tensiones por encima de su rango elástico.

**Tenacidad**

Es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura por acumulación de dislocaciones.

**TIG**

Tungsten Inert Gas, tipo de soldadura que se caracteriza por el empleo de un electrodo permanente de tungsteno.

**Turbo generador**

Generador eléctrico accionado por una turbina de vapor de agua.

## RESUMEN

Las tuberías de acero al carbono deben alearse con otros materiales como cromo, molibdeno y silicio, con el fin de alcanzar diferentes propiedades mecánicas.

Cuando se unen dos tuberías mediante una soldadura, las propiedades del material en esta unión cambian, por ello es importante realizar un tratamiento térmico adecuado dependiendo de la composición química del material de la tubería, éste se realiza mediante el tratamiento térmico localizado y consiste en calentar la unión soldada mediante resistencias eléctricas que están rodeadas de cerámica.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Conocer la importancia del tratamiento térmico en soldaduras de tuberías que conducen vapor a altas temperaturas

### **Específicos**

1. Identificar el tipo de tratamiento térmico que se realiza a una tubería de acuerdo a su composición.
2. Conocer las propiedades de los elementos de aleación en una tubería.
3. Calcular la presión de trabajo al cual está sometida una tubería, así como el espesor mínimo que la tubería puede tener antes de fallar.



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación se refiere al tratamiento térmico a que debe ser sometido la soldadura de tuberías que conducen vapor a altas temperaturas, tomando la importancia de la composición química de la tubería.

En este trabajo se describe el tratamiento térmico a realizar a una tubería a 335 grado P11, pero aplicando este mismo principio y la información contenida en el anexo, se puede realizar satisfactoriamente el tratamiento térmico a un buen grupo de tuberías.

Las tuberías que conducen vapor sufren ciertos desgastes en el espesor provocados por mala calidad de vapor, corrosión entre otros por lo que es necesario conocer el espesor mínimo, para garantizar una continua operación, considerando la presión y temperatura de trabajo de la máquina; es por ello que en este trabajo se considera este tema y se dan los principios para calcular dicho espesor.



# 1. FUNDAMENTOS NECESARIOS DE LÍNEAS DE VAPOR

## 1.1 Tubos de acero al carbono

El acero al carbono es el principal producto siderúrgico, siendo aproximadamente el 90% de la producción de acero al carbono y un 10%, acero aleado. Por lo que en la industria, el acero al carbono es el material metálico más importante.

El acero al carbono es una aleación de composición química compleja, en el hierro existen elementos cuya presencia como el magnesio y el silicio se deben a los procesos de su producción, con la dificultad de excluir totalmente elementos como azufre, fósforo, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno; conforme se incrementa el contenido de carbono en el acero, se eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad.

Los aceros al carbono pueden subdividirse en tres grupos que son: (1) bajo contenido de carbono, 0.05 a 0.25% de carbono, los cuales tienen una plasticidad considerable y una resistencia moderada; (2) aceros para maquinaria que tiene un 0.30 a 0.55% de carbono, estos pueden tratarse térmicamente para lograr altas resistencias; (3) acero con un 0.60 a 1.30% de carbono los cuales se usan para herramientas, resortes, etc.

Los aceros al carbono tienen sus propiedades principales debido al porcentaje de carbono y elementos de aleación, frecuentemente son fabricados de acuerdo con las especificaciones ASTM; por ejemplo, la ASTM A 106 indica que es un tubo de acero al carbono sin costura para servicio de alta temperatura que soporta presiones no mayores de 2,500 lb/pulg<sup>2</sup> (92,237 N/m<sup>2</sup>) mientras que el tubo A 53 es un tubo de acero al carbono sin costura y soldado que soportan presiones no mayores de 600 lb/pulg<sup>2</sup> (22,137 N/m<sup>2</sup>), tanto el A 106 como el A 53 se fabrican en los grados A y B; El grado B tiene mayor fragilidad y resistencia mecánica comparado con el grado A, debe considerarse que cuando el acero al carbono haya de usarse en construcciones



soldadas a temperaturas mayores a 775 °F (413 °C), hay posibilidades de que se forme grafito.

## 1.2 Materiales que se usan en la manufactura de tubería de vapor

Dentro de los diferentes materiales que se usan en la manufactura de tuberías, el carbono es el que produce la máxima dureza obtenible en la superficie de la sección que se enfría por inmersión, se ha de considerar ciertas aleaciones para lograr propiedades mecánicas diferentes a las de un metal puro, aunque no se conoce con certeza la fecha en que se descubrió la técnica de fundir mineral de hierro para producir el metal para ser utilizado, las primeras aleaciones producidas por los primeros artesanos del hierro se clasifican en la actualidad como hierro forjado el cual se obtenía de calentar una masa de mineral de hierro y carbón vegetal en un horno o forja con tiro forzado. Este tratamiento reducía el mineral a una masa esponjosa de hierro metálico lleno de una escoria formada por impurezas metálicas y cenizas de carbón vegetal. Esta esponja de hierro se retiraba mientras permanecía incandescente y se golpeaba con pesados martillos para expulsar la escoria y dejar el hierro el cual solía contener un 3% de partículas de escoria y un 0.1% de otras impurezas (aleaciones de hierro en el siglo XIV), Las aleaciones de hierro y carbono son aleaciones metálicas importantes de la civilización actual y dentro de los metales que se usan en aleaciones podemos mencionar los siguientes:

**Carbono:** Este elemento se usa principalmente para endurecer el acero, por lo que cada aumento del porcentaje de carbono incrementara la dureza y resistencia a la tracción del acero tal y como ha sido normalizado.

**Cobre:** Se agrega al acero para aumentar su resistencia a la corrosión, la adición de este elemento no altera considerablemente las propiedades mecánicas.

**Cromo:** Se emplea este elemento en los aceros de aleación para construcción con el fin de aumentar la endurecibilidad, da mayor resistencia a la abrasión y promueve la carburización.

**Manganeso:** Está presente en todos los aceros comerciales y contribuye en forma importante a su resistencia física y dureza en forma similar que el carbono, aunque en menor grado.

El manganeso aparece prácticamente en todos los aceros, debido, principalmente, a que se añade como elemento de adicción para neutralizar la perniciosa influencia del azufre y del oxígeno, que suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido. Si los aceros no tuvieran manganeso, no se podrían laminar ni forjar. El manganeso actúa también como desoxidante y evita, que en la solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material.

Empleando el manganeso en porcentajes superiores a 11%, hace austenítico al acero.

Los aceros al manganeso de uso más frecuente son:

1° Aceros al manganeso de gran resistencia, en los que al emplearse el manganeso en cantidades variables de 0,80 a 1,60 %, con contenidos en carbono de 0,30 a 0,50 %, se consigue mejorar la templabilidad y obtener excelentes combinaciones de características mecánicas aun en piezas de cierto espesor.

2.° Aceros indeformables al manganeso con 1 a 3 % de Mn y 1 % de Ca.

3.° Aceros austeníticos al manganeso con 12 % de Mn y 1% de carbono, que a la temperatura ambiente son austeníticos y tienen gran resistencia al desgaste, empleándose, principalmente, para cruzamientos de vías, mordazas de máquinas trituradoras, excavadoras, etc.

**Molibdeno:** Produce mayor efecto de endurecibilidad, por unidad, comparado con cualquier otro elemento de aleación, exceptuando el manganeso, es un elemento no oxidante y es muy útil para la fusión cuando necesitamos un control adecuado de la endurecibilidad.

Es un elemento de uso relativamente reciente. Mejora notablemente algunas propiedades de los aceros.

El molibdeno aumenta también la resistencia de los aceros en caliente y reemplaza al wolframio en la fabricación de los aceros rápidos, pudiéndose emplear para las mismas aplicaciones aproximadamente una parte de molibdeno por cada dos de wolframio.

Los aceros al molibdeno más utilizados son:

1.º Aceros manganeso-molibdeno, cromo-molibdeno y cromo-níquel-molibdeno de bajo contenido en carbono para cementación, y de 0,15 a 0,40 % de carbono para piezas de gran resistencia.

2.º Aceros rápidos con 6 a 10 % de molibdeno; son de utilización relativamente parecida a los aceros rápidos al wolframio, pero en ellos el wolframio es sustituido por el molibdeno.

3.º Aceros de 0,50 a 6 % de molibdeno que se emplean principalmente para construcciones metálicas, tuberías e instalaciones en refinerías de petróleo, en las que llegan a calentarse de 100° a 300° y deben resistir bien el efecto de esos calentamientos relativamente moderados.

**Vanadio:** Es uno de los formadores de carburos más fuertes, además se disuelve hasta cierto grado en la ferrita y le da resistencia y tenacidad.

Se emplea principalmente para la fabricación de aceros de herramientas, tiende a afinar el grano y a disminuir la templabilidad. Es un elemento desoxidante muy fuerte y tiende a formar carburos.

El vanadio tiene una tendencia muy fuerte a formar carburos. Una característica de los aceros con vanadio, es su gran resistencia al ablandamiento por revenido.

Los aceros con vanadio más utilizados son:

1.º Aceros rápidos que suelen contener de 0,50 a 1% de vanadio,

2.º Aceros de herramientas de diversas clases. Para troqueles indeformables, etc., que suelen contener de 0,10 a 0,30 % de vanadio.

3.º Aceros para muelles cromo-vanadio.

### **1.3 Tubos de acero al Carbono – Molibdeno**

Se encuentran disponibles en los tipos A 204 este tubo se fabrica con la formación de una tira de lamina de acero con métodos de soldadura y dimensiones de 4 a 20 pulgadas, A 335 es un tubo sin costura que se obtiene de perforar un lingote o varilla macizas y se encuentran disponibles en tamaño de 1/8 a 26 pulgadas, tiene aplicaciones en la industria para aire, gas, vapor, agua; a 369 es un tubo forjado, torneado y barrenado, este material se empezó a utilizar en los últimos años cuando las temperaturas del vapor se fueron aproximando a 1,000 °F (538 °C) en cuyo caso el acero al carbono-molibdeno resultaba antieconómico.

### **1.4 Tubos de acero al Cromo – Molibdeno**

Estos tubos se emplean para temperaturas de 1,100 °F (533 °C), para diámetros pequeños hay tubos con soldadura; mientras que para los de gran diámetro y pared gruesa se recurre a un procedimiento más costoso, como las de hueco forjado y barrenado. El material que se ha de utilizar deberá seleccionarse después de una revisión de las consideraciones técnicas y económicas. Puede servir de guía la siguiente tabla.

Tabla I. Aleación de cromo - molibdeno a utilizar según la temperatura de operación.

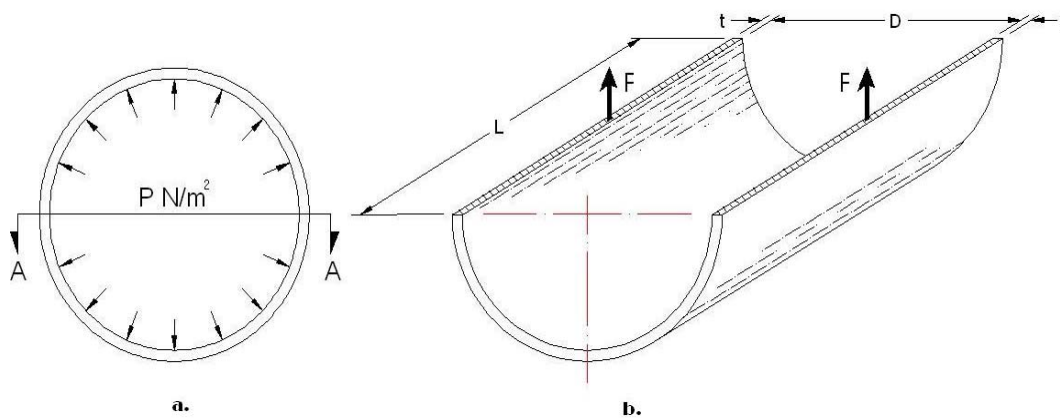
RANGO DE TEMPERATURA	ALEACIÓN DE LA TUBERÍA A TILIZAR
950 °F (510 °C)	Cr. 0.5 % - Mo 0.5 % (A 335 grado P2)
950 – 1000 °F (510 – 538 °C)	Cr. 1.0 % - Mo 0.5 % (A 335 grado P12)
1000 – 1050 °F (538 – 566 °C)	Cr.1.25 % - Mo 0.5 % (A 335 grado P11)
1050 – 1100 °F (566- 593°C)	Cr. 2.25% - Mo 1.0 % (A 335 grado P22)

Fuente: Lionel S. Marks. Manual del ingeniero mecánico. Pág. 148

### 1.5 Selección de tubería según las condiciones de operación

La tubería la usamos para la conducción de diferentes fluidos ya sea en su estado líquido o gaseoso así como materiales sólidos, pero en este caso en el que analizamos vapor debemos de considerar ciertos parámetros de operación como la presión y temperatura del vapor que se desea conducir.

