

6  
25



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES**

**A R A G O N**

**DETERMINACION DE UN METODO DE EVALUACION  
PARA OBTENER LA VIDA REMANENTE DE LOS  
PRINCIPALES COMPONENTES DE UN GENERADOR  
DE VAPOR**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A :**

**ISMAEL CORTEZ ALCANTARA**

**DIRECTOR : M. EN I. DANIEL ALDAMA AVALOS**

**SAN JUAN DE ARAGON**

**1994**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A :

Guadalupe Alcántara

*Tal vez se deba esta a que fuiste el primer milagro que alentó mi vida, el primer alisba que tuve de la que ahora soy.*

*Has estado presente en los años de mayor estrechez que hemos pasado... e hiciste posible la risa en medio de la pobreza, el calor cuando hacia frío y el éxito a pesar de los fracasos. debes de haber sufrido bastante por nuestra presencia, y tú, en vez de dejarte vencer, reaccionaste, haciéndote fuerte. Es admirable tu vehemencia, tu independencia y tu impulsividad.*

*Has compartido tus mejores años, cuando las prioridades y los valores pueden confundirse, tu nos hiciste recordar lo que realmente éramos, volviéndonos a la senda correcta cuando nos desviábamos, nos estimulaste con tu alegría de vivir.*

*Ahora tu cobello de pronto ha empezado a cambiar de color, de cualquier forma gracias a ti se nos ha aligerado el paso, nuestras espaldas se irguieron y revivió nuestra esperanza.*

*Te he amado por tu paciencia, tu comprensión y compasión. Pero sobre todo he amado a la mujer que ha tenido una vida bastante dura pero que la ha vivido con gran argolla.*

---

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Es imposible dar el adecuado reconocimiento a todas las personas quienes han contribuido substancialmente en la elaboración de este trabajo.

Doy especiales gracias a dos distinguidas personas quienes su contribución profesional ahora se refleja en este libro, a los profesores Daniel Aldama Avalos y Cuiclahuac Osornio Correa.

Quisiera reconocer con un sincero agradecimiento a diversas personas quienes participaron con su ayuda, apoyo y motivación, ellos son, Francisco González, Margarito Barajas, Arturo Martínez, Agustín Arrieta, Mauro Díaz e Irma Mejía.

Finalmente expreso un especial agradecimiento con mucho cariño a Mireya Araiza por su entendimiento y apoyo durante los años de preparación de este trabajo.

**I.C.A**

---

# INDICE

---

TITULO	pag.
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
INDICE	VI
INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPITULO UNO El generador de vapor, los aceros y aleaciones que emplea</b>	<b>3</b>
1.1 GENERALIDADES	3
1.1.1 EL GENERADOR DE VAPOR	3
1.1.2 EL CICLO RANKINE	4
1.1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR	7
1.2 ACEROS Y ALEACIONES (CODIGOS, NORMAS Y ESPECIFICACIONES)	8
1.2.1 CODIGOS Y NORMAS	9
1.2.2 ESPECIFICACIONES DE MATERIALES	9
1.3 PROCESOS DE TRANSFORMACION	11
1.3.1 EL ACERO Y SU MANUFACTURA	11
1.3.2 EL ALTO HORNO	11
1.3.3 HORNOS DE ACERACION	12
1.3.4 EL HORNO SIEMENS-MARTIN	12
1.3.5 EL HORNO ELECTRICO	12
1.3.6 HORNO BOF O CONVERTIDOR BASICO	12
1.4 METODOS DE INSPECCION	12
1.4.1 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS	14
1.5 COMERCIALIZACION DE LOS MATERIALES	17
1.5.1) ALCANCE DE LOS MATERIALES	17
1.5.2) REQUISITOS TECNICOS	17
1.5.3) ACCESO	18
1.5.4) SELECCION DE PROVEEDORES	18
1.5.5) PROCEDIMIENTO DE SELECCION	18
1.5.6) EVALUACION DE OFERTAS Y ADJUDICACION DE CONTRATOS	18
<b>CAPITULO DOS Diseño básico del generador de vapor y cuidados posteriores a su fabricación</b>	<b>20</b>
2.1 TIPOS. COMPONENTES PRINCIPALES, FUNCIONAMIENTO Y LOCALIZACION DE LOS MATERIALES DE ACUERDO A SU UBICACION.	20
2.1.1. TIPOS DE GENERADORES DE VAPOR (CLASIFICACION)	20
2.1.2. COMPONENTES PRINCIPALES	22
2.2 INTEGRACION DE LOS MATERIALES (FABRICACION EN CAMPO)	28
2.2.1 FABRICACION EN TALLER	28
2.2.2 MONTAJE	30

2.2.3 TIPOS DE UNION DE TUBERIAS	30
2.2.4 NORMALIZACION DE ELECTRODOS	33
2.2.5 UNIONES EMBRIDADAS	34
2.3 FALLAS CARACTERISTICAS EN UN GENERADOR DE VAPOR Y ACCIONES CORRECTIVAS	34
2.3.1 RUPTURA POR ESFUERZO	35
2.3.2 CORROSION LADO AGUA	36
2.3.3 CORROSION LADO FUEGO	38
2.3.4 EROSION	39
2.3.5 FATIGA	41
2.4 INSPECCION EN SERVICIO DEL GENERADOR DE VAPOR	42
2.4.1 PLAN DE INSPECCION	42
2.4.2 EXAMENES NO DESTRUCTIVOS Y SU APLICACION	43
2.4.3 DESARROLLO DE LA INSPECCION	43
2.5 DETERMINACION DE LA VIDA REMANENTE POR METODOS YA ESTABLECIDO	44
2.5.1 DETERMINACION DE LA VIDA RESIDUAL	45
2.5.2 FRACTURA POR ESFUERZO	46
2.5.3 CARACTERISTICAS DEL ENSAYO DE TERMOFLUENCIA (CREEP)	48
<b>CAPITULO TRES Trabajo de campo</b>	<b>54</b>
3.1. CONSIDERACIONES DE LA INVESTIGACION	54
3.2 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	57
3.2.1 MATERIALES UTILIZADOS	57
3.2.2 EQUIPOS UTILIZADOS	59
3.3 PROCEDIMIENTO	59
3.3.1. RECOLECCION DE LOS MATERIALES, SELECCION E IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	59
3.3.2 EXAMINACION MICROSCOPICA Y ANALISIS DE LOS MATERIALES BASICOS	60
3.3.3 ENSAYOS MECANICOS (MEDICION DE DUREZAS EN LAS PRIMERAS MUESTRAS)	61
3.3.4 ENSAYO SIMULADO DE LAS CONDICIONES DE OPERACION.	61
3.3.5 PREPARACION DE LAS MUESTRAS METALOGRAFICAS	62
3.3.6 PREPARACION DE LAS MUESTRAS PARA MEDICION DE DUREZAS	62
3.3.7 EXAMINACION Y ANALISIS DE LAS MUESTRAS METALOGRAFICAS.	62
3.4 CAPTACION DE LA INFORMACION	63
<b>CAPITULO CUATRO Análisis de los resultados de la investigación.</b>	<b>64</b>
4.1. DATOS OBTENIDOS	64
4.1.1 ANTECEDENTES	64
4.1.2 FOTOMICROGRAFIAS CORRESPONDIENTES AL MATERIAL SA-106 GR C	68
4.1.2 RESULTADOS DE LA INVESTIGACION SOBRE EL ACERO AL CARBON.	65
4.1.3 DATOS OBTENIDOS DEL MATERIAL DE ACERO AL CARBON-MOLIBDENO SA-209 T1	70
4.1.4 DATOS OBTENIDOS DEL MATERIAL DE ACERO AL 2.25 Cr- 1 Mo, SA 213 T22	74
4.1.5 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MATERIAL DE ACERO INOXIDABLE.	78
4.2 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS	82

4.2.1. ANALISIS DE DATOS DEL MATERIAL SA-106 GR. C	87
4.2.2 ANALISIS DE LOS DATOS DEL MATERIAL SA- 209-T1.	88
4.2.3. ANALISIS DE DATOS DEL MATERIAL SA-213-T22	90
4.2.4 EMPLEO DE LA LEY DEL DECAIMIENTO PARA EL ANALISIS DE LOS DATOS GENERADOS DE LA INVESTIGACION REALIZADA.	91
4.2.5. ECUACIONES GENERALES OBTENIDAS.	96
4.2.6 MANEJO DE LOS RESULTADOS (USO DE LAS FORMULAS)	97
<b>A N E X O "A" FRAGILIZACION DEL ACERO INOXIDABLE TIPO 347 POR FASE SIGMA.</b>	<b>101</b>
CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES	113
BIBLIOGRAFIA	114

---

# INTRODUCCION

---

Un buen numero de aleaciones de acero han sido desarrolladas para satisfacer la demanda industrial en todo el mundo, usándose en diversos equipos como: recipientes, vehículos, motores, generadores de vapor, entre otras aplicaciones.

De particular importancia, para este trabajo , son aquellos los cuales combinan sus propiedades mecánicas y químicas para proporcionar un buen servicio a elevadas temperaturas en un generador de vapor.

Es importante mencionar que el conocimiento de los fenómenos metalúrgicos que ocurren en los aceros usados en la fabricación de los generadores de vapor posibilita resolver algunos problemas por fallas en tuberías, una de las principales causas de indisponibilidad de centrales eléctricas.

Por lo tanto en años recientes, también se han desarrollado técnicas y métodos que nos ayudan a predecir la vida remanente de los materiales que operan a elevadas temperaturas, los cuales son un importante apoyo a las actividades de mantenimiento de tuberías, todo esto para incrementar la disponibilidad de las unidades generadoras.

Este trabajo describe principalmente la investigación realizada para obtener un método que nos permita, de una forma sencilla, conseguir resultados análogos a los proporcionados por los métodos conocidos.

Finalmente, la presente investigación examina la relación entre la propiedad mecánica de la dureza y los cambios microestructurales ocurridos en diversos aceros usados en la fabricación de generadores de vapor, en función del tiempo y la temperatura a la que son expuestos.

Considerando que la microestructura de estos materiales tiende a modificarse por el efecto de la temperatura, haciendo que las propiedades mecánicas resultantes, después de periodos prolongados de exposición se vean seriamente disminuidas.

El capítulo uno plantea en el inciso de generalidades, algunas ideas básicas de termodinámica y transferencia de calor como antecedentes de la utilización y formas de manifestación del calor en un generador de vapor. En este capítulo se describe también, en forma general, la normativa internacional relacionada con los materiales empleados en una caldera, así mismo se indican las especificaciones de dichos materiales de acuerdo a lo establecido por el código ASME.

Los procesos para la manufactura del acero, los métodos de inspección, principalmente no destructivos, para la verificación de los aceros y la comercialización de estos, son indicados en el capítulo uno.



=====

El capítulo dos maneja primordialmente al generador de vapor, realizando una clasificación de estos y describiendo cada uno de los componentes principales que lo integran. Se resume en cuanto a la fabricación una visita realizada a una planta especialista en la manufactura de calderas.

Es importante mencionar la descripción realizada a los procesos de soldadura, aunque se haya hecho de una manera sencilla, esta forma de unión de metales es una parte fundamental en el montaje de un generador de vapor. Otro aspecto básico de este tipo de equipos son las fallas que se puedan generar durante su operación, ya que estas representan una pérdida económica significativa para el usuario del equipo, por lo que también se mencionan las fallas características, su localización, apariencia típica y una recomendación para evitar los tipos de falla descritos. Así también una forma de conocer el estado actual de la tubería del generador es realizar una inspección en servicio y mediante la ayuda de los métodos para determinar la vida remanente de los aceros empleados, se pueden programar mantenimientos preventivos a fin de evitar fallas que pongan fuera de servicio al generador de vapor.

En los capítulos tres y cuatro se indican el trabajo de campo y los resultados obtenidos, respectivamente, empleados con la finalidad de generar un método para la determinación de la vida remanente de cuatro aceros que son comúnmente usados para trabajar a elevadas temperaturas en un generador de vapor.

---

# CAPITULO UNO

---

## 1. EL GENERADOR DE VAPOR, ACEROS Y ALEACIONES QUE EMPLEA

### 1.1 GENERALIDADES

En México la industrialización exige cada día el suministro de energía eléctrica. Para lograr la producción de esta, es necesario una central eléctrica. Dichas centrales se clasifican en las siguientes:

- a) Centrales Termoeléctricas (CTE)
- b) Centrales hidroeléctricas (CHE)
- c) Centrales Nucleoeléctricas (CNE)

Actualmente las que mayor divulgación han tenido son las centrales termoeléctricas (CTE). "En las CTE se genera cerca del 76% de la energía eléctrica que se produce en nuestro planeta. Esto se debe a que en casi todas las regiones del mundo existe combustible orgánico. Los otros dos tipos de centrales, hidroeléctrica y nucleoeléctrica, constituyen el 21% y 3% respectivamente".(1)

En nuestro país estos porcentajes de generación son muy similares, para la CTE existe un 71% aproximadamente y un 22% de las CHE. Sabemos que ha entrado en operación la central nuclear de Laguna Verde, que fue conectada a la red general de generación con un 7% de energía eléctrica producida.

Este trabajo se enfoca al estudio, principalmente del generador de vapor, y sus características, como parte integral de una central termoeléctrica, donde también se emplean otros componentes básicos.

#### 1.1.1 EL GENERADOR DE VAPOR

"Se comprende como caldera a un recipiente por el cual circulan agua y gases de combustión contando esta con superficies que absorben el calor por convección. Al diseñarse las paredes enfriadas por agua, los sobrecalentadores, recalentadores y otros equipos auxiliares se creo el termino Generador de Vapor (GV) para dar al equipo una denominación más apropiada. La caldera se sobreentiende que describe a la unidad generadora de vapor en su conjunto". (2)

Tomando en consideración la definición anterior, en este trabajo se utilizaran los dos términos indistintamente, caldera y generador de vapor, ya que en cualquier planta de fuerza se maneja de la misma forma.

"Un generador de vapor es un aparato termodinámico, cuya principal función es la de convertir el agua en vapor por la transferencia de calor de los gases de una combustión". (3)

La termodinámica como se observa juega un papel fundamental en el diseño de un GV, ya que este se basa en estudios de procesos termodinámicos y en principios de transferencia de calor. Entre estos estudios mencionaremos el ciclo Rankine, el cual analiza los sistemas generadores de vapor, figura número 1.1.

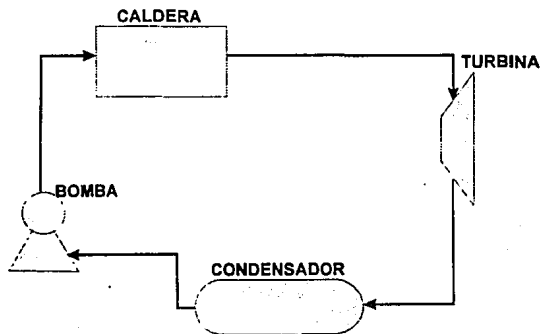


Figura 1.1 Diagrama de bloques del Ciclo Rankine

### 1.1.2 EL CICLO RANKINE

En este ciclo termodinámico el agua es comprimida por una bomba, alimentándola a la caldera la cual la convierte en vapor a alta presión, este vapor pasa a la turbina productora del movimiento de un generador eléctrico produciéndose así la electricidad. Finalmente el vapor sale de la turbina hacia un condensador y el líquido vuelve nuevamente a la bomba para dar principio al ciclo una vez más.

Cada una de las etapas del ciclo Rankine descrito anteriormente son un proceso termodinámico, las cuales se presentan en la tabla número 1.1 con los diagramas respectivos en la figura 1.2 a y b.

ETAPA DEL CICLO	DESCRIPCION DEL PROCESO
1 - 2	Compresión isentrópica en la bomba
2 - 3	A presión constante (isobárica) con adición de calor a la caldera
3 - 4	Expansión isentrópica en la turbina
4 - 1	A presión constante (isobárica) con eliminación de calor en el condensador

Tabla 1.1 Procesos termodinámicos del ciclo Rankine.

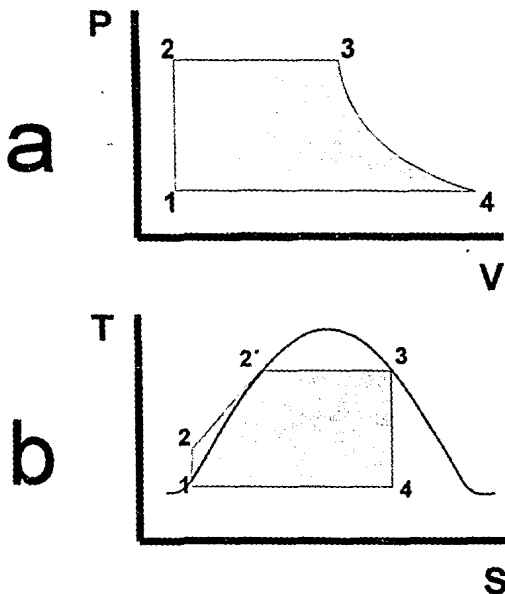


Figura 1.2 a y b Diagramas de presión-volumen y temperatura-entropía que representan las etapas del Ciclo Rankine

De la figura 1.2.b; podemos decir que el proceso 1-2 en la bomba, es considerado como reversible, con un fluido incompresible es isentropico. Se añade calor en un proceso isobarico 2-3. En la primera etapa (2-2'), la temperatura del líquido subenfriado es incrementada a la temperatura de saturación a condiciones de presión de la caldera.

Después en la etapa (2'-3) el calor latente de vaporización es añadido convirtiendo el líquido saturado a vapor saturado. Un trabajo es producido por el proceso de expansión isentropica 3-4 en la turbina. El calor es removido por el proceso isobárico 4-1. Durante este proceso todo el vapor es convertido a líquido saturado a condiciones de presión del condensador.

Una modificación del ciclo Rankine que normalmente se emplea en centrales termoeléctricas es el recalentamiento. Esto es después que el vapor sale de la turbina de alta presión regresa a la caldera para recalentarse antes de alimentarlo a la turbina de baja presión. En la figura 1.3 se observa el diagrama de bloques del ciclo Rankine con recalentamiento. Los procesos termodinámicos que intervienen se describen y representan en la tabla 1.2 y en el diagrama de la figura 1.4 respectivamente.

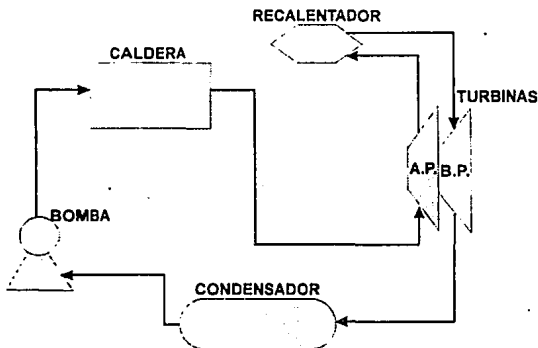


Figura 1.3 Diagrama de bloques del Ciclo Rankine con recalentamiento

ETAPA DEL CICLO	DESCRIPCION DEL PROCESO
1 - 2	Compresión isoentrópica en la bomba
2 - 3	Presión constante (isobárico) con adición de calor a la caldera
3 - 3'	Presión constante (isobárico) con adición de calor en el sobrecalentador
3 - 4	Expansión isoentrópica en la turbina
4 - 5	Presión constante (isobárico) con adición de calor en el recalentador
5 - 6	Expansión isoentrópica en la turbina de baja presión
6 - 1	Presión constante (isobárico) con eliminación de calor en el condensador

Tabla 1.2 Ciclo Rankine con Recalentamiento

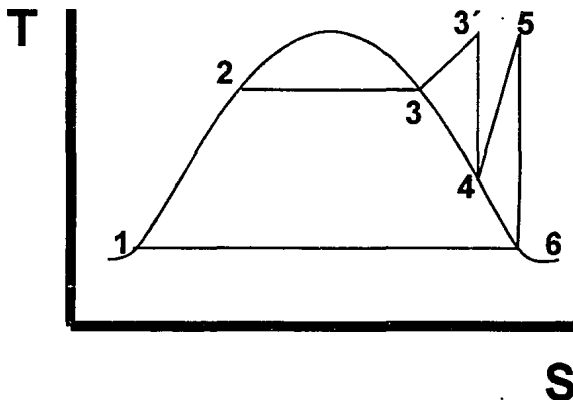


Figura 1.4 Diagrama de temperatura-entropía que representan las etapas del Ciclo Rankine con recalentamiento

En las centrales termoeléctricas son empleados ambos tipos de ciclos, el ciclo Rankine y el ciclo Rankine modificado, en función de la capacidad de la caldera.

### 1.1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR

Otro aspecto importante que fue señalado en la definición del GV es la transferencia de calor. Sabemos que cuando existe una diferencia de temperaturas entre dos medios distintos, el más caliente cederá su energía (calor) al que está frío (con menor temperatura).

El GV también es una aplicación de los principios de transferencia de calor. Ahora bien, la forma de realizarse este intercambio de energía sigue ciertos mecanismos en función del medio y la forma en que se desplace el calor. "Existen tres mecanismos básicos de transferencia de calor que son:" (4)

- a) Conducción
- b) Convección
- c) Radiación

### **1.1.3.a CONDUCCION**

El flujo de calor por conducción es transferido por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas. La conducción ocurre a través de cuerpos sólidos, líquidos y gases y/o de un cuerpo a otro cuando estos están en contacto físico con otro. (4)

### **1.1.3.b CONVECCION**

La transferencia de calor por convección ocurre entre un fluido y una superficie sólida cuando hay movimiento relativo entre el fluido y el sólido. Tal movimiento del fluido puede ser dirigido por pequeñas fuerzas generadas por gradientes térmicos en el fluido (convección libre) o por movimiento forzado del fluido (convección forzada) (4)

### **1.1.3.c RADIACION**

Es el mecanismo de transferencia de calor que se da entre dos medios separados por un espacio que incluso puede ser el vacío. La energía incidente en un cuerpo se descompone de acuerdo al aprovechamiento de ésta, así la energía incidente se va a reflejar, absorber y a transmitir dependiendo de la naturaleza del cuerpo, características de superficie y de su forma geométrica. (4)

## **1.2 ACEROS Y ALEACIONES (CODIGOS, NORMAS Y ESPECIFICACIONES)**

"Un generador de vapor utiliza una gran variedad de materiales metálicos, aceros principalmente, en forma de tubería, cerca de 483 Km (300 millas) de ésta, con rangos que van de 1.9 a 7.6 cm. (0.75 a 3.0 plgs) de diámetro exterior" (5) Para poder fabricar esta tubería es necesario una normalización de los materiales para que los fabricantes y diseñadores tengan un mismo criterio y que los primeros produzcan lo que realmente necesita la industria y que los segundos diseñen artículos con materiales fácilmente adquiribles en el mercado.

Existen varios comités en el mundo encargados de estudiar y normalizar estos materiales, sus conclusiones se reflejan en las normas correspondientes que son aceptadas por fabricantes y proyectistas.

Inmediatamente surge una pregunta que hacer, ¿Cómo se elige el material adecuado, dentro de una gama determinada, para cada trabajo a realizar? Naturalmente, según la aplicación así debe ser el material, puro o exento de ciertas impurezas o con limitaciones de algunas otras, lo cual obligaría al fabricante a dar una larga serie de composiciones del acero que necesita, para que el proveedor le suministre el que se ajuste a sus exigencias.

### 1.2.1 CODIGOS Y NORMAS

La solución fue la dedicación en principios de algunos grupos de teóricos, y más tarde entidades complejas, expertos en normalización de los materiales, atendiendo las propiedades físicas, químicas, mecánicas y de cualquier tipo dando lugar a la creación de las normas de clasificación de los materiales.

Naturalmente las normas son muchas y no siempre cubren el total de necesidades de materiales que el desarrollo tecnológico exige, por ello van en constante aumento y perfeccionamiento. A continuación vamos a referir algunas de las normas más conocidas y usuales del mundo, tabla 1.3.

Tabla 1.3 ASOCIACIONES CREADORAS DE NORMAS MAS CONOCIDAS

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
<b>A S M E</b>	American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
<b>A S T M</b>	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
<b>A N S I</b>	American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de Normalización)
<b>A P I</b>	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)
<b>D I N</b>	Das Est Norm (Una Norma Alemana)
<b>A F N O R</b>	Association Franccaise Normalisation (Asociación Francesa de Normalización)
<b>B S</b>	British Standard (Estandarización Británica)
<b>I S O</b>	International Standards Organization (Organización Internacional de Normalización)
<b>J I S</b>	Japan Institute Standards (Instituto Japones de Normalización)

### 1.2.2 ESPECIFICACIONES DE MATERIALES

Cada una de las asociaciones mencionadas anteriormente crea sus normas para la fabricación de los materiales, la utilización de éstos. pruebas que se les pueden realizar, propiedades (físicas, químicas, mecánicas), y comportamiento ingenieril de estos materiales en la industria. Las normas se



plasman en los llamados códigos, los cuales contienen toda información requerida por un fabricante para llevar a cabo la elaboración de un producto. En México las centrales termoeléctricas para la fabricación, montaje, operación y reparaciones de sus calderas se basan en el llamado código ASME. Este ha aprobado ciertos aceros para la fabricación de tuberías en el diseño de calderas. El código ASME consta de once secciones que se enuncian a continuación tabla 1.3.a.:

SECCION	TITULO
I	Calderas de potencia
II	Materiales (especificaciones)
III	Componentes nucleares
IV	Calderas de calor
V	Pruebas no destructivas
VI	Requisitos de operación de calderas de calor
VII	Requisitos de operación de calderas de potencia
VIII	Recipientes a presión
IX	Soldadura
X	Recipientes a presión de fibra de vidrio y plástico
XI	Inspección en servicio de una central nuclear

Tabla 1.3.a. Secciones del código ASME.

La sección I del código para calderas (ASME) titulado "Calderas de Potencia" menciona en su párrafo PG.9 los materiales permisibles para un generador de vapor", tabla 1.4, (6). La sección II nos marca las especificaciones de materiales y requerimientos de manufactura para varios aceros aprobados.

El número de especificación ASME es comúnmente usado para identificar la tubería de acero permisible en diferentes secciones de caldera. La especificación ASME es esencialmente la misma que la especificación ASTM.

Los tubos de acero usados en generadores de vapor se seleccionan de acuerdo a la temperatura del metal que experimentan, en acuerdo con los criterios de diseño. Por ejemplo para tuberías de acero al carbono se emplean los aceros con especificación ASME SA-178-A, SA-192, SA-106-B y SA-210 para fabricar economizadores, paredes de agua y sobrecalentadores de baja temperatura. A diferencia de la especificación ASME, la especificación ASTM se designa de la siguiente manera.:

ASME	ASTM
SA-178-A	A-178-A
SA-192	A-192
SA-210	A-210
SA-106-B	A-106-B

Unicamente la "S" es la que se agrega a la especificación ASME, pero en lo que respecta a composiciones químicas, propiedades mecánicas, etc., de los materiales es completamente lo mismo entre ambas especificaciones.

Tabla 1.4 . Especificaciones de tubería de acero para calderas aprobados por el código ASME (6)

ESPECIFICACION	TITULO
SA-106	Tubería de acero al carbón para servicio a alta temperatura.
SA-178	Tubería de acero al carbón con costura
SA-192	Tubería de acero al carbón para servicio de alta temperatura y alta presión sin costura
SA-210	Tubería de acero de medio carbón para sobrecalentadores sin costura
SA-213	Tubería sin costura de aleaciones de aceros ferríticos y austeníticos para sobrecalentadores
SA-226	Tubería de acero al carbón con costura para sobrecalentadores sometidos a altas presiones.
SA-249	Tubería con costura de acero austenítico para sobrecalentadores
SA-250	Tubería de acero al carbón-molibdeno para sobrecalentadores
SA-268	Tubería de acero inoxidable ferrítico para servicio en general
SA-423	Tubería de acero de baja aleación con costura o sin costura
SA-450	Tubería para requerimientos generales de acero al carbón, aleaciones ferríticas y austeníticas

### 1.3 PROCESOS DE TRANSFORMACION

#### 1.3.1 EL ACERO Y SU MANUFACTURA

Es importante saber acerca de la metalurgia del acero, ya que al entender como se producen las distintas clases, se conocerá más del porqué de su normalización. Como se sabe el acero puede ser manufacturado a partir de minerales vírgenes o de chatarra. Las formas y mecanismos de transformación del acero se describirán a continuación.

#### 1.3.2 EL ALTO HORNO

\*El tamaño de un alto horno moderno es aproximadamente de 30 mts. de altura y un diámetro interior de 10 mts.; su cubierta exterior es de acero y su interior esta recubierto con ladrillo refractario denso, duro y de alta calidad. El tiempo que puede operar continuamente un alto horno depende de la vida del refractario, normalmente los altos hornos operan sin interrupción de 3 a 7 años. La operación del Alto Horno se basa en la reacción química que se produce entre la carga sólida y el flujo ascendente de los gases en el horno. La carga consiste principalmente de mineral de fierro, fúndente y coque. El mineral de Fe es óxido de fierro en trozos de aproximadamente 10 cm. de diámetro. El fúndente es piedra caliza, la cual se descompone en CaO y CO<sub>2</sub>; la cual reacciona con las impurezas

contenidas en el mineral y en el roque para formar escoria, ya que al quemarse produce gas CO que es el principal agente reductor en la producción del acero.\*(7)

### **1.3.3 HORNOS DE ACERACION**

\*Para purificar el arrabio y la chatarra se utilizan diversos tipos de hornos, entre los cuales están los Siemens-Martín, el horno eléctrico y el BOF o convertidor básico.\*(7)

### **1.3.4 EL HORNO SIEMENS-MARTIN**

\*Tiene la ventaja de eliminar el fósforo, producir composiciones de acero más exactas y utilizar chatarra, lo cual es cada vez más importante.\*(7)

### **1.3.5 EL HORNO ELECTRICO**

\*Emplea grandes electrodos de grafito para producir un arco de gran intensidad que funde la carga. La ventaja de este horno es que es mucho más sencillo mantener en su interior una atmósfera ya sea oxidante o reductora.\*(7)

### **1.3.6 HORNO BOF O CONVERTIDOR BASICO**

\*Grandes avances se han logrado en los procesos de aceracion gracias al uso de inyección de oxígeno puro en lugar de aire; este método permite la producción de grandes toneladas de acero con bajo contenido de nitrógeno.\*(7)

Finalmente de estos procesos podemos extraer dos etapas básicas que se realizan para la obtención del acero.

- a) En el Alto Horno su función básica consiste en reducir el mineral mediante el coque para obtener un arrabio o hierro metálico con grandes cantidades de carbón y otras impurezas como fósforo, azufre, etc.
- b) Refinación del acero (de arrabio o chatarra), mediante la eliminación del carbono e impurezas y agregando elementos que dan a los aceros sus cualidades específicas.

## **1.4 METODOS DE INSPECCION**

Todos los materiales metálicos son necesariamente inspeccionados durante su fabricación. Es importante determinar la homogeneidad total de estos materiales ya que en ocasiones se corre el riesgo de fallas que generan pérdidas económicas considerables y accidentes lamentables que pudieron ser evitados.

=====

"Calidad de los Materiales" es una expresión cuyo significado depende del uso final que se de a dichos materiales. Controlar realmente la calidad que se requiere para cada material en particular en cuanto a desempeño de su función."(8)

El grado de calidad puede determinarse mediante la inspección de un material, haciéndose correctamente bajo los requisitos y exigencias de un código y con la ayuda de técnicas o métodos que aseguran la completa calidad de dicho material.

Existen actualmente pruebas para el control de calidad que permiten la inspección al 100% de una producción y la obtención de datos de todo el volumen de un producto o pieza, éstas son las denominadas pruebas no destructivas (PND) que contribuyen a mantener un nivel de calidad uniforme en el producto y en la producción.

"Ahora bien, para seleccionar el ensayo o prueba no destructiva es necesario cumplir fundamentalmente con:

- > Que la realización de la inspección sea al ritmo de la producción
- > Que los factores económicos y el tipo de ensayo deben ser programados bajo el criterio de máximo rendimiento beneficio."(9)

"La ejecución de las pruebas no destructivas implica ciertas etapas que son básicas para la inspección de un material. a continuación se describen estas etapas."(8)

1. Elección del método idóneo
2. Obtención de una indicación propia
3. Interpretación de la indicación
4. Evaluación de la indicación

#### 1. ELECCION DEL METODO IDONEO (8)

Para ello hay que tomar en cuenta la naturaleza del material, su estado estructural y el tipo de heterogeneidades que se pretenden detectar.

#### 2. OBTENCION DE UNA INDICACION PROPIA (8)

Una indicación propia viene supeditada por su naturaleza, morfología, situación, orientación y tamaño.

#### 3. INTERPRETACION DE LA INDICACION (8)

Es la determinación del tipo de indicación de acuerdo a la morfología, situación, orientación y tamaño.

#### 4. EVALUACION DE LA INDICACION (8)

Consiste en hallar la correlación entre la heterogeneidad detectada y la dimensión medida en el material, es decir la decisión sobre cuando una heterogeneidad o característica del material afecta su empleo.

##### 1.4.1 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

"Las técnicas de pruebas no destructivas se pueden clasificar como superficiales y volumétricas."

La técnica superficial abarca inspecciones exclusivamente de la superficie del material o pieza de estudio, utilizándose las pruebas no destructivas de líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido (ondas superficiales).\*(9)

"Las técnicas volumétricas nos proporcionan resultados de defectos internos en piezas inspeccionadas. Las pruebas no destructivas empleadas para el desarrollo de estas técnicas son el ultrasonido y radiografía industrial.\*(9)

##### 1.4.1.a LIQUIDOS PENETRANTES (9)

Es un método de inspección no destructivo para localizar grietas superficiales y pequeños poros invisibles a simple vista. Puede aplicarse en cualquier clase de materiales con características físicas superficiales adecuadas (sin porosidad o rugosidad), además en materiales de características no magnéticas como el acero inoxidable austenítico o en materiales no ferrosos. El juego de líquidos penetrantes consta de lo siguiente:

- a) Penetrante (coloreado o fluorescente)
- b) Revelador
- c) Removedor (solvente)

El procedimiento de aplicación de esta técnica se lleva a cabo de la siguiente forma:

- a) Limpieza y secado de la superficie
- b) Aplicación del penetrante
- c) Limpieza del exceso del penetrante
- d) Aplicación del revelador
- e) Evaluación de indicaciones y limpieza final

La inspección por líquido penetrante se realiza de acuerdo al procedimiento planteado, es importante llevar a cabo cada paso para obtener buenos resultados.

El material por inspeccionar debe estar perfectamente limpio y seco, (libre de pintura, grasa, polvo, óxidos, etc.). Cualquier material extraño puede cerrar las aberturas y conducir a conclusiones

falsas. Una acción capilar arrastra al líquido penetrante al interior de las aberturas de la superficie. Luego se elimina el exceso de penetrante de la pieza y se usa un revelador para sacar el penetrante a la superficie.

La evaluación de la técnica se efectúa en función del penetrante usado. El penetrante coloreado es visible a la luz ordinaria, puede aplicarse con brocha o por aspersión, por lo tanto debe existir una buena iluminación durante la evaluación para poder detectar posibles indicaciones que existan en la pieza. Cuando el penetrante usado es fluorescente las indicaciones resultantes se observan a la luz ultravioleta.

#### **1.4.1.b PARTICULAS MAGNETICAS (9)**

La inspección por partículas magnéticas es un método para localizar y definir discontinuidades en los materiales magnéticos. Es una técnica para detectar defectos superficiales, revela discontinuidades que son demasiado finas para apreciarse a simple vista, puede usarse también para detectar defectos subsuperficiales, existen dos métodos de inspección magnética.

##### **a) MAGNETIZACION DIRECTA (9)**

Dentro de la magnetización directa encontramos a la magnetización circular y longitudinal.

1. **Magnetización circular:** Se logra colocando las terminales de cables en los extremos de la pieza a inspeccionar, se hace pasar una corriente eléctrica de alto amperaje a través de la pieza de trabajo produciéndose un campo magnético en ángulo recto a la dirección del paso de la corriente, cuando esas líneas de fuerza encuentran una discontinuidad se separan y fugan por la superficie, creando polos o puntos de atracción magnética.

Si se esparce polvo magnético sobre la superficie, este se adherirá más tenazmente a la zona de fuga que en cualquier otra parte, brindando la indicación de la discontinuidad.

2. **Magnetización longitudinal:** Se crea mediante el uso de un solenoide en este caso, las líneas de fuerza magnética son longitudinales y paralelas a la pieza de trabajo con este dispositivo se detectan las grietas transversales.

##### **b) MAGNETIZACION INDIRECTA (9)**

La magnetización indirecta se produce haciendo pasar una corriente eléctrica en una área determinada de la pieza de trabajo (No se logra magnetizar toda la pieza) a diferencia de los dos métodos anteriores. La forma de obtención de indicaciones es de la misma manera que la descrita en la magnetización circular.

Para tener fuga de campo magnético externo, este debe distorsionarse suficientemente. Las discontinuidades finas y alargadas como grietas que son paralelas al campo magnético no lo distorsionan lo suficiente para desarrollar fugas de campo magnético, por lo tanto no producirá indicación alguna.

Para asegurar de que se detecten las discontinuidades se recomienda aplicar el campo en dos direcciones una a 90 grados con respecto de la obra (ángulos rectos entre si).

#### **1.4.1.c RADIOGRAFIA (9)**

Este método de prueba aprovecha la posibilidad que ofrecen las radiaciones de onda corta como los rayos X y los rayos gama ( $\gamma$ ) de penetrar a través de los objetos opacos a la luz ordinaria. En general a menor longitud de onda corresponde mayor poder de penetración. No toda la radiación penetra a través del material; parte de ella es absorbida. La magnitud de la absorción es función de la densidad y del espesor del material.

Si hay una cavidad, como por ejemplo un poro de escape de gases en el interior del material, el haz de radiación tendrá menor material que traspasar comparándolo con el material sano.

Consecuentemente habrá una variación que si se mide o se registra en una película sensible a la radiación, dará una imagen que indicara la presencia del defecto.

Una buena radiografía es aquella que finalmente grabe la imagen de los rayos X o de los rayos gama de manera que permita establecer la presencia o ausencia de un defecto en el material y en caso de haber, definir claramente su tamaño forma y ubicación.

Debe tenerse presente que una radiografía proyecta en un plano todas las indicaciones que hay en el material. En consecuencia, la radiografía tiende a dar una impresión exagerada de tipos dispersos de defectos tales como porosidad, inclusiones, fisuras, etc., y de no aplicar una tolerancia por este hecho, una soldadura que sea adecuada para su función puede declararse defectuosa. El ángulo de exposición tiene también influencia en la radiografía.

#### **1.4.1.d ULTRASONIDO (9)**

Es un método de inspección no destructiva usado para determinar defectos superficiales o internos en los metales. Las fallas que no pueden describirse por otros métodos pueden detectarse por este. En la inspección práctica de soldaduras y de cualquier otro material la sensibilidad del proceso se restringe a menudo por diseño, ajustando el equipo o calibrándolo para dar una respuesta equivalente a una sensibilidad del 2% del espesor del metal, obteniendo así resultados comparables con los de la inspección radiográfica.

La inspección ultrasónica se basa en el hecho de que una discontinuidad o cambio de densidad actúa como reflector de las vibraciones de alta frecuencia, propagadas a través del metal.

La unidad buscadora del equipo ultrasónico (transductor), del tipo impulso-eco, contiene un cristal de cuarzo que cambia de dimensiones al aplicar una fuerza electromotriz.

Cuando se genera una onda ultrasónica contra un metal las ondas vibratorias se propagan a través del material hasta que llegan a una discontinuidad o a un cambio de densidad. En estos puntos

parte de la energía vibratoria se refleja hacia atrás, la vibración reflejada causa presión en el cristal de cuarzo, la cual se traduce en la generación de una corriente eléctrica, alimentada a un tubo de rayos catódicos. Esta corriente produce deflexiones verticales en la línea de base horizontal.

## **1.5 COMERCIALIZACION DE LOS MATERIALES**

La tubería utilizada en un generador de vapor debe cumplir con las especificaciones requeridas por el código ASME en su sección II, en lo relacionado a las propiedades físicas, químicas, procesos de fabricación de la tubería y pruebas de calidad para cada tipo de tubería.

En un generador de vapor básicamente se emplea tubería sin costura, debido a las altas presiones y temperaturas que maneja dicho equipo. En nuestro país, desafortunadamente existen pocas empresas que producen tubería de caldera, debido a que solo fabrican tuberías de acero al carbón y con pocos elementos de aleación, esto por carecer de tecnología apropiada para estos procesos de manufactura.

Los materiales que presentan elementos aleantes en porcentajes elevados como: cromo, níquel o molibdeno son producidos en forma de tubería por países industrializados. Por lo tanto, nuestro país tiene que importar los materiales necesarios para la construcción de un generador de vapor. \*Todo comprador necesita establecer procedimientos adecuados para que en los documentos referentes a la adquisición de los materiales se incluyan o se citen por referencia las disposiciones reglamentarias, condiciones de diseño y otros requisitos.

Los documentos referentes a la adquisición, establecidos por los compradores, mencionaran las disposiciones reglamentarias e incluirán también cláusulas referentes a las siguientes materias, (según proceda).\*(10)

### **1.5.1) ALCANCE DE LOS MATERIALES :(10)**

Descripción de los materiales por adquirir

### **1.5.2) REQUISITOS TECNICOS (10)**

1. Requisitos técnicos tales como los definidos con referencia a códigos, normas o especificaciones comprendidas las revisiones de los mismos que describan el material por adquirir.

2. Requisitos relativos a ensayos inspecciones, aceptación y cualquiera instrucciones y requisitos especiales relativos a actividades tales como la identificación, fabricación, limpieza, embalaje, manipulación, expedición y almacenamiento de los materiales.



### **1.5.3) ACCESO (10)**

Quando proceda y en conformidad con las prácticas nacionales, se fijaran condiciones regulando el acceso del representante designado por el comprador y/o de otras personas autorizadas por el comprador a las instalaciones y registros del proveedor a efectos de inspección.

### **1.5.4) SELECCION DE PROVEEDORES (10)**

La selección de proveedores se basara en la evaluación de su capacidad de suministrar el material en conformidad con los requisitos establecidos en los documentos referentes a la adquisición, el nivel de calidad depende sobremanera de la dirección respecto a dicha calidad; de la capacidad del personal del proveedor y de las condiciones físicas de las instalaciones y equipo de fabricación del proveedor.

### **1.5.5) PROCEDIMIENTO DE SELECCION (10)**

Para seleccionar y evaluar la capacidad del proveedor, el comprador deberá adoptar un procedimiento adecuado. Dicho procedimiento debe incluir normas para identificar a quien incumbe dentro de la organización del comprador la responsabilidad de determinar dicha capacidad del proveedor. Esta determinación puede requerir una acción coordinada en la que participen una o varias áreas de la empresa del comprador. Los métodos a utilizar para evaluar las fuentes de suministro y los resultados obtenidos deberán documentarse y se recomienda que se incluyan los siguientes aspectos:

- a) Evaluación de los antecedentes del proveedor
- b) Evaluación de la capacidad del proveedor
- c) Evaluación de registros de calidad actuales del proveedor.

### **1.5.6) EVALUACION DE OFERTAS Y ADJUDICACION DE CONTRATOS (10)**

- a) El comprador deberá establecer un sistema documentado para evaluar desde el punto de vista de calidad las ofertas y para la adjudicación de contratos.
- b) El comprador deberá establecer procedimientos para cerciorarse de que la oferta esta conforme con los requisitos de los documentos referentes a la adjudicación.

c) Las ofertas serán evaluadas por personas o por organizaciones encargadas de examinar los aspectos, según proceda con respecto al tipo de adquisición.

1. Consideraciones técnicas
2. Requisitos de calidad
3. Personal del proveedor
4. Capacidad de producción del proveedor
5. Antecedentes del proveedor
6. Tiempos de entrega.

Intervienen en la evaluación de las ofertas otras consideraciones, por ejemplo, garantías, plazos, precios, ajustes de precios, condiciones de pago, aunque no estén relacionadas con la calidad.

Antes de adjudicar el contrato, el comprador deberá asimismo modificar las condiciones de la oferta, estimadas inaceptables, como resultado de la evaluación, y obtener a este efecto un compromiso escrito.

---

## CAPITULO DOS

---

### 2. DISEÑO BASICO DEL GENERADOR DE VAPOR, Y CUIDADOS POSTERIORES A SU FABRICACION

#### 2.1 TIPOS, COMPONENTES PRINCIPALES, FUNCIONAMIENTO Y LOCALIZACION DE LOS MATERIALES DE ACUERDO A SU UBICACION

"Las calderas se diseñan para transmitir calor de una fuente externa de combustión a un fluido (agua) contenido dentro de ella"(1).

El principio básico de todas las calderas es calentar el agua para generar vapor y ser utilizado en gran variedad de procesos industriales, por ejemplo, en la producción de papel, generación de electricidad, procesos químicos, etc. Los diseños de calderas varían según la utilización y cantidad de vapor requerido por determinada industria. Existen gran variedad de tipos de diseños de calderas con diferencias en construcción y tamaños.

En las centrales termoeléctricas de México se han construido diferentes diseños y marcas de calderas, estos equipos generan el vapor bajo presión, de acuerdo con las características de la máquina que alimenta (turbina), es importante saber que en el diseño de una caldera se utilizan materiales resistentes a elevadas temperaturas habiéndose calculado para soportar también altas presiones.

##### 2.1.1. TIPOS DE GENERADORES DE VAPOR (CLASIFICACION)

La gran parte de la industria mexicana requiere del uso de calderas y principalmente de energía eléctrica que se logra en una central termoeléctrica, por lo tanto podemos suponer que existen muchos tipos y formas de calderas.

Actualmente la mayoría de las calderas presentan materiales de alta calidad y procesos de fabricación donde incluyen a la soldadura que ha eliminado a otros procesos de unión de metales, ahora bien, una clasificación general de las calderas es la siguiente:(2)

- |   |   |  |
|---|---|--|
| 1. Por el tipo de circulación del agua con respecto a los gases de combustión | } | + De tubos de humo<br>+ De tubos de agua             |
| 2. Por el tipo de circulación del agua  | } | + De circulación natural<br>+ De circulación forzada |

La primera clasificación es la más elemental, ya que toma en cuenta el lado de los tubos por los que circula cada fluido.

La segunda clasificación menciona como se mueve el agua dentro de la caldera.

En las calderas de tubos de humo los gases de combustión pasan por el interior de los tubos y calientan el agua en la que están sumergidos.

En las calderas de tubos de agua la masa de agua se reparte entre un gran número de tubos sometidos exteriormente a los gases de combustión.

Las calderas de circulación natural requiere el suministro de agua de alimentación la cual se introduce al domo, elemento necesario en este tipo de calderas, desde donde baja por una serie de tubos, posteriormente pasa por otro conjunto de tubos, que se encuentran a fuego directo, calentando el agua contenida en los tubos, sube esta última por la diferencia de densidades que existe entre el agua y el vapor llegando finalmente al domo para completar su ciclo. Como se observa, la circulación del agua no requiere ningún método externo de impulsión.

Ahora bien en las calderas de circulación forzada mediante el uso de una bomba se mueve el agua dentro de la tubería de estas calderas. "Estas calderas no necesitan domos pues al ser su circuito continuo, y a presión elevada, el agua se evapora sin cambio apreciable de estado, por lo que no tiene sentido la separación del agua y del vapor, produciéndose la evaporación total en los tubos. No obstante para el arranque de la caldera es preciso un punto de separación agua-vapor".(2).

En función de lo anteriormente descrito y en base a la utilización y existencia de las calderas de tubos de agua y de circulación natural, daremos mayor importancia a estas. Por ejemplo en centrales termoelectricas y en muchas industrias las calderas del tipo mencionado son las más comunes para la producción de vapor.

En las centrales termoelectricas de México, básicamente se han instalado calderas de tubos de agua y de circulación natural, por lo tanto se hará una descripción de los componentes y funcionamiento de este tipo de aparatos.

---

**2.1.2. COMPONENTES PRINCIPALES**

El generador de vapor esta compuesto por equipos variados como:

**2.1.2.1 -Equipos donde circula el agua, la mezcla agua-vapor y vapor.**

- a) Economizador
- b) Domo o Domos
- c) Paredes del hogar
- d) Sobrecalentadores
- e) Recalentadores

**2.1.2.2 -Equipos por los que circula el aire y gases de combustión.**

- a) Ventiladores
- b) Pre calentador de aire
- c) Ductos de aire
- d) Chimenea

En las figuras 2.1 y 2.2 se muestran dos arreglos de generadores de vapor; uno representa los componentes de tubería en forma horizontal y el otro en forma vertical, señalando en cada uno de ellos la localización de cada componente de acuerdo a la lista anterior.

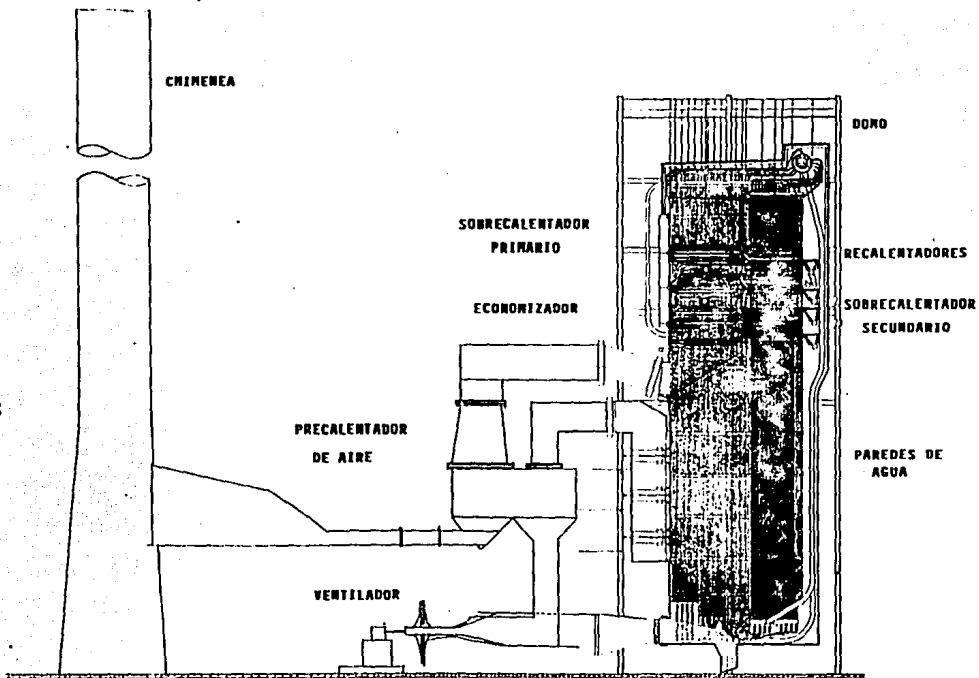


FIG. 2.1 COMPONENTES DEL GENERADOR DE VAPOR EN FORMA HORIZONTAL.

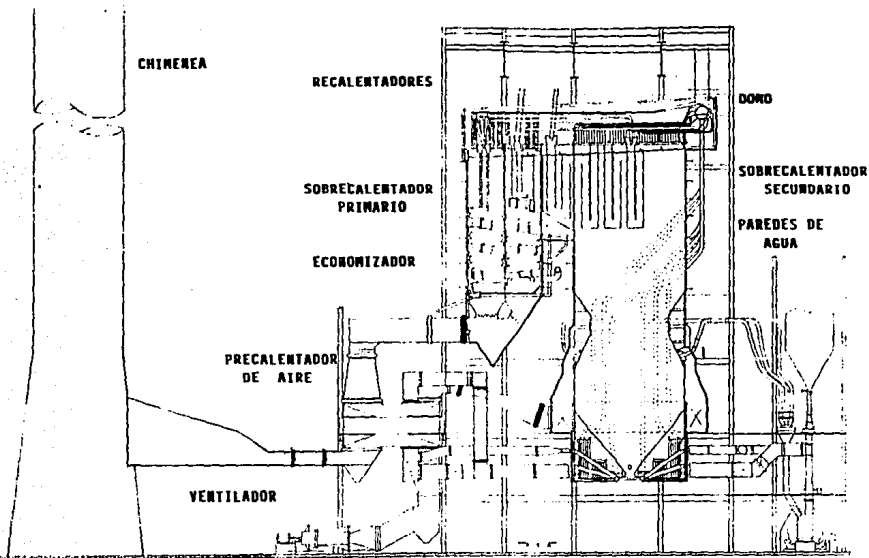


FIG. 2.2 COMPONENTES DEL GENERADOR DE VAPOR EN FORMA VERTICAL.

=====

Ahora se describirán los componentes indicados en el inciso 2.1.2.1.

#### **2.1.2.1.a ECONOMIZADOR**

El agua que se alimenta o se repone al circuito de la caldera, no entra directamente en el domo. "El economizador puede definirse como un aditamento de recuperación de calor, diseñado para transmitir calor de los productos de combustión a un fluido generalmente agua. En el economizador no se produce vapor" (3). El agua pues, circula previamente por un serpentín situado en el circuito de los gases de combustión, el economizador así llamado, se localiza en el último tramo del conducto de los gases pero antes de los precalentadores de aire.

#### **2.1.2.1.b DOMO**

Es una de las principales piezas de la caldera de circulación natural. Físicamente tiene la forma de un depósito cilíndrico, con tapas forjadas en sus extremos. Posee un gran número de conexiones para tuberías de entrada de agua de alimentación, llegada de la mezcla agua-vapor desde las paredes de agua, hasta la salida de vapor saturado. Se localiza fuera del alcance del fuego y de los gases de combustión, en la parte superior de la caldera.

#### **2.1.2.1.c PAREDES DEL HOGAR**

El espacio que encierra el hogar de la caldera equipados con paredes de agua, esta parcial o totalmente rodeado por tubos que contienen agua. Al absorber directamente el calor radiante, tan pronto como este se forma, estos tubos evitan las altas temperaturas en el hogar los cuales tienen un efecto destructor. Por estos tubos sube el agua que bajo del domo, al ser calentados el agua comienza a hervir y por la diferencia de densidades entre el agua caliente y la que esta entrando a esta tubería, llega nuevamente al domo de vapor pero en parte agua y en parte vapor.

#### **2.1.2.1.d SOBRECALENTADOR**

El vapor que abandona el domo pasa a los llamados sobrecalentadores para aumentar su temperatura y modificar sus condiciones de vapor saturado a vapor sobrecalentado, para que así pueda ser utilizado en la turbina. El sobrecalentador se encuentra situado en los conductos de los gases, así estos calientan el vapor hasta las condiciones deseadas. Generalmente las calderas de potencia cuentan con varios sobrecalentadores conectados en serie, situados en varias zonas de la caldera denominándose sobrecalentadores primario, secundario, etc., en orden creciente de temperaturas.

#### **2.1.2.1.e RECALENTADOR**

Una vez que el vapor abandona la caldera y entra en la turbina, hace girar el rotor de ésta, cediéndola su energía térmica que se convierte en mecánica, disminuyéndose su presión y temperatura, de modo que pudieran llegar a condensarse pequeñas gotas de agua que al ser



arrastradas por el vapor chocarían con los alabes de la turbina, dañandolos; por ello el vapor una vez expansionado parcialmente en la turbina, en la zona de alta presión, se le hace retornar a la caldera para calentarlo de nuevo por encima de la línea de saturación. Lo anterior se realiza haciendo circular el vapor a través de una tubería llamada recalentador, situado en el circuito de los gases y generalmente en una zona intermedia entre los sobrecalentadores y economizadores.

Ahora se describen los componentes indicados en el inciso número 2.1.2.2.

#### **2.1.2.2.a VENTILADORES DE AIRE Y DE GASES**

Para llevar a cabo la combustión dentro de la caldera es necesario la aportación de aire (oxígeno). Mediante el uso de ventiladores es suministrado el aire a través de ductos hasta los quemadores; este mismo aire al mezclarse con el combustible y quemarse se transforma en CO, CO2 etc., que es impulsado hacia la salida de la caldera por el mismo ventilador y por la diferencia de densidades y temperaturas del aire atmosférico y los gases de la combustión.

**2.1.2.2.b PRECALENTADOR DE AIRE**

Es un aditamento por el cual se hace pasar el aire frío impulsado por los ventiladores. El precalentador de aire es un cilindro dividido en dos secciones en forma longitudinal, por una de ellas pasan los gases calientes de la combustión y en sentido contrario pasa el aire frío y al girar el componente la sección caliente cede su energía al aire que por contacto que es calentado para así poder pasar a los quemadores con la temperatura adecuada para una buena combustión.

**2.1.2.2.c DUCTOS DE AIRE**

Son canales por donde el aire frío y caliente circulan desde en ventilador hasta los quemadores, pasando por el precalentador de aire.

**2.1.2.2.d CHIMENEA**

Es la parte final de la caldera, por donde escapan los gases de la combustión.

**2.1.2.3 MATERIALES QUE SE EMPLEAN EN EL GENERADOR DE VAPOR DE ACUERDO A SU UBICACION**

Una gran variedad de materiales son utilizados para la fabricación de tubería que trabaja en un generador de vapor.

"Cerca de 483 Km (300 millas) de tubería es instalada en un generador de vapor en rangos de 1.9 a 7.6 cm (0.75 a 3.0 pulgadas) de diámetro exterior."(4)

La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) ha aprobado ciertos materiales de acero para su uso de tuberías en calderas, diseñados en acuerdo al código ASME, calderas y recipientes a presión (boilers and pressure vessels code).

La sección I del código ASME especifica los materiales permisibles en el párrafo PG-9,( tabla No. 4 capítulo I). La sección I del código ASME tiene por título "calderas de potencia" (power boilers).(5)

La sección II especifica el material y los requerimientos de varios aceros aprobados. El número de especificación ASME es usado para identificar el tipo de material de tubería de acero en las diferentes secciones de la caldera. Esta sección del código ASME se divide en tres partes que son; parte A "materiales féreos"; parte B "materiales no ferrosos"; y parte C "soldadura y materiales de aporte".(6)

La tubería de acero empleada en un generador de vapor se selecciona en función de la temperatura a la que va a estar sometido el metal.

La tubería de acero al carbono usada en generadores de vapor según la especificación ASME son SA 178, SA192 y SA 210 empleados para fabricar tuberías de economizadores, paredes de agua y sobrecalentadores de baja temperatura,(6). Aceros al carbón molibdeno son usados donde la temperatura es ligeramente más alta que los anteriormente expuestos.

Donde las temperaturas del metal están arriba de 427 grados centígrados (800 grados Fahrenheit) se deben seleccionar materiales que contengan cromo en su composición química para aumentar la resistencia a la oxidación y a la elevada temperatura. En estas áreas de la caldera donde la temperatura es elevada es común el uso de aceros ferríticos y austeníticos.(4)

El código ASME ha establecido en su sección I criterios para determinar los esfuerzos permisibles a los que pueden estar sometidos los materiales en función de la temperatura. "Los esfuerzos permisibles disminuyen en operación en las regiones de alta temperatura de un sobrecalentador y de un recalentador". (3)

Estos criterios han sido establecidos para poder establecer la vida del material en función de la condiciones de diseño siempre y cuando la pared del tubo no sea reducida por fenómenos de erosión o corrosión.

## 2.2 INTEGRACION DE LOS MATERIALES (FABRICACION EN CAMPO)

### 2.2.1 FABRICACION EN TALLER

Quando se ha fabricado una caldera, esta debe satisfacer una necesidad y cumplir con requisitos razonables de seguridad, resistencia y durabilidad. Se fabrica la mayor parte posible de la caldera en el taller, domos, cabezales, elementos de tubería (sobrecalentadores, recalentadores, economizadores y paneles de paredes de agua), etc., de esta forma sólo se instalarán cada una de estas partes en su lugar correspondiente y así agilizar la fabricación en campo de la caldera.

Las actividades de fabricación de una caldera efectuadas en el taller van desde doblar un tubo hasta conformar un domo de 150 toneladas. Estas actividades y procesos de fabricación se describirán de manera simple mencionándose básicamente los puntos más importantes, observados durante la visita a la planta de CE-RREY en la ciudad de Monterrey, la cual tuvo un periodo de 30 días.

La fabricación de los precalentadores de Aire se realiza utilizándose láminas de diferentes calibres, placas y vigas para soportería. Los espesores de lámina o calibres de lámina se establecen bajo la norma ANSI B32.1 "tamaños recomendados para láminas". Para placas se emplea el código ASME en su sección II parte A así como para la soportería. Las actividades realizadas a estos materiales son cortes dobles y uniones, los cortes se realizan con cizallas para espesores hasta de 12mm (1/2") y con métodos oxiacetilénicos (pantógrafos) para corte de espesores mayores. Los dobles son efectuados con máquinas dobladoras, en placas de espesores grandes no se recomiendan dobles muy agudos sino cortar y unir las partes por soldadura. Los materiales utilizados para este componente básicamente son de acero al carbón.

=====

En la fabricación de componentes tubulares se destina una área en la cual se distribuyen diversas actividades que llevan a la conclusión de sobrecalentadores y recalentadores, etc. Primeramente se preparan los tubos de acuerdo a la función específica que desarrollan en la caldera, en forma general todos son tratados y procesados de la misma forma.

- a) Dimensionado de la tubería, obteniéndose la longitud total que tendrá el arreglo de ésta
- b) Preparaciones para soldadura; cuando es necesario añadir tramos de tubería para obtener la longitud total, la preparación de la soldadura consiste en realizar un bisel en el tubo ya sea manualmente con discos abrasivos o de manera automática con máquinas biseladoras.
- c) La aplicación de la soldadura para partes que trabajan a alta presión y temperatura requiere unión por soldadura con procesos donde la calidad de esta sea confiable para su operación. El proceso recomendado para este tipo de trabajos es el de arco eléctrico protegido con gas.
- d) Doble de tubos; cuando se tiene la longitud total del tubo se procede a doblar de acuerdo a la forma de arreglo del componente (todo esto se realiza bajo la utilización de planos de fabricación donde se establecen, dimensiones, ángulos de dobles, radios de curvatura, soldaduras, etc.).

El doble del tubo se realiza con máquinas dobladoras que trabajan automáticamente, sólo deben colocarse los dados y seleccionarse el ángulo de doblez en forma manual.

Si el material ha sido unido por soldadura a esta se le debe realizar una examinación radiográfica para determinar su calidad, esto se hace con el fin de evitar problemas durante su operación. Un defecto de soldadura puede ocasionar grandes dificultades, llegando a producir fallas en la tubería. Si es necesario y de acuerdo al tipo de material y lo especificado en el código ASME se realizara a la tubería el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, que consiste en elevar la temperatura del metal dentro de un horno hasta que se alcanza una temperatura llamada de sostenimiento, esta temperatura se mantiene durante un tiempo determinado de acuerdo al espesor del material, posteriormente se enfría lentamente.

En la fabricación de cabezales y domos se utilizan materiales que presentan espesores de 25 a 180 mm (1 a 6 pulgadas). Los cortes efectuados a estos materiales se realizan mediante equipos oxiacetilénicos (pantógrafos). para obtener las formas cilíndricas de estas placas, estas se someten a un equipo llamado roladora. formada de tres rodillos impulsados por una serie de engranajes que transmiten la potencia requerida para este proceso de fabricación. Tanto los cabezales como los

domos son considerados como recipientes a presión, por esta razón se fabrican de acuerdo con la sección VIII división I del código ASME (recipientes a presión).

Generalmente los cabezales son cilíndricos con tapas formadas en sus extremos. Estos componentes de la caldera son rolados de tal forma que sólo se les aplica una sola soldadura para cerrar el cilindro en ocasiones se utilizan tuberías de grandes diámetros. En algunos casos por su longitud, los cabezales deben ser fabricados en secciones unidas por soldadura.

### 2.2.2 MONTAJE

Antes de iniciar la fabricación de los elementos componentes para las calderas de grandes dimensiones es indispensable estudiar cuidadosamente los problemas de almacenamiento, manejo e instalación. El procedimiento normal practicado, es terminar todas las partes componentes al máximo en el taller, dándoles su forma y dimensiones definitivas, incluyendo el biselado requerido para los cordones de soldadura. Las superficies terminadas son engrasadas y protegidas contra deterioros accidentales.

Los métodos y la secuencia de montaje varían con el tipo de caldera, así como la accesibilidad y el espacio disponible en el lugar de la obra, la instalación por lo general no se inicia sino cuando se dispone de la cantidad suficiente de equipo almacenado, para asegurar la continuidad del proceso de trabajo y el mejor aprovechamiento del personal de instalación. El objetivo es, sin embargo, la puesta en servicio de la unidad en el menor plazo posible.

Domos y cabezales usualmente se montan primero. Una vez colocados en su lugar, se nivelan y se alinean con precisión, de acuerdo con la posición de la base (líneas de referencia), hecho lo cual se les sujeta firmemente o se les fija mediante tirantes, para impedir su movimiento durante la colocación de tubos. Inmediatamente después se montan los cabezales de las paredes de agua del hogar, los cabezales de sobrecalentadores y recalentadores y los del economizador. Todos ellos se alinean conforme a la posición del domo de vapor (superior) para eliminar la acumulación de errores de dimensión.

Los tubos se van montando en el orden requerido, inicialmente se les presenta en su lugar y se fijan provisionalmente mediante expansión o abocinado de los extremos. Una vez colocados los tubos se procede a su alineamiento. Se utilizan al principio bloques o espaciadores de madera, o bien se instalan los separadores definitivos. Todos los tubos deben quedar correctamente alineados, los tubos colocados dentro de barrenos deben de entrar libremente. Una vez alineados correctamente con los extremos en hilera, son rolados o soldados en su posición final. Las costuras de soldadura son examinadas para la localización de defectos como faltas de fusión, poros, escorias, grietas y fisuras, por medio del equipo de rayos X o de rayos gamma.

### 2.2.3 TIPOS DE UNION DE TUBERIAS

Después de haber descrito de manera general la forma de fabricación y montaje de una caldera nos introduciremos en una explicación de cada uno de los métodos básicos de unión de metales

utilizados en la fabricación y montaje de calderas. De entre los sistemas de unión, los más utilizados en la fabricación y montaje de una caldera son los siguientes:

- a) unión soldada
- b) unión embridada
- c) unión expandida o rolada
- d) unión roscada

Las uniones soldadas tienen entre otras ventajas principales, la fácil elaboración de la soldadura, su gran resistencia mecánica, la continuidad del material y relativamente menor costo en materiales; por el contrario, tiene el inconveniente de que no son desmontables en caso de averías o servicios periódicos de mantenimiento. Las uniones embridadas presentan la ventaja de su facilidad para el montaje y desmontaje por sustitución de tramos o reformas o averías, no precisa de mano de obra calificada, en contrapartida presenta el inconveniente de que la unión embridada es un punto débil en la línea, desde el punto de vista mecánico, por lo que su utilización se limita a casos especiales en que el flujo que circula por el interior permita su montaje.

En calderas de baja presión donde no existen uniones soldadas se utiliza la unión expandida, lográndose el sello entre los metales únicamente por la deformación del extremo del tubo que es encajonado en un barreno del domo. La ventaja de estas uniones es que su ejecución es rápida, la desventaja es que si no se logra el sello adecuado se corre el riesgo de una deformación excesiva de los materiales teniéndose la necesidad de cambiarlos.

Por último, cabe destacar que las uniones roscadas son en la actualidad de poca aplicación y se limitan al servicio de poca responsabilidad, aunque también tiene un gran campo de utilización en servicios de automatismo e instrumentación, pero restringido a tuberías de pequeño diámetro.

### 2.2.3.a UNIONES SOLDADAS

Destacaremos los aspectos importantes de la soldadura en su aplicación a la fabricación y montaje de los sistemas de tubería de un generador de vapor.\* Se podría definir la soldadura como un procedimiento de unión de metales bajo la acción del calor, con o sin adición de material de aportación, para formar un todo continuo y homogéneo'.(7)

Como se puede observar de la definición, es imprescindible la aplicación de la energía en forma de calor, que a su vez, se origina por distintos sistemas, por ejemplo: llama oxiacetilénica, arco eléctrico, resistencia eléctrica, rayo láser, etc., de lo que depende en gran parte la enorme variedad de técnicas utilizadas. A continuación vamos a extendernos en exponer más ideas generales de aquellas que son de aplicación en las uniones de tuberías.

**2.2.3.b. SOLDADURA ELECTRICA DE ARCO**

En esta técnica el calor necesario para la fusión de los bordes a soldar procede de la generación de un arco eléctrico entre estos y un electrodo. Según la forma del electrodo, su alimentación y la forma de proteger el baño, se consideran distintos tipos de variantes entre las que destacaremos las de más aplicación en el montaje de tuberías.(7)

- a) Soldadura de arco eléctrico protegido (Shielded metal arc welding, SMAW)
- b) Soldadura bajo gas protector, con las siguientes variantes:
  - b.1) Con electrodo no consumible de tungsteno (Gas tungsten arc welding, GTAW)
  - b.2) Con electrodo consumible (Gas metal arc welding, GMAW)
- c) Soldadura por arco sumergido bajo polvo (Sumerged arc welding, SAW)

**2.2.3.b.a) SOLDADURA MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO**

La Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society, AWS) denomina esta técnica como shielded metal arc welding (SMAW), y así se recoge en el código ASME para la fabricación de calderas y recipientes a presión. "En esta técnica la fusión de los bordes a soldar se efectúa mediante aportación de calor debido a un arco eléctrico generado entre el electrodo revestido y los citados bordes."(7)

El electrodo es una varilla metálica revestida de un material que puede ser de distintos tipos; rutilo, básico, celulósico, etc., este revestimiento se funde con el arco y proporciona una protección contra la oxidación del baño fundido hasta que solidifica este.

**2.2.3.b.b) SOLDADURA BAJO GAS PROTECTOR**

En esta técnica el arco eléctrico generado y el baño del metal fundido, se protegen rodeándolo de un gas protector que se hace fluir constantemente alrededor del electrodo. Los gases empleados en este tipo de soldadura pueden ser: argón, helio o bióxido de carbono. Por lo que respecta al electrodo que crea el arco, este puede ser:(7)

- a) No consumible (Tungsteno o Torio)
- b) Consumible (Es el propio metal de aporte el que fluye de manera continua en forma de hilo procedente de una bobina).

**2.2.3.b.a) SOLDADURA CON ELECTRODO DE TUNGSTENO**

Este proceso generalmente conocido por TIG (tungsten inert gas), se denomina por la AWS como Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) y así se recoge en diversos códigos americanos para construcciones soldadas. La soldadura puede efectuarse fundiendo entre si los bordes a soldar o bien aportando material en forma de varillas metálicas, de adecuada composición, cuyo extremo va fundiendo el soldador en el arco eléctrico generado entre el electrodo de tungsteno y la pieza a soldar.(7)

**2.2.3.b.b) SOLDADURA CON ELECTRODO CONSUMIBLE**

Este proceso de soldadura generalmente conocido por MIG (Metal Inert Gas), se denomina por la AWS proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding). Es un proceso en cierta forma similar al GTAW, pero la diferencia fundamental es que el electrodo que genera el arco eléctrico es el mismo material de aportación que se va al mismo tiempo fundiendo en el arco aportándose así a los bordes a unir y que se alimenta continuamente a través de una pistola siendo arrastrado por unos rodillos desde un tambor en el que se encuentra enrollado.(7)

**2.2.3.b.c) SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO**

Este proceso es denominado por la AWS como SAW (submerged Arc Welding). En este proceso el arco eléctrico se genera entre el electrodo en forma de alambre que se alimenta en forma similar al proceso MIG, fundiéndose el extremo del alambre por efecto del arco eléctrico y alimentándose así a los bordes fundidos de la pieza a unir. La característica fundamental de este proceso consiste en que el arco eléctrico esta protegido de la atmósfera recubriéndolo continuamente por un polvo fundente, alimentado en forma simultánea a la generación del arco, el cual se funde y recubre el baño fundido con una escoria protectora que lo aísla de la atmósfera.(7)

En este proceso, el arco no es visible y por lo tanto se requiere de una gran precisión en la preparación de borde, alineaciones de los mismos, etc., pues en caso de no realizarse convenientemente, pueden aparecer defectos muy importantes en la soldadura.

**2.2.4 NORMALIZACION DE ELECTRODOS**

Los materiales de aporte, llamados electrodos, así como el material fundente (flux), se encuentran normalizados según diversas normas (DIN, AWS, ASME, entre otras). El código ASME en su sección II parte C, clasifica los materiales de aporte, siendo la misma clasificación que maneja AWS con diferencias solo en la notación por ejemplo:(6)

- a) La especificación ASME SFA 5.1 corresponde con la AWS A 5.1
- b) La especificación ASME SFA 5.4 corresponde con la AWS A 5.4



### 2.2.5 UNIONES EMBRIDADAS

Un sistema para unir las tuberías es por medio de bridas.

Consiste en acoplar a los extremos de los tubos los elementos llamados bridas, y que posteriormente se unen entre sí apretándolas con tornillos o pernos, situando entre ellas un material que favorece la estanqueidad de la unión, llamado empaque o junta.(7)

### 2.3 FALLAS CARACTERISTICAS EN UN GENERADOR DE VAPOR Y ACCIONES CORRECTIVAS

Las fallas ocurridas en tuberías de alta presión de un generador de vapor son una de las principales causas de salidas forzadas de las unidades generadoras de energía eléctrica, por lo que, el conocimiento de los mecanismos de falla es importante para la determinación oportuna de las acciones preventivas y/o correctivas a seguir.

Los principales mecanismos de falla en tuberías del generador de vapor, su localización de mayor frecuencia se presentan a continuación:(4)

<b>Ruptura por esfuerzo</b>	Sobrecalentamiento repentino Sobrecalentamiento prolongado
<b>Corrosión por el lado del agua</b>	Corrosión localizada (Pitting) Corrosión cáustica Daño por hidrógeno Corrosión bajo esfuerzo
<b>Corrosión por el lado del fuego</b>	Corrosión a baja temperatura Corrosión a alta temperatura
<b>Erosión</b>	Ceniza volátil Erosión por sopladores de hollín Erosión por partículas de carbón
<b>Fatiga</b>	Vibración Variación térmica

### 2.3.1 RUPTURA POR ESFUERZO

Este mecanismo, predominantemente se presenta en las secciones del sobrecalentador y recalentador donde la temperatura de operación de los tubos esta en el rango de fluencia. Sin embargo también pueden presentarse en las paredes de agua si las condiciones de transferencia de calor son anormales. Se consideran a continuación dos tipos de mecanismos de falla.(4)

#### a) Sobrecalentamiento repentino

##### a.1) Causas probables

- > Bloqueo interno del tubo
- > Pérdida de circulación del refrigerante
- > Bajo nivel de agua del domo
- > Excesiva temperatura de los gases de la combustión
- > Patrón de combustión irregular

##### a.2) Apariencia típica

La falla presenta una severa reducción en el espesor de la pared del tubo, lo que generalmente se conoce como falla de labios delgados.

##### a.3) Localización

Este tipo de falla se presenta generalmente en los elementos situados en la zona de radiación, (sobrecalentadores, recalentadores y paredes de agua a nivel de quemadores).

#### b) Sobrecalentamiento prolongado

##### b.1) Causas probables

- > Restricción en el flujo del refrigerante
- > Reducción en la capacidad de transferencia de calor
- > Bloqueo del paso de los gases de combustión

##### b.2) Apariencia típica

Esta falla produce una falla longitudinal cuya extensión varía en función de su severidad, una pequeña falla formara una ampolla, y una falla mayor causara una abertura, semejante a una boca de pescado, ésta presentara bordes gruesos.

**b.3) Localización**

Se presenta generalmente en las partes inferiores de los elementos colgantes localizados en la zona de radiación, así como los que están situados en la zona de transferencia de calor radiación-convección.

**2.3.2 CORROSION LADO AGUA**

Este mecanismo es promovido fundamentalmente por el tratamiento químico del agua utilizada. La resistencia de los tubos a la corrosión depende fundamentalmente del nivel de PH del agua y de la cantidad de contaminantes. Por lo anterior el control de tratamiento de agua deberá de mantenerse moderadamente alcalina para proteger la capa de magnetita formada.(4)

La corrosión del lado del agua puede subdividirse en los siguientes mecanismos de falla:

- a) Corrosión localizada (Pitting)
- b) Corrosión cáustica
- c) Daño por hidrógeno
- d) Corrosión bajo esfuerzo

**a) CORROSION LOCALIZADA (PITTING)****a.1) CAUSAS PROBABLES**

Los picados (pitting) en la superficie interna de la tubería generalmente se debe a la operación con niveles altos de oxígeno en el agua.(4)

**a.2) APARIENCIA**

Esta corrosión produce socavaciones en el material, generalmente con depósitos rojos por la formación de hematita ( $Fe_2O_3$ ).

**a.3) LOCALIZACION**

Se localiza frecuentemente en las tuberías horizontales ya sea de economizadores, sobrecalentadores y recalentadores.

**b) CORROSION CAUSTICA (4)**

**b.1) CAUSAS PROBABLES**

- > Concentración alta de hidratos de sodio
- > Depósitos en zonas de alto flujo térmico
- > Arrastre de productos de corrosión del sistema precalentadores

**b.2) APARIENCIA TIPICA**

Antes de la falla presenta forma de ampulas en la zona donde los productos de la corrosión se han depositado y por lo consiguiente se ha adelgazado la pared del tubo, después de la falla presenta aberturas pequeñas de bordes delgados.

**b.3) LOCALIZACION**

Este mecanismo de falla se presenta en tuberías refrigeradas por agua, principalmente en soldaduras que usan anillo de respaldo, curvas, tuberías horizontales y donde hay incidencia de flama.

**c) DAÑO POR HIDROGENO (4)**

**c.1) CAUSAS PROBABLES**

- > Operación con bajo PH del agua del ciclo
- > Contaminación de limpieza química
- > Funcionamiento inadecuado del control químico
- > Contaminación por fugas del condensador

**c.2) APARIENCIA TIPICA**

El daño por hidrógeno produce una fractura tipo ventana con bordes gruesos, y generalmente con incrustaciones internas en las zonas de falla.

**c.3) LOCALIZACION**

Se presenta generalmente en las partes donde existe una interrupción del flujo (anillos de respaldo), en tuberías horizontales o inclinadas y donde existe un alto flujo térmico.

**d) CORROSION BAJO ESFUERZO (4)****d.1) CAUSAS PROBABLES**

- Concentración de productos corrosivos internos en lugares altamente esforzados principalmente cloruros o hidróxidos.
- Depósitos externos (nitratos, sulfatos) en lugares con altos esfuerzos de tensión.

**d.2) APARIENCIA TIPICA**

Este mecanismo de falla produce una fractura por el adelgazamiento del espesor del tubo debido a la corrosión aunado a la propagación de grietas a través del material. La orientación de las grietas puede ser circunferencial o longitudinal dependiendo de la dirección de los esfuerzos de tensión aplicados. La mayoría de las grietas se inician en la superficie interna, pero algunas de ellas han sido iniciadas en el exterior debido a la exposición a los nitratos y sulfatos.

**d.3) LOCALIZACION**

Generalmente se presenta en sobrecalentadores y recalentadores en sitios donde están expuestos a concentración de sulfatos, cloruros o hidróxidos, así como en las curvas de estos y otros elementos.

**2.3.3 CORROSION LADO FUEGO (4)**

Los constituyentes del combustible y la temperatura del metal son factores importantes que promueven la corrosión externa de la tubería, principalmente mecanismos de falla del lado fuego son:

- a) Corrosión a baja temperatura
- b) Corrosión a alta temperatura

**a) CORROSION A BAJA TEMPERATURA (4)****a.1) CAUSAS PROBABLES**

- Alto contenido de SO<sub>3</sub> en los gases de combustión.
- Operar con temperaturas del metal abajo del punto de rocío ácido.
- Operar con temperatura de gases inferiores al punto de rocío ácido.

**a.2) APARIENCIA TIPICA**

Este tipo de falla produce un adelgazamiento en el espesor de la pared, provocando rupturas dúctiles, la superficie externa de los componentes atacados presentan depósitos porosos e irregulares y la falla se presenta en forma aparentemente circular.

**a.3) LOCALIZACION**

Generalmente se presentan en economizadores, ductos de salida de gases de combustión, precalentadores de aire y chimeneas.

**b) CORROSION A ALTA TEMPERATURA (4)****b.1) CAUSAS PROBABLES**

- Combustibles con alto contenido de vanadio, azufre y sodio.
- Alta temperatura de metal en la tubería.

**b.2) APARIENCIA TIPICA**

La corrosión a alta temperatura produce adelgazamiento en la pared del tubo provocando la ruptura del tubo por esfuerzos.

**b.3) LOCALIZACION**

Este mecanismo principalmente se localiza en los componentes situados en la zona de radiación.

**2.3.4 EROSION (4)**

El fenómeno de erosión, aun cuando en los generadores de vapor que quema combustóleo se presenta, es más severa su acción en generadores de vapor que queman carbón, y el desgaste del material producido esta directamente influenciado por la cantidad, velocidad, tamaño y clase de partículas arrastradas en los gases de combustión.

Se conocen tres tipos de erosión que son:

- a) Erosión por ceniza volátil
- b) Erosión por sopladores de hollín
- c) Erosión por partículas de carbón

**a) EROSION POR CENIZA VOLATIL**

**a.1) CAUSAS PROBABLES**

- Flujo irregular de los gases de combustión
- Deslizamiento de tuberías oponiéndose al paso del flujo del gas.
- Combustibles con alto contenido de cenizas.

**a.2) APARIENCIA TIPICA**

Este mecanismo produce una superficie pulida, libre de óxidos

**a.3) LOCALIZACION**

Se presenta generalmente en los huelgos entre los bancos de tubos, y en las zonas donde la velocidad de los gases se incrementa (zona de convección).

**b) EROSION POR SOPLADORES DE HOLLIN**

**b.1) CAUSAS PROBABLES**

- -Localización impropia del soplador de hollín
- -Soplado con presión excesiva

**b.2) APARIENCIA TIPICA**

Este mecanismo de falla produce una superficie plana y lisa.

**b.3) LOCALIZACION**

Se presenta en áreas de influencia del soplado.

**c) EROSION POR PARTICULAS DE CARBON**

**c.1) CAUSAS PROBABLES**

- -Arrastre de escoria en tolvas de recolección
- -Propiedades del carbón utilizado

**c.2) APARIENCIA TIPICA**

Este mecanismo de falla presenta una superficie plana donde hay desgaste de material (espesor), la falla presenta una fractura de borde delgado.

**c.3) LOCALIZACION**

Generalmente se localiza en el piso de los generadores de vapor y en las partes inferiores de las tolvas de recolección de ceniza.

**2.3.5 FATIGA (4)**

Los esfuerzos cíclicos impuestos a las tuberías de los generadores de vapor reducen significativamente la vida del mismo a través del inicio y propagación de fracturas por fatiga. El fenómeno de fatiga puede ocurrir en varias áreas de la caldera, estos pueden ser atribuidos a los siguientes mecanismos:

a) Fatiga por vibración

b) Fatiga térmica

a) FATIGA POR VIBRACION

a.1) CAUSAS PROBABLES

- -Diferentes patrones de flujo de los gases de combustión.
- -Cargas cíclicas inducidas por equipo circundante.

a.2) APARIENCIA TIPICA

Este mecanismo produce fisuras de borde grueso sobre la superficie exterior de las tuberías con una orientación circunferencial.

a.3) LOCALIZACION

Generalmente están presentes próximos a los soportes o candados que sirven como puntos de fijación de los bancos de tuberías, principalmente de gran longitud.

b) FATIGA TERMICA

b.1) CAUSAS PROBABLES

- -Cambios frecuentes en la temperatura del metal
- -Salpicaduras de agua provenientes de sopladores
- -Soporteria inadecuada



**b.2) APARIENCIA TIPICA**

Presentan fisuras circunferenciales en el área afectada, iniciada en la superficie exterior.

**b.3) LOCALIZACION**

Zonas afectadas por sopladores de hollín así como en tuberías donde existen gradientes de temperaturas altas.

**2.4 INSPECCION EN SERVICIO DEL GENERADOR DE VAPOR**

Tomando como marco de referencia las actividades que se realizan durante los trabajos de mantenimiento preventivo en generadores de vapor, entre estas se encuentran las inspecciones en servicio. Con el propósito de efectuar estudios que puedan proporcionar un dictamen técnico confiable en relación al estado que guardan las tuberías y equipos auxiliares del generador.

La inspección en servicio es una actividad que auxiliada de las pruebas no destructivas establece diagnósticos del generador de vapor y resulta bien importante que la realización de un trabajo de esta magnitud implique una sistematización que nos permita planear, ejecutar y documentar las actividades previstas para cada intervalo de inspección en servicio; de tal manera que sea congruente con las necesidades del programa de mantenimiento que establece el usuario del generador.

**2.4.1 PLAN DE INSPECCION (8)**

El generar un plan de inspección implica proporcionar una guía para el desarrollo sistemático y específico de exámenes no destructivos que se aplican principalmente en los sistemas y componentes sujetos a presión de un generador de vapor, cumpliendo con los requerimientos de procedimientos escritos.

### 2.4.2 EXAMENES NO DESTRUCTIVOS Y SU APLICACION (8)

La inspección en servicio involucra los siguientes exámenes no destructivos:

a) Exámenes volumétricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Radiografía</li> <li>◆ Ultrasonido</li> </ul>
b) Exámenes superficiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Líquidos penetrantes</li> <li>◆ Partículas magnéticas</li> <li>◆ Inspección visual</li> <li>◆ Metalografía de campo</li> <li>◆ Corrientes inducidas</li> </ul>

**2.4.2.1 Los exámenes volumétricos y superficiales se aplican en:**

- a) Domos y recipientes a presión
- b) Cabezales
- c) Tuberías de elementos
- d) Tuberías de paredes de agua

**2.4.2.2. Las áreas de examen específicas son:**

- a) Superficies internas y externas
- b) Soldaduras circunferenciales y longitudinales
- c) Verificación de espesores

### 2.4.3 DESARROLLO DE LA INSPECCION (8)

Para el desarrollo de la inspección es necesario contar con lo descrito en los siguientes puntos:

- a) Manuales de operación y mantenimiento, dibujos planos y diagramas del generador de vapor.
- b) Limpieza, iluminación y medios de acceso a las áreas sujetas a inspección.
- c) Un local dentro de la central para alojamiento de los equipos, instrumentos de prueba y oficina para que los inspectores formulen reportes técnicos que se deriven de sus actividades.

---

### **2.4.3.1 ACTIVIDADES PRINCIPALES (8)**

#### **2.4.3.1.1 INSPECCION VISUAL.**

Previo al proceso de limpieza se efectúa una inspección visual en las superficies externas de los componentes para determinar condiciones de concentración y evaluación de depósitos.

Una vez terminada la limpieza de componentes, se procede a inspeccionarlos visualmente, para determinar fundamentalmente las condiciones superficiales externas, tales como corrosión, incrustaciones, deterioro mecánico, erosión, inseguridad de elementos, evidencias de fugas.

Otro aspecto importante es la verificación del estado que guardan las superficies internas de los componentes, para llevar a cabo esto, se hace necesario el uso de instrumentos, ayudas visuales que permitan llegar al área de interés; estos instrumentos pueden ser boroscopios; con la posibilidad de adaptarse a cámaras fotográficas o monitores de televisión; así como el uso de espejos e iluminación apropiada.

#### **2.4.3.1.2 EXAMENES NO DESTRUCTIVOS**

Asociando los exámenes no destructivos con los resultados que arroja la inspección visual, se procede a verificar el estado que guardan los materiales y soldaduras mediante la aplicación de exámenes superficiales y volumétricos en aquellas partes que se indican en el plan de inspección.

Al terminar la fase operativa, es decir, de ejecución de lo que inicialmente se planeo, se continua con la etapa documental, generándose un informe técnico preliminar, el cual se discute con la central y así, poder llegar a conclusiones positivas que redunden en el beneficio que trae consigo un mantenimiento preventivo.

Los datos que se generan son analizados y finalmente archivados, a fin de utilizarse como referencia durante el siguiente intervalo de mantenimiento del generador de vapor.

## **2.5 DETERMINACION DE LA VIDA REMANENTE POR METODOS YA ESTABLECIDOS**

Conocer con mayor amplitud los diversos procesos que intervienen en la generación de energía eléctrica constituye la mejor garantía para su pleno aprovechamiento. En el caso de la generación termoeléctrica, que en nuestro país constituye con cerca de las dos terceras partes de la producción total de electricidad, el conocimiento de los fenómenos que ocurren en los generadores de vapor posibilita resolver algunos problemas como los de fallas de tuberías, una de las principales causas de indisponibilidad de las centrales.

La inspección en servicio proporciona resultados de los sistemas de tuberías de los generadores de vapor la cual apoya las actividades de mantenimiento a través de la determinación de la vida residual de las tuberías, esto para incrementar la disponibilidad de las unidades generadoras.

Para determinar la vida residual de las tuberías se analizan puntos específicos, con base en el diseño y en los parámetros de operación del generador de vapor. Determinar estos puntos es importante puesto que en ellos se encuentran las zonas más susceptibles a fallar o a quedar dañadas. La inspección en servicio se realiza utilizando técnicas de evaluación no destructiva que nos permitan determinar la vida útil de los elementos del generador de vapor.

#### 2.5.1 DETERMINACION DE LA VIDA RESIDUAL

"La estimación de la temperatura del metal, la presión del vapor y el flujo de calor permiten conocer el patrón de esfuerzos termoplásticos que aunados a datos empíricos y mediciones de velocidad de corrosión y a la correlación de Larson-Miller hacen posible estimar la vida residual de la tubería en cada uno de sus puntos de análisis, como función de los parámetros de operación".(4)

La correlación de Larson-Miller comprende esfuerzos, temperaturas y tiempo de fractura y esta se obtiene a partir de experimentos de termofluencia.

### 2.5.2 FRACTURA POR ESFUERZO

El esfuerzo y la temperatura influyen en el tiempo de vida de la tubería de acero que opera en un generador de vapor. La resistencia de un tubo de caldera esta en función del nivel de esfuerzo como también de la temperatura cuando esta oscila en el rango de fluencia (Creep). La figura 2.3 muestra un ejemplo de las curvas de tiempo de ruptura para la tubería de acero 2.25Cr-1Mo.<sup>(9)</sup>

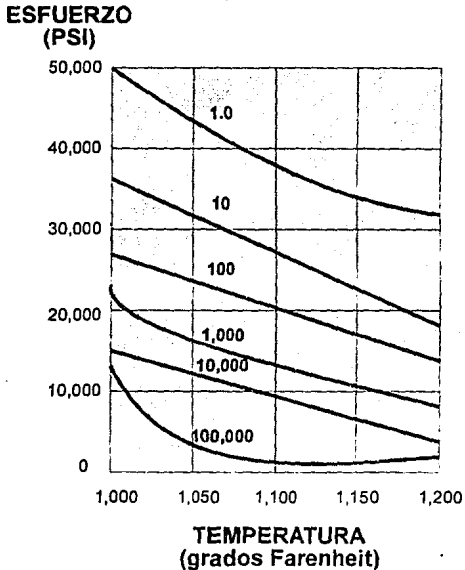


Figura 2.3 Curva de tiempo-ruptura para un material 2.25 Cr-1Mo, Acero SA-213 T 22, un incremento en la temperatura de operación del tubo puede disminuir significativamente el tiempo a la ruptura de un nivel de esfuerzo específico, a 10,000 PSI y 1040 °F, un incremento de 60° puede reducir el tiempo a la ruptura de 100,000 a 10,000 horas.

De la figura podemos ver que un incremento tanto en el esfuerzo o la temperatura reduce el tiempo a la ruptura.

La figura 2.4 presenta el tiempo de ruptura contra las curvas de esfuerzo de un material 2 1/4 Cr-1 Mo, SA 213 T 22. Esta figura muestra que cuando la temperatura del metal se incrementa, el esfuerzo que causara la ruptura dentro de un intervalo de tiempo especifico decrece. Cualquier nivel de esfuerzo dado resultara en falla más rápidamente con un incremento de la temperatura del metal.(9)

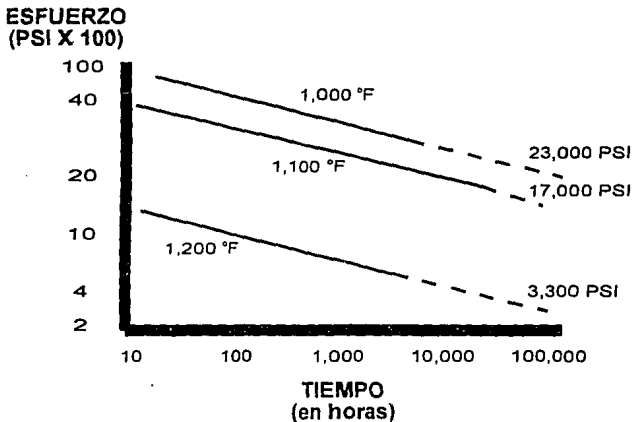


Figura 2.4 Esfuerzo a la ruptura para el material SA 213 T 22. La vida total de servicio en un tubo de caldera depende de la temperatura de operación y el esfuerzo, un incremento en ambos decrecerá el tiempo a la ruptura o la vida de servicio de la tubería.

La figura 2.5 presenta el rango de termofluencia (Creep) (cantidad de deformación por unidad de tiempo) contra curvas de esfuerzos para el mismo tipo de acero de la figura anterior. Esta muestra que para un incremento de la temperatura del metal, el esfuerzo requerido decrece para un rango creep específico. Cualquier nivel de esfuerzo dado resultara en un rango de creep más alto cuando la temperatura del metal crece.(9)

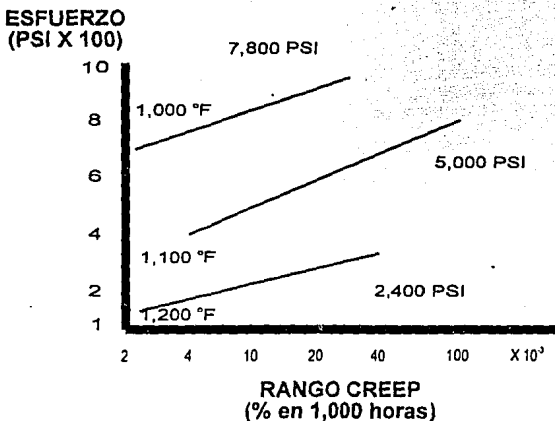


Figura 2.5 Esfuerzo contra rango CREEP para el material SA 213 T 22.

### 2.5.3 CARACTERISTICAS DEL ENSAYO DE TERMOFLUENCIA (CREEP)

\*Si se aplica a un material un esfuerzo, estando a una elevada temperatura, dicho material puede estirarse y finalmente fallar, aun si el esfuerzo aplicado es menor que el de fluencia a tal temperatura. La deformación plástica a temperaturas altas es conocida como termofluencia (Creep).

Para determinar las características de termofluencia de un material, se aplica un esfuerzo constante a una probeta cilíndrica colocada en un horno. Tan pronto como se aplica el esfuerzo, la probeta se alarga elásticamente una pequeña cantidad  $S_0$ , dependiendo del esfuerzo aplicado y el módulo de elasticidad del material a esa temperatura".(10)

De lo anterior observamos que el esfuerzo que provoca la falla del metal que opera a elevadas temperaturas depende mucho del tiempo durante el cual se aplica la carga. Las gráficas de tiempo de deformación son el resultado de los ensayos de termofluencia. Las curvas obtenidas de estos ensayos se dividen en tres etapas siguientes:

En la figura 2.6 se presenta una curva de fluencia donde se observan varias secciones de acuerdo a lo siguiente:

"La sección OA corresponde a una deformación elástica que se produce en el momento de aplicar la carga."

La sección AB, llamada primera etapa o sección no estacionaria de la curva de fluencia. El metal se deforma con velocidad no uniforme. La sección BC, segunda etapa, llamada de régimen de fluencia estacionario. El metal se deforma con una velocidad uniforme. La tangente del ángulo de inclinación de la curva caracteriza la velocidad de fluencia.

La sección CD, es la tercera etapa de fluencia, que transcurre con aceleración ininterrumpida del proceso y concluye con la ruptura en el punto D.\*(9)

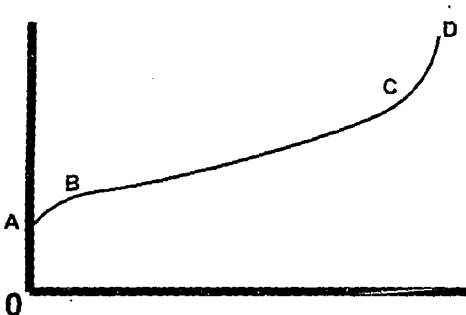


Figura 2.6 Curva típica de fluencia donde se representan las etapas básicas del fenómeno.

Las gráficas de tiempo-deformación obtenidas en el ensayo de termofluencia (Creep) pueden modificarse como resultado de las siguientes condiciones:

- Debido a la alta temperatura del metal cientos de grados arriba de la temperatura de diseño para una duración de escasos minutos.
- Por un relativamente continuo o ligero incremento en el nivel de temperatura o esfuerzos.
- De una acumulación de periodos de operación a una temperatura o esfuerzo moderados para una duración de miles de horas.\*(4)

Dentro del generador de vapor la temperatura del metal de sus componentes es alta (rangos de fluencia) y principalmente los sobrecalentadores y recalentadores, en estos la temperatura es tal que el acero sufre los fenómenos producidos por el calor elevado.



La figura 2.7 es una gráfica de tiempo contra deformación para demostrar el efecto del tiempo y la temperatura. La cantidad de deformación de un tubo es generalmente una indicación del período de tiempo involucrado.

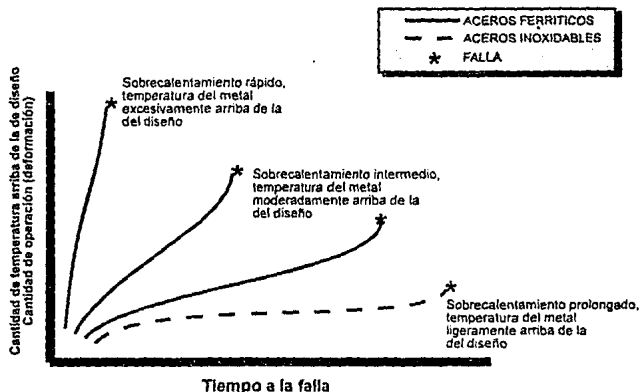


Figura 2.7 Efecto del tiempo y la temperatura sobre la deformación de tubería.

Como se menciona en el punto 1.2, la tubería se selecciona para cualquier localización en el circuito de calentamiento de vapor de acuerdo con el código ASME "éste permite el 1% de deformación de fluencia en 100,000 horas de tiempo de operación."(5)

"Los datos de tiempo de falla han sido adquiridos para varios materiales de acero en pruebas de esfuerzo a la ruptura (STRESS-RUPTURE). Estos datos han sido analizados y usados para generar la correlación entre el tiempo, la temperatura y el esfuerzo.

Un análisis paramétrico comúnmente usado es el método llamado de Larson-Miller, donde el tiempo y la temperatura están relacionados por la siguiente ecuación:" (9)

$$P^o = T[20 + \log t]$$

Donde:

- $P^o$  = Parámetro de Larson-Miller
- $T$  = Temperatura absoluta en grados Rankine (Fahrenheit+460)
- $t$  = Tiempo de ruptura en horas

Las gráficas de ruptura bajo esfuerzo como una función del parámetro de Larson-Miller resultan en una simple línea la cual puede ser usada para evaluar los cambios en la vida de la tubería de acero aun cuando las condiciones de operación varíen.

La figura 2.7 ilustra como el incremento del esfuerzo, temperatura o tiempo de servicio reducirá la vida de las tuberías de las calderas. Si el esfuerzo, la temperatura y el tiempo de operación pueden ser determinados, el parámetro de Larson-Miller puede ser usado para calcular el tiempo de vida remanente a la ruptura del material del tubo. El tiempo a la falla puede reducirse si el esfuerzo aplicado y/o la temperatura son incrementados. Por ejemplo, usando la gráfica de la figura 2.4 de este capítulo, incrementando el esfuerzo del material SA 213 T 22 a 538°C (1000°F) de 96 MPa (13 KSI) a 117 MPa (17 KSI) reducirá su vida a la ruptura de 100,000 horas a 10, 000 horas, incrementando la temperatura del mismo acero con un esfuerzo de 96 MPa (13 KSI) de 538°C (1000°F) a 566°C (1050°F) reducirá su vida de 100,000 horas a 8,000 horas. La aplicación cíclica de esfuerzo y temperatura debida a los cambios de carga en la caldera también agrava estos efectos de la vida del tubo. (10)

El adelgazamiento del espesor por erosión, corrosión u oxidación incrementaran el esfuerzo. Un incremento en la capa interna del tubo (magnetita) incrementara la temperatura del metal de éste.

Como ejemplo de la utilización de las curvas de Larson-Miller se muestra un caso real para la determinación y cálculo de temperatura del metal en los elementos de un sobrecalentador denominado SH-3 de la unidad numero 4 de la central termoeléctrica de Salamanca, las cuales fallaron después de tres meses de operación.

Debido a que los resultados obtenidos en base a estudios metalográficos y ensayos de dureza (resistencia a la tensión equivalente) reflejan la existencia de degradación microestructural y pérdida de sus propiedades mecánicas muy severas, para el tiempo de operación al que ha sido sometido el sobrecalentador desde el último mantenimiento y situación del SH-3 hasta el momento de la falla de elementos, se ha tenido que llevar a cabo el cálculo de la temperatura de metal en los elementos, para conocer y corroborar la falla de los tubos, ocurrido durante su operación. (11)

Datos generales:

Tipo de material: SA 213 t 22  
Diámetro exterior: 47.625 mm  
Diámetro interior: 38.625 mm

No se tiene el valor de presión de vapor en el momento de la falla de la tubería del SH-3; por lo tanto; se obtendrán diferentes temperaturas con los valores de presiones que van desde los 80 Kg/cm<sup>2</sup> hasta los 120 Kg/cm<sup>2</sup>, tabla 2.5a.

Para diferentes valores de presión se tiene:

P (Kg/cm <sup>2</sup> )	S (KSI)
80	4.8800
85	5.1760
90	5.4812
95	5.7857
100	6.0904
105	6.3947
110	6.6992
115	7.0037
120	7.3083

Tabla 2.5a Valores de presión seleccionados con el correspondiente valor de esfuerzo máximo permisible del material obtenido de la sección I del código ASME (5).

Utilizando las curvas de Larson-Miller para el material SA 213 T 22, se obtienen los datos siguientes, tabla 2.5.b :

Presión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Parámetro de Larson/Miller x10E3	Temperatura °C	Temperatura °F
80	39.8	832	1530
85	39.7	829	1525
90	39.5	824	1515
95	39.3	818	1505
100	39.2	816	1500
105	39.0	810	1490
110	38.7	802	1475
115	38.6	799	1470
120	38.4	793	1400

Tabla 2.5b Datos obtenidos del estudio realizado para determinar las causas de la falla del material analizado.

Los datos de temperatura del metal, establecidos en la tabla 2.5b, se han calculado mediante la fórmula siguiente, para un tiempo de rotura de una hora máximo.

$$T = \left[ \frac{P^{\circ}}{20 + \log t} \right] - 460$$

Donde:

- T = temperatura del metal ( $^{\circ}\text{F} + 460$ ) =  $^{\circ}\text{K}$
- $P^{\circ}$  = parámetro de Larson-Miller
- t = tiempo de permanencia a la elevada temperatura 1 hora.

---

---

## CAPITULO TRES

---

---

### 3. TRABAJO DE CAMPO

#### 3.1. CONSIDERACIONES DE LA INVESTIGACION

En los dos pasados capítulos se han presentado las características generales de los materiales que son utilizados en la fabricación de una caldera, con la finalidad de proporcionar un conocimiento global y ofrecer una visión de los materiales que trabajan a elevadas temperaturas.

El tema primordial de este trabajo es, el desarrollo de un método que nos permita determinar la vida remanente o residual de los materiales que trabajan a elevadas temperaturas. La idea de realizar este trabajo se basa en los resultados obtenidos en inspecciones de generadores de vapor.

La forma empleada para conseguir los objetivos establecidos fue la de la experimentación, utilizando el razonamiento dirigido acerca de la degradación microestructural que presentan los materiales en una caldera.

Los diversos materiales usados en un generador de vapor, incurren en una modificación en su microestructura después de estar operando a elevadas temperaturas. Resultando una disminución en las propiedades mecánicas de estos metales.

El estudio de laboratorio se realizó sobre los materiales SA-106 grado C, SA-209 T1, SA-213 T22 y SA-213 T347, para investigar la interrelación entre la dureza y la microestructura que presentan estos materiales al ser expuestos durante tiempos prolongados a elevadas temperaturas.

Para establecer la disminución de las propiedades mecánicas de los materiales se consideró la relación existente entre la dureza y la resistencia a la tensión mediante el uso de la tabla 3.1 (3B de la especificación SA-370 de la sección II parte A del código ASME). (1) Además, para definir la aplicabilidad de la tubería en un generador de vapor se consideró un rango de dureza, establecido de acuerdo a la especificación de cada material empleado, obtenido del código ASME. Este rango de dureza, restringe el uso de los materiales en la caldera con un valor máximo y un mínimo, estos, por lo tanto, se consideraron como parámetros fundamentales para determinar la finalización del ensayo, al obtener el valor mínimo de dureza del material durante la prueba.

TABLE 3B Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels<sup>A</sup> (Rockwell B to other Hardness Numbers)

Rockwell B Scale, 100-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Vickers Hardness Number	Brinell Indentation Diameter, mm	Hicell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell F Scale, 60-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength, ksi (MPa)
							15T Scale, 15-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	
100	240	3.91	240	251	61.5	...	93.1	83.1	72.9	116 (800)
99	234	3.96	234	246	60.9	...	92.8	82.5	71.9	114 (785)
98	228	4.01	228	241	60.2	...	92.5	81.8	70.9	109 (750)
97	222	4.06	222	236	59.5	...	92.1	81.1	69.9	104 (715)
96	216	4.11	216	231	58.9	...	91.8	80.4	68.9	102 (705)
95	210	4.17	210	226	58.3	...	91.5	79.8	67.9	100 (690)
94	205	4.21	205	221	57.6	...	91.2	79.1	66.9	98 (675)
93	200	4.26	200	216	57.0	...	90.8	78.4	65.9	94 (650)
92	195	4.32	195	211	56.4	...	90.5	77.8	64.8	92 (635)
91	190	4.37	190	206	55.8	...	90.2	77.1	63.8	90 (620)
90	185	4.43	185	201	55.2	...	89.9	76.4	62.8	89 (615)
89	180	4.48	180	196	54.6	...	89.5	75.8	61.8	88 (605)
88	176	4.53	176	192	54.0	...	89.2	75.1	60.8	86 (590)
87	172	4.58	172	188	53.4	...	88.9	74.4	59.8	84 (580)
86	169	4.62	169	184	52.8	...	88.6	73.8	58.8	83 (570)
85	165	4.67	165	180	52.3	...	88.2	73.1	57.8	82 (565)
84	162	4.71	162	176	51.7	...	87.9	72.4	56.8	81 (560)
83	159	4.75	159	173	51.1	...	87.6	71.8	55.8	80 (550)
82	156	4.79	156	170	50.6	...	87.3	71.1	54.8	77 (530)
81	153	4.84	153	167	50.0	...	86.9	70.4	53.8	73 (505)
80	150	4.88	150	164	49.5	...	86.6	69.7	52.8	72 (495)
79	147	4.93	147	161	48.9	...	86.3	69.1	51.8	70 (485)
78	144	4.98	144	158	48.4	...	86.0	68.4	50.8	69 (475)
77	141	5.02	141	155	47.9	...	85.6	67.7	49.8	68 (470)
76	139	5.06	139	152	47.3	...	85.3	67.1	48.8	67 (460)
75	137	5.10	137	150	46.8	99.6	85.0	66.4	47.8	66 (455)
74	135	5.13	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	65 (450)
73	132	5.18	132	145	45.8	98.5	84.3	65.1	45.8	64 (440)
72	130	5.22	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	63 (435)
71	127	5.27	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	62 (425)
70	125	5.32	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	61 (420)
69	123	5.36	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	60 (415)
68	121	5.40	121	135	43.3	95.6	82.7	61.7	40.8	59 (405)
67	119	5.44	119	133	42.8	95.1	82.4	61.0	39.8	58 (400)
66	117	5.48	117	131	42.3	94.5	82.1	60.4	38.7	57 (395)
65	116	5.51	116	129	41.8	93.9	81.8	59.7	37.7	56 (385)
64	114	5.54	114	127	41.4	93.4	81.4	59.0	36.7	...
63	112	5.58	112	125	40.9	92.8	81.1	58.4	35.7	...

Tabla 3-1. CONVERSION DE DUREZAS PARA ACEROS NO AUSTENITICOS DEL CODIGO ASME SECCION II PARTE "A", DONDE SE INDICA TAMBIEN LA RESISTENCIA A LA TENSION APROXIMADA.

TABLE 3B—Continued

Rockwell B Scale, 100-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Vickers Hardness Number	Brinell Indentation Diameter, mm	Brinell Hardness, 3000-kgf Load, 10-mm Ball	Knoop Hardness, 500-gf Load and Over	Rockwell A Scale, 60-kgf Load, Diamond Penetrator	Rockwell F Scale, 60-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	Rockwell Superficial Hardness			Approximate Tensile Strength, ksi (MPa)
							1ST Scale, 15-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	30T Scale, 30-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	45T Scale, 45-kgf Load, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	
62	110	5.63	110	124	40.4	92.2	80.8	57.7	34.7	...
61	108	5.68	108	122	40.0	91.7	80.5	57.0	33.7	...
60	107	5.70	107	120	39.5	91.1	80.1	56.4	32.7	...
59	106	5.73	106	118	39.0	90.5	79.8	55.7	31.7	...
58	104	5.77	104	117	38.6	90.0	79.5	55.0	30.7	...
57	103	5.81	103	115	38.1	89.4	79.2	54.4	29.7	...
56	101	5.85	101	114	37.7	88.8	78.8	53.7	28.7	...
55	100	5.87	100	112	37.2	88.2	78.5	53.0	27.7	...
54	...	...	...	111	36.8	87.7	78.2	52.4	26.7	...
53	...	...	...	110	36.3	86.5	77.9	51.7	25.7	...
52	...	...	...	109	35.9	86.0	77.5	51.0	24.7	...
51	...	...	...	108	35.5	85.4	77.2	50.3	23.7	...
50	...	...	...	107	35.0	84.8	76.9	49.7	22.7	...
49	...	...	...	106	34.6	84.3	76.6	49.0	21.7	...
48	...	...	...	105	34.1	83.7	76.2	48.3	20.7	...
47	...	...	...	104	33.7	83.1	75.9	47.7	19.7	...
46	...	...	...	103	33.3	...	75.6	47.0	18.7	...
45	...	...	...	102	32.9	82.6	75.3	46.3	17.7	...
44	...	...	...	101	32.4	82.0	74.9	45.7	16.7	...
43	...	...	...	100	32.0	81.4	74.6	45.0	15.7	...
42	...	...	...	99	31.6	80.8	74.3	44.3	14.7	...
40	...	...	...	98	31.2	80.3	74.0	43.7	13.6	...
40	...	...	...	97	30.7	79.7	73.6	43.0	12.6	...
39	...	...	...	96	30.3	79.1	73.3	42.3	11.6	...
38	...	...	...	95	29.9	78.6	73.0	41.6	10.6	...
37	...	...	...	94	29.5	78.0	72.7	41.0	9.6	...
36	...	...	...	93	29.1	77.4	72.3	40.3	8.6	...
35	...	...	...	92	28.7	76.9	72.0	39.6	7.6	...
34	...	...	...	91	28.2	76.3	71.7	39.0	6.6	...
33	...	...	...	90	27.8	75.7	71.4	38.3	5.6	...
32	...	...	...	89	27.4	75.2	71.0	37.6	4.6	...
31	...	...	...	88	27.0	74.6	70.7	37.0	3.6	...
30	...	...	...	87	26.6	74.0	70.4	36.3	2.6	...

<sup>A</sup>This table gives the approximate interrelationships of hardness values and approximate tensile strength of steels. It is possible that steels of various compositions and processing histories will deviate in hardness-tensile strength relationship from the data presented in this table. The data in this table should not be used for austenitic stainless steels, but have been shown to be applicable for ferritic and martensitic stainless steels. Where more precise conversions are required, they should be developed specially for each steel composition, heat treatment, and part.

TABLE 3.1. CONTINUACION.

Debido a la resistencia a elevadas temperaturas de los materiales ferríticos y austeníticos, son empleados ampliamente en los generadores de vapor. La aplicación de estos materiales generalmente implica servicios por largos períodos a elevadas temperaturas, una desventaja inherente en el uso de estos materiales es su tendencia a modificar su microestructura o a formar nuevas fases metalúrgicas, en el caso de los aceros inoxidable, lo cual puede resultar en lo que llamamos degradación microestructural y a la alteración en sus propiedades mecánicas.

Un cambio notable es la modificación microestructural, en el caso de los aceros ferríticos es la globulización o pérdida de la fase perlítica y en el caso de los aceros inoxidable austeníticos es la precipitación de carburos de cromo en el límite de grano y a la fragilización de estos por la presencia de la fase sigma.

El nivel de degradación microestructural de los metales estudiados esta en función del tiempo a que se han sometido cuando trabajan a la elevada temperatura.

La presencia de una degradación microestructural en materiales que trabajan en generadores de vapor ha sido observada desde hace varios años y esto ocurre durante inspecciones en servicio del generador de vapor o en análisis de fallas sucedidas en estos.

El mecanismo por el cual ocurre la degradación microestructural, no es simple y no existe información relacionada con este tema. El término degradación microestructural lo podemos definir como una modificación en la microestructura de los metales debida a la exposición prolongada de estos a una elevada temperatura, sin llegar a someterlos a la temperatura de transformación de los materiales para evitar en ellos un cambio de fase.

## 3.2 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

### 3.2.1 MATERIALES UTILIZADOS

De la gran variedad de materiales para tubería que se emplea en un generador de vapor, se seleccionaron los que corresponden a las siguientes especificaciones:

SA-106 grado C	SA-209 T1
SA-213 T22	SA-213 T347

La especificación empleada es la establecida por el código ASME.(1)

Las propiedades mecánicas de los aceros involucrados en esta investigación se presenta en la tabla 3.1, la composición química de cada uno de ellos se muestran en la tabla 3.2 y los requerimientos de dureza se incluyen en la tabla 3.3.



ESPECIFICACION DEL MATERIAL	RESISTENCIA A LA TENSION KPSI [MPa]	RESISTENCIA A LA CEDENCIA KPSI [MPa]	ELONGACION EN 50 mm MINIMO (%)
SA-106 Gr.C	70 [485]	40 [275]	30
SA-209 T1	55 [380]	30 [205]	30
SA-213 T22	60 [415]	30 [205]	30
SA-213 T347	75 [515]	30 [205]	35

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas de los materiales empleados en la investigación.(1)

ELEMENTO	COMPOSICION QUIMICA POR ESPECIFICACION			
	SA-106 GrC	SA-209 T1	SA-213 T22	SA-213 T347
C	0.35 MAX	0.10-0.20	0.15 MAX	0.04-0.10
Mn	0.29-1.06	0.30-0.80	0.30-0.60	2.00
P	0.048 MAX	0.045 MAX	0.03 MAX	0.04 MAX
S	0.058 MAX	0.045 MAX	0.03 MAX	0.03 MAX
Si	0.10 MIN	0.10-0.50	0.50 MAX	0.75 MAX
Mo	-----	0.44-0.65	0.80-1.10	-----
Cr	-----	-----	1.90-2.60	17.0-20.0
Ni	-----	-----	-----	9.00-13.0

Tabla 3.2 Composición química de los materiales empleados en la investigación.(1)

ESPECIFICACION	DUREZA BRINEL		DUREZA ROCKWELL B	
	MAXIMA	MINIMA	MAXIMA	MINIMA
SA-106 Grado C	147	100	79	55
SA- 209 T1	184	110	89	62
SA- 213 T22	163	123	84	69
SA- 213 T347	192	143	91	78

Tabla 3.3 Requerimientos de dureza.(1)

Los materiales usados en este trabajo fueron obtenidos de empresas que se dedican a la fabricación de calderas, como Carrey y Cleaver Brooks. Se consiguieron en tramos de tubería de aproximadamente 30 cm., cada uno, como tubería nueva.

### 3.2.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Dentro de los equipos utilizados se encuentran los siguientes:

- a) Máquina cortadora con disco abrasivo de 12,000 rpm marca Buheler.
- b) Máquina para preparar metalografías con diferentes tipos de lijas y paño marca Buheler.
- c) Probador de durezas con escala Rockwell B marca Wilson
- d) Microscopio metalográfico con cámara fotográfica integrada marca Bausch and Lomb.
- e) Horno con control automático de temperatura marca Midlandross.

### 3.3 PROCEDIMIENTO

El procedimiento empleado para conseguir los objetivos establecidos en este trabajo esta basado en los siguientes puntos:

- 3.3.1. *Recolección de los materiales e identificación de las muestras.*
- 3.3.2. *Examinación microscópica y análisis de los materiales básicos.*
- 3.3.3. *Ensayos mecánicos (medición de dureza en las primeras muestras).*
- 3.3.4. *Ensayo simulado de las condiciones de operación.*
- 3.3.5. *Preparación de las muestras metalográficas.*
- 3.3.6. *Preparación de las muestras para la medición de dureza.*
- 3.3.7. *Examinación y análisis de las muestras metalográficas.*

#### 3.3.1. RECOLECCION DE LOS MATERIALES, SELECCION E IDENTIFICACION DE LAS MUESTRAS

Los materiales que se obtuvieron son los siguientes :

SA- 106 GRADO C  
SA- 209 T 1  
SA- 213 T 22  
SA- 213 T 347

Cada uno de ellos se seleccionó de tal forma que cumpliera con las especificaciones indicadas por el código ASME. La tubería de este material se consiguió en diferentes diámetros y espesores con una longitud de 30 cm., aproximadamente.

Una vez recolectados estos materiales se procedió a identificarlos empleando números y letras de golpe. Cada tramo de tubo fue cortado en secciones de un centímetro de espesor, de cada material se obtuvieron veinte probetas, las que fueron marcadas con números de golpe del 1 al 20, además de marcar la especificación del material para evitar pérdidas y confusiones.

### 3.3.2 EXAMINACION MICROSCOPICA Y ANALISIS DE LOS MATERIALES BASICOS.

Mediante el uso de la metalografía se estudiaron las características microestructurales de los metales seleccionados. El procedimiento seguido para la preparación de cada probeta se indica a continuación:

- Cada muestra o probeta fue la sección del tubo, no fue necesario que se montaran en baquelita u otro material para poder manejarlas en los pasos siguientes de su preparación.
- La última aproximación a la superficie plana libre de ralladuras se obtuvo mediante un disco giratorio humedecido con agua y cubierto con un paño especial cargado con partículas abrasivas.
- La etapa final es hacer visibles las características microestructurales del metal usándose el llamado ataque químico. Este proceso se ejecuto de tal forma que quedaron claramente diferenciadas las partes de la microestructura. Se logro este punto mediante el uso de un reactivo apropiado para cada tipo de metal. En la tabla 3.4 se indican los reactivos involucrados en este trabajo.

ESPECIFICACION DEL MATERIAL	REACTIVO DE ATAQUE	COMPOSICION DEL REACTIVO EN 100 ml
SA-106 Gr C	NITAL 2%	ALCOHOL ETILICO 98 ml ACIDO NITRICO 2 ml
SA-209 T1 SA-213 T22	NITAL 3%	ALCOHOL ETILICO 97ml ACIDO NITRICO 3 ml
SA-213 T347	GLICERERGIJA EN 35 ml	ACIDO NITRICO 10 ml ACIDO CLORHIDRICO 15 ml ACETICO 10 ml

Tabla 3.4 Reactivos para ataque químico de materiales

Después de haber realizado la preparación de las muestras se observaron estas en el microscopio metalográfico para establecer el tipo de microestructura que presentaba cada probeta.

El análisis que se realizó a cada probeta se presenta en el siguiente capítulo, mostrándose también las fotomicrografías que fueron tomadas como resultado de la investigación.

En lo que respecta a la investigación, se indican como materiales básicos a la probeta número 1 de cada tipo de material. Considerándose su microestructura de estas probetas como original y sin modificaciones.

La probeta número 1 de cada material fue sometida para su análisis metalográfico a la secuencia del procedimiento anteriormente descrito en el punto 3.3.2 de este capítulo.

### 3.3.3 ENSAYOS MECANICOS (MEDICION DE DUREZAS EN LAS PRIMERAS MUESTRAS)

Para este trabajo de investigación se considera a la propiedad mecánica de dureza como un parámetro fundamental para los materiales que trabajan a elevadas temperaturas. El código ASME plantea un rango de durezas para cada tipo de material, fuera de este rango no se recomienda el uso de estos debido a que no son sus propiedades óptimas para su operación.

Los rangos de dureza recomendadas para los materiales empleados se indican en la tabla 3.3.

Después de haber realizado el análisis metalográfico de la probeta número 1 de cada material, se le practico la medición de su dureza. Considerando estas probetas como patrones inalterables para la investigación.

El tipo de ensayo mecánico realizado a las probetas fue el de dureza Rockwell B. Una cantidad de cinco ensayos fueron realizados en cada probeta, obteniéndose un promedio de ellos para registrarlos como dato de la investigación.

### 3.3.4 ENSAYO SIMULADO DE LAS CONDICIONES DE OPERACION.

Como la duración de la tubería de caldera suele ser de varios años, no es posible llevar a cabo un ensayo durante tanto tiempo, para determinar que material emplear en la fabricación de éstos equipos. En este trabajo se presenta un ensayo simple y de corta duración, con la finalidad de que nos proporcione datos útiles.

Se ha indicado con anterioridad que una prueba a elevadas temperaturas en nuestro país es muy costosa y difícil de aplicar por las tecnologías tan sofisticadas que se requieren. En este trabajo fue realizada la siguiente prueba:

La experiencia que se ha tenido en inspecciones de generadores de vapor indica que los materiales empleados y sometidos a elevadas temperaturas después de un periodo operativo presentan una degradación microestructural lo que implica también una pérdida en las propiedades mecánicas de tales aceros, en forma específica la dureza, parámetro fundamental de esta investigación.

En función de los resultados obtenidos de inspecciones de generadores de vapor, se decidió someter a materiales nuevos a una elevada temperatura que no sobrepasara el punto de transformación de cada uno de ellos. La temperatura seleccionada para todos ellos fue de 700°C, con la finalidad de obtener una degradación microestructural y una alteración en su propiedad mecánica de la dureza.

Se colocaron dentro del horno las probetas de cada material marcadas del número 2 al 20, a una temperatura de 700°C. Cada una de ellas fue retirándose en orden consecutivo después de un periodo de sostenimiento a la temperatura indicada. En la tabla 3.6 se muestra el tiempo en que fue extraída cada una de las probetas. Una vez obtenidas las probetas del horno se dejaron enfriar al aire.

No. DE PROBETA	TIEMPO DE PERMANENCIA EN HORAS	No. DE PROBETA	TIEMPO DE PERMANENCIA EN HORAS
1	0	11	72
2	1	12	120
3	8	13	170
4	6	14	220
5	24	15	270
6	32	16	320
7	40	17	370
8	48	18	420
9	56	19	470
10	64	20	520

Tabla 3.6 Tiempo de exposición de cada probeta a la temperatura elevada de 700 grados centígrados.

### 3.3.5 PREPARACION DE LAS MUESTRAS METALOGRAFICAS

Siguiendo el procedimiento indicado en el punto 3.3.2 se prepararon las muestras metalográficas después de haberse retirado del horno y haberse enfriado completamente. A todas las probetas se les analizó metalográficamente para establecer el tipo de microestructura correspondiente, pero sólo se seleccionaron ocho como resultado final y a las cuales se les tomo su microfotografía.

### 3.3.6 PREPARACION DE LAS MUESTRAS PARA MEDICION DE DUREZAS

La medición de durezas en cada una de las muestras fue efectuada después de haberse realizado el análisis metalográfico. Utilizándose un durómetro con escala Rocwell B, las lecturas registradas de cada una de las probetas sirvió para obtener una gráfica asignada a cada material de estudio.

### 3.3.7 EXAMINACION Y ANALISIS DE LAS MUESTRAS METALOGRAFICAS.

La actividad primordial de este inciso consistió en observar al microscopio las 20 probetas de cada tipo de material.

Se observó efectivamente que la microestructura del metal había cambiado de acuerdo al tiempo de permanencia a la elevada temperatura a la que había sido sometido. También se pudo notar que los cambios de microestructura fueron graduales, de tal manera que la diferencia microestructural

entre una probeta y otra era casi imperceptible por lo que se seleccionaron sólo ocho de las más relevantes siendo estas establecidas como referencia y resultado de la investigación.

Las probetas fueron analizadas a 200x y 500x siendo también a estos aumentos a los que se obtuvieron las fotomicrografías.

Incluyéndose en el capítulo cuatro.

### 3.4 CAPTACION DE LA INFORMACION

En aproximadamente 520 horas de exposición a una temperatura de 700°C, se obtuvieron varias etapas de degradación microestructural, el metal que ha sufrido ésta presenta pérdida de dureza, por lo tanto, los datos registrados fueron la dureza, el tiempo de permanencia y el tipo de microestructura observada.

La degradación microestructural a elevada temperatura en diferentes tiempos de permanencia fue efectivamente marcada, registrándose variaciones en la dureza. En orden a examinar el efecto de la temperatura sobre la microestructura y dureza del metal, se tomaron valores de esta los cuales se registraron en la tabla 3.7.

No. DE PROBETA	ESPECIFICACION DEL MATERIAL			
	SA-106 Gr C	SA-209 T1	SA-213 T22	SA-213 T347
1	76	85	88	78
2	78	83	85	76
3	74	82	87	76
4	71	82	83	80
5	72	81	80	73
6	70	79	77	73
7	70	75	75	76
8	70	75	79	81
9	73	73	77	79
10	71	73	78	82
11	67	72	75	77
12	65	71	74	76
13	66	73	71	82
14	64	70	72	84
15	63	67	72	82
16	60	65	69	93
17	57	65	67	86
18	54	61	67	90
19	54	60	65	92
20	52	57	66	98

Tabla 3.7 Valores de dureza obtenidos en relación con el número de probeta y la especificación del material. Estos datos de dureza fueron tomados en la escala Rockwell B.

---

# CAPITULO CUATRO

---

## 4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACION.

### 4.1. DATOS OBTENIDOS

Se pretende con este estudio llegar a elaborar la metodología que permita mediante recursos al alcance de la tecnología de nuestro país determinar la vida remanente de la tubería que opera en generadores de vapor. Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la investigación se ha definido una ecuación que nos lleva a determinar el tiempo de vida que le resta al material de componentes de calderas, sabiendo que de acuerdo a lo establecido en el código de calderas A.S.M.E., que la vida de cada material es de 100,000 horas, por lo que después de este período no se recomienda su uso.(1)

Así pues en este capítulo se presentan dos análisis matemáticos que nos llevan a establecer las ecuaciones correspondientes para cada material investigado.

#### 4.1.1 ANTECEDENTES

Los aceros empleados en calderas generalmente presentan uno o más elementos aleantes, los que proporcionan algunas propiedades al material (resistencia a la corrosión, resistencia a las elevadas temperaturas y a la oxidación, como ejemplos).

Para construcciones soldadas, el código ASME, (calderas y recipientes a presión), limita el contenido de carbono a menos del 0.35 % .Entonces virtualmente todos los materiales usados en la fabricación de calderas y partes a presión caen dentro de esta clasificación. La tabla 4.1 lista los aceros usados en este trabajo.

ALEACION	ESPECIFICACION
Aceros al carbón	SA 106 GR C
Aceros al carbón-1/2 Molibdeno	SA 209 T1
Aceros con 2 1/4 Cromo-1 Molibdeno	SA 213 T22
Aceros inoxidable 18 Cromo- 10 Níquel	SA 213 TP 347

Tabla 4.1 Materiales empleados en la investigación.

Estas cuatro aleaciones cubren probablemente del 35 % al 40 % de los aceros usados, en la fabricación de tubería de calderas, de muchos grados aceptados y listados en el código ASME.

La máxima temperatura de uso de los materiales es determinada tanto por la corrosión u oxidación que limitan la vida útil de los mismos antes de alguna falla o de que ocurran cambios microestructurales que debilitan el acero durante el servicio a elevadas temperaturas.

El efecto de la temperatura sobre los aceros sometidos a períodos largos en un generador de vapor, es comparado mediante esta investigación, la cual, se realizó tratando de ejemplificar las características de temperatura a la que son sometidos éstos materiales.

Los resultados obtenidos sugieren que el tiempo y la temperatura son los responsables del cambio microestructural del material. Estos cambios llevan al material a disminuir, la propiedad mecánica de dureza.

Las pruebas de dureza y fotomicrografías fueron obtenidas para determinar los efectos de la temperatura sobre estos materiales. Todos los datos registrados de los materiales de estudio se describirán de acuerdo a la especificación del material.

#### 4.1.2 RESULTADOS DE LA INVESTIGACION SOBRE EL ACERO AL CARBON.

Este material corresponde a la especificación de tubería de acero al carbón sin costura para servicio a alta temperatura. En las tablas 4.2 y 4.3 se incluyen los requerimientos químicos y mecánicos respectivamente.

C.máx.	Mn	P.máx	S.máx.	Si.min.
0.35	0.29-1.06	0.025	0.025	0.10

Tabla 4.2 Requerimientos químicos para el material SA 106 Gr C.

Resist. Tensión	Pto. Cedencia	Elongación	Dureza
MPa (PSI)	MPa(PSI)	en 50mm min %	RB(HBN)
483 (70000)	276 (40000)	Longitudinal 30% Transversal 16.5%	79(147)MAX 55(100)MIN

Tabla 4.3 Requerimientos mecánicos del material SA 106 Gr C.






En la tabla 4.4 se incluyen los datos siguientes: número de clasificación de probeta, tiempo de exposición a la elevada temperatura y la dureza promedio registrada para el material SA 106 Gr C.

No. de probeta	Tiempo exp. alta temperatura (horas)	Dureza promedio (RB)	No. de probeta	Tiempo exp. alta temperatura (horas)	Dureza promedio (RB)
1	0	76	11	72	87
2	1	78	12	120	85
3	8	74	13	170	66
4	16	71	14	220	84
5	24	72	15	270	63
6	32	70	16	320	80
7	40	70	17	370	57
8	48	70	18	420	54
9	56	73	19	470	54
10	64	71	20	520	52

Tabla 4.4 Datos registrados para el material SA 106 Gr C.

Las microestructuras obtenidas se muestran en las fotomicrografías número 4.1.2 correspondientes al acero SA 106 Gr C, obteniéndose ocho tipos de microestructuras en función del tiempo de exposición a elevada temperatura, se tomaron estas a 200X y 500X para poder definir su caracterización.

Las microestructuras tomadas fueron ocho, de un total de veinte probetas, siendo éstas las más significativas como resultado del estudio. Una clasificación arbitraria se hizo para la identificación de estas microestructuras y describiendo cada una de ellas como sigue:

CLASIFICACION DE LA MICROESTRUCTURA "TIPO"	DESCRIPCION
	Probeta seleccionada No. 1, sin someterse a temperatura, material sin modificación microestructural (nuevo), presenta granos homogéneos de ferrita y perlita en forma de bandas debido al proceso de fabricación del tubo.
	Probeta seleccionada No. 2, con una hora de exposición a 700°C grados centígrados, el material ya presenta modificación microestructural con granos equiaxiales de ferrita y perlita, apresándose aun la orientación original de los granos.
	Probeta seleccionada No. 3, con ocho horas de exposición, esta microestructura muestra granos equiaxiales de ferrita y perlita con una incipiente globulización de la perlita. Perdiéndose la orientación original de los granos.

4	Probeta seleccionada No. 7, con cuarenta horas sometida a elevada temperatura, continua la forma equiaxial de los granos de la microestructura siendo estos ferrita y perlita, esta última esta semiglobulizada.
5	Probeta seleccionada No. 10, expuesta a 700°C durante sesenta y cuatro horas, la microestructura consta de granos equiaxiales de ferrita y perlita, estando el carburo de hierro de la perlita con mayor grado de globulización que en la microestructura TIPO 4
6	Probeta seleccionada No. 13 con 170 horas de exposición, la microestructura observada en esta probeta son granos equiaxiales de ferrita y perlita globulizada.
7	Probeta seleccionada No. 16 expuesta 320 horas a 700°C, observándose en la probeta granos de ferrita y la perlita globulizada casi en su totalidad dispersándose esta en la matriz ferrítica.
8	Probeta seleccionada No. 19 con un tiempo de exposición de 470 horas y una dureza de 54 RB rebasando el límite inferior del rango establecido por el código ASME, la microestructura observada presenta granos de ferrita (matriz) y el carburo de hierro de la perlita esta totalmente globulizado.

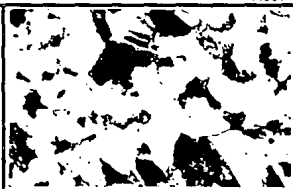
4.1.2 FOTOMICROGRAFIAS CORRESPONDIENTES AL MATERIAL SA-106 GR C DE ACERO  
AL CARBONO

## MICROESTRUCTURA TIPO 1

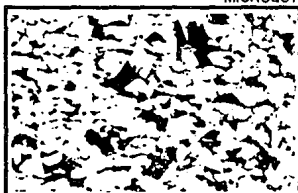
x200



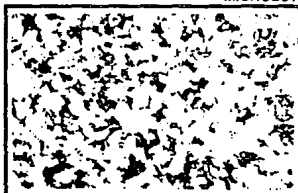
X500



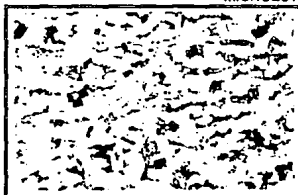
## MICROESTRUCTURA TIPO 2



## MICROESTRUCTURA TIPO 3

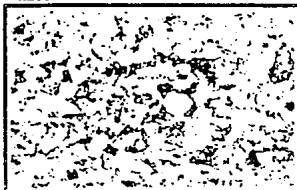


## MICROESTRUCTURA TIPO 4



## MICROESTRUCTURA TIPO 5

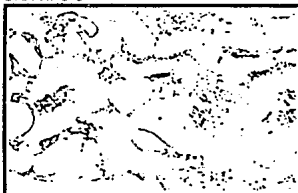
x200



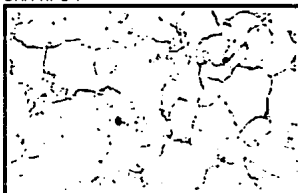
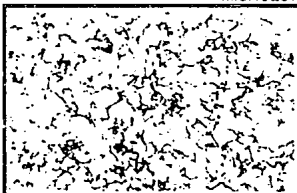
X500



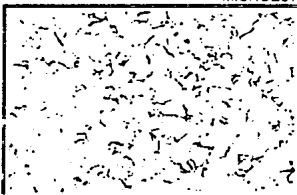
## MICROESTRUCTURA TIPO 6



## MICROESTRUCTURA TIPO 7



## MICROESTRUCTURA TIPO 8



## 4.1.3 DATOS OBTENIDOS DEL MATERIAL DE ACERO AL CARBON-MOLIBDENO SA 209 T1

Este material corresponde a la especificación de tubería sin costura de aceros al carbón molibdeno para uso de sobrecalentadores de vapor en calderas.

Se indican como referencia las propiedades químicas y mecánicas de este material en las tablas 4.5 y 4.6 respectivamente.

C	Mn	P max.	S max.	Si	Mo
0.10-0.20	0.30-0.80	0.045	0.045	0.10-0.50	0.44-0.65

Tabla 4.5 Requerimientos químicos para el material SA 209 T1

Resist. Tensión MPa (KPSI)	Pto. Cedencia MPa (KPSI)	Elongación en 50 mm mín %	Dureza RB(HBN)
380 (55)	205 (30)	Longitudinal 30 Transversal 16.5	89 (184)max 62 (110)min

Tabla 4.6 Requerimientos mecánicos del material SA 209 T1

En la tabla 4.7 se incluyen los datos siguientes: número de clasificación de probeta, tiempo de exposición a la elevada temperatura y la dureza promedio registrada para el material SA 209 T1.

No. de probeta	Tiempo exp. alta temperatura (horas)	Dureza promedio (RB)	No. de probeta	Tiempo exp. alta temperatura (horas)	Dureza promedio (RB)
1	0	85	11	72	72
2	1	83	12	120	71
3	8	82	13	170	73
4	16	82	14	220	70
5	24	81	15	270	67
6	32	79	16	320	65
7	40	75	17	370	65
8	48	75	18	420	61
9	56	73	19	470	60
10	64	73	20	520	57

Tabla 4.7 Datos registrados para el material SA 209 T1.

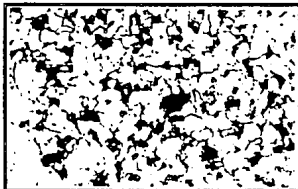
Las microestructuras obtenidas se muestran en las fotomicrografías número 4.1.3 correspondientes al material SA 209 T1 obteniéndose ocho tipos de microestructuras, de un total de veinte tomadas a 200X y 500X para evaluar sus características después de someterse a la elevada temperatura. La clasificación que se les dio a las microestructuras fue arbitraria y estas se describen a continuación.

CLASIFICACION DE LA MICROESTRUCTURA "TIPO"	DESCRIPCION
1	<p>Probeta seleccionada No. 1, sin exposición a la elevada temperatura, la microestructura corresponde a la condición de fabricación del tubo. Esta se constituye de una matriz ferrítica (fondo color blanco), ístas o colonias bien definidas de perlita laminar (áreas de color negro) y algunos carburos precipitados en los límites e interior de los granos ferríticos.</p>
2	<p>Probeta seleccionada No. 2, con una hora de exposición a 700°C, el material ya presenta modificación microestructural, con esferoidización del 50% del carburo de hierro o cementita (Fe<sub>3</sub>C) de la fase perlítica. Se aprecian distintos niveles de esferoidización de los carburos de dichas colonias y aumento de los carburos precipitados en la matriz. La perlita se observa claramente definida.</p>
3	<p>Probeta seleccionada No. 3, con ocho horas de exposición, existe una manifestación de esferoidización de la cementita (90-100%). Localizándose los carburos aun en el modelo perlítico original. Se aprecia la dispersión incipiente de los carburos esferoidizados en la matriz y pérdida de definición en la perlita.</p>
4	<p>Probeta seleccionada No. 9, con cincuenta y seis horas expuesto a 700°C, ésta se considera una etapa intermedia de la dispersión (40-60% aprox.) de los carburos en la matriz ferrítica. La perlita presenta pérdida casi total de su definición. Se observa que los carburos dispersos se localizan tanto en los límites como en el interior de los granos, apreciándose coalescencia incipiente de algunos carburos.</p>
5	<p>Probeta seleccionada No. 11, extraída después de 72 horas sometida a 700°C, encontramos en esta probeta dispersión del 75% aproximadamente de los carburos esferoidizados en la matriz de ferrita. Se observa mayor coalescencia de carburos y un notorio incremento del tamaño de algunos de ellos. La perlita ha perdido totalmente su definición.</p>
6	<p>Probeta seleccionada No. 13, tiempo de exposición 170 horas, en esta se observa dispersión de carburos. En lugar de la perlita se aprecian pequeñas agrupaciones de carburos. La mayor parte de los carburos no agrupados se encuentran localizados en los límites de grano.</p>
7	<p>Probeta seleccionada No. 17, sometida 370 horas a 700°C. Localización de carburos preferentemente en los límites de grano. Las agrupaciones de carburos citados en el grado T6 han desaparecido prácticamente en su totalidad. Se observan algunos carburos distribuidos al azar en el interior de los granos ferríticos.</p>
8	<p>Probeta seleccionada No. 20, sometida a 520 horas a 700°C. Esta microestructura está constituida por una matriz ferrítica, en la que se observan carburos del tipo Fe<sub>3</sub>C y Mo<sub>3</sub>C localizándose en los límites de grano formando una red. Aun se alcanzan a apreciar algunas partículas de carburo en el interior de los granos ferríticos.</p>

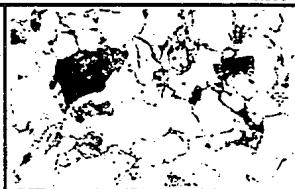
## 4.1.3 FOTOMICROGRAFIAS CORRESPONDIENTES AL MATERIAL SA-209 T1 DE ACERO AL CARBON-MOLIBDENO

## MICROESTRUCTURA TIPO 1

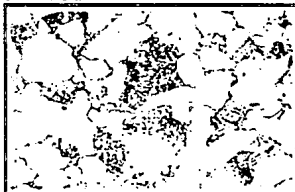
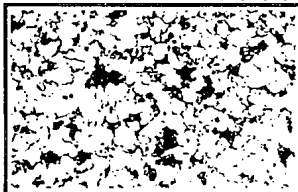
x200



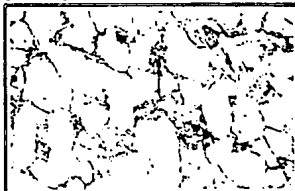
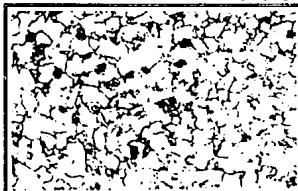
X500



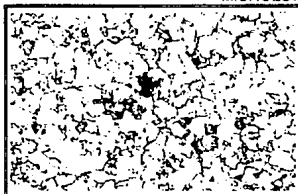
## MICROESTRUCTURA TIPO 2



## MICROESTRUCTURA TIPO 3



## MICROESTRUCTURA TIPO 4



## MICROESTRUCTURA TIPO 5

x200



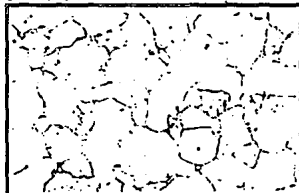
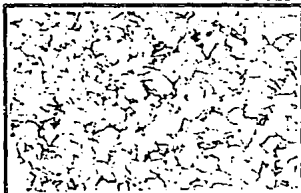
X500



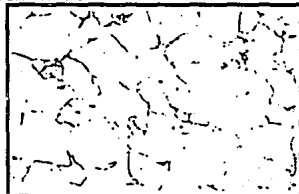
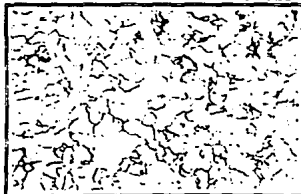
## MICROESTRUCTURA TIPO 6



## MICROESTRUCTURA TIPO 7



## MICROESTRUCTURA TIPO 8





## 4.1.4 DATOS OBTENIDOS DEL MATERIAL DE ACERO AL 2.25 Cr- 1 Mo, SA 213 T 22.

Esta material corresponde a la especificación de tubería sin costura para sobrecalentadores e intercambiadores de calor de aleaciones ferríticas y austeníticas. En las tablas 4.8 y 4.9 se muestran las propiedades químicas y mecánicas de esta aleación respectivamente como referencia previa a los resultados obtenidos del estudio realizado a este material.

C	Mn	P max	S max	Si max	Mo	Cr
0.15	0.30-0.60	0.30	0.30	0.50	0.80-1.10	1.90-2.60

Tabla 4.8 Requerimientos químicos del material SA 213 T22.

Resist. Tensión MPa (KPSI)	Pto. Cedencia MPa (KPSI)	Elongación en 50 mm mín %	Dureza RB(HBN)
415 (60)	205 (30)	(30)	69(123) mín 84(163) máx

Tabla 4.9 Requerimientos mecánicos del material SA 213 T 22.

En la tabla 4.10 se incluyen los datos siguientes: número de clasificación de probeta, tiempo de exposición a la elevada temperatura y la dureza promedio registrada para el material SA 213 T 22.

No. de probeta	Tiempo exp. alta temperatura (horas)	Dureza promedio (RB)	No. de probeta	Tiempo exp. alta temperatura (horas)	Dureza promedio (RB)
1	0	88	11	72	75
2	1	85	12	120	74
3	8	87	13	170	71
4	16	83	14	220	72
5	24	80	15	270	72
6	32	77	16	320	69
7	40	75	17	370	67
8	48	79	18	420	67
9	56	77	19	470	65
10	64	78	20	520	66

Tabla 4.10. Datos registrados para el material SA 213 T 22.

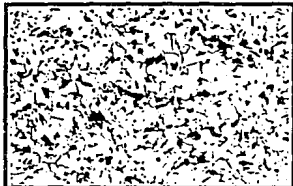
Las microestructuras tomadas a este material se muestran en las fotomicrografías 4.1.4 correspondientes al material SA 213 T 22 obtenidas a 200X y 500X, siendo ocho las seleccionadas de las 20 probetas que se estudiaron, siendo estas las más significativas como resultado de la investigación. La clasificación se realizó de forma arbitraria para determinar la identificación de cada microestructura describiendo cada una de ellas como sigue:

CLASIFICACION DE LA MICROESTRUCTURA "TIPO"	DESCRIPCION
1	<p>Probeta seleccionada No. 1, sin someterse a la elevada temperatura, material sin modificación microestructural. Los constituyentes microestructurales de este material en condiciones de fabricación son: matriz ferrítica (fondo blanco), granos de perlita formada por ferrita (parte blanca) y cementita parcialmente laminar (áreas de color negro) y una fina dispersión de carburos y partículas de carburo localizados al azar en la matriz (puntos color negro).</p>
2	<p>Probeta seleccionada No. 3, con ocho horas de exposición a 700°C. La morfología de la perlita se torna variable, predominando aquella en la que los carburos se encuentran en forma de partículas. No obstante en lo anterior se aprecia claramente el modelo perlítico original.</p>
3	<p>Probeta seleccionada No. 5, expuesta durante 24 horas a 700°C, se presenta esferoidización y dispersión de los carburos de hierro en la perlita en grado intermedio (40-60%). Aun se aprecia razonablemente definido el modelo perlítico original.</p>
4	<p>Probeta seleccionada No. 7, expuesta durante 40 horas a 700°C, en esta microestructura la dispersión en la matriz ferrítica del 75% aproximadamente de los carburos de las colonias de perlita. La esferoidización de los carburos continúa en aumento, se estima que ésta es del orden del 90-100%, se observa coalescencia incipiente de carburos.</p>
5	<p>Probeta seleccionada No. 11, expuesta durante 72 horas a 700°C. La dispersión de los carburos y partículas de carburo es virtualmente completa. En lugar de las colonias de perlita ahora se aprecian pequeñas agrupaciones de carburos. Los carburos, partículas y agrupaciones se encuentran al azar en la matriz. Las colonias de perlita han perdido totalmente su definición. La coalescencia de carburos continúa en aumento.</p>
6	<p>Probeta seleccionada No. 13, con 170 horas de exposición a 700°C. Presenta tendencia de los carburos a agruparse en los límites de grano de la matriz ferrítica. Las agrupaciones de carburos citadas en el grado tipo 5 han desaparecido prácticamente en su totalidad. Se observa mayor coalescencia de carburos y un notorio incremento del tamaño de algunos de ellos.</p>
7	<p>Probeta seleccionada No. 15, sometida durante 270 horas a 700°C. Se localizan carburos preferencialmente en los límites de grano. Aun se aprecian carburos y partículas de carburo en el interior de los granos ferríticos.</p>
8	<p>Probeta seleccionada No. 18, expuesta 420 horas a 700°C. La microestructura está constituida por granos de ferrita, en los que se observan carburos del tipo Fe<sub>3</sub>C, Mn<sub>3</sub>C y Cr<sub>3</sub>C ubicados en los límites de grano formando una red. Aun se aprecian partículas de carburo en el interior de los granos ferríticos.</p>

4.1.4 FOTOMICROGRAFIAS CORRESPONDIENTES AL MATERIAL SA-213 T22 DE ACERO  
AL CROMO-MOLIBDENO

## MICROESTRUCTURA TIPO 1

x200



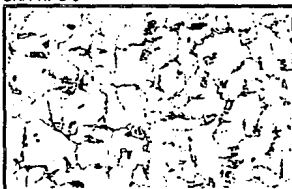
X500



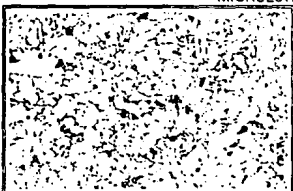
## MICROESTRUCTURA TIPO 2

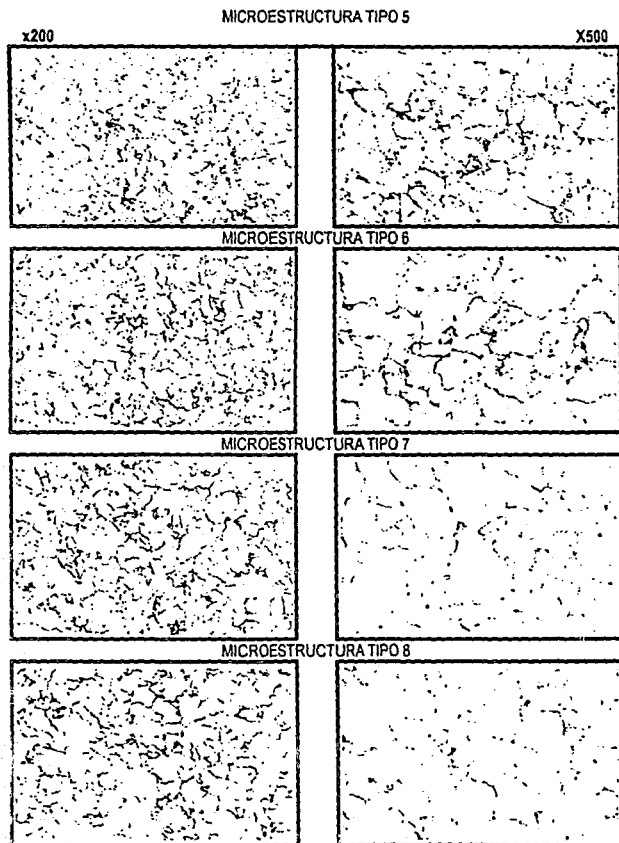


## MICROESTRUCTURA TIPO 3



## MICROESTRUCTURA TIPO 4





## 4.1.5 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MATERIAL DE ACERO INOXIDABLE.

El material de acero inoxidable seleccionado para este trabajo fue el correspondiente a la especificación SA 213 TP 347 la cual indica que es tubería sin costura para sobrecalentadores e intercambiadores de calor de aleaciones ferríticas y austeníticas. En las tablas 4.11 y 4.12 respectivamente se muestran las propiedades químicas y mecánicas del material en cuestión como referencia.

C	Mn	P max	S max	Si max	Mo	Cr
0.04-0.10	2.00	0.04	0.03	0.75	17.00-20.00	9.00-13.00

Tabla 4.11 Requerimientos químicos del material SA 213 TP 347

Resist. Tensión MPa (KPSI)	Pto. Cedencia MPa (KPSI)	Elongación en 50 mm min %	Dureza RB(HBN)
515 (75)	205 (30)	35	78(143) mín. 91(192) máx.

Tabla 4.12 Requerimientos mecánicos del material SA 213 TP 347

En la tabla 4.13 se incluyen los datos siguientes: número de clasificación de probeta, tiempo de exposición a la elevada temperatura y la dureza promedio registrada para el material SA 213 TP 347.

No. de probeta	Tiempo exp. alta temperatura (horas)	Dureza promedio (RB)	No. de probeta	Tiempo exp. alta temperatura (horas)	Dureza promedio (RB)
1	0	78	11	72	77
2	1	76	12	120	76
3	8	76	13	170	82
4	16	80	14	220	84
5	24	73	15	270	82
6	32	73	16	320	93
7	40	76	17	370	86
8	48	81	18	420	90
9	56	79	19	470	92
10	64	82	20	520	98

Tabla 4.13 Datos obtenidos del material SA 213 TP 347.

Como podemos notar el material de acero inoxidable no se comporta como los otros tres materiales al reducir su dureza sino que éste la aumento debido a la alta temperatura. En las fotomicrografías 4.1.5. tomadas a 200X y 500X, se seleccionaron ocho como resultado de la investigación de éste material y se describen como a continuación se indica:

CLASIFICACION DE LA MICROESTRUCTURA "TIPO"	DESCRIPCION
1	Probeta seleccionada No. 1. Sin someterse a la alta temperatura. Material nuevo considerado sin cambio microestructural, consiste en una microestructura austenitica en condición de recocida, libre de carburos precipitados.
2	Probeta seleccionada No. 4, con 16 horas de exposición a 700°C. Etapa inicial de la precipitación de carburos de Cromo (M23C6) en los limites de grano de la austenita.
3	Probeta seleccionada No. 5, expuesta 24 horas a 700°C, presenta un aumento en los carburos de Cromo en los limites de grano de la austenita.
4	Probeta seleccionada No. 8, expuesta 48 horas a 700°C, la microestructura sigue siendo austenitica pero la precipitación de los carburos de Cromo en los limites de grano sigue en aumento tanto en el tamaño como en la cantidad de ellos; apreciándose también esta precipitación en las maclas.
5	Probeta seleccionada No. 10, expuesta 64 horas a 700°C, la microestructura correspondiente a este tipo de clasificación presenta engrosamiento de los carburos tanto en los limites de grano como en las maclas; observándose también precipitación de carburos en el interior de los granos.
6	Probeta seleccionada No. 14, con una duración de 220 horas a 700°C, esta probeta muestra la formación de una red de carburos de Cromo en los limites de grano y las maclas
7	Probeta seleccionada No. 16, expuesta 320 horas a 700°C, tendencia al crecimiento de la red de carburos en los limites de grano austeníticos en cuanto al número y tamaño.
8	Probeta seleccionada No. 20, expuesta 520 horas a 700°C, última probeta de la investigación, esta deja ver un engrosamiento y formación de una red continua de los carburos de Cromo en los limites de grano, apreciándose una tendencia a la descohesión intergranular además se aprecia la llamada fase sigma

ESTA YESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

4.1.5 FOTOMICROGRAFIAS CORRESPONDIENTES AL MATERIAL SA-213 TP347 DE  
ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO

## MICROESTRUCTURA TIPO 1

x200



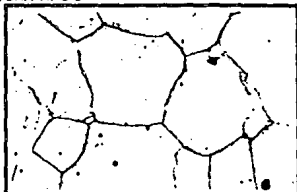
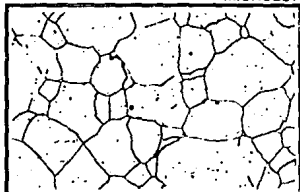
X500



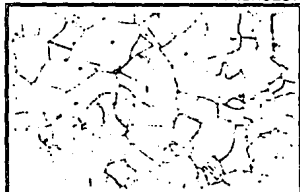
## MICROESTRUCTURA TIPO 2

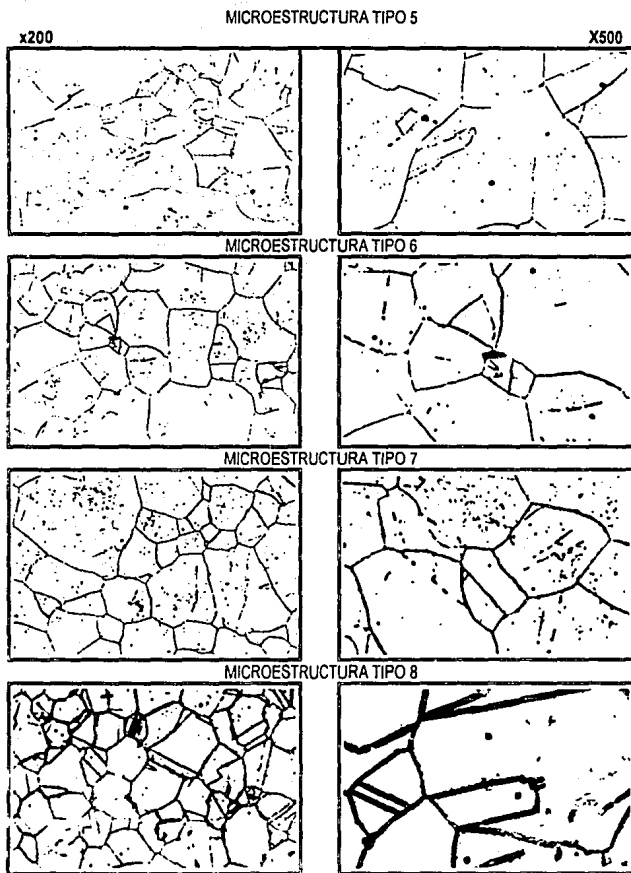


## MICROESTRUCTURA TIPO 3



## MICROESTRUCTURA TIPO 4







Debido al comportamiento diferente del acero inoxidable con respecto a los aceros anteriores, se tomo como apoyo un estudio realizado por E. L. KRAMER , I. ROZALSKY y R. W. LEONARD, publicado en la revista Welding Journal, volumen 48, numero 6, de junio 1969, y titulado "EMBRITTEMENT OF TYPE 347 STAINLESS STEEL WELDMENTS BY SIGMA PHASE", (Fragilización en aceros inoxidables del tipo 347 por fase sigma) y definir aspectos que pudieran ayudarnos establecer el objetivo buscado en la investigación. La traducción de este estudio se muestran en el anexo "A".

#### 4.2 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Hasta ahora se han obtenido resultados de dureza, tiempo de exposición de los materiales a la elevada temperatura y las microestructuras de ocho probetas seleccionadas para corroborar los cambios microestructurales de dichos materiales debido a los efectos de la alta temperatura.

Los resultados de esta forma presentados no nos proporcionan la información suficiente para cubrir el objetivo inicialmente planteado. Para lo cual se procedió a realizar, mediante el manejo de métodos estadísticos, las ecuaciones y gráficas que definirían una relación entre los parámetros manejados en la investigación y así poder establecer finalmente con el auxilio de éstas relaciones la vida remanente de los materiales estudiados.

Para empezar diremos que frecuentemente es necesario investigar posibles relaciones (de causalidad o de interdependencia), entre dos variables aleatorias  $x$  y  $y$ . Con el método estadístico empleado se determinará el comportamiento de las variaciones correspondientes de  $\bar{x}$  e  $y$ .(2)

Los datos de que se dispone, constituyen una muestra de valores observados de las variables  $x$ ,  $y$ , (tiempo, dureza), si se dibujan estos valores en una gráfica de puntos, ver figuras 4.2.1 a 4.2.4, correspondientes a cada uno de los materiales estudiados. Si estas gráficas presentan cierta regularidad o forma será posible trazar una curva que trate de ajustarse lo mejor posible a las tendencias de los puntos. La ecuación de la curva será la relación buscada entre las variables  $x$  e  $y$ .

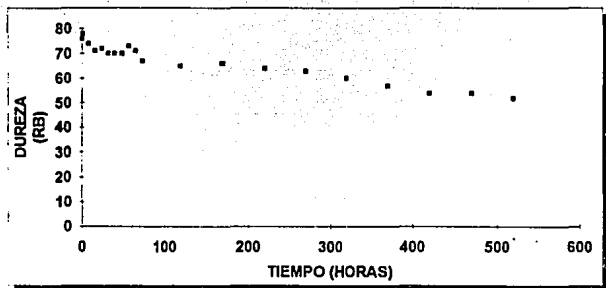


FIGURA 4.2.1 GRAFICA DE PUNTOS MATERIAL SA-106 GR C

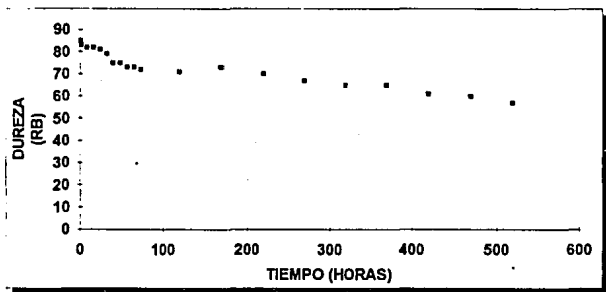


FIGURA 4.2.2 GRAFICA DE PUNTOS MATERIAL SA-209 T1

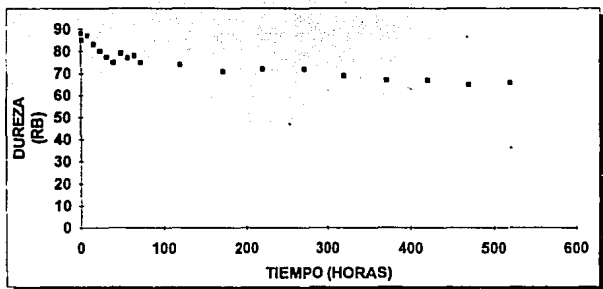


FIGURA 4.2.3 GRAFICA DE PUNTOS MATERIAL SA-213 T22

En las figuras 4.3 a 4.5 se han graficado los puntos obtenidos de dureza y tiempo de exposición a la elevada temperatura, en una hoja de papel logarítmico se observa que dichos puntos parecen estar alojados en una línea recta.

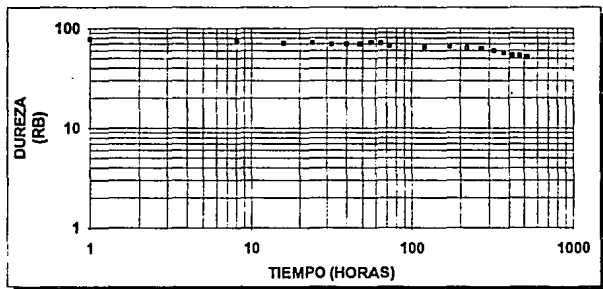


FIGURA 4.3. GRAFICA LOGARITMICA DEL MATERIAL SA-106 GR C

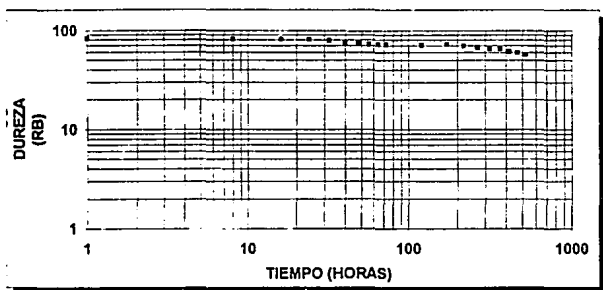


FIGURA 4.4. GRAFICA LOGARITMICA DEL MATERIAL SA-209 T1

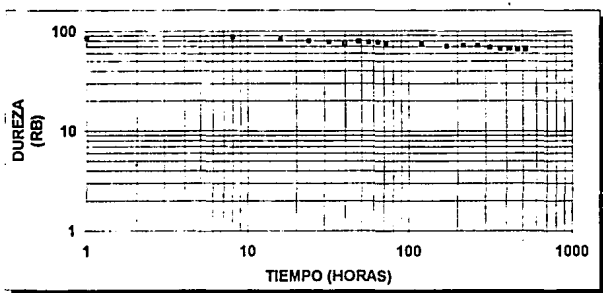


FIGURA 4.5. GRAFICA LOGARITMICA DEL MATERIAL SA-213 T22

Esto significa que la curva de regresión es de la forma:(2)

$$y = Ae^{-bx} \dots\dots\dots(1)$$

ya! tomar logaritmos en ambos miembros se obtiene la siguiente expresión:

$$\ln y = \ln A - bx \dots\dots\dots(2)$$

tomando ahora la forma de la ecuación de una recta del tipo:

$$y = a + bx \dots\dots\dots(3)$$

De esta manera el problema se reduce a ajustar una recta al conjunto de puntos  $(X_i, Y_i)$ .(2)

Para calcular las constantes  $a$  y  $b$  se aplicaran las fórmulas (4) y (5), que representan el método de mínimos cuadrados para ajustar una línea recta. (2)

$$\bar{y} = a + b(x - \bar{x}) \dots\dots\dots(4)$$

$$\bar{y} = a$$

$$b = \frac{\sum y(x - \bar{x})}{\sum (x - \bar{x})^2} \dots\dots\dots(5)$$

Estas ecuaciones se obtuvieron del libro de referencia número 2, combinando con las relaciones siguientes derivadas de el mismo tema de la referencia indicada.

$$t = \frac{x - \bar{x}}{(2/3)(8)(50)} = 0.003892(x - \bar{x}) \dots\dots\dots(6)$$

El denominador de la ecuación (6) es el periodo o frecuencia considerados al tomarse las lecturas de la investigación. De acuerdo al razonamiento indicado en el libro de referencia (2).

De esta manera las ecuaciones (4) y (5) quedan:

$$y = a + (1/2)bt \dots\dots\dots(4a)$$

$$\bar{y} = a$$

$$b = \frac{2 \sum yt}{\sum t^2} \dots\dots\dots(5A)$$

En donde en lugar de  $y$  y deberá trabajarse con  $\ln y$ .  
Los cálculos se ordenan en las tablas 4.14 a 4.16.

## 4.2.1. ANALISIS DE DATOS DEL MATERIAL SA-106 GR. C

No. PROBETA	TIEMPO EXPOSICION $X_i$	DUREZA $Y_i$	$\ln Y_i$	$t_i$	$t_i^2$	$t_i \ln Y_i$
1	0	76	4.33	-0.63	0.39	-2.83
2	1	78	4.35	-0.62	0.38	-2.80
3	8	74	4.30	-0.59	0.35	-2.61
4	16	71	4.26	-0.56	0.32	-2.52
5	24	72	4.27	-0.53	0.28	-2.71
6	32	70	4.24	-0.49	0.25	-2.20
7	40	70	4.24	-0.47	0.22	-2.10
8	48	70	4.24	-0.43	0.19	-1.92
9	56	73	4.29	-0.40	0.17	-1.87
10	64	71	4.26	-0.37	0.14	-1.72
11	72	67	4.20	-0.35	0.12	-1.57
12	120	65	4.17	-0.16	0.02	-0.78
13	170	66	4.18	0.03	0.00	0.11
14	220	64	4.15	0.22	0.05	0.87
15	270	63	4.14	0.42	0.17	1.67
16	320	60	4.09	0.61	0.31	2.45
17	370	57	4.04	0.80	0.65	3.92
18	420	54	3.98	1.00	1.00	4.10
19	470	54	3.98	1.19	1.43	4.83
20	520	52	3.95	1.39	1.94	5.92

TABLA 4.14 Datos generados para el cálculo de la ecuación del material SA-106 GR C

De la tabla 4.14 obtenemos los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= 162.05 & \sum t_i &= 0.9551 \\ \ln \bar{y} &= 4.1868 & \sum t_i^2 &= 8.5015 \\ & & \sum t_i \ln y_i &= -0.0008391 \end{aligned}$$

Utilizando las fórmulas 4a, 5a y los resultados anteriores obtenemos lo siguiente:

$$a = 4.1868$$

$$b = -0.001974$$

substituyendo estos valores en la ecuación 4a tenemos:

$$y = 4.1874 - (3.84 \times 10^{-6})x \dots (7)$$

Aplicando logaritmos en la ecuación 7 tenemos:

$$\ln y = \ln 4.1874 - \ln(3.84 \times 10^{-6})x$$

realizando las operaciones nos queda:

$$y = 66e^{-(3.84 \cdot 10^{-6})x} \dots (8)$$

Ecuación obtenida para el material de acero al carbón SA-106 GR C, que representa su comportamiento a elevada temperatura.

#### 4.2.2 ANALISIS DE LOS DATOS DEL MATERIAL SA-209-T1.

No. PROBETA	TIEMPO EXPOSICION $X_i$	DUREZA $Y_i$	$\ln Y_i$	$t_i$	$t_i^2$	$t_i \ln Y_i$
1	0	85	4.44	-0.63	0.39	-2.80
2	1	83	4.41	-0.62	0.38	-2.77
3	8	82	4.40	-0.59	0.35	-2.64
4	16	82	4.40	-0.56	0.32	-2.50
5	24	81	4.39	-0.53	0.28	-2.36
6	32	79	4.36	-0.50	0.25	-2.21
7	40	75	4.31	-0.47	0.22	-2.05
8	48	75	4.31	-0.44	0.19	-1.91
9	56	73	4.24	-0.41	0.17	-1.77
10	64	73	4.24	-0.38	0.14	-1.63
11	72	72	4.27	-0.35	0.12	-1.49
12	120	71	4.26	-0.16	0.02	-0.69
13	170	73	4.29	-0.03	0.00	0.13
14	220	70	4.24	0.22	0.05	0.95
15	270	67	4.20	0.42	0.17	1.76
16	320	65	4.17	0.61	0.31	2.56
17	370	65	4.17	0.80	0.65	3.37
18	420	61	4.12	1.00	1.00	4.02
19	470	60	4.09	1.19	1.43	4.57
20	520	57	4.04	1.39	1.94	5.91

Tabla 4.15. Datos obtenidos para el cálculo de la ecuación del material SA-209-T1.

De la tabla 4.15 se derivan los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= 162.05 & \sum t_i &= 0.9551 \\ \ln \bar{y} &= 4.3653 & \sum t_i^2 &= 8.5015 \\ & & \sum t_i \ln y_i &= -0.012\end{aligned}$$

Utilizando las fórmulas 4a, 5a y los resultados anteriores tenemos:

$$a = 4.3653$$

$$b = -0.00287$$

Substituyendo estos valores en la ecuación 4a nos queda:

$$y = 4.3653 + \left( \frac{-0.001287}{2} \right) t^2 \dots (10)$$

Aplicando los valores de la ecuación (6) en la (10) obtenemos:

$$y = 4.4204 - \left( 5.08 \times 10^{-6} \right) x$$

Aplicando logaritmos nos queda:

$$\ln y = \ln 4.4204 + \ln \left( -5.08 \times 10^{-6} \right) x$$

Por lo tanto:

$$y = 84 e^{-(5.08 \times 10^{-6})x} \dots (11)$$

Ecuación que representa el comportamiento de la dureza en función de la temperatura del material especificado como SA-209-T1.



## 4.2.3. ANALISIS DE DATOS DEL MATERIAL SA-213-T22

En la tabla 4.16 se presentan los datos generados del análisis realizado al material SA-213-T22:

No. PROBETA	TIEMPO EXPOSICION $X_i$	DUREZA $Y_i$	$\ln Y_i$	$t_i$	$t_i^2$	$t_i \ln Y_i$
1	0	88	4.47	-0.63	0.39	-2.82
2	1	85	4.44	-0.62	0.38	-2.78
3	8	87	4.46	-0.59	0.35	-2.67
4	16	83	4.41	-0.56	0.32	-2.35
5	24	80	4.38	-0.53	0.28	-2.35
6	32	77	4.34	-0.50	0.25	-2.19
7	40	75	4.31	-0.47	0.22	-2.05
8	48	79	4.36	-0.44	0.19	-1.94
9	56	77	4.34	-0.41	0.17	-1.79
10	64	78	4.35	-0.38	0.14	-1.66
11	72	75	4.31	-0.35	0.12	-1.51
12	120	74	4.30	-0.16	0.02	-0.70
13	170	71	4.26	0.03	0.00	0.93
14	220	72	4.27	0.22	0.05	0.96
15	270	72	4.27	0.42	0.17	1.79
16	320	69	4.23	0.61	0.31	2.68
17	370	67	4.20	0.80	0.65	3.49
18	420	67	4.20	1.00	1.00	4.22
19	470	65	4.17	1.19	1.43	5.80
20	520	66	4.18	1.39	1.94	5.93

Tabla 4.16 Datos generados para la obtención de ecuación para el material SA-213-T22.

De la tabla 4.16 se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= 162.05 & \sum t_i &= 0.9551 \\ \ln \bar{y} &= 4.3425 & \sum t_i^2 &= 8.5015 \\ & & \sum t_i \ln y_i &= -0.0063 \end{aligned}$$

Utilizando las fórmulas 4a, 5a y los resultados anteriores tenemos:

$$a = 4.3425$$

$$b = -0.001448$$

Substituyendo los valores de a y b en la ecuación 4a obtenemos lo siguiente:

$$y = 4.3425 + \left( \frac{-0.001448}{2} \right) t \dots\dots\dots (12)$$

Aplicando los valores de la ecuación 6 en la 12 nos queda:

$$y = 4.3429 - \left( 2.88 \times 10^{-6} \right) x$$

Aplicando logaritmos tenemos lo siguiente:

$$\ln y = \ln 4.3429 + \ln \left( -2.88 \times 10^{-6} \right) x$$

$$y = 77e^{(-2.88 \cdot 10^{-6})x} \dots\dots\dots (13)$$

Ecuación que representa el comportamiento de la dureza en función del tiempo a que fue expuesto a la elevada temperatura el material especificado como SA-213-T2.

#### 4.2.4 EMPLEO DE LA LEY DEL DECAIMIENTO PARA EL ANALISIS DE LOS DATOS GENERADOS DE LA INVESTIGACION REALIZADA.

A manera de comprobación consideramos la ley del decaimiento como aplicación de la función exponencial. (3) Para este caso de dureza en función del tiempo podemos decir que el cambio de esta propiedad mecánica surgirá cuando la rapidez de cambio de esta con respecto al tiempo es proporcional a la dureza medida en un instante dado. (3)

##### 4.2.4.1 COMPROBACION CON LOS DATOS OBTENIDOS DEL MATERIAL SA-106 GR C.

Ahora bien si el tiempo se representa por t y D representa unidades de dureza presente en cualquier tiempo dado, entonces:

$$\frac{dD}{dt} = kD$$

Donde k es una constante.

Si D decrece cuando t crece, entonces  $k < 0$  y tenemos la ley de decrecimiento natural.(3)

Realizando esta comprobación para cada uno de los materiales a los que se obtuvo la ecuación por el método estadístico, presentamos lo siguiente:

Para el material de acero al carbón especificado como SA-106 GR C, tenemos que presenta una dureza inicial de 76 RB y su periodo de vida considerado por diseño es de 100,000 horas, por lo tanto para obtener su ecuación procedemos como sigue:

sea  $t$  = tiempo en horas a partir de este momento.

$D$  - dureza presente en  $t$  horas.

empezaremos con la ecuación diferencial siguiente: (3)

$$\frac{dD}{dt} = kD$$

separando las variables obtenemos:

$$\frac{dD}{D} = k dt$$

integrando tenemos:

$$\int \frac{dD}{D} = k \int dt$$

$$\ln D = kt + \bar{c}$$

$$D = e^{(kt + \bar{c})} = e^{\bar{c}} e^{kt}$$

haciendo  $e^{\bar{c}} = C$ ; tenemos  $D = ce^{kt}$

y como  $D$  es negativa podemos omitir las barras del valor absoluto, con lo cual nos da: (3)

$$D = ce^{kt}$$

Para este caso, sabiendo que la dureza inicial es de 76 RB cuando el tiempo  $t = 0$ , ya que el material no ha sido expuesto a la alta temperatura, obtenemos:

$$D = 76 \text{ Rb} \quad t = 0 \text{ (horas)}$$

$$76 = ce^{k(0)} = C \dots\dots 76 = C$$

$$D = 76e^{kt} \dots\dots(14)$$

Si tomamos la dureza final de la investigación para el material SA-106 GR C de 52 RB considerando que esta dureza la debe presentar cuando el material haya sido sometido a operación con elevadas temperaturas por un tiempo de 100,000 horas, obtenemos:

$$\text{si } D = 52RB \quad \text{y} \quad t = 100,000 \text{ horas}$$

por lo tanto:

$$52 = 76e^{k(100,000)} \quad \text{ó}$$

$$0.684 = e^{k(100,000)}$$

así aplicando logaritmos a la expresión anterior nos queda:

$$\ln 0.684 = k(100,000)$$

$$\text{y} \quad k = \frac{\ln 0.684}{100,000} = -3.79 \times 10^{-6}$$

Substituyendo el valor de k en la ecuación 14 obtenemos:

$$D = 76e^{(-3.79 \times 10^{-6})t}$$

Que representa la ecuación del comportamiento de la dureza del material SA-106 GR C en función del tiempo a que éste es sometido a una elevada temperatura en un generador de vapor.

Finalmente podemos definir esta ecuación como sigue:

$$D = D_0 e^{(-3.79 \times 10^{-6})t} \quad \dots\dots(15)$$

Donde :

D = dureza en cualquier tiempo.

D<sub>0</sub> = Dureza inicial del material SA-106 GR C que debe ser conocida y registrada antes de someterlo a operación en el generador de vapor.

$-3.79 \cdot 10^{-6}$  Constante obtenida para el material SA-106 GR C.

t = tiempo transcurrido del material sometido a temperatura.

Cuando se pretenda determinar el tiempo de vida remanente del material SA-160 GR C; de la ecuación 15 podemos despejar la variable (t) y tendríamos:

$$\ln D = \ln D_0 - 3.79(10)^{-6} t$$

por lo tanto:

$$t = \left[ \frac{1}{3.79(10^{-6})} \right] \ln \left( \frac{D}{D_0} \right)$$

$$t = \left[ -2.63(10^5) \right] \ln \left( \frac{D}{D_0} \right)$$

Asignándole una letra al valor constante la ecuación nos queda de la siguiente forma:

$$t = P \ln \left( \frac{D}{D_0} \right) \dots\dots\dots(16)$$

Donde:

P = constante exclusiva para el material

SA-106 GR C, con un valor de  $\left[ -2.63(10^5) \right]$ .

Utilizando la ecuación 16 obtendríamos el tiempo que ha transcurrido del material que ha sido sometido a elevada temperatura en función de la dureza. Considerando que la vida útil del material es de 100,000 horas podemos determinar la expresión que finalmente se utilizará para determinar el tiempo de vida remanente del material especificado, quedando esta de la siguiente manera:

$$T = 100,000 - t \dots\dots\dots (17)$$

Donde :

T = tiempo de vida remanente del material SA-106 GR C en función de la dureza obtenida en un instante determinado.

t = tiempo transcurrido en función de la dureza del material, determinado por la ecuación 16.

=====

4.2.4.2. USO DE LA LEY DEL DECAIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LOS MATERIALES SA-209 T1 Y SA 213 T 22.

Realizando la comprobación anterior para los dos materiales restantes SA-290 T1 y SA-213 T22 tenemos lo siguiente:

Para el material SA-209 T1 :

$$D = D_0 e^{(-4.53 \times 10^{-6})t} \dots\dots\dots(18)$$

$$t = P \ln \left( \frac{D}{D_0} \right) \dots\dots\dots(19)$$

$$T = 100,000 - t \dots\dots\dots(20)$$

Donde:

$D_0$  = Dureza del material sin haberse operado a elevadas temperaturas.

$D$  = Dureza del material en un tiempo de operación determinado.

$P$  = Constante determinada para el acero SA-209 T1 con

un valor de  $\left[ -2.20 \left( 10^5 \right) \right]$ .

$t$  = Tiempo transcurrido de un material operado a altas temperaturas en función de la dureza.

$T$  = Tiempo de vida remanente en función del tiempo transcurrido con una dureza determinada en el material.

Para el material SA-213 T22 tenemos:

$$D = D_0 e^{(-3.02 \times 10^{-6})t} \dots\dots\dots(21)$$

$$t = P \ln \left( \frac{D}{D_0} \right) \dots\dots\dots(22)$$

$$T = 100,000 - t \dots\dots\dots(23)$$

Donde:

$D_0$  = Dureza del material antes de ser sometido a operación a elevadas temperaturas.

$D$  = Dureza del material en un tiempo de operación determinado.

$P$  = Constante particular para el material SA-213 T22 con un

valor de  $\left[ -3.31 \left( 10^5 \right) \right]$ .

$t$  = Tiempo transcurrido de un material operado a altas temperaturas en función de la dureza.

$T$  = Tiempo de vida remanente del material SA-213 T22 en función del tiempo transcurrido con una dureza determinada en el material.

#### 4.2.5. ECUACIONES GENERALES OBTENIDAS.

Como podemos observar las ecuaciones obtenidas por los dos métodos matemáticos utilizados son muy similares, las diferencias entre ellas pueden ser las fracciones decimales empleadas y por la cantidad de valores manejados en cada uno de ellos.

Se decidió considerar como definitivas las ecuaciones generadas por el método de decaimiento, el segundo empleado. Por lo tanto las ecuaciones generales son las siguientes:

$$D = D_0 e^{(kt)}$$

$$t = P \ln \left( \frac{D}{D_0} \right)$$

$$T = 100,000 - t$$

Donde:

<b>D</b>	=	Dureza del material que se este analizando después de haberse operado a elevadas temperaturas.
<b>Do</b>	=	Dureza inicial del material que se pretenda analizar, sin haberse expuesto a operación.
<b>k</b>	=	Constante particular de cada material con valor definido, para la obtención de la dureza.
<b>t</b>	=	Tiempo transcurrido del material operado a elevada temperatura en función de la dureza.
<b>P</b>	=	Constante para determinar el tiempo transcurrido con un valor definido para cada material analizado.
<b>T</b>	=	Tiempo de vida remanente del material.

En la tabla 4.17 se muestran los valores de las constantes para cada material estudiado en esta investigación.

Valor de las constantes

Especificación del material	K	P
SA-106 GR C	$-3.79 \times 10^{-6}$	$-2.63 \times 10^5$
SA-209 T1	$-4.53 \times 10^{-6}$	$-2.20 \times 10^5$
SA-213 T22	$-3.02 \times 10^{-6}$	$-3.31 \times 10^5$

Tabla 4.17 Valores de las constantes K y P para cada uno de los materiales estudiados en esta investigación.

#### 4.2.6 MANEJO DE LOS RESULTADOS (USO DE LAS FORMULAS)

En forma general las ecuaciones obtenidas para cada material se pueden usar de la misma manera. esto es; para el uso de la ecuación del tiempo de vida remanente tenemos que conocer la dureza original del material antes de que sea usado en el generador de vapor.



=====

Durante inspecciones en servicio pueden ser obtenidos valores de dureza de estos materiales y relacionándose con la ecuación indicada se define por lo tanto el tiempo de vida remanente de los aceros manejados en el generador de vapor.

Sabiendo que las condiciones de operación del generador de vapor al ser manejadas con irregularidad pueden llegar a causar la disminución de la vida operativa de la tubería. Estando de acuerdo que el uso de las ecuaciones obtenidas pueden llegar a ser de gran utilidad en estudios de calderas.

Será necesario establecer diferencias entre las ecuaciones definidas en este trabajo y los métodos ya establecidos para la determinación del tiempo de vida remanente de aceros manejados en generadores de vapor.

Otra manera de usar los resultados de este estudio es relacionar la microestructura obtenida durante inspecciones en servicio, las durezas correspondientes obtenidas en la investigación y la fórmula de tiempo de vida remanente.

En las tablas 4.18 a 4.20 se indica el tiempo de vida remanente del material en función del tipo de microestructura observada.

Para la utilización de los resultados obtenidos se muestra un ejemplo en el cual son expuestas las diversas ecuaciones obtenidas para el cálculo de vida remanente de la tubería de generador de vapor que ha sido estudiada en esta investigación.

Ejemplo:

Una tubería de acero especificado como SA-213 T22 de un sobrecalentador de vapor cuya dureza al momento de su instalación es de 78 RB. Durante una inspección en servicio se comprueba que la dureza de este material ha sido modificada con respecto a la original y ahora es de 72 RB. Determinar la vida remanente de este material para un posible cambio de elementos.

Solución:

Datos:

Material: SA-213 T22  
Dureza original:  $D_o = 78$  RB  
Dureza en un tiempo de operación: 72 RB

Ecuación aplicable:

$$T = 100,000 - t$$

Donde:

$$t = P \ln \left( \frac{D}{D_0} \right)$$

de la tabla 4.17 de este trabajo sabemos que

$$P = -3.31 \times 10^5 \text{ (horas) para el material SA-213 T22}$$

Por lo tanto:

$$t = (-3.31 \times 10^5) \ln(72/78)$$

$$t = (-331000) \ln(0.923) = 26,521.72$$

Por lo tanto el tiempo que se considera que ha transcurrido para este material desde su instalación es de 26,521.72 horas. Y el tiempo de vida remanente se calcula como sigue:

$$T = 100,000 - t$$

$$T = 100,000 - 26,521.72$$

$$T = 73,478.28 \text{ horas}$$

El tiempo de vida útil de este material es de 73,478.28 horas calculado.

TIPO DE MICROESTRUCTURA	TIEMPO DE VIDA REMANENTE (HORAS)
1	100,000
2	93,000
3	86,000
4	75,000
5	71,000
6	56,000
7	31,000
8	3,000

Tabla 4.18 Tiempo de vida remanente del material SA-106 Gr C en función de la microestructura observada durante una inspección en servicio del generador de vapor.

TIPO DE MICROESTRUCTURA	TIEMPO DE VIDA REMANENTE (HORAS)
1	100,000
2	94,000
3	90,000
4	66,000
5	62,000
6	57,000
7	40,000
8	10,000

Tabla 4.19. Tiempo de vida remanente del material SA-209 T1 en función del tipo de microestructura.

TIPO DE MICROESTRUCTURA	TIEMPO DE VIDA REMANENTE (HORAS)
1	100,000
2	95,000
3	68,000
4	47,000
5	42,000
6	28,000
7	24,000
8	9,000

Tabla 4.20 En función de la microestructura observada se puede definir el tiempo de vida remanente para el acero SA-213 T22 con el uso de esta tabla.

### FRAGILIZACION DEL ACERO INOXIDABLE TIPO 347 POR FASE SIGMA.

La fase sigma puede drásticamente reducir la tenacidad del material de acero inoxidable del tipo 347, no sólo a temperatura ambiente sino también a elevadas temperaturas.

#### ABSTRACTO:

Los aceros inoxidables austeníticos pueden desarrollar la precipitación de la fase sigma después de exponerse a elevadas temperaturas. El resultado de esto, es un comportamiento frágil a temperatura ambiente de estos metales. Poca información es disponible, sin embargo, es conocida la tenacidad de la fase sigma contenida en las aleaciones que operan a elevadas temperaturas.

Estudios de laboratorio fueron realizados sobre una placa soldada de acero inoxidable austenítico del tipo 347, para investigar la interrelación entre la formación de la fase sigma, la temperatura y el grado de fragilización que puede ocurrir. La tenacidad del material fue determinada sobre un amplio rango de temperaturas, tanto en condiciones de ausencia de fase sigma como con una severa sigmatización.

En una exposición de tres meses, la fase sigma se formó en el rango de los 1050-1550°F y fue más extensiva en la soldadura que en el metal base. La soldadura sigmatizada exhibe un comportamiento frágil no sólo a temperatura ambiente sino también a temperaturas tan elevadas como 1000°F. La tenacidad de la placa fue menos afectada por la presencia de la fase sigma. Los materiales parcialmente sigmatizados por la reducción de la temperatura de exposición fueron correspondientemente más tenaces que los materiales severamente sigmatizados.

El comportamiento observado durante la prueba de impacto del acero inoxidable tipo 347 sigmatizado, especialmente la soldadura, muestra que este material no debe estar sujeto a cargas de impacto.

## INTRODUCCION:

Por la relativa resistencia a la corrosión y a la oxidación de los aceros inoxidable austeníticos son empleados ampliamente en industrias petroleras, químicas y de generación de vapor. La aplicación en estas industrias rutinariamente involucra servicio por largos periodos de tiempo a elevadas temperaturas. Un problema inherente en el uso de estas aleaciones a elevadas temperaturas es su tendencia a formar nuevas fases metalúrgicas las cuales pueden resultar en detrimento de las propiedades mecánicas. Un notable cambio pernicioso en la microestructura que puede ocurrir en algunos aceros inoxidable es la precipitación de la fase sigma a temperaturas generalmente entre los 1000 y 1700°F.

Es bien sabido que la presencia de la fase sigma en los aceros inoxidable austeníticos puede resultar en la fragilización del metal a temperatura ambiente. El grado de fragilización es relacionado tanto por la concentración y distribución de la fase sigma presente en la microestructura. La extensión de la fragilización es más grande cuando la fase sigma se forma en los límites de grano en forma continua.

En contraste, muy poca información es disponible sobre la tenacidad y ductilidad de los aceros sigmatizados a elevadas temperaturas. La opinión que es algunas veces expresada es la siguiente: se debe tener mucha precaución con un acero inoxidable austenítico sigmatizado a temperatura ambiente por que este es bastante frágil pero la tenacidad del material es satisfactoria a alta temperatura. En relación a como un acero inoxidable austenítico es afectado por la presencia de la fase sigma sobre un amplio rango de pruebas de temperaturas, se realizó una investigación involucrando al material base y la soldadura del acero inoxidable austenítico tipo 347. Esta investigación consistió en la determinación de la interpelación entre la formación de la fase sigma, la temperatura de exposición y el comportamiento a la prueba de impacto tanto de aceros severa como parcialmente sigmatizados.

## TEORIA:

La presencia de la fase sigma y sus efectos de fragilización en aleaciones tenaces y dúctiles ha sido reconocida desde hace muchos años. El mecanismo por el cual la fase sigma se forma, sin embargo, no es simple y nunca ha sido establecido de forma definida. El término fase sigma pertenece a una clase de componentes intermetálicos. Estos componentes pueden ocurrir en sistemas tales como Hierro-Cromo, Hierro-Vanadio, Níquel-Vanadio y Cobalto-Cromo, los cuales involucran combinaciones de cúbico centrado en el cuerpo y cúbico centrado en la cara. Ha sido considerado que la estructura cristalina de la fase sigma esta mejor representada por una unidad tetragonal conteniendo una celda de treinta átomos, y es caracterizada por un número de valencia constante por átomo. Para la fase sigma el formar un sistema binario, la diferencia en los diámetros atómicos de los elementos involucrados deben estar cerca del 8%; si es menor del 8%, ocurre la solución sólida completa y, si es más grande, son formados los componentes de una estructura simple.

=====

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Dos placas con un espesor de 12 mm de acero inoxidable del tipo 347 fueron manualmente soldadas con una unión a tope biseladas en "V" usando electrodos especificados como E 347-15. Una sección rectangular de (500 x 266 mm) con la soldadura centrada longitudinalmente fue maquinada y sujeta a tres meses de exposición en un horno de laboratorio. La probeta fue calentada en un rango de temperatura de 700-1720°F. Un gradiente de temperatura esencialmente lineal de aproximadamente 100°F por pulgada de espesor fue mantenido a lo largo de la barra. Después de tres meses de exposición, las concentraciones de fase sigma presentaron varias localizaciones sobre la probeta y fueron determinadas por metalografía cuantitativa.

Para evaluar el grado de fragilización en que se incurrió, otra probeta soldada fue calentada por tres meses a una temperatura la cual fue establecida para producir la máxima concentración de fase sigma. Fueron maquinadas probetas para pruebas de impacto con muesca en "V", del material sigmatizado. Las probetas fueron obtenidas de la zona de soldadura y material base. La prueba de impacto fue realizada a una temperatura de -321 a 1600°F.

El efecto de la menor concentración de fase sigma sobre la tenacidad del material a temperatura ambiente también fue determinada. Tres meses de exposición fueron nuevamente empleados pero a temperaturas entre 1090 y 1340°F. Las concentraciones de la fase sigma y las propiedades de impacto fueron determinadas por las probetas expuestas bajo estas condiciones.

## RESULTADOS Y CONCLUSION:

Las cantidades de fase-sigma como una función de la temperatura en la soldadura y material base durante los tres meses de exposición se muestran en la tabla A.1. Dentro de los límites de la microscopía óptica, la fase sigma se observó formarse de 1005 a 1590°F en la soldadura y de 1100 a 1520°F en el material base. Ambos formaron la máxima concentración de fase sigma aproximadamente a 1340°F. Sin embargo una considerablemente más alta concentración de fase sigma se formó en la soldadura (18.9%) que en el material base (5.3%).

La falla de fase sigma para formarse en cantidades detectables menor a los 1000°F esta probablemente relacionados con bajos rangos de difusión de átomos que ocurre en tal temperatura. Sobre estas bases, sin embargo, la fase sigma en esta aleación es aparentemente inestable a 1600°F. Eliminando la fase sigma de esta aleación después de que ésta se ha formado requiere calentamiento arriba de 1600°F. Donde la disolución de la fase sigma es una difusión controlada. El rango de temperatura a la cual la fase sigma es disuelta no fue determinado para esta aleación; sin embargo, fue observado que esencialmente no ocurre disolución durante un tratamiento de 15 minutos a 1650°F.

Temperatura °F	Concentración de fase sigma en el material de soldadura % en peso	Concentración de fase sigma en material base % en peso
955	0.0	0.0
1005	<0.1	0.0
1060	3.5	0.0
1100	6.7	<0.1
1160	8.9	1.6
1215	14.8	2.5
1275	17.3	3.3
1340	18.9	5.3
1395	14.6	3.8
1455	12.1	1.9
1520	5.1	<0.1
1590	<0.1	0.0
1660	0.0	0.0

Tabla A.1 Efecto de la temperatura sobre la concentración de la fase sigma en el acero inoxidable tipo 347 con aplicación de soldadura. (Tres meses de exposición).

Respectivamente las microestructuras de la soldadura y del material base y las correspondientes temperaturas de exposición son mostradas en las figuras A.2 y A.3. La fase sigma se formó interdendriticamente en la soldadura. En el material base consistió en granos equiaxialmente distribuidos. En ambos casos, las partículas fase sigma individual vario en tamaño con la exposición de la temperatura.

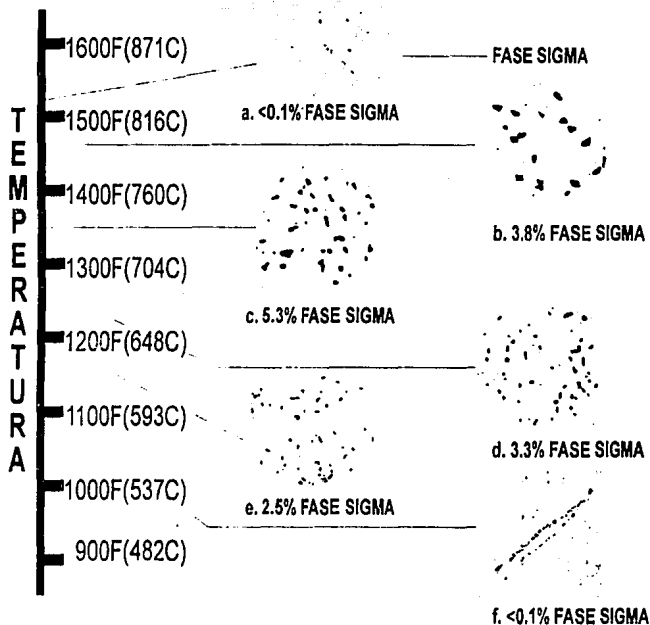


FIGURA A.2 MICROESTRUCTURA DE ACERO INOXIDABLE TIPO 347, MATERIAL BASE DE PLACA EXPUESTO ENTRE 1000°F Y 1600°F (537°C Y 870°C)



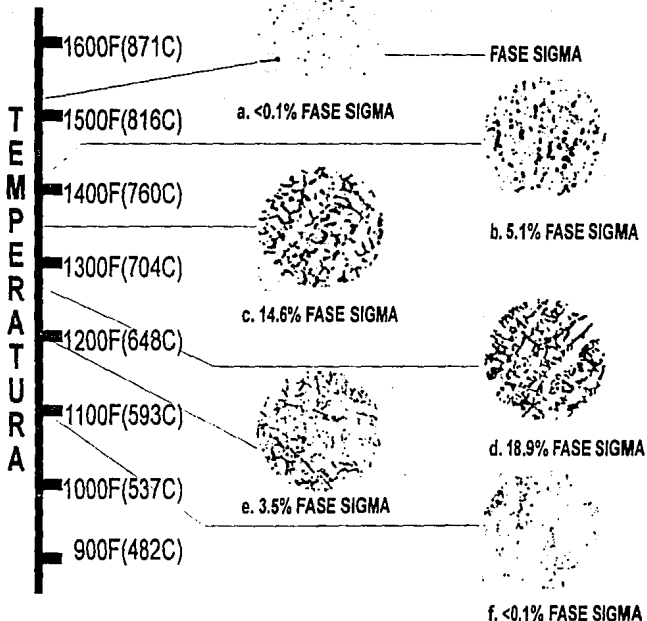


FIGURA A.3 MICROESTRUCTURA DE ACERO INOXIDABLE TIPO 347, MATERIAL BASE DE PLACA SOLDADA EXPUESTA ENTRE 1000°F Y 1600°F (537°C Y 870°C)

Aplicando la relación de Gow y Harder a esta aleación, resulta un promedio de 1.74 para la soldadura y de 1.56 para el metal base. Estos valores indican la tendencia de la formación de la fase sigma a ser mayor en la soldadura que en el metal base. Los resultados experimentales confirman esta predicción.

Una examinación metalográfica de la soldadura revelan que la fase sigma se forma más fácilmente de la ferrita que de la austenita. La estructura de la soldadura figura A.4.a, contiene aproximadamente 9.5% de ferrita interdendrítica. La figura A.4.b, muestra la excelente correlación entre la morfología de la nuevamente precipitada fase sigma y la ferrita presente originalmente. A 1340°F, la temperatura en la cual toda la ferrita es esencialmente transformada. La morfología de la fase sigma resultante fue muy similar a la ferrita interdendrítica original, figura A.4.c.



FIGURA A.4 MICROESTRUCTURAS REPRESENTATIVAS DEL MATERIAL DE ACERO INOXIDABLE TIPO 304 SOLDADO CON VARIACIONES EN LAS CONCENTRACIONES DE FERRITA Y FASE SIGMA.

FIGURA A.4 A (IZQUIERDA) MATERIAL DESPUES DE SOLDARSE; 9.55% DE FERRITA.

FIGURA A.4 B (CENTRO) MATERIAL DESPUES DE TRES MESES DE EXPOSICIÓN A 1060°F (571°C); 5% DE FERRITA, 4% DE FASE SIGMA.

FIGURA A.4 C (DERECHA) MATERIAL DESPUES DE TRES MESES DE EXPOSICIÓN A 1340°F (726°C); 0% DE FERRITA, 18.9% DE FASE SIGMA.

## PROPIEDADES DE IMPACTO

El efecto de la temperatura sobre la energía de impacto de la soldadura, tanto en las condiciones de como se soldó y después de tres meses de sigmatización a 1340°F, es mostrado en la figura A.5. Una temperatura de prueba de aproximadamente 1000°F fue requerida para que los valores de energía de impacto excedieran 20 lb-ft para el material sigmatizado. La fragilización extensiva a temperatura ambiente fue anticipada, pero los valores de baja energía de impacto se obtuvieron a temperaturas tan altas como 1000°F.

La reducción de la tenacidad del material 304 resultado de la fase sigma se muestra en la figura A.6

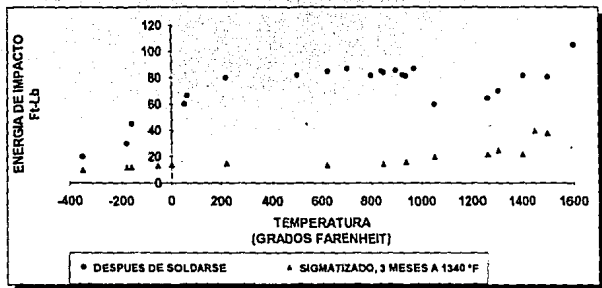


FIGURA A.5 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA ENERGIA DE IMPACTO EN UN MATERIAL SOLDADO Y SIGMATIZADO DE ACERO INOXIDABLE TIPO 347.

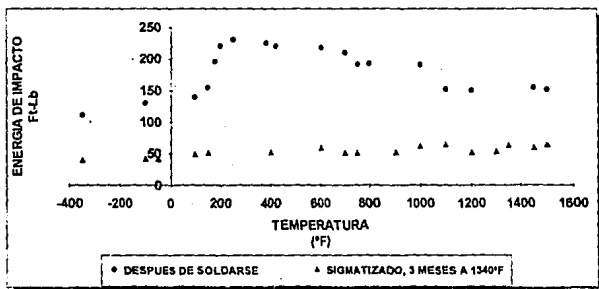


FIGURA A.6 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA ENERGIA DE IMPACTO EN UN MATERIAL BASE Y SIGMATIZADO DE ACERO INOXIDABLE TIPO 347.

---

**CONCLUSIONES:**

De los resultados obtenidos en el estudio descrito en este anexo se concluye lo siguiente:

1. El acero inoxidable del tipo 347 es susceptible a la formación de fase sigma en un rango de temperatura de 1050-1550°F.
2. La máxima concentración de fase sigma es formada aproximadamente a 1340°F tanto para soldadura como para metal base.
3. La soldadura del material acero inoxidable tipo 347 exhibe una mayor tendencia a formar la fase sigma que el metal base.
4. En general, la soldadura no exhibe la tenacidad superior que el material base tanto en condiciones de no sigmaizado y sigmaizado.
5. Sobre los datos de laboratorio, el acero inoxidable tipo 347 sigmaizado es frágil a relativamente altas temperaturas. La reducción en la tenacidad en el material base después de la exposición no es extensiva.
6. La cantidad de fase sigma formada y el grado de fragilización en que incurre el acero inoxidable tipo 347 dependen de varios factores, incluyendo la composición, estructura y tiempo de exposición a alta temperatura.

---

## CONCLUSIONES

---

En este trabajo se ha pretendido proporcionar los lineamientos prácticos para la elaboración de una investigación, utilizando métodos y técnicas simples al alcance de nuestra tecnología.

La propuesta de la investigación no constituye una discusión compleja, es solo la realización de algo observado en un generador de vapor y llevado al laboratorio; tratando de ejemplificar las condiciones de alta temperatura a la que trabajan los materiales de éstos equipos.

Se definieron relaciones mediante métodos de cálculo sencillos, llegando a plantear el objetivo buscado.

Los datos para obtener las relaciones mencionadas se generaron a partir de lo siguiente:

En forma general los materiales SA-106 Gr B, SA-209 T1 y SA-213 T22 presentaban una microestructura original consistente de ferrita y perlita laminar en forma de bandas, durante la exposición a la temperatura, la fase cementita se globulizó de tal forma que los granos de perlita, originalmente vistos, desaparecieron en forma gradual, hasta no existir en la microestructura, donde hay una tendencia a disminuir la dureza al incrementar la permanencia de estos aceros en una atmósfera a elevadas temperaturas.

En la investigación se utilizaron 700°C, sin sobrepasar la temperatura de transformación de los materiales sin embargo originó una degradación microestructural, donde el nivel de este fenómeno estuvo en función de la permanencia de las probetas en el horno.

Las pruebas de dureza realizadas determinaron que ésta propiedad mecánica, efectivamente varió en función del tiempo a las condiciones de temperatura arriba mencionadas. Los valores de dureza resultantes disminuyen en forma no lineal de acuerdo al tiempo de exposición, esta reducción es debida a la pérdida de la perlita al precipitar los carburos de hierro.

Es interesante notar que los valores de dureza de los tres materiales indicados, son mayores en relación al tipo de material, es decir, por ejemplo: La especificación SA 213 T22 que contiene 2.25 de cromo y 1.00 de molibdeno con respecto al SA 209 T1 que sólo presenta molibdeno, cuenta con mejores características para el servicio a altas temperaturas. Por lo tanto la influencia de los elementos aleantes los hace más resistentes a estas condiciones de operación.

=====

En el caso del acero con la especificación SA 213 TP 347 de características austeníticas (acero inoxidable), la microestructura presenta cambios debido a la elevada temperatura, pero la dureza no sigue la misma tendencia que los tres materiales restantes, ya que en vez de disminuir aumenta. Además que la degradación microestructural consiste en la aparición de los carburos de cromo y la llamada fase sigma.

Del estudio incluido en el anexo 4.2 realizado a un material de especificación SA 213 TP 347; se concluye que la fase sigma se forma en el rango de temperatura de 565-843°C (1050-1550°F).

La máxima concentración de fase sigma formada aproximadamente a los 726°C (1340°F). Este tipo de acero inoxidable exhibe en la soldadura una tendencia considerablemente más grande de formar fase sigma que el material base, por lo tanto la tenacidad en la soldadura es menor.

De los datos de laboratorio, la soldadura del acero inoxidable SA-213 TP 347 sigmatizado es frágil a temperaturas relativamente altas. La reducción de la tenacidad en el material base después de una exposición similar no es extensiva.

La cantidad de fase sigma formada y el grado de fragilización en el que incurre el acero inoxidable depende de varios factores; incluyendo, composición, estructura, tiempo y temperatura de exposición

La finalidad de este trabajo es determinar un método que nos permita definir la vida remanente de la tubería que trabaja en un generador de vapor.

Mediante los datos obtenidos como resultado de la investigación se lograron definir varias relaciones que se adecuan a cada uno de los materiales estudiados, empleando dos métodos matemáticos diferentes se obtuvieron dichas relaciones, esto con la finalidad de comparar los resultados y conocer la diferencia existente entre cada uno de los métodos.

Se decidió emplear las relaciones obtenidas mediante el segundo método usado, denominado ley de decaimiento, debido a la sencillez y facilidad de manejo de datos, de alguna forma los dos métodos dieron resultados muy semejantes.

Podemos decir que un método para determinar la vida remanente de la tubería de un generador de vapor además de los beneficios desde el punto de vista de mantenimiento son altos, así mismo son los beneficios económicos generados.

Como ejemplo mencionaremos un caso particular dentro de la industria azucarera. En este tipo de plantas es típico realizar mantenimientos a los generadores de vapor en determinados periodos y es común cada cinco años, independientemente del estado que guarden los componentes, sin realizar algún estudio que determine la funcionalidad de estos. Lo que representa un gasto extremadamente alto; algunas veces logra superarse la inversión original de la compra del equipo.

A continuación se describe el análisis realizado a un generador de vapor de un ingenio ubicado en el estado de Jalisco, donde se determinaron los resultados siguientes en un sobrecalentador de

vapor. Este componente esta formado por 42 elementos, de material SA 213 T11, que están expuestos al calor por radiación y convección. En las zonas curvas del componente se determinó usando el parámetro de Larson-Miller una vida remanente de 8,700 horas, y en la parte recta del componente 52,000 horas, por lo que se determinó substituir sólo las curvas; definiéndose un punto para cortar y realizar la reparación. El llevar a cabo un análisis con el método indicado, también requiere la obtención de medición de durezas, por lo que los datos fueron usados para emplear los estudios realizados en este trabajo.

Si nos damos cuenta la especificación del material no es de los estudiados, pero utilizaremos la relación obtenida para el material SA-213 T22 ya que ambos contienen los mismos elementos aleantes, únicamente la diferencia es en la cantidad del cromo y del molibdeno.

Los valores de dureza determinados durante el análisis para el material SA 213 T11 fueron de 66 HRB para la parte curva y de 77 HRB para la parte recta.

No se conocen los valores de dureza iniciales debido a que no se tenía registro, por lo que se suponen los requeridos por el código A.S.M.E que es de 86 HRB para el material de la caldera.

Al realizar las operaciones obtenemos; para la parte recta de 63,460 horas y de 9680 horas para la parte curva.

Comparando los dos métodos podemos decir; que en la parte curva se obtuvieron resultados muy parecidos. La diferencia existente en los resultados de la parte recta es considerable, tal vez se deba a la cantidad de elementos aleantes de cada uno de los materiales.

Hablando de los beneficios económicos que brinda el manejo de cualquiera de los métodos para obtener la vida remanente de los materiales que trabajan en un generador de vapor, es considerable; por ejemplo; en el ingenio mencionado se decidió sólo cambiar la parte curva de los elementos; de acuerdo a lo indicado en la tabla comparativa R-1, donde se anotan los gastos generados por sólo cambiar las curvas o cambiar todo el componente.

Se considera un ahorro del 75% del costo, si se desea cambiar el componente completo, respecto a únicamente el cambio de las curvas.

Descripción	Costo del cambio de curvas N\$	Costo del cambio de todo el componente N \$
Material 42 piezas	8,584.04	320,400.80
Montaje	70,427.30	278,732.55
Inspección	14,827.30	14,827.30
Total	93,834.70	613,960.70

Tabla R-1. Comparación de gastos entre el cambio de una sola sección del componente a el total del mismo.

---

## RECOMENDACIONES

---

Para finalizar este trabajo se exponen a continuación las siguientes recomendaciones:

El estudio realizado en esta investigación enfocó solamente cuatro tipos de materiales, para no hacer un volumen muy extenso del presente, por lo que para otros materiales no contemplados en la investigación será necesario seguir el mismo procedimiento para la generación y obtención de los resultados deseados.

Podemos decir que el manejo y uso de los resultados y las relaciones aquí presentadas darán como consecuencia una confianza para tomar decisiones en relación a lo definido por el método, en consecuencia lo que se recomienda es su utilización sobre todo para los usuarios de generadores de vapor.

Tal vez la comparación con otros métodos pueda ser la clave para poder hablar de su eficiencia o su inadaptabilidad.



---

## BIBLIOGRAFIA

---

### CAPITULO UNO.

1. CENTRALES ELECTRICAS

Y.M. LAJTIN, YA. D. KOGAN  
MASHINOSTROENIE  
ED. MIR MOSCU, 1976

2. CALDERAS, TIPOS, CARACTERISTICAS Y SUS FUNCIONES.

CARL D. SHIELDS  
ED. CECSA, 1962.

3. AN INTRODUCTION TO THERMODINAMICS FOR ENGINEERING TECHNOLOGISTS.

J.P. TODD, H.B. ELLIS.  
ED. JOHN WILEY & SONS, 1981

4. TRANSFERENCIA DE CALOR

DONALD P. KERN  
ED. CECSA, 1984.

5. MANUAL FOR INVESTIGATION AND CORRECTION OF BOILER TUBE FAILURES.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE  
EPRI, PALO ALTO, CALIFORNIA 1982.

6. SECCION I, CODIGO ASME

AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINEERS  
1986, EDITION.

7. EL ACERO Y SU MANUFACTURA

ACEROS MONTERREY  
MONTERREY N.L. 1979.

8. INSPECTION WELDING, AWS

AMERICAN WELDING SOCIETY  
NEW YORK, 1984.

9. PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

INTA. (INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AERONAUTICA)  
ESPANA, 1982.

10. CURSO DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD PARA CENTRALES NUCLEARES  
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES  
ININ 1987.

**CAPITULO DOS**

1. AN INTRODUCTION TO THERMODYNAMICS FOR ENGINEERING TECHNOLOGISTS  
J.P. TOOD, H.B. ELLIS  
ED. JOHN WILLEY & SONS, 1981.
2. CURSO DE PLANTAS TERMoeLECTRICAS (GENERADORES . DE VAPOR,  
TURBOGENERADORES Y EQUIPOS AUXILIARES)  
COMPANIA DE INSPECCION MEXICANA S.A. 1987.
3. CALDERAS, TIPOS, CARACTERISTICAS Y SUS FUNCIONES.  
CARL D. SHIELDS  
ED. CECSA. 1962.
4. MANUAL FOR INVESTIGATION AND CORRECTION OF BOILER TUBE FAILURES.  
ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE  
EPRI, PALO ALTO, CALIFORNIA, 1982.
5. SECCION I CODIGO ASME  
AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINEERS  
1989 EDITION.
6. SECCION II, PARTES A Y C, CODIGO ASME  
AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINEERS  
1989 EDITION.
7. CURSO DE CAPACITACION PARA INSPECTORES MECANICOS  
DET NORSKE VERITAS 1986.
8. REVISTA TECNOLAB # 19  
MARZO DE 1988.  
COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. 1988.
9. COMBUSTION ENGINEERING AIM FOR HIGER AVAILABILITY IN STEAM GENERATORS  
AND THEIR AUXILIARIES  
PUBLICATION No. T 15-5271  
WINDSOR, CONECTICUT: CE.

10 BABCOCK & WILCOX COMPANY STEAM, ITS GENERATION AND USE.  
39th EDITION, NEW YORK.  
THE BABCOCK & WILCOX CO. 1978.

11 REPORTE DE FALLA EN TUBERIA DE SOBRECALENTADOR DE CALOR DE UNIDAD No.4  
CT. SALAMANCA.  
COMPANIA DE INSPECCION MEXICANA S.A.-  
AGOSTO 1987.

### CAPITULO TRES

1. SECTION II PART A, FERROUS MATERIALS ASME CODE, BOILERS AND PRESSURE  
VESSELS  
AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINEERS.  
1986 ADDENDA 1989.

### CAPITULO CUATRO

1. SECTION I, POWER BOILERS  
A.S.M.E. CODE . 1989 EDITION

2. ELEMENTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADISTICA  
ALBERTO MORENO BONETT  
FRANCISCO J. JAUFFRED.  
ED. REPRESENTACIONES Y SERVICIOS DE INGENIERIA S.A.  
SEGUNDA EDICION.

3. CALCULO CON GEOMETRIA ANALITICA  
LOUIS LEITHOD  
ED. INTERAMERICANA 2DA. EDICION.