



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

*Título: Análisis de falla de un tubo colapsado del
Generador de vapor en La CTE Felton.*

Autor: Edian Almira Espinosa.

Tutores: Dr.C Alberto Velázquez del Rosario.
Dr.C Tomas H. Fernández Columbié.

Felton 2012

Declaración de Autoridad

Yo: Edian Almira Espinosa

Autor de este Trabajo de Diploma y los tutores Dr. C Alberto Velázquez del Rosario y Dr. C. Tomas H. Fernández Columbié certificamos su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa " Dr. Antonio Núñez Jiménez ", y hacer uso del mismo en la finalidad que estime conveniente.

Edian Almira Espinosa.

Dr. C. Alberto Velázquez del Rosario

Dr. C. Tomas H. Fernández Columbié



Dedicatoria

La realización de este trabajo ha sido mi sueño durante la trayectoria de la carrera. Con mucho amor, trabajo y perseverancia hoy veo el fruto de mis esfuerzos, expresados en este trabajo, el cual va dedicado a todos aquellos que lo merecen en mayor magnitud:

A la persona que más amo en el mundo, mi niña Milena.

A mi esposa Gladys por su dedicación.

A mis padres que han deseado tanto este día.



Agradecimiento:

A Dios por fortalecerme en todo tiempo, a mis tutores por asesorarme técnica y científicamente, durante la elaboración de la tesis.

A todos los profesores del instituto que dedicaron parte de su tiempo a impartirnos las asignaturas necesarias y asesorarnos en aras de vencer las materias de la carrera.

A mis compañeros del departamento y del centro en general, especialmente a Juan Carlos Peña Céspedes por su apoyo y colaboración en los momentos necesarios.

A mi esposa, hija y hermanos por su ayuda y aliento para seguir adelante.

A los que de un modo u otro contribuyeron con el desarrollo del trabajo.

A todos muchas Gracias.



RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el estudio sobre las causas que originan el fallo en las superficies de intercambio del sobrecalentador de vapor y la pared del generador de vapor de la CTE “Lidio Ramón Pérez” de Felton, para ello se utilizaron los métodos de diagnóstico y control de los metales, se prepararon ocho probetas, seis de las mismas de los materiales de las superficies averiadas, estas fueron cortadas longitudinalmente con dimensiones de 25x25, las cuales correspondían a distintas zonas de la mocheta y dos como muestra patrón, a estas se le realizaron los análisis químico y microestructural, a tener en cuenta para los análisis de los resultados de las tensiones, los cuales se realizaron en el cálculo de resistencia del proceso de sobrecalentamiento en el sobrecalentador y a la pared del generador de vapor, se evaluaron las transformaciones de las microestructuras de ambas zonas teniendo en cuenta el régimen de trabajo a que están sometidos, se realizaron los análisis de la fluencia en ambas zonas observando las magnitudes de la que depende la deformación, como la presión, temperatura, tiempo y número de arranques y paradas del generador de vapor, también se tuvo en cuenta la incidencia del proceso sobre el hombre y el medio ambiente, y como parte de interés la evaluación económica.



ABSTRACT

In this work was made the study on the causes that originate the failure in the surfaces of exchange of overheater of steam and the wall of the steam generator of electric power plant “Lidio Ramón Pérez” of Felton, for they were used it the diagnosis methods and control of the metals, they got ready eight test tubes, six of the same materials of the damaged surfaces, these were cut longitudinally with dimensions of 25X25, which corresponded to different areas of the test tubes and two like sample pattern, to these they were carried out the chemical and microscope structural analysis, to keep in mind for the analysis of the results of the tensions, which took place the calculation of resistance of the overheating process in the overheater and to the wall of boiler, are evaluated the transformations of the microstructures of both areas were keep in mind the work regime to that it are subjected, there were the analysis of the fluency in both areas by observing the magnitudes of the deformation of which is like the pressure, temperature and time in frequent start-stops the boiler, was also account of the impact of the process of the man and the environment, and as part of the assessment of economic valuation.



INDICE

SÍNTESIS	Pág
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. MARCO TEÓRICO	
1.1. Introducción.....	5
1.2. Principales fallos de los generadores de vapor.....	5
1.3. Modo de fallo.....	8
1.3.1. Técnicas para el análisis de fallo	8
1.4. Descripción del flujo tecnológico de la instalación.....	10
1.5. Influencia del cromo en los aceros.....	13
1.6. Degradación del material.....	14
1.6.1. Teoría de degradación por resistencia residual.....	16
1.7. Tensiones en las uniones soldadas.....	17
1.7.1. Agrietamiento por soldadura en tubos.....	18
1.7.2. Rotura por materiales dúctiles.....	19
1.8. Generalidades y naturaleza de la corrosión bajo tensión.....	20
1.8.1. Corrosión producida por la quema del petróleo.....	21
1.8.2. Modelos basados en la mecánica del daño.....	23
1.8.3. Método de diagnostico y control.....	24
1.8.4. Definiciones de partes y mediciones de los generadores de vapor.....	25
1.9. Conclusiones del capitulo I.....	27
CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción.....	28
2.2. Fundamentación de las propiedades a investigar.....	28
2.3. Composición química del acero.....	29
2.3.1. Selección y preparación de muestras para el análisis microestructural	29
2.3.2. Selección de las muestras.....	30
2.3.3. Corte de las probetas.....	30
2.3.4. Desbaste de las muestras.....	30



2.3.5 Pulido de las muestras.....	31
2.3.6. Limpieza, lavado y secado de las probetas antes del ataque químico.....	31
2.3.7. Ataque químico de las muestras seleccionadas.....	32
2.3.8. Análisis microestructural por el método de examen microscópico.....	32
2.4. Propiedades mecánicas del acero de baja aleación 15020.....	34
2.5. Cálculo de resistencia mecánica, determinación de presión.....	34
2.5.1. Temperatura de cálculo en la pared exterior del elemento.....	35
2.5.2. Determinación de la tensión permisible del material.....	36
2.5.3. Espesor de la pared del tubo.....	37
2.6. Condición de resistencia.....	37
2.6.1. Cálculo de tensiones en el sobrecalentador.....	38
2.6.2. Determinación de la tensión tangencial.....	38
2.6.3. Tensión equivalente.....	39
2.6.4. Variación del radio interior.....	39
2.6.5. Tensión producida por la presión de trabajo.....	40
2.7. Métodos de control de superficies.....	40
2.7.1. Control de propiedades químicas.....	41
2.7.2. Ensayos metalográficos.....	41
2.7.3. Ensayos no destructivos.....	41
2.7.4. Control de las superficies.....	42
2.7.5. Control dimensional.....	42
2.7.6. Métodos de control a realizar y plazos.....	42
2.8. Conclusiones del capítulo II.....	45
CAPITULO III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS	
3.1. Introducción.....	46
3.2. Resultado del análisis químico.....	46
3.3. Resultado del análisis metalográfico.....	46
3.3.1. Mediciones de espesor tomadas en las zonas de la muestras.....	51
3.4. Resultados del cálculo de resistencia mecánica.	51
3.5. Valoración económica.....	54
3.6. Análisis medio ambiental.....	55



3.7. Conclusiones parciales del capítulo III.....	58
Conclusiones Generales.....	59
Recomendaciones.....	60
Bibliografía.....	61
Anexos	

INTRODUCCIÓN

El actual escenario energético mundial pasa por una crisis, en la cual, todas las alternativas que tributen al uso racional de los portadores energéticos, atañan un gran significado. Es indiscutible que el actual modelo energético, basado fundamentalmente en la producción de energía a partir de combustibles fósiles, es insostenible e injusto. Es un modelo injusto por la desigualdad en el consumo y el acceso a la energía comercial. Hoy en día un 15% de la población mundial, los 1000 millones de habitantes de los países desarrollados, consumen más del 50% de los recursos energéticos del planeta, mientras que 2000 millones de personas no tienen acceso a la energía comercial y otros 3000 millones tienen un suministro insuficiente, lo que imposibilita su desarrollo y condenándolas a la pobreza.

Numerosas Empresas Eléctricas en el mundo están enfrascadas en la gestión eficiente de la disponibilidad de sus unidades generadoras, entre otras razones por la disminución de la disponibilidad en sus unidades, la elevación de los costos de construcción de nuevas centrales eléctricas y las restricciones ambientales, lo que ha puesto a los Directivos con margen para cumplir las demandas crecientes de electricidad.

La eficiencia energética no consiste en racionar o reducir el consumo de energía, sino en utilizarla mejor. Los aumentos de productividad y la reducción de los consumos energéticos por unidad de producto constituyen, en realidad, fases de un mismo proceso con aportes significativos al crecimiento, la protección del medio ambiente y la equidad social. La disponibilidad de una planta, es una cuestión más compleja de tratar que la eficiencia de la misma.

Nuestro país en estos momentos gasta alrededor de 1.000 000 de dólares diariamente en la generación de energía eléctrica, es la forma de energía de más uso diversificada y cuyo costo total tiene mayor influencia en el balance financiero cerca del 37% de los combustibles derivados del petróleo que se consumen en el país se destinados a la generación de energía eléctrica, lo que ha llegado a representar más de 400 millones de dólares anuales, Chaves (2004). Por ellos, en

el programa de nacional de ahorro energético se señala que la producción continua de esta, ha sido y seguirá siendo un factor decisivo en la recuperación económica, el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones destinados a su producción incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos. Debido a esto, se ha hecho un considerable esfuerzo para mejorar la operación de las centrales termoeléctricas, tal que los procesos operen en forma segura y eficiente, se mantenga la viabilidad económica y se reduzca el impacto ambiental de sus actividades.

Es conocido que la energía eléctrica constituye un producto cuya generación debe en cada instante estar balanceada con el consumo, esto determina que el régimen de trabajo de la instalación de generación este en cada instante sujeto al régimen de carga que de ella se demanda.

Debido a la gran demanda de consumo de electricidad que hubo hace varios años atrás en nuestro país, nuestras plantas generadoras se vieron afectadas por cumplimiento de los mantenimientos planificados, lo que trajo consigo que estas plantas fueran bajando la eficiencia y se vieran Averiadadas por falta de mantenimiento.

La producción de energía eléctrica presupone, en el caso de las centrales termoeléctricas, convertir la energía química del combustible en energía térmica del vapor, para luego convertir esta en energía mecánica en rotor de la turbina acoplada al generador eléctrico. Pero si se analiza que todos estos procesos se desarrollan de forma continua y que están sujetos a un gran número de perturbaciones dinámicas de tipo interno y externo.

Entonces podemos decir que dentro de la producción de energía eléctrica el generador de vapor juega un papel muy importante dentro del proceso tecnológico.

La Central Termoeléctrica (CTE) "Lidio Ramón Pérez", enclavada en Felton, es la instalación de su tipo de más reciente construcción en nuestro país. Consta de dos unidades generadoras de 250MW cada una, la primera unidad fue sincronizada al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) el 16 de febrero de 1996.

Las calderas de vapor de la CTE Lidio Ramón Pérez de Felton de 250 MW fueron diseñadas para la utilización del Mazut-100, combustible proveniente de la antigua URSS. A raíz del derrumbe del campo socialista se cortan los suministros y dichos generadores de vapor comienzan a funcionar quemando crudo nacional; combustible extrapesado con elevado contenido de vanadio, níquel, hierro y otros elementos formadores de ceniza durante la combustión, el contenido de azufre oscila entre 6 – 8 % lo que influye de manera significativa en la corrosión de las superficies de alta y baja temperatura; la potencia calorífica bajo de este combustible es inferior a la del combustible de diseño por lo que se requiere quemar mayor cantidad de combustible para lograr la misma potencia de caldera, de esta manera se incrementa el volumen de gases de combustión y mayor cantidad de calor será trasladada al eje convectivo, probablemente la causa de las elevadas temperaturas de los metales de las superficies de transferencia de calor encargadas de sobrecalentar y recalentar el vapor hasta el punto de producirse fallas repetitivas con solo 50000 – 90000 horas de funcionamiento.

Desde la puesta en marcha de la Unidad # 1 de la CTE “Lidio Ramón Pérez” de Felton, se vienen presentando problemas de averías en el economizador, el sobrecalentador #2, y las paredes del generador de vapor, lo que provoca limitaciones de energía disponible en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y trae como consecuencia grandes pérdidas en la eficiencia, factor incidente en la producción de la planta y en la economía del país.

La parada de esta unidad tiene gran repercusión en lo económico y lo social, de ello la importancia de esta investigación, generada por la Situación Problemática siguiente:

Situación Problemática: Las ocurrencias de averías de los tubos de la pared del generador de vapor (caldera) perteneciente a la Empresa Lidio Ramón Pérez de Felton, están provocando las salidas de la línea, lo que trae consigo mantenimiento continuo, disminución de la eficiencia de la planta y reducción de la vida de la superficie de intercambio. Los tubos normalmente colapsan por rotura en el sentido axial en forma de boca de pescado.

A partir de la situación planteada se declara como **problema:** Desconocimiento de las causas que dan lugar a la fractura longitudinal en los tubos de las paredes del generador de vapor de la CTE Lidio Ramón Pérez.

Objeto de estudio: Tubos de las paredes de la caldera U #1 CTE Felton.

El **campo de acción:** Fractura en caliente de recipientes a presión.

Como **hipótesis:**

La fractura axial de los tubos de las paredes del generador de vapor de la CTE Lidio Ramón Pérez, está provocada por de la concentración de tensiones a través de línea de laminación bajo los efectos combinados de las variaciones de temperatura y la presión del flujo en el interior de los mismos.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo:**

Determinar las causas de la fractura de los tubos de las paredes del generador de vapor de la CTE Lidio Ramón Pérez.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo:**

1. Realizar un análisis bibliográfico que permita el establecimiento del estado del arte sobre la temática tratada.
2. Recopilación de materiales y preparación de probetas.
3. Análisis microestructural de las deformaciones, grietas y averías.
4. Realizar cálculos de verificación de resistencia mecánica de los tubos para las condiciones analizadas.
5. Análisis de los resultados.

Aseguramiento

1. Bibliografía relacionada con el tema a investigar.
2. Equipamiento de Laboratorio para ensayos mecanográficos y análisis de fractura.



CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1. Introducción

Para poder desarrollar el objetivo del tema propuesto es necesario el estudio de diversas temáticas, las cuales permitirán una mayor comprensión y claridad con respecto al tema. Partiendo de los fundamentos teóricos contenidos en las fuentes bibliográficas se podrá formular y emitir un criterio referente al tema, que estará respaldado por otros autores en otras investigaciones de carácter científico o experimental. Con el estudio de temáticas referentes a las fallas y consecuencias del Generador de Vapor, se podrán determinar las deformaciones del material en la Unidad #1 de la CTE "LIDIO RAMON PEREZ", de Felton.

Objetivo del capítulo es realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática relacionada con el agrietamiento y fractura de los tubos del generador de vapor

1.2. Principales fallos de los Generadores de Vapor

Concepto de Fallo: Averías que ocurren o tienen lugar en un equipo hasta ocasionar