Figura 1. Fuerzas en una sección de tubería



Fuente: Ferdinand L. Singer. Resistencia de materiales. Pág. 32

Para determinar la fuerza resultante  $F$  de todas las fuerzas elementales que actúan en la pared de la tubería analizaremos el efecto que tiene la presión de un fluido en la tubería, tomando en cuenta que el fluido transmite una presión perpendicular igual en todos los puntos de la tubería por lo que la distribución de fuerzas y presiones elementales por pulgada cuadrada es la misma como la que se muestra en la figura 1a; así también se puede observar en la fig.1b el diagrama de cuerpo libre correspondiente a la mitad inferior de un tubo que muestra la fuerza resultante  $F$  que soporta la tubería siendo esta igual a la presión del fluido de trabajo en toda el área en la cual actúa.

Como esta área es la superficie libre del fluido, o sea, diámetro por longitud del tubo ( $DL$ ) se obtiene la siguiente formula:

**Fórmula 1.**

$$F = PDL$$

$F$  = fuerza resultante (lb.)

$P$  = presión del fluido (lb/pulg<sup>2</sup>)

$D$  = diámetro exterior de la tubería (pulg.)

$L$  = longitud sobre la que actúa la fuerza o presión (pulg.)

Esta fuerza  $F$  calculada anteriormente provocará un esfuerzo tangencial o esfuerzo a la tracción que resulta de dividir la fuerza resultante  $F$  que soporta la sección de corte longitudinal dividido entre el área de la sección de corte, dando lugar a la fórmula 2 la cual aplica cuando el espesor de la tubería es igual o menor que un décimo de su radio.

**Fórmula 2.**

$$\sigma = PDL/2 = PD/2t$$

$\sigma$  = esfuerzo a la tracción o tangencial (lb/pulg<sup>2</sup>)

$P$  = presión del fluido (lb/pulg<sup>2</sup>)  
 $t$  = espesor de la tubería (pulg.)

Con estas fórmulas y datos del turbo generador de 15 MW del Ingenio Madre Tierra se pueden realizar ciertos cálculos que se desarrollan a lo largo de este trabajo.

### Datos técnicos del turbo - generador de 15 MW.

Capacidad máxima.....18,750 kW.  
Capacidad nominal.....15,000 kW.  
Presión de vapor de admisión.....650 psig.  
Temperatura del vapor de admisión.....825 °F.  
Velocidad.....3600 rpm.  
Presión de vapor de extracción.....2 ½" HG Abs.  
Número de etapas.....16.  
Tubería de admisión de vapor.....ASTM A 335 grado P 11.  
Diámetro de tubería admisión de vapor.....10 plg.

### Ejemplo 1.

Calcular la presión de operación que puede soportar la tubería A 335 grado P 11, de 10 pulgadas de diámetro, cédula 80, usando un factor de seguridad de 0.847 (dado por el código ASME B 31.1 página 17) y determinar si cumple con las condiciones de operación del TG. 15MW, el cual esta diseñado para trabajar con una presión y temperatura de vapor de 650 psig. y 800 °F respectivamente.

### DATOS:

$T = 825$  °F.  
 $\sigma = 14000$  lb/pulg<sup>2</sup> (de la tabla A-2 ASME B 31.1).  
 $D = 10$  pulgadas.  
 $t = 0.594$  pulg. (De la tabla I.)  
 $FS = 0.847$ .

De la fórmula 2 del esfuerzo tangencial  $\sigma = PD/2t$ , despejamos la presión P que soporta la tubería; resultando lo siguiente:

**Fórmula 3.**

$$P = 2\sigma t/D$$

Sustituyendo los valores del esfuerzo a la ruptura ( $\sigma$ ) tabulados en el código ASME B 31.1 para la tubería y que esta especificado en el apéndice 1 de este trabajo.

$$P = 2(14000 \text{ lb/pulg}^2)(0.594 \text{ pulg})/10\text{pulg.}$$

$$P = 1663.2 \text{ lb/pulg}^2$$

Siendo esta la presión máxima que puede soporta la tubería. Usando un factor de seguridad de 0.847 tenemos que la presión de trabajo ( $P_t$ ) a la cual puede operar la tubería será:

**Fórmula 4.**

$$P_t = 0.847P$$

$$P_t = 0.847 (1663.2 \text{ lb/pulg}^2)$$

$$P_t = 1408.7 \text{ lb/pulg}^2$$

Concluyendo que la tubería A 335 grado P11 puede trabajar a una presión  $P = 1408.7 \text{ lb/pulg}^2$  que es mayor a la presión de diseño del TG. de 15MW (650 psig.).

**Cálculo de la cédula de una tubería.**

Las clasificaciones de los tubos son de peso normal o sea estándar (Std), extrafuerte (XS) y doble extrafuerte (XXS). En los tubos de tamaño nominales de 1/8 a



10 pulgadas los espesores de la cédula 40 ANSI son idénticos a los del tubo de peso normal.

La cédula 80 (1/8 a 8 pulgadas nominales) es idéntica a los del tubo extrafuerte y la cédula 160 recae entre extrafuerte y doble extrafuerte, en la tabla I se muestran las dimensiones y propiedades de los tubos (Std), (XS), (XXS).

Anteriormente no existían espesores intermedios entre Std, XS, XXS, para que estos resultaran económicos; para calcular el número de cédula de una tubería usamos la siguiente fórmula:

#### **Fórmula 5.**

$$\text{No. de cédula} = 1000P_t/\sigma$$

$P_t$  = presión de trabajo (psig.)

$\sigma$  = esfuerzo máximo admisible (psig.)

#### **Ejemplo 2.**

Calcule si el número de cédula 80 de la tubería ASTM A 335 grado P 11 de 10 pulgadas de diámetro es el adecuado, considerando la presión de trabajo del TG. de 15MW.  $P = 650$  psig,  $825$  °F, con un esfuerzo admisible de  $14000$  lb/plg<sup>2</sup> (de la tabla A-2 del código ASME B31.1, ver apéndice 1)

Usando la fórmula 5 tenemos:

$$\text{No. de cédula} = 1000(650 \text{ psig})/(14000 \text{ lb/plg}^2)$$

$$\text{No. de cédula} = 46.4$$

El número de cédula 80 es adecuado, ya que es mayor del valor calculado 46.4.

Con este resultado podemos garantizar que la tubería de 10 pulg. De diámetro cédula 80 ASTM A 53 Grado A cumple con las condiciones de operación que se requieren.

Tabla II: Cédula y espesor de tubería.

<b>DIAMETRO (pulgadas)</b>	<b>ESPESOR DE PARED ( m/m ).</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>CÉDULA</b>
<b>8</b>	8.18	STD	40
	10.31		60
	12.70	XS	80
	15.09		100
	18.26		120
<b>10</b>	9.27	STD	40
	12.70	XS	60
	15.09		80
	18.26		100
	21.44		120
<b>12</b>	10.31	STD	40
	12.70	XS	40
	14.27		60
	17.48		80
	21.44		100
<b>14</b>	25.40	XXS	120
	12.70	XS	40
	15.09		60
	19.05		80
	23.83		100

Fuente: Luís García. Gestión del mantenimiento industrial. Pág. 72

## 1.6 Fatiga admisible en las tuberías

Cuando se habla de fatiga de un material se refiere al deterioro gradual que presenta debido a cargas repetidas; para calcular la resistencia de los materiales es necesario someter ciertas probetas a ensayos de fatigas; las fallas primero se inician con una grieta minúscula sobre la superficie que se encuentra mas débil, a continuación la grieta se propaga gradualmente conforme la carga sigue su aplicación cíclica. Finalmente, el material no soporta las cargas y ocurre la fractura súbita.

La fatiga se produce por:

- a) Carga de Rotación.
- b) Carga de Flexión
- c) Carga de Vibración

Los esfuerzos de flexión en las tuberías causados por expansión o movimiento de los soportes se vuelven un problema estáticamente indeterminado; se puede resolver modificando la teoría de los arcos en donde se introduce un índice de flexibilidad para corregir la aumentada flexibilidad de un tubo curvo considerando la longitud completa entre soportes.

En la tabla A - 2 del código ASME B31.1 (ver apéndice 1) se presentan diferentes propiedades mecánicas de las tuberías que dependen de la clasificación y grado a las que pertenezcan. Con estos datos podemos calcular el espesor mínimo que puede tener la tubería antes de fallar.

Para calcular el espesor mínimo de la tubería usamos la fórmula 6, (tomada de la página 17 del código ASME B 31.1); el material de la tubería no debe ordenarse más delgado que el espesor calculado por la fórmula 6, el material ordenado debe de incluir margen para la tolerancia inferior de manufactura permitida.

Cuando se use tubería mayor de 5 pulgadas de diámetro nominal el espesor mínimo de la pared del tubo deberá ser de  $\frac{1}{4}$  pulgada.

### Fórmula 6.

$$t_m = (PD/2(\sigma + Py)) + A$$

De donde:  $t_m$  = Espesor mínimo de pared (pulg.)

P = Presión interior de trabajo (lb/pulg<sup>2</sup>.)

D = Diámetro exterior (pulg.)

$\sigma$  = Esfuerzo tangencial (lb/pulg<sup>2</sup>. de la tabla A-1)

A = Tolerancia por corrosión y esfuerzos mecánicos = 0.18 pulgadas según dato del código ASME B31.1 al referirse a tubería estáticamente moldeado.

y = Coeficiente de temperatura.

Tabla III. Valores del coeficiente de temperatura “y”.

TEMPERATURA °F	Por debajo de 900	900	1000	1050	1100	1150	1200	Arriba de 1250
TEMPERATURA °C	Por debajo de 482	510	538	566	593	621	649	Arriba de 677
Acero Ferrítico	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Acero Auténtico	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7

Fuente: Código ASME. Pág. 18

### Ejemplo 3.

Usando los datos de trabajo del TG. 15 MW. el cual es alimentado con vapor a una presión de 650 psig. y temperatura de 825 °F por una tubería ASTM A 335 grado P11 de 10 pulgadas de diámetro, esfuerzo a la tracción de 14000 lb/pulg.<sup>2</sup>, con una tolerancia a la corrosión de 0.18 pulgadas; calcular el espesor mínimo que debe tener la tubería que alimentará al TG, de 15 MW.

Datos:

$D = 10$  pulg.

$P = 650$  lb/pulg<sup>2</sup> (presión de trabajo del TG. De 15 MW.)

$\sigma = 14000$  lb/pulg<sup>2</sup> (ver apéndice 1)

$y = 0.4$  coeficiente de temperatura según la tabla III.

$A = 0.18$  tolerancia por corrosión y esfuerzos mecánicos para tubería mayor de 1 pulg.

Sustituyendo valores en la fórmula 6 tenemos:

$$t_m = (PD/2(\sigma + Py)) + A$$

$$t_m = (650(10)/2(14000+650 \times 0.4)) + 0.18$$

$$t_m = 0.407 \text{ pulg.}$$

Que es el espesor mínimo que debe de tener la tubería que conducirá el vapor hacia el turbogenerador de 15 MW.

## 2. MÁQUINA PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS POR MEDIO DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS CONTROLADAS

### 2.1 Componentes de la máquina

A continuación se describen las cantidades y elementos necesarios para realizar el alivio térmico a tuberías que conducen vapor, a temperaturas mayores de 800 °F.

Tabla IV. Componentes para tratamiento térmico.

<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1	Máquina para alivios térmicos (Cooperheat)
1	Graficadora para control de temperaturas
6	Cables divisores
6	Cables de potencia triple
6	Cables compensadores de termocople para graphicadora
1	Unidad para soldar termocople con su equipo TAU
17	Calefactores cerámicos de 12 pulgadas
18	Calefactores cerámicos de 15 pulgadas
30	Conectores o clavijas para termocople

Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 Máquina para tratamiento térmico

Consiste en un sistema que permite la ejecución automática de tratamientos térmicos (relevado de esfuerzos), utilizando programas almacenados en la memoria del microprocesador (Coopermaster) o programas introducidos por el usuario. Es el equipo ideal para alta protección y especificaciones estrictas referente al tratamiento térmico. Que consta de seis zonas de control, 72 kW de potencia, 85V de salida, tres calefactores de 3.6kW por salida en la unidad el cual es ideal para tratamientos térmicos a soldaduras de tubería, recipientes, etc. Siempre que se pueda colocar adecuadamente las resistencias para lograr un calentamiento uniforme y completo.

Figura 2. Máquina para alivios térmicos



Fuente: Cooperheat. Manual de instrucciones. Pág. 5

El equipo para tratamiento térmico cuenta con una protección del operador es inherente debido al interruptor de corte de 125-Amp. Para protección contra la alimentación primaria, un interruptor de corte de 5-Amp. De seguridad contra sobrecarga al circuito central, protección contra sobretensiones a las bobinas del transformador primario (275 °F temperatura de escape).

El programador de temperaturas promueve la eficiencia y ejecución sencillas al tratamiento térmico, el cual consta de seis programas comúnmente empleados según normas es almacenado en la memoria del microprocesador y pueden utilizarse con mucha facilidad el cual se puede modificar cualquiera de las programaciones sin alterar las demás, tiene tres programas adicionales diseñados para el usuario de modo que se pueden introducir o almacenar en la memoria para futuros usos, el mantenimiento es fácil por la sencillez de la electrónica y para el intercambio de piezas hay acceso ya que el chasis del Coopermaster es movable, cuenta con un interruptor para protección contra cortes de corriente:

- a) Posición número 1: Al producirse una interrupción en la corriente primaria un acumulador externo sostendrá el programa por cinco minutos. Al restablecerse la alimentación, la máquina se reactiva y el programa continuará con la operación.
- b) Posición número 2: La máquina continuará apagada.

De acuerdo a las necesidades tiene un control con seis circuitos independientes los cuales pueden ser controlados con una unidad, el control automático tiene seis zonas que pueden ser controladas automáticamente con el microprocesador, los sistemas especiales pueden suministrar equipos diseñados para aplicaciones específicas que requieren mayor potencia y que deben cumplir requisitos especiales.

El programador automático de temperatura puede controlar el ciclo de tratamiento térmico a tantos como 36 circuitos distintos mediante la adición de tarjetas de circuitos integrados, opcionales de seis canales y controladores de temperaturas individuales, basado en normas como ASME y otras, seis programaciones pre-establecidas pueden activarse con una simple selección de una función numérica del



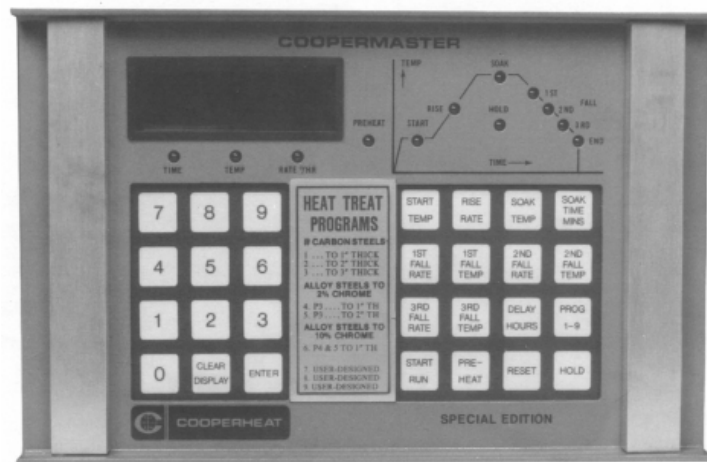
tablero indicador, tres programas adicionales destinados al usuario pueden ser programados y memorizados permanentemente para futuras aplicaciones.

Con el Coopormaster se realiza un buen tratamiento térmico con mucha facilidad; Seis programas de tratamientos térmicos basados en materiales típicos, espesores nominales y temperaturas, son almacenados de modo que cualquier parte de cualquier programa puede ser alterado sin afectar a los otros parámetros, la formación de programas especiales es fácil debido a la aplicación de una terminología sencilla y común, simplemente con seleccionar el botón correcto de inicio, temperatura, tasa de subida, temperatura de calentamiento para la aplicación que se necesite.

El controlador de temperaturas se adapta a cualquier regulador de temperatura, equipos de alivio térmico, hornos que pueden accionar con mando externo, tiene la habilidad de programar un controlador de temperatura sencillo o tantos como treinta y seis (36) circuitos mediante la adición de tarjetas de circuitos integrados, por intermedio de la programación automática de tiempo es posible iniciar el pre y post calentamiento con cuatro días de anticipación a la soldadura, el programador de temperaturas tienen las siguientes especificaciones:

Ancho.....11-1/4 pulg.  
Altura.....7.0 pulg.  
Profundidad.....11.0 pulg.  
Número de canales.....uno (1)  
Demanda de potencia.....120 o 240V CA, 50 - 60 Hz.  
Programas permanentes..... memoria imborrable  
Base cronológica..... control a cristales exactitud, 0.01%  
Tiempo de estabilidad..... 1 a 1999 minutos 1995 °F max.  
Número de posibles canales (opcional)..... treinta y seis (36)

Figura 3. Programador de temperaturas



Fuente: Cooperheat. Manual de instrucciones. Pág. 7

### 2.3 Graficador

Éste es un registrador de temperaturas es el que se emplea como unidad estándar en la máquina de seis zonas de control. Todos los datos importantes que deben ser controlados para obtener alivio de tensiones precisos se grafican claramente en formatos que son muy fáciles de interpretar. Una lámpara fluorescente provee iluminación interna. El registrador está completamente protegido por una caja metálica y por una puerta que se cierra perfectamente.

Los usuarios pueden programar rangos íntegros de temperatura, velocidad y alarmas por medio del teclado del tablero frontal, la información se presenta en formatos simples y significativos-impresos y gráficos analógicos y digitales, los impresos son fáciles de interpretar debido a los seis distintos colores (púrpura, rojo, verde, azul, marrón y negro), los impresos digitales señalan tiempo, número de canal, número de señal, escala (de 0 hasta 100% del gráfico con unidad de ingeniería),

velocidad, fecha y tiempo; El listado del programa impreso presenta fecha, tiempo, rangos, número de señal, unidad de ingeniería, alarma y velocidad, el impreso de alarma incluye número de canal, señal H o L y la hora de la alarma encendida / apagada.

Especificaciones del graficador

Peso..... 31 lbs.  
 Precisión..... 0.03%  
 Voltaje.....115 CA, 60Hz  
 Tramo de registro..... 7.08 pulg. dato analógico  
 Dimensiones..... 11-3/8 pulg. x 11-3/8 pulg. x 11-1/2 pulg.  
 Tiempo de ciclo..... 5 seg., todos los puntos, modelo de 12 puntos  
 Tiempo de ciclo impresor..... 30 seg., todos los puntos, modelo de 12 puntos  
 Papan cartográfico..... 7.75 pulg. X 65 pie 0 – 2000 °F para termocoples K  
 Velocidad de registro..... 0.03 - 59 pulg/h. Seleccionado en pasos  
 de pulg. A través del teclado  
 Tipo de entrada..... nueve clases de termocoples distintos  
 pueden ser conectados a nuestro  
 registrador normal.

Tabla V. Guía de colores

<b>COLOR</b>	<b>CANALES</b>
Púrpura	1, 7, 13, 19
Rojo	2, 8, 14, 20
Verde	3, 9, 15, 21
Azul	4, 10, 16, 22
Marrón	5, 11, 17, 23
Negro	6, 12, 18, 24

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Graficador de temperaturas



Fuente: Cooperheat. Manual de instrucciones. Pág. 8

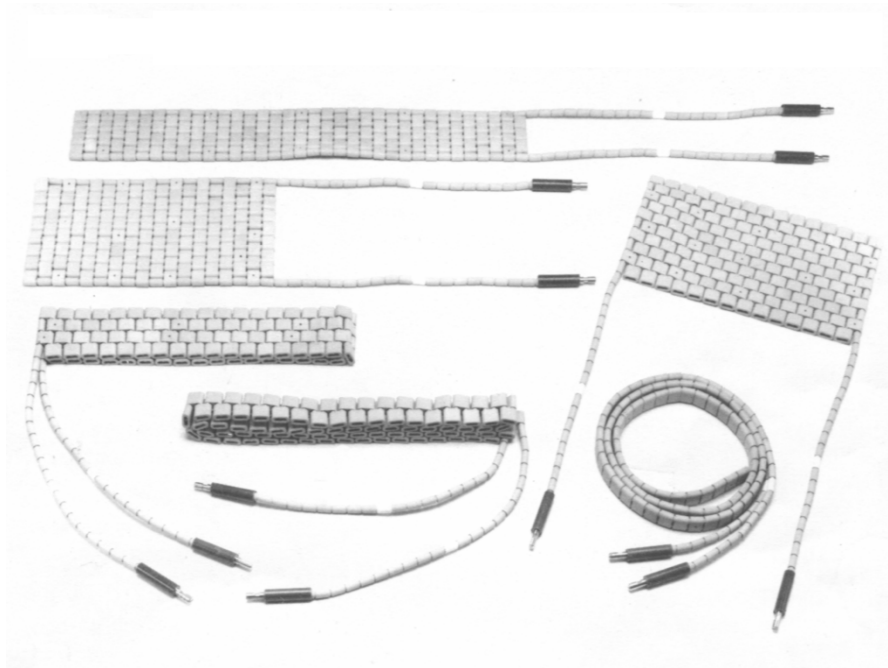
## 2.4 Resistencias

Las resistencias son elementos flexibles de cerámica y están fabricados con 94% de alúmina sinterizada, alambre nicromel trenzado. El resultado de esta combinación es un elemento ideal para llevar a cabo tareas de relevado de esfuerzos de tensiones en juntas soldadas. Estos elementos calefactores potentes (28 watts/pulgada<sup>2</sup> de superficie de calentamiento) proporcionan el calor necesario a la superficie del material base. Los elementos pueden conectarse a máquinas de soldar o transformadores conectados a 65 u 85 voltios mediante sistema de control automático de acuerdo a la capacidad del elemento calefactor.

Las ventajas del elemento calefactor es que posee una larga vida debido a la resistencia al choque térmico, lo cual no se reemplazan frecuentemente, tienen durabilidad porque está hechos de alambre nicromo 80/20 los cuales funcionan

óptimamente a temperaturas elevadas, tienen excelente característica de transferencia térmica, lo cual traduce en menor utilización de la potencia y mejoras en costos, al emplear voltaje bajo la seguridad industrial es absoluta debido a que tiene una alta resistencia eléctrica constantes a temperaturas elevadas, se pueden armar de múltiples formas y tamaños que contribuyen a formar elementos para diversas aplicaciones.

Figura 5. Resistencias calefactoras



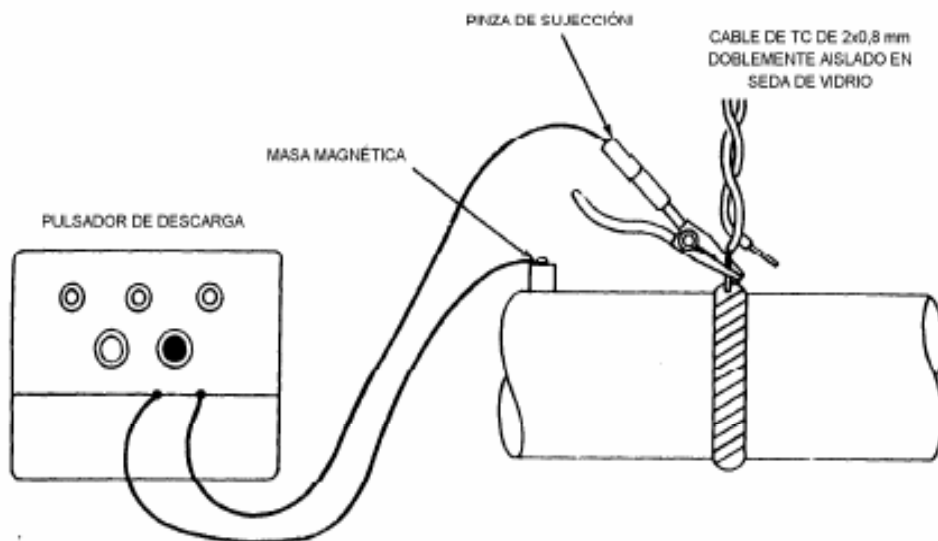
Fuente: Cooperheat. Manual de instrucciones. Pág. 10

## 2.5 Unidad soldadora de termocoplas

Para controlar la temperatura de la tubería, la cual se trasmite por medio de las resistencias eléctricas se sueldan termocoplas, con el objetivo lograr un buen contacto y minimizar los errores de medición; este método consiste en fijar cada alambre de la

termocupa por separado y a una distancia aproximadamente de cinco milímetros (5mm) a la superficie por medio de una soldadura por descarga como se muestra en la figura 7.

Figura 6. Soldadura de termocoplas por descarga capacitiva



Fuente: Internet.

Ahora en cuanto al procedimiento de soldadura de la tubería varía con el material y el proceso que sigue al soldarlo, se recomienda limpiar con aceite y grasa los extremos, las cantidades de costra y herrumbre deberán quitarse; el tamaño y el tipo de varilla de soldar debe de establecerse, así como el número de capas o pasadas que se determinan dependiendo del espesor de la tubería que se este soldando.

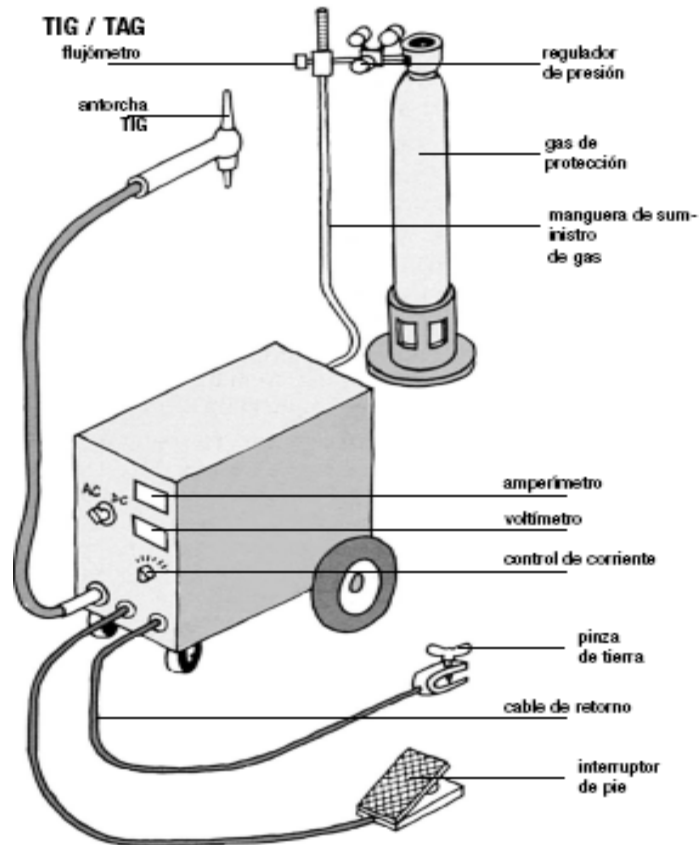
Toda la escoria o fundente que quede sobre el cordón de soldadura ha de quitarse antes de poner la siguiente y sucesiva capa, se debe tomar en cuenta que no debe existir cualquier grieta o porosidad que aparezca en la superficie de la soldadura los cuales se deben de quitar con un cincel o por medio de un esmeril antes de

depositar sobre ella el siguiente cordón de soldadura. A través de todo proceso de soldadura es esencial mantener la temperatura mínima de precalentamiento.

Según el tipo de acero que se vaya a soldar se tomarán las precauciones necesarias para que en la soldadura no se produzcan alteraciones del acero base, que sea motivo de una pérdida de la resistencia a la corrosión; existen diferentes tipos de soldadura que son:

**Soldadura TIG** (Tungsten Inert gas) la fuente de energía adoptada en esta técnica de soldadura es el arco eléctrico que salta entre un electrodo no fundible de Tungsteno toreado contenido en un aboquilla, la boquilla está conectada al generador de corriente, a la botella de gas protector y a la toma de agua de enfriamiento a través de una vaina, en la que se sitúa el alimentador y las condiciones de agua y gas. Existen también boquillas refrigeradas por aire, pero están limitadas a corrientes de pequeña intensidad para la soldadura de espesores. El electrodo está protegido por una atmósfera de gas inerte que lo envuelve y evita el contacto con el aire junto al baño de soldadura. Conviene subrayar que el método TIG requiere bordes bien refrentados y bien fijados, la protección del gas inerte debe aplicarse especialmente en los espesores gruesos, también en el reverso de soldadura se usan para ello barras de bronce o de cobre acanaladas, a las que se fijan los bordes a soldar. El metal de aporte es una varilla de acero inoxidable escogida en función del metal base.

Figura 7. Máquina TIG.

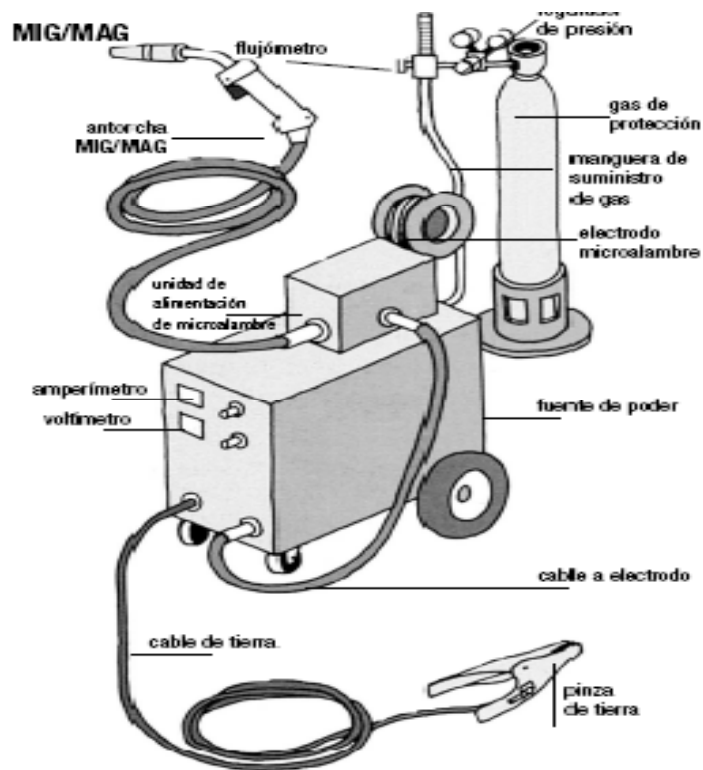


Fuente: Internet.

**Soldadura MIG (Metal Inert Gas)** este sistema de soldadura utiliza como electrodo un hilo enrollado en una bobina, fundido por el arco que salta entre el propio electrodo y el metal base. El hilo circula en una boquilla similar a la TIG, enfriada con agua y capaz de suministrar un caudal de gas inerte para la protección de la zona de fusión; el mecanismo de la base del hilo es alimentado por la corriente de la red y no la de la soldadura y la velocidad de alimentación es regulada manualmente en función de la longitud de arco que se desea obtener. Normalmente la soldadura MIG se realiza en una sola pasada, porque en caso contrario deben realizarse operaciones de amolado del cordón anteriormente depositado para eliminar los óxidos y las burbujas presentes en la parte superior del cordón.



Figura 8. Máquina soldadora MIG.



Fuente: Internet.

**Soldadura al plasma** se entiende por plasma un gas ionizado, explotando esta fuente de energía capaz de alcanzar temperaturas muy elevadas, ha podido llegarse a la realización del sistema de soldadura y corte al plasma empleados en el sector de inoxidable, sus principales características del gas de plasma puede generarse utilizando gases inertes que pueden a la vez ejercer una acción de protección al baño de soldadura, el gas de plasma es un buen conductor de electricidad y puede dosificarse de modo muy preciso con lo que permite disponer fuertes fuentes de calor muy concentradas.

**Soldadura al arco** este procedimiento se hace normalmente con corriente continua, conectando el electrodo al polo positivo del generador y las piezas cuando son pequeñas al polo negativo, de esta manera conseguimos concentrar el calor más en el electrodo que en las piezas, y cuando las piezas son de gran espesor se conectan a la inversa. El procedimiento a emplearse en chapas no muy delgadas puesto que el calor intenso del arco y baja conductividad de los aceros inoxidable presentan la posibilidad de perforar la lámina, por lo tanto se sugiere que para soldar con este método se emplee material con un espesor superior a un milímetro. Los procedimientos más utilizados son:

Con electrodo metálico revestido.

En atmósfera gaseosa con electrodo fusible.

En atmósfera gaseosa con electrodo de wolframio.

Por arco sumergido.

Figura 9. Soldadura al arco



Fuente: Internet.

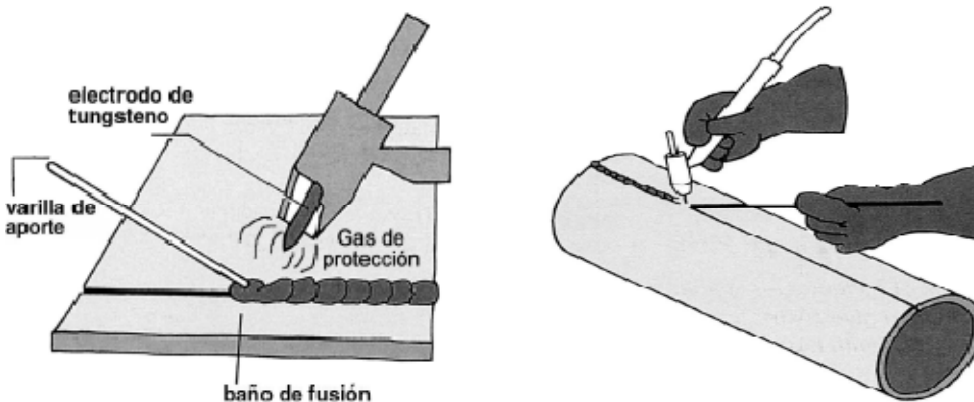
## 2.6 Funcionamiento de la máquina soldadora

El tipo de soldadura que se utilizará para la unión de la tubería del turbo-generador de 15 MW es la soldadura con gas y arco de tungsteno (TIG).

El electrodo de tungsteno se coloca en un soplete que tiene también una boquilla que sirve para dirigir el gas protector alrededor de la zona del arco, el cual se forma entre el electrodo de tungsteno y la pieza de trabajo. Por lo general se alimenta el metal de aporte, en forma de varilla de manera manual.

El metal de aporte se suele utilizar excepto cuando se suelda material muy delgado, la composición del metal de aporte quizá no este disponible con todas las aleaciones, el tamaño de la varilla de metal de aporte depende del espesor del metal base y de la corriente para soldadura.

Figura 10. Aplicación de material de aporte



Fuente: Internet.

**Máquina soldadora:** esta máquina utiliza corriente alterna continua, se pueden emplear máquinas del tipo de transformador con rectificador o con generador. Por lo general la máquina incluye un generador de alta frecuencia que se utiliza para iniciar el arco cuando se suelda con corriente alterna. La selección de corriente alterna o continua depende del material que se va a soldar; se recomienda corriente alterna para aluminio y magnesio, mientras que se recomienda corriente continua para aceros inoxidables, aceros al carbono, cobre y aleaciones.

El soplete para soldadura sostiene el electrodo de tungsteno y sirve para dirigir el gas protector y la corriente hacia el arco, los sopletes son de diferentes tamaños, los sopletes suelen incluir un conjunto de cable que incluye el conductor para corriente y conductos para gas y agua de enfriamiento (cuando se utiliza) desde la máquina hasta el soplete.

Los electrodos se fabrican de tungsteno pues tiene el punto de fusión más alto de cualquier metal (6 170 °F o 3 405 °C) y se considera no consumible. El electrodo debe de limpiarse inmediatamente si tocara el charco en forma accidental, ya que si no se limpia producirá un arco errático; los electrodos están disponibles en tres aleaciones y de tungsteno puro que es el menos costoso, pero hay aleaciones que contienen 1 a 2% de torio y son de uso extenso utilizados para soldar metales específicos; otra aleación es la de circonio, que se utiliza a menudo para trabajos que deben pasar inspección con rayos X. Los electrodos de tungsteno están disponibles en dimensiones que van desde 0.002 pulg. (0.5 mm) hasta 1/4 pulg. (6 mm), la superficie del electrodo puede tener acabado esmerilado o limpio con una longitud de 3 a 6 pulg. (7.5 a 15 cm). Se debe utilizar un gas protector inerte, el argón es el de mayor uso pero en ciertas aplicaciones se emplea el helio y en otras una mezcla de argón y helio, el argón es más fácil de obtener y menos costoso que el helio.



### 3. INFORMACIÓN INCLUIDA EN EL CÓDIGO ASME B31.1 NECESARIA PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS

#### 3.1. Agrupación de tuberías, según su composición

Existen diferentes formas y una diversidad amplia de agrupar las tuberías, pero el propósito de este tema es tratar con las tuberías, más comunes que se utilizan para transportar vapor a altas temperaturas.

Tabla VI. Agrupación de tubería por composición y temperatura crítica

AGRUPACIÓN POR COMPOSICIÓN Y TEMPERATURA CRÍTICA	
MATERIAL	TEMPERATURA CRÍTICA °F. (°C)
Acero al carbono (P-No. 1)	1340 (725)
Carbono Molibdeno (P-No. 3)	1350 (730)
1Cr - 1/2Mo (P-No. 4, Gr No. 1)	1375 (745)
1 1/4Cr - 1/2Mo (P-No, 4, Gr. No. 2)	1430 (775)
2 1/4Cr - 1Mo, 3Cr - 1Mo (P - No. 5, Gr. No. 1)	1480 (805)
5Cr - 1/2Mo (P - No. 5, Gr. No. 2)	1505 (825)
7Cr - 1/2Mo (P - No. 5, Gr. No.3)	1520 (825)
9Cr - 1/2Mo (P - No. 5, Gr. No. 4)	1490 (810)

Fuente: Código ASME B. 31.1. Pág. 126

Podemos también agrupar las tuberías de acuerdo al grado P – No. El cual indica cual debe de ser la temperatura de pre calentamiento que se debe aplicar a la tubería antes ser soldada la junta.

El precalentamiento se puede emplear durante la soldadura para auxiliar en la terminación de la junta soldada. La necesidad del pre calentamiento y la temperatura de precalentamiento dependen de diversos factores como el análisis químico, propiedades mecánicas a temperaturas elevadas y espesores de material.

Cuando se unen por soldadura materiales de dos grupos diferentes de número P, el precalentamiento usado será el correspondiente al material con el precalentamiento especificado más elevado en la especificación del procedimiento de soldar, a continuación se describe las temperaturas de precalentamiento de la tubería a soldar dependiendo del P – No.

- No. P 1, grupo 1, 2, 3. 175 °F. para el material que tiene tanto un contenido de carbono máximo especificado en exceso de 0.30% como espesor en la unión en exceso de 1 pulgada; 50 °F. para todos los otros materiales de estos grupos.
- No. P 3, grupo 1, 2, 3, 175 °F para el material que tiene ya sea una resistencia a la tensión mínima especificada en exceso de 70,000 lb/pulg<sup>2</sup>. o un espesor en la unión en exceso de 5/8 pulg. 50 °F para todos los otros materiales de estos grupos.
- No. P 4, Grupo 1, 2. 250 °F para el material que tiene ya sea una resistencia a la tensión mínima especificada en exceso de 60,000 lb/pulg<sup>2</sup>. o un espesor en la unión en exceso de ½ pulg; 50 °F para todos los otros materiales de estos grupos.
- No. P 5, grupo 1, 2. 400 °F para el material que tienen ya sea una resistencia a la tensión mínima especificada en exceso de 60,000 lb/pulg<sup>2</sup>. o que tiene tanto un contenido de cromo mínimo especificado de más de 6% como espesor en la unión en exceso de ½ pulgada. 300 °F para todos los otros materiales de estos grupos.
- No. P 6, grupo 1, 2, 3. 400 °F.
- No. P 7, grupo 1, 2. Ninguna.
- No. P 8, grupo 1, 2. Ninguna.

- No. P 9A, grupo 1. 250 °F.
- No. P 9B, grupo 1. 300 °F.
- No. P 10A, grupo 1. 175 °F
- No. P 10E, grupo 5. 300 °F. con interpaso mantenido entre 350 °F y 450 °F.

### **3.2 Tratamiento térmico a realizarse, según la composición del material**

A continuación se describe la temperatura y tiempo de relevado, velocidad y temperatura ascendente hasta temperatura de relevado y velocidad de temperatura descendente hasta 600 °F. dependiendo del tipo de aleación de la tubería.

- Acero al carbono de 0 a 600 °F la velocidad de acenso con la que se inicia el tratamiento térmico no es significativa, arriba de 600 °F la velocidad de acenso no debe de exceder de 600 °F/h esto es si el espesor es menor o igual a 2 pulg. Si es mayor de 2 pulg. entonces incrementar a 400 °F/h hasta llegar a 1,340 °F.  
Mantener a 1,340 °F si el espesor es menor o igual a 2 pulg. durante 2 hrs. más 15 min. por cada pulg. adicional si el espesor sobrepasa de 2 pulg.  
Con respecto a la velocidad descendente del tratamiento térmico de 1,340 °F a 1,200 °F descender a 100 °F/h. Debajo de 1,200 °F descender a 400 °F/h. debajo de 600 °F la velocidad no es significativa.
- Acero al carbono molibdeno de 0 a 600 °F la velocidad de acenso con la que se inicia el tratamiento térmico no es significativa, arriba de 600 °F la velocidad de acenso no debe de exceder de 550 °F/h esto es si el espesor es menor o igual a 2 pulg. Si es mayor de 2 pulg. entonces incrementar a 400 °F/h hasta llegar a 1,350 °F.



Mantener a 1,350 °F si el espesor es menor o igual a 2 pulg. durante 2 hrs. más 15 min. por cada pulg. adicional si el espesor sobrepasa de 2 pulg.

Con respecto a la velocidad descendente del tratamiento térmico de 1,350 °F a 1,150 °F descender a 100 °F/h. Debajo de 1,150 °F descender a 400 °F/h. debajo de 600 °F la velocidad no es significativa.

- 1 Cr – ½ Mo de 0 a 600 °F la velocidad de acenso con la que se inicia el tratamiento térmico no es significativa, arriba de 600 °F la velocidad de acenso no debe de exceder de 500 °F/h esto es si el espesor es menor o igual a 2 pulg. Si es mayor de 2 pulg. entonces incrementar a 400 °F/h hasta llegar a 1,375 °F.

Mantener a 1,375 °F si el espesor es menor o igual a 2 pulg. durante 2 hrs. más 15 min. por cada pulg. adicional si el espesor sobrepasa de 2 pulg.

Con respecto a la velocidad descendente del tratamiento térmico de 1,375 °F a 1,100 °F descender a 100 °F/h. Debajo de 1,100 °F descender a 350 °F/h. debajo de 600 °F la velocidad no es significativa.

- 1 ¼ Cr – ½ Mo de 0 a 600 °F la velocidad de acenso con la que se inicia el tratamiento térmico no es significativa, arriba de 600 °F la velocidad de acenso no debe de exceder de 450 °F/h esto es si el espesor es menor o igual a 2 pulg. Si es mayor de 2 pulg. entonces incrementar a 350 °F/h hasta llegar a 1,430 °F.

Mantener a 1,430 °F si el espesor es menor o igual a 2 pulg. durante 2 hrs. más 15 min. por cada pulg. adicional si el espesor sobrepasa de 2 pulg.

Con respecto a la velocidad descendente del tratamiento térmico de 1,430 °F a 1,100 °F descender a 100 °F/h. Debajo de 1,100 °F descender a 350 °F/h. debajo de 600 °F la velocidad no es significativa.

- 2 ¼ Cr – ½ Mo de 0 a 600 °F la velocidad de acenso con la que se inicia el tratamiento térmico no es significativa, arriba de 600 °F la velocidad de acenso no debe de exceder de 400 °F/h esto es si el espesor es menor o igual a 2 pulg.

Si es mayor de 2 pulg. entonces incrementar a 300 °F/h hasta llegar a 1,480 °F.

Mantener a 1,480 °F si el espesor es menor o igual a 2 pulg. durante 2 hrs. más 15 min. por cada pulg. adicional si el espesor sobrepasa de 2 pulg.

Con respecto a la velocidad descendente del tratamiento térmico de 1,480 °F a 1,000 °F descender a 100 °F/h. Debajo de 1,000 °F descender a 300 °F/h. debajo de 600 °F la velocidad no es significativa.

- 5 Cr – ½ Mo de 0 a 600 °F la velocidad de acenso con la que se inicia el tratamiento térmico no es significativa, arriba de 600 °F la velocidad de acenso no debe de exceder de 400 °F/h esto es si el espesor es menor o igual a 2 pulg. Si es mayor de 2 pulg. entonces incrementar a 300 °F/h hasta llegar a 1,480 °F.

Mantener a 1,505 °F si el espesor es menor o igual a 2 pulg. durante 2 hrs. más 15 min. por cada pulg. adicional si el espesor sobrepasa de 2 pulg.

Con respecto a la velocidad descendente del tratamiento térmico de 1,480 °F a 1,000 °F descender a 100 °F/h. Debajo de 1,000 °F descender a 300 °F/h. debajo de 600 °F la velocidad no es significativa.

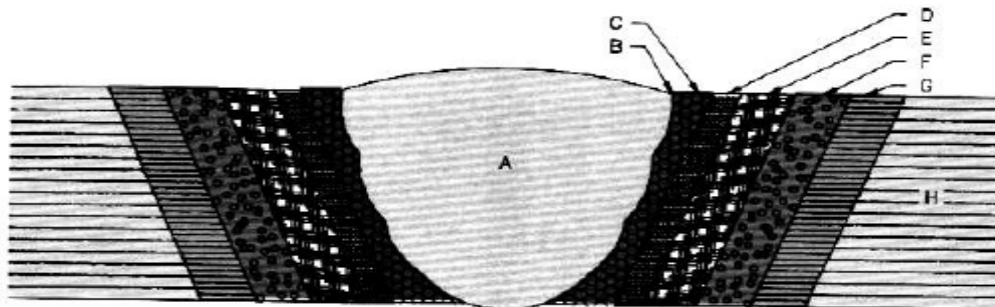


## 4. APLICACIÓN EN TUBERÍA PARA TURBO-GENERADOR DE 15 MW. DEL INGENIO MADRE TIERRA

### 4.1 Alivio térmico para tubería

Cuando se solda un metal trabajado en frío con un soplete o arco eléctrico, el metal adyacente a la soldadura se calienta por encima de las temperaturas de recristalización y de crecimiento del grano. Esta región se llama zona afectada por el calor, la estructura y las propiedades de esta zona cambian fig. (7.19 manual procesos 1) por el calor de soldadura; los procesos de soldadura como el haz de electrones y de láser que generan altos niveles de calor por muy breves períodos, minimiza la exposición del metal a temperaturas por encima de la recristalización es por ello necesario efectuar un tratamiento térmico a la soldadura de la tubería y un alivio de esfuerzos.

Figura 11. Zona afectada por la soldadura



A – soldadura	B – línea de fusión	C – grano ordinario
D – grano refinado	E – región parcialmente transformada	F – región esferoide
G – metal base afectado por la temperatura		H – metal base

Fuente: E. Jimeno. Metalurgia general. Pág. 1087

Por tratamiento térmico se entiende el conjunto de operaciones de calentamiento, permanencia y enfriamiento de las aleaciones de metales en estado sólido con el fin de cambiar su estructura y conseguir las propiedades físicas y mecánicas necesarias; se tratan térmicamente no sólo las piezas semiacabadas con el objeto de disminuir su dureza, mejorar la maquinabilidad y preparar su estructura para el tratamiento térmico definitivo posterior, logrando así propiedades definitivas exigidas; también se puede elevar bruscamente con un tratamiento térmico adecuado el alargamiento, resiliencia y resistencia a la rotura.

La elevación de propiedades mecánicas de los metales por medio del tratamiento térmico permite aumentar las tensiones admisibles y reducir el tamaño y peso de la pieza conservando o incluso aumentando su resistencia mecánica, seguridad y estabilidad de servicio; el científico ruso D. Chernov descubrió los puntos críticos de transformaciones en los aceros, mientras que los científicos soviéticos han logrado grandes éxitos en el perfeccionamiento de los procesos ya conocidos.

Dentro de los principales factores que determinan el régimen de tratamiento térmico son la temperatura y el tiempo; por lo tanto cualquier régimen de tratamiento térmico se puede representar gráficamente en función de la temperatura “  $t$  “ y el tiempo “  $\tau$  “.

Es importante conocer las temperaturas críticas de las diferentes aleaciones ya que suelen ser los valores máximos durante los calentamientos en los tratamientos térmicos subcríticos.

Un error frecuente es creer que la temperatura de 727 °C o 1340 °F es la temperatura crítica de cualquier acero. Solo los aceros al carbono sin aleantes tienen esta temperatura crítica.

Como se ve en la figura 13 la temperatura crítica de un acero con 0.5% de cromo y 0.5% de molibdeno es de 760 °C. o 1400 °F. y con 5% de cromo y 5% de Mo. la temperatura crítica alcanza los 820 °C o 1508 °F.

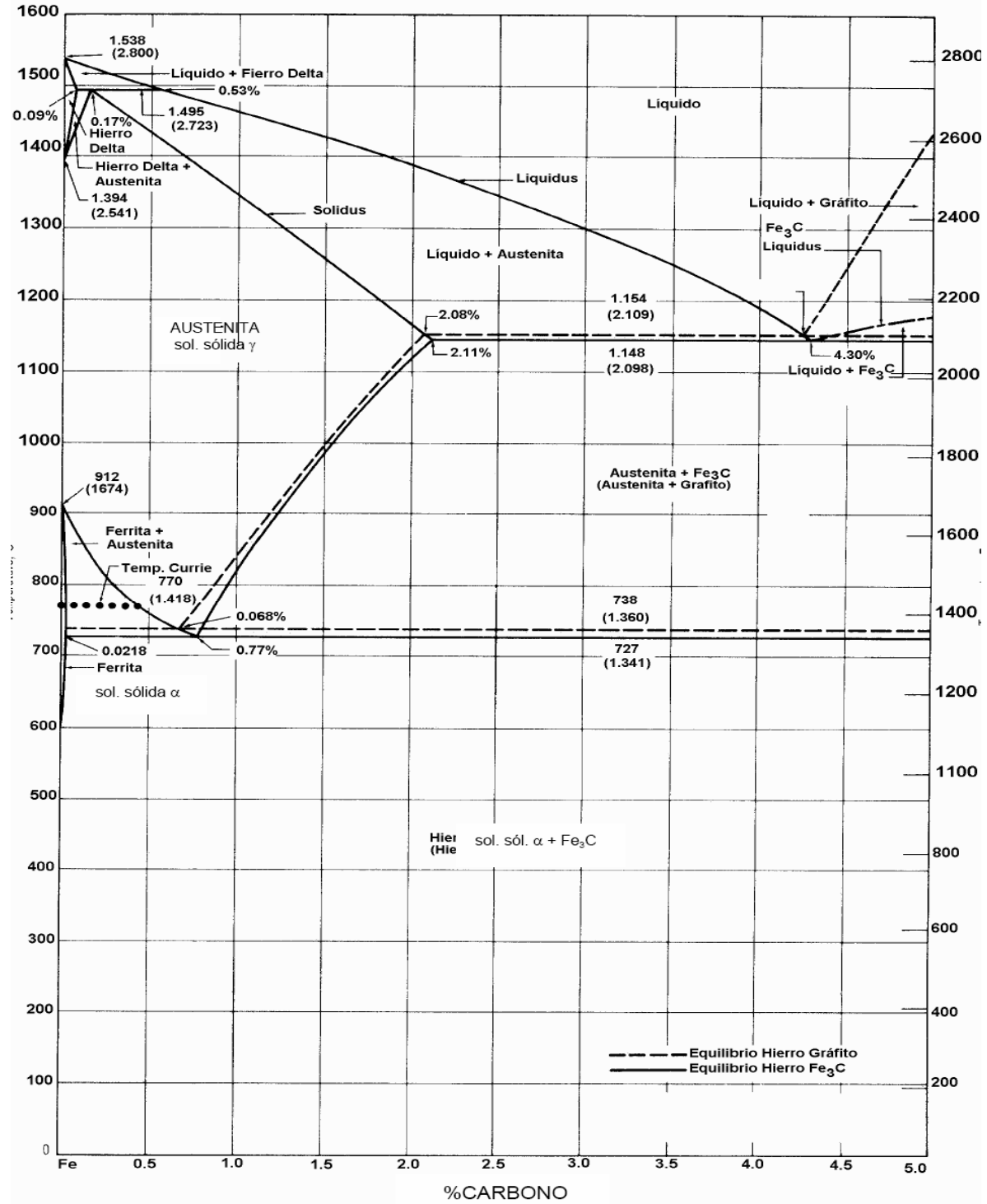
Si observamos el diagrama de equilibrio estable hierro carbono vemos que la temperatura crítica esta representada por la horizontal Ac1 temperatura a la que comienza la recristalización alotrópica. La temperatura Ac3 también llamada temperatura crítica superior es aquella a la que la recristalización es completa y depende del % de carbono del acero en cuestión, en cambio Ac1 no depende del mismo. Desde nuestro punto de vista la temperatura crítica que nos interesa es Ac1 comienzo de la recristalización.

**Recuperación** cuando al principio se calienta el metal la energía térmica adicional permite que las dislocaciones se muevan y formen los bordes de una estructura subgranular poligonizada, sin embargo la densidad de las dislocaciones se mantiene sin modificaciones.

**Recristalización** cuando se calienta el metal por encima de la temperatura de recristalización, una rápida recuperación elimina los esfuerzos residuales, produciendo una estructura de dislocación poligonizada, el metal recristalizado tiene baja resistencia, pero una elevada ductilidad.

**Crecimiento granular** a temperaturas mayores, tanto la recuperación como la recristalización ocurren con rapidez, produciendo una estructura granular recristalizada fina, el crecimiento de ciertos granos es favorecido eliminando así a los más pequeños.

Figura 12. Diagrama de equilibrio Fe-C hasta 6.67 %C.



Fuente: Internet.

## **4.2 Búsqueda del grupo de tubería según su composición para TG. 15 MW**

Para determinar los pasos que se deben de seguir para dar el tratamiento térmico a la tubería nos referimos al apéndice 1, que nos indica que la composición de una tubería A 335 P11, es la siguiente:

1 ¼ Cromo, ½ Molibdeno, Silicio.

Tomando en cuenta estos datos en el capítulo 3.2 pág. 42 se busca el grupo al cual pertenece esta tubería, el cual se aproxima al grupo de que tiene la composición 1 Cromo, ½ Molibdeno el cual nos indica que para realizar el tratamiento térmico a la tubería A 335 P11 se sigue los siguientes pasos.

- Calentar la tubería hasta 600 °F.
- Incrementar la temperatura a razón de 8 °F por minuto hasta llegar a la temperatura crítica de 1,375 °F.
- Permanecer a 1375 °F por un tiempo de dos horas.
- Descender la temperatura a razón de 2 °F hasta llegar a 1,100 °F
- Descender la temperatura a razón de 6 °F hasta llegar a 600 °F.
- Enfriar a temperatura Ambiente.

## **4.3 Tratamiento térmico a tubería para TG. 15 MW**

Soldar es llevar los bordes de las partes a ser unidas hasta el punto de fusión accionándole o no a un metal de aporte y luego permitir al conjunto enfriarse hasta temperatura ambiente, lo más relevante de este proceso es sin duda el calentamiento localizado seguido de enfriamiento que produce en las partes soldadas una serie de efectos indeseables.

- a) Tensiones residuales y/o distorsión. Las construcciones soldadas contendrán usualmente tensiones residuales del orden de la resistencia a la fluencia



paralelas al eje de la soldadura y una fracción de la misma en las direcciones perpendiculares al cordón. La mayoría de los metales al calentarse se dilatan; si el calentamiento es localizado como ocurre durante la soldadura, la falta de uniformidad de la temperatura produce dilataciones diferentes en distintos puntos de la pieza en un mismo instante generándose por esta razón tensiones térmicas.

- b) Modificación de la estructura metalografica. La mayoría de los aceros modernos obtienen sus propiedades mecánicas por intermedio de procesos termomecánicos como forja, laminación, fundición los que realizados correctamente proporcionan una microestructura óptima para soportar las sollicitaciones mecánicas. Cuando a esta estructura se le aplica el ciclo térmico de la soldadura se forman dos zonas perfectamente diferenciadas que son metal fundido con o sin presencia de metal de aporte y una zona afectada por el calor. Esta zona esta afectada por estructuralmente sin haber llegado a la fusión. Estas dos zonas ya no tienen la estructura óptima original del material base y por lo tanto puede considerarse a este cambio un efecto indeseable del ciclo térmico de soldadura.
- c) Absorción de gases por la soldadura. Es uno de los problemas a tener en cuenta cuando se estudian los efectos indeseables. Cualquiera que sea el procedimiento de fusión, en el acero líquido se fijan cantidades mas o menos importantes de los gases del aire (oxígeno y nitrógeno) y de los productos de descomposición del revestimiento, principalmente hidrogeno procedente de la humedad. Pero el verdadero problema y mucho más grave es que durante la soldadura el acero también absorbe hidrógeno, lo mismo que absorbe oxígeno y nitrógeno por lo que la concentración de hidrógeno en las soldaduras por arco es mucho mas importante y puede llegar a alcanzar el limite de solubilidad de este gas en el metal liquido, el hidrógeno es la causa de la formación de microfisuras.

Para lograr que la soldadura alcance propiedades similares a la tubería en general con el tratamiento térmico es necesario llevar cierto control en el proceso de soldadura

por lo cual antes de empezar la soldadura muchos materiales requieren un calentamiento hasta determinada temperatura, el calentamiento se puede efectuar con resistencias eléctricas, por inducción o con mecheros de gas del tipo de anillos concéntricos al tubo, la temperatura la podemos controlar con pirómetros o termopar la cual ha de mantenerse durante la operación.

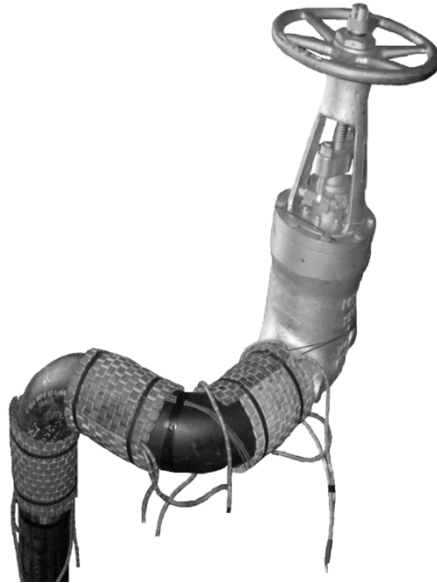
Con la información obtenida en el subcapítulo 4.2 referente al grupo al que pertenece la tubería código A 335 P11 se puede tabular la tabla VII con la suposición que el tratamiento iniciará a las 7:00 AM.

Tabla VII. Tiempos y temperaturas para tratamiento a tubería A 335 P11

INCREMENTO		DECREMENTO		DECREMENTO	
TIEMPO (min)	Temp (°F)	TIEMPO (min)	Temp (°F)	TIEMPO (min)	Temp (°F)
07:00	600	11:15	1375	14:50	1031
07:05	629	11:20	1367	14:45	1023
07:10	658	11:25	1359	14:40	1015
07:15	687	11:30	1351	14:35	1007
07:20	716	11:35	1343	14:30	999
07:25	745	11:40	1335	14:25	991
07:30	774	11:45	1327	14:30	983
07:35	803	11:50	1319	14:35	975
07:40	832	11:55	1311	14:40	967
07:45	861	12:00	1303	14:45	959
07:50	890	12:05	1295	14:50	951
07:55	919	12:10	1287	14:55	943
08:00	948	12:15	1279	15:00	935
08:05	977	12:20	1271	15:05	927
08:10	1006	12:25	1263	15:10	919
08:15	1035	12:30	1255	15:15	911
08:20	1064	12:35	1247	15:20	900
08:25	1093	12:40	1239	15:25	888
08:30	1122	12:45	1231	15:30	876
08:35	1151	12:50	1223	15:35	864
08:40	1180	12:55	1215	15:40	852
08:45	1209	13:00	1207	15:45	840
08:50	1238	13:05	1199	15:50	828
08:55	1267	13:10	1191	15:55	816
09:00	1296	13:15	1183	16:00	804
09:05	1325	13:20	1175	16:05	792
09:10	1354	13:25	1167	16:10	780
09:15	1375	13:30	1159	16:15	768
<b>permanecer</b>		13:35	1151	16:20	756
<b>dos horas en</b>	<b>1375</b>	13:40	1143	16:25	744
		13:45	1135	16:30	732
		13:50	1127	16:35	720
		13:55	1119	16:40	708
		14:00	1111	16:45	696
		14:05	1103	16:50	684
		14:10	1095	16:55	672
		14:15	1087	17:00	660
		14:20	1079	17:05	648
		14:25	1071	17:10	636
		14:30	1063	17:15	624
		14:35	1055	17:20	612
		14:40	1047	17:25	600
		14:45	1039	apagar maquina.	

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Tubería tratada térmicamente de turbo generador 15 MW.



Fuente: Fotografía tomada en Ingenio Madre Tierra.

#### **4.4 Curva de alivio de esfuerzos en tubería**

Por la perfección que hoy se ha alcanzado la soldadura eléctrica es predominante en el montaje de tubería por lo que es la más usada, pero muchas veces cuando el tipo de material es semi-dúctil, como en los casos de tubería de acero al carbono-molibdeno o al cromo-molibdeno para altas temperaturas, las juntas soldadas no guardan la misma ductilidad que el material de la tubería en sí, debido a los cambios bruscos de temperatura al realizar la soldadura el material se templea y se crean esfuerzos residuales, por lo cual después de la soldadura hay que someter las mismas a un tratamiento térmico para normalizar cada soldadura y dejarlas con las propiedades del material de la tubería, evitando de esta manera agrietamiento o que la soldadura falle cuando la planta esté en operación lo que significa parar por completo la misma.

Para el normalizado de las soldaduras de toda clase de aleaciones de tuberías se debe ascender, mantener y descender adecuadamente la temperatura en los tramos

de tubería en que están las soldaduras, a una velocidad constante dependiendo del material que conforma la aleación de la tubería; después de determinar que porcentaje de elementos de aleación posee la tubería mediante el código ASME se determinara el tiempo de ascenso, permanencia y descenso de la temperatura.

- a) La velocidad de calentamiento influye en la diferencia de temperatura entre el diámetro interior y exterior, que alcanza su máximo calor cuando comienza el periodo de mantenimiento. El gradiente térmico radial produce tensiones tangenciales, con las fibras exteriores en compresión y las interiores en tracción, de esta manera la superficie exterior trata de dilatarse mientras que la superficie interior mas fría se lo impide. Las tensiones son proporcionales a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior. A medida que la velocidad de calentamiento aumenta la diferencia de temperatura también lo hace. Sin embargo si no se producen fisuras, no se daña al material entonces las tensiones residuales se relevaran durante el posterior mantenimiento a la temperatura de tratamiento. El código ASME B31.1 indica que la velocidad de calentamiento por encima de 315 °C o 600 °F no debe ser superior a los 355 °C o 671 °F. dividido por  $\frac{1}{2}$  del máximo espesor del material en pulgadas, esto dignifica que hasta los 315 °C o 600 °F la velocidad de calentamiento es libre. Esto significa no significa que podamos dar velocidades altas ya que la propia inercia del material lo impedirá, además pro el beneficio de ganar unos minutos en el calentamiento corremos el riesgo de quemar los calefactores.
  
- b) El tiempo de mantenimiento es un proceso de relajación de tensiones por Creep (Fluencia lenta o termofluencia). La deformación pro Creep depende, a diferencia de la deformación plástica convencional, del tiempo y de la temperatura. Por lo tanto la cantidad de distensionado (porcentaje de tensiones residuales relevadas) es proporcional al tiempo de mantenimiento. Cuanto mayor sea la temperatura de mantenimiento el tiempo podrá disminuirse. El código ASME B31.1 permiten si no se alcanzo la temperatura especificada de tratamiento, compensar con un mayor tiempo a menor temperatura. Esta práctica de compensar con tiempo la falta de

temperatura tiene su límite y en el código la máxima disminución de temperatura aceptada es de 112 °C o 200 °F, si la falta de temperatura supera este límite hay que realizar el tratamiento nuevamente ya que falta potencia calefactora o la aislante era insuficiente.

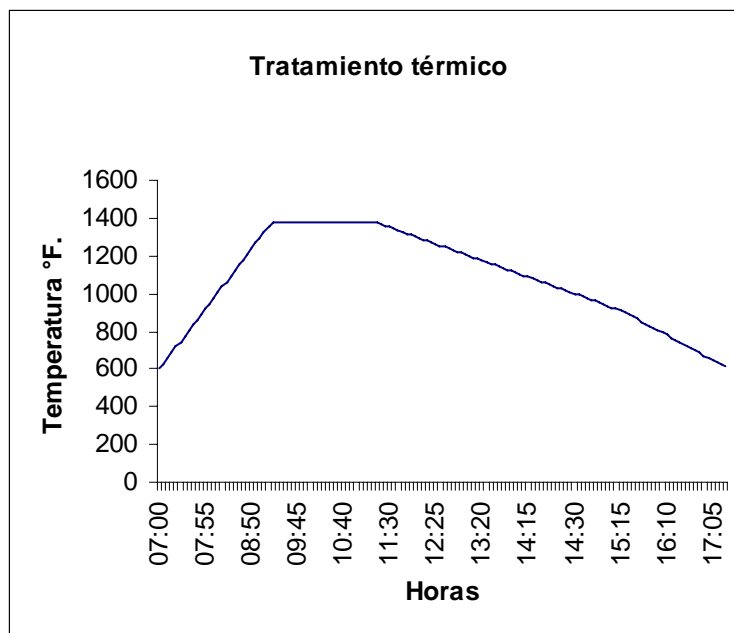
- c) La velocidad de enfriamiento. Las tensiones producidas durante el calentamiento son normalmente relevadas durante el mantenimiento a temperatura de tratamiento, mientras que las producidas durante el enfriamiento tienden a permanecer. Por esta razón, a veces la velocidad de enfriamiento requerida es inferior a la de calentamiento. Sin embargo en el código ASME B31.1 no hace diferencia e indica la misma velocidad para el calentamiento y enfriamiento 355 °C/h o 671 °F/h dividido por ½ del espesor. Un factor a tener en cuenta para explicar lo anterior, es que es más fácil y más probable que nos excedamos en la velocidad de calentamiento ya que esta depende de la temperatura de 1000 °C o 1832 °F y de la potencia de los calefactores, pues con la potencia normalmente encontrada vemos que la diferencia de temperaturas entre el calefactor y la pieza durante el calentamiento es mayor que durante el enfriamiento y por lo tanto en los mismos calientan rápidamente la piel del recipiente mientras que el interior se encuentra aun frío, produciendo un gradiente de temperaturas excesivo. Una manera obvia de evitar velocidades excesivas de enfriamiento, si no tenemos programadores de ciclo térmico, es mantener el aislamiento hasta temperaturas suficientemente bajas o 150 °C o 302 °F. Conviene tener en cuenta que la velocidad de enfriamiento depende de la diferencia de temperatura entre el material y el ambiente por lo tanto a altas temperaturas la velocidad de enfriamiento será mayor que a bajas temperaturas. A altas temperaturas se deberá seguir aplicando calor para evitar velocidades excesivas, esto se automáticamente por intermedio de programadores de ciclo térmico.

Teniendo la información necesaria se puede trazar la gráfica a seguir para el tratamiento térmico deseado, la velocidad de ascenso y descenso de temperatura debe

seguirse en intervalos de tiempo lo más cortos que se puedan para lograr uniformidad en el tratamiento térmico, esto se logra únicamente dividiendo los factores principales que determinan el régimen del tratamiento térmico que es la temperatura de relevado y el tiempo de ascenso.

La gráfica por lo general adopta la forma que tiene la figura 16 realizada con los datos del tratamiento proveniente de la tabla VII.

Figura 14. Gráfica temperatura frente al tiempo de tratamiento de tubería A 335 P11



Fuente: Elaboración propia

## CONCLUSIONES

1. La resistencia a la ruptura en una tubería que conduce vapor disminuirá conforme se incrementa la temperatura del vapor.
2. Es posible tener propiedades mecánicas en una unión soldada; muy cercana al de la tubería en general mediante la aplicación de un adecuado tratamiento térmico.
3. El tratamiento térmico a una soldadura de una tubería varía dependiendo de la composición química del material.
4. Es necesario pre calentar las áreas a soldar con el fin de no tener agrietamiento en el cordón de la soldadura aplicado.





## RECOMENDACIONES

1. Cuando se está haciendo el tratamiento térmico suele suceder que se rompa la unión del sensor de temperatura de la tubería el cual comunica con la máquina de tratamiento, entonces es necesario conectar inmediatamente un segundo sensor previamente instalado y si este segundo sensor pierde comunicación, entonces dejar enfriando la soldadura a temperatura ambiente y reiniciar nuevamente el procedimiento de incremento, permanencia y descenso de temperatura.
2. Cubrir la resistencia que se está utilizando para el tratamiento térmico con fibra aislante, con el objeto que el calentamiento de la soldadura sea homogénea y evitar también así que cualquier material dañe la resistencia que pueda provocar que está se queme.
3. Considerando que el tratamiento térmico a realizar es un poco cansado y toma un buen tiempo, es necesario que por lo menos dos personas sepan realizar dicha actividad y contar así relevos de personas si es necesario.
4. Usar equipo de seguridad industrial como respiradores, guantes para alta temperatura, casco de seguridad, zapatos resistentes a altas temperaturas y contra pinchaduras. Identificar zonas calientes.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Singer.Ferdinand L, Gaspar Torrent.Raimundo, Gutiérrez. Ángel.  
Resistencia de materiales. Publicado por Harper & Row, 1971. 21 pp.
2. Askeland. Donald R, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, cuarta edición. Publicado por Thomson 2005. 135, 136, 168 pp.
3. The American Society of Mechanical Engineers. Power Piping, ASME B31.1 – 1995 Edition. USA. 18, 19, 84, 85, 87, 88, 91, 120 – 134 pp.
4. Jimeno. E, Morral. F. R, Metalurgia General.Tomo 2. Edición 1985. 1087, 1098 pp.
5. García. Luís, Gestión del mantenimiento industrial, publicado por industria de Madrid, 1989. 72, 84, 93 pp.



TABLE A-2  
LOW AND INTERMEDIATE ALLOY STEEL

Spec. No.	Grade	Type or Class	Nominal Composition	P- No.	Allowable Stress Values in Tension, ksi, for Metal Temperature, °F, Not Exceeding											Spec. No.		
					650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150		1200	Grade
Seamless Pipe and Tube																		
A 199	T5	...	5Cr-1/2Mo	5B	12.9	12.8	12.4	12.1	11.6	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	T5	A 199
	T9	...	9Cr-1Mo	5B	12.9	12.8	12.4	12.1	11.6	11.0	10.3	7.4	5.0	3.3	2.2	1.5	T9	
A 199	T11	...	1 1/4Cr-1/2Mo	4	12.8	12.6	12.3	12.0	11.7	11.3	9.3	6.3	4.2	2.8	1.9	1.2	T11	A 199
	T21	...	3Cr-1Mo	5A	15.0	14.8	14.5	13.9	13.2	12.0	9.0	7.0	5.5	4.0	2.7	1.5	T21	
	T22	...	2 3/4Cr-1Mo	5A	15.0	15.0	15.0	15.0	14.4	13.1	11.0	7.8	5.8	4.2	3.0	1.6	T22	
	T2	...	1 1/2Cr-1/2Mo	3	15.0	15.0	14.8	14.4	14.0	13.7	9.2	5.9	...	...	...	...	T2	
A 213	T3b	...	2Cr-1/2Mo	4	14.4	14.2	13.9	13.5	13.1	12.5	10.0	6.2	4.2	2.6	...	...	T3b	A 213
	T5	...	5Cr-1/2Mo	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	T5	
A 213	T5b	...	5Cr-1/2Mo-1 1/2Si	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	T5b	A 213
	T5c	...	5Cr-1/2Mo-Ti	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.9	4.2	2.9	2.0	1.3	T5c	
A 213	T9	...	9Cr-1Mo	5B	15.0	15.0	14.8	14.4	14.0	13.6	9.3	6.3	4.2	2.8	...	...	T9	A 213
	T11	...	1 1/4Cr-1/2Mo	4	15.0	15.0	15.0	14.8	14.2	13.1	11.0	6.5	4.1	2.8	...	...	T11	
A 213	T12	...	1Cr-1/2Mo	4	15.0	14.8	14.5	13.9	13.2	12.0	9.0	7.0	5.5	4.0	...	...	T12	A 213
	T21	...	3Cr-1Mo	5A	15.0	15.0	15.0	14.4	13.1	11.0	7.9	5.8	4.2	...	...	T21		
	T22	...	2 1/4Cr-1Mo	5A	20.5	20.0	19.4	18.7	17.8	16.7	15.5	14.3	12.9	10.3	7.0	4.3	T22	
	T91	...	9Cr-1Mo-V	5B	16.3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	T91	
A 333	3	...	3 1/2Ni	9B	16.3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	3	A 333
	4	...	Ni-Cu-Al	4	15.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	4	
	7	...	2 1/2Ni	9A	16.3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	7	
	9	...	2Ni-1Cu	9A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	9	
A 335	P1	...	C-1/2Mo	3	13.8	13.8	13.8	13.5	13.1	...	...	...	...	...	...	...	P1	A 335
	P2	...	1/2Cr-1/2Mo	3	13.8	13.8	13.8	13.8	13.3	9.2	5.9	...	...	...	...	...	P2	
	P5	...	5Cr-1/2Mo	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	P5	
	P5b	...	5Cr-1/2Mo-1 1/2Si	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	P5b	
	P5c	...	5Cr-1/2Mo-Ti	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	P5c	
A 335	P9	...	9Cr-1Mo	5B	13.9	13.7	13.2	12.3	12.1	11.4	10.6	7.4	5.0	3.3	2.2	1.5	P9	A 335
	P11	...	1 1/4Cr-1/2Mo-Si	4	15.0	15.0	14.8	14.4	14.0	13.6	9.3	6.3	4.2	2.8	...	...	P11	



TABLE A-2 (CONT'D)  
LOW AND INTERMEDIATE ALLOY STEEL

Spec. No.	Grade	Type or Class	Nominal Composition	P- No.	Allowable Stress Values in Tension, ksi, for Metal Temperature, °F, Not Exceeding											Spec. No.		
					650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150		1200	Grade
Seamless Pipe and Tube (Cont'd)																		
A 335	P12	...	1Cr-1/2Mo	4	15.0	15.0	15.0	14.8	14.2	13.1	11.0	6.6	4.1	2.8	...	P12	A 335	
	P21	...	3Cr-1Mo	5A	15.0	14.8	14.5	13.9	13.2	12.0	9.0	7.0	5.5	4.0	...	P21		
	P22	...	2 1/4Cr-1Mo	5A	15.0	15.0	15.0	15.0	14.4	13.1	11.0	7.8	5.8	4.2	...	P22		
	P91	...	9Cr-1Mo-V	5B	20.5	20.0	19.4	18.7	17.6	16.7	15.5	14.3	12.9	10.3	7.0	4.3	P91	
A 369	FP1	...	C-1/2Mo	3	13.8	13.8	13.8	13.5	13.1	...	...	...	...	...	...	FP1	A 369	
	FP2	...	1/2Cr-1/2Mo	3	13.8	13.8	13.8	13.8	13.3	9.2	5.9	...	...	...	...	FP2		
	FP3b	...	2Cr-1/2Mo	4	14.4	14.2	13.9	13.5	13.1	12.5	10.0	6.2	4.2	2.6	...	FP3b		
	FP5	...	5Cr-1/2Mo	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	FP5	
A 369	FP9	...	9Cr-1Mo	5B	13.9	13.7	13.2	12.3	12.1	11.4	10.6	7.4	5.0	3.3	2.2	1.5	FP9	A 369
	FP11	...	1 1/4Cr-1/2Mo-Si	4	15.0	15.0	14.8	14.4	14.0	13.6	9.3	6.3	4.2	2.8	...	FP11		
A 369	FP12	...	1Cr-1/2Mo	4	15.0	15.0	15.0	14.8	14.2	13.1	11.0	6.6	4.0	2.8	...	FP12	A 369	
	FP21	...	3Cr-1Mo	5A	15.0	14.8	14.5	13.9	13.2	12.0	9.0	7.0	5.5	4.0	...	FP21		
	FP22	...	2 1/4Cr-1Mo	5A	15.0	15.0	15.0	15.0	14.4	13.1	11.0	7.8	5.8	4.2	...	FP22		
A 714	V	...	2Ni-1Cu	9A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	V	A 714	
Centrifugally Cast Pipe																		
A 426	CP1	...	C-1/2Mo	3	13.8	13.6	13.0	13.4	13.0	...	...	...	...	...	...	CP1	A 426	
	CP2	...	1/2Cr-1/2Mo	3	12.2	12.1	11.8	11.5	11.1	10.9	7.8	5.0	...	...	...	CP2		
	CP5	...	5Cr-1/2Mo	5B	17.7	17.4	16.8	16.3	12.1	9.2	6.8	4.9	3.6	2.4	1.7	1.1	CP5	
	CP5b	...	5Cr-1/2Mo-Si	5B	11.8	11.6	11.2	10.9	10.3	9.3	6.8	4.9	3.6	2.5	1.7	1.1	CP5b	
A 426	CP9	...	9Cr-1Mo	5B	17.7	17.4	16.8	16.3	15.5	14.0	9.4	5.3	4.3	2.8	1.8	1.3	CP9	A 426
	CP11	...	1 1/4Cr-1/2Mo	4	14.9	14.9	14.9	14.9	14.6	13.5	9.4	5.8	3.9	2.3	...	CP11		
A 426	CP12	...	1Cr-1/2Mo	4	12.8	12.8	12.6	12.6	12.1	11.1	9.4	5.6	3.5	2.4	...	CP12	A 426	
	CP21	...	3Cr-1Mo	5A	12.8	12.6	12.3	11.8	11.2	10.2	7.7	6.0	4.7	3.4	...	CP21		
	CP22	...	2 1/4Cr-1Mo	5A	14.1	14.0	13.7	13.4	12.8	12.1	9.4	5.5	4.9	3.7	...	CP22		





Table A-2

Table A-2

A95

A95

TABLE A-2 (CONT'D)  
LOW AND INTERMEDIATE ALLOY

TABLE A-2 (CONT'D)  
LOW AND INTERMEDIATE ALLOY STEEL

Spec. No.	Grade	Type or Class	Nominal Composition	P- No.	Allowable Stress Values in Tension, ksi, for Metal Temperature, °F, Not Exceeding											Spec. No.	
					650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150		1200
<b>Forgings</b>																	
A 182	F1	...	C-1/2Mo	3	17.5	17.5	17.5	17.5	17.1	17.1	...	...	...	...	...	...	F1
	F2	...	1/4Cr-1/2Mo	3	17.5	17.5	17.5	17.5	17.1	15.0	9.2	5.9	...	...	...	...	F2
	F5	...	5Cr-1/2Mo	5B	16.3	16.0	15.4	14.9	14.1	10.8	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	F5
	F5a	...	5Cr-1/2Mo	5B	20.9	20.5	19.8	19.1	14.8	10.8	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	F5a
A 182	F9	...	9Cr-1Mo	5B	19.9	19.4	18.7	18.1	17.1	16.2	11.0	7.4	5.0	3.3	2.2	1.5	F9
	F91	...	9Cr-1Mo-V	5B	20.5	20.0	19.4	18.7	17.8	16.7	15.5	14.3	12.9	10.3	7.0	4.3	F91
	F11	Class 2	11Cr-1/2Mo-Si	4	17.5	17.5	17.5	17.5	17.1	13.7	9.3	6.3	4.2	2.8	...	...	F11
	F12	Class 2	1Cr-1/2Mo	4	17.5	17.5	17.5	17.5	17.1	15.9	11.0	8.6	4.3	2.6	...	...	F12
	F21	...	3Cr-1Mo	5A	17.7	17.5	17.2	16.9	16.4	13.1	9.5	6.8	4.9	3.2	...	...	F21
	F22	Class 3	2 1/4Cr-1Mo	5A	17.7	17.5	17.2	16.9	16.4	13.8	11.0	7.6	5.8	4.4	...	...	F22
A 350	LF3	...	3 1/2Ni	9B	17.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	LF3
	LF4	...	3/4Cr-3/4Ni-Cu-Al	4	15.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	LF4
	LF5	...	Mn-1 1/2Ni	9A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	LF5
	LF5	Class 2	Mn-1 1/2Ni	9A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	LF5
	LF9	...	2Ni-1Cu	9A	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	LF9
<b>Wrought Fittings (Seamless and Welded)</b>																	
A 234	W P1	...	C-1/2Mo	3	13.8	13.8	13.8	13.5	13.1	...	...	...	...	...	...	...	W P1
	W P5	...	5Cr-1/2Mo	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	W P5
	W P11	...	1 1/4Cr-1/2Mo	4	15.0	15.0	14.8	14.4	14.0	13.6	9.3	6.3	4.2	2.8	...	...	W P11
	W P12	Class 1	1Cr-1/2Mo	4	15.0	15.0	15.0	14.8	14.2	13.1	11.0	6.6	4.1	2.8	...	...	W P12
A 234	W P22	...	2 1/4Cr-1Mo	5A	15.0	15.0	15.0	15.0	14.4	13.1	11.0	7.8	5.8	4.2	...	...	W P22
	W P91	...	9Cr-1Mo-V	5B	20.5	20.0	19.4	18.7	17.8	16.7	15.5	14.3	12.9	10.3	7.0	4.3	W P91
<b>Castings</b>																	
A 217	WC1	...	C-1/2Mo	3	13.0	13.0	13.0	12.6	12.2	...	...	...	...	...	...	...	WC1
	WC4	...	Ni-Cr-1/2Mo	4	14.0	14.0	14.0	14.0	13.7	12.0	7.4	4.7	...	...	...	...	WC4
	WC5	...	Ni-Cr-1Mo	4	14.0	14.0	14.0	14.0	13.7	13.0	8.8	5.5	3.7	2.2	...	...	WC5
	WC6	...	1 1/4Cr-1/2Mo	4	14.0	14.0	14.0	14.0	13.7	12.7	8.8	5.5	3.7	2.2	...	...	WC6
A 217	WC9	...	2 1/4Cr-1Mo	5A	13.3	13.2	12.9	12.6	12.0	11.4	8.8	6.1	4.6	3.5	...	...	WC9
	C5	...	5Cr-1/2Mo	5B	16.7	16.4	15.8	15.3	11.4	8.7	6.4	4.6	3.4	2.3	1.6	1.0	C5
	C12	...	9Cr-1Mo	5B	16.7	16.4	15.8	15.3	14.6	13.2	8.8	5.9	4.0	2.6	1.7	1.2	C12
<b>Bolts, Nuts, and Studs</b>																	
A 193	B5	...	5Cr-1/2Mo	...	20.0	20.0	20.0	18.5	14.5	10.4	7.6	5.6	4.2	3.1	2.0	1.3	B5
	B7	...	1Cr-1/2Mo	...	25.0	25.0	23.6	21.0	17.0	12.5	8.5	4.5	...	...	...	...	B7
	B7	...	1Cr-1/2Mo	...	23.0	23.0	22.2	20.0	16.3	12.5	8.5	4.5	...	...	...	...	B7
	B7M	...	1Cr-1/2Mo	...	18.8	18.8	18.8	18.0	16.3	12.5	8.5	4.5	...	...	...	...	B7M
	B7M	...	1Cr-1/2Mo	...	20.0	20.0	20.0	18.5	16.2	12.5	8.5	4.5	...	...	...	...	B7M







TABLE A-2 (CONT'D)  
LOW AND INTERMEDIATE ALLOY STEEL

Spec. No.	Grade	Type or Class	Nominal Composition	P- No.	Allowable Stress Values in Tension, ksi, for Metal Temperature, °F, Not Exceeding											Spec. No.		
					650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150		1200	Grade
Electric Fusion Welded Pipe — Filler Metal Added (Cont'd)																		
A 691	1 1/4Cr	20,23	1 1/4Cr-1/2Mo-Si	4	13.5	13.5	13.5	13.5	13.1	12.3	8.4	5.7	3.8	2.5	...	1 1/4Cr	A 691	
	1 1/4Cr	21,22	1 1/4Cr-1/2Mo-Si	4	15.0	15.0	15.0	15.0	14.6	13.7	9.3	6.3	4.2	2.8	...	1 1/4Cr	A 691	
	1 1/4Cr	20,23,30,33,40,43	1 1/4Cr-1/2Mo-Si	4	16.9	16.9	16.9	16.9	16.5	12.3	8.4	5.7	3.8	2.5	...	1 1/4Cr	A 691	
	1 1/4Cr	21,22,31,32,41,42	1 1/4Cr-1/2Mo-Si	4	18.8	18.8	18.8	18.8	18.3	13.7	9.3	6.3	4.2	2.8	...	1 1/4Cr	A 691	
A 691	2 1/4Cr	20,23	2 1/4Cr-1Mo	5A	13.5	13.5	13.5	13.5	13.0	11.8	9.9	7.0	5.2	3.8	...	2 1/4Cr	A 691	
	2 1/4Cr	21,22	2 1/4Cr-1Mo	5A	15.0	15.0	15.0	15.0	14.4	13.1	11.0	7.8	5.6	4.2	...	2 1/4Cr	A 691	
	2 1/4Cr	20,23,30,33,40,43	2 1/4Cr-1Mo	5A	15.9	15.8	15.5	15.2	14.8	14.2	9.9	6.8	5.2	4.0	...	2 1/4Cr	A 691	
	2 1/4Cr	21,22,31,32,41,42	2 1/4Cr-1Mo	5A	17.7	17.5	17.2	16.9	16.4	15.8	11.0	7.6	5.6	4.4	...	2 1/4Cr	A 691	
A 691	3Cr	20,23	3Cr-1Mo	5A	13.5	13.3	13.1	12.5	11.9	10.8	8.1	6.3	5.0	3.6	...	3Cr	A 691	
	3Cr	21,22	3Cr-1Mo	5A	15.0	14.8	14.5	13.9	13.2	12.0	9.0	7.0	5.5	4.0	...	3Cr	A 691	
	3Cr	20,23,30,33,40,43	3Cr-1Mo	5A	15.9	15.8	15.5	15.2	14.8	11.8	8.6	6.1	4.4	2.9	...	3Cr	A 691	
	3Cr	21,22,31,32,41,42	3Cr-1Mo	5A	17.7	17.5	17.2	16.9	16.4	13.1	9.5	6.8	4.9	3.2	...	3Cr	A 691	
A 691	5Cr	20,23	5Cr-1/2Mo	5B	12.5	12.3	11.9	11.5	10.9	9.8	7.2	5.2	3.8	2.6	1.8	1.2	5Cr	A 691
	5Cr	21,22	5Cr-1/2Mo	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	5Cr	A 691
	5Cr	20,23,30,33,40,43	5Cr-1/2Mo	5B	15.7	15.4	14.9	14.4	13.6	9.8	7.2	5.2	3.8	2.6	1.6	1.2	5Cr	A 691
	5Cr	21,22,31,32,41,42	5Cr-1/2Mo	5B	17.4	17.1	16.5	16.0	15.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	5Cr	A 691
A 387	2	1	1/2Cr-1/2Mo	3	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.3	9.2	5.9	...	...	...	2	A 387	
	2	2	1/2Cr-1/2Mo	3	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	16.9	9.2	5.9	...	...	...	2	A 387	
	5	1	5Cr-1/2Mo	5B	13.9	13.7	13.2	12.8	12.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	5	A 387
	5	2	5Cr-1/2Mo	5B	17.4	17.1	16.5	16.0	15.1	10.9	8.0	5.8	4.2	2.9	2.0	1.3	5	A 387
	11	1	1 1/4Cr-1/2Mo-Si	4	15.0	15.0	15.0	15.0	14.6	13.7	9.3	6.3	4.2	2.8	...	11	A 387	
	11	2	1 1/4Cr-1/2Mo-Si	4	18.8	18.8	18.8	18.8	18.3	13.7	9.3	6.3	4.2	2.8	...	11	A 387	
	12	1	1Cr-1/2Mo	4	13.8	13.8	13.8	13.8	13.4	12.8	11.0	6.6	4.3	2.6	...	12	A 387	
	12	2	1Cr-1/2Mo	4	16.3	16.3	16.3	16.3	15.8	15.1	11.0	6.6	4.3	2.6	...	12	A 387	
A 387	21	1	3Cr-1Mo	5A	15.0	14.8	14.5	13.9	13.2	12.0	9.0	7.0	5.5	4.0	...	21	A 387	
	21	2	3Cr-1Mo	5A	17.7	17.5	17.2	16.9	16.4	13.1	9.5	6.8	4.9	3.2	...	21	A 387	
	22	1	2 1/4Cr-1Mo	5A	15.0	15.0	15.0	15.0	14.4	13.1	11.0	7.8	5.8	4.2	...	22	A 387	
	22	2	2 1/4Cr-1Mo	5A	17.7	17.5	17.2	16.9	16.4	15.8	11.0	7.6	5.8	4.4	...	22	A 387	
A 387	91	2	9Cr-1Mo-V	5B	20.5	20.0	19.4	18.7	17.8	16.7	15.5	14.3	12.9	10.3	7.0	4.3	91	A 387



Table A-2

Table A-2

TABLE A-2 (CONT'D)  
LOW AND INTERMEDIATE ALLOY

TABLE A-2 (CONT'D)  
LOW AND INTERMEDIATE ALLOY STEEL

Spec. No.	Grade	Type or Class	Nominal Composition	P-No.	Allowable Stress Values in Tension, ksi, for Metal Temperature, °F, Not Exceeding											Spec. No.			
					650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150		1200	Grade	
Bolts, Nuts, and Studs (Cont'd)																			
A 193	B16	...	1Cr-1/2Mo-V	...	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	23.5	20.5	16.0	11.0	6.3	2.8	...	...	B16	A 193
	B16	...	1Cr-1/2Mo-V	...	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	21.0	18.5	15.3	11.0	6.3	2.8	...	...	B16	
	B16	...	1Cr-1/2Mo-V	...	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	18.8	16.7	14.3	11.0	6.3	2.8	...	...	B16	
A 194	3	...	5Cr-1/2Mo	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	3	A 194
	4	...	C-Mo	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	4	
	7	...	Cr-Mo	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	7	
A 320	L7	...	1Cr-1/2Mo	...	25.0	25.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	L7	A 320
	L7M	...	1Cr-1/2Mo	...	20.0	20.0	20.0	18.5	16.2	12.5	8.5	4.5	...	...	...	...	...	L7M	
	L43	...	1 3/4 Ni-3/4 Cr-1/2 Mo	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	L43	
A 354	BC	...	Alloy Steel	...	25.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	BC	A 354
	BC	...	Alloy Steel	...	23.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	BC	
	BD	...	Alloy Steel	...	30.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	BD	
	BD	...	Alloy Steel	...	28.0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	BD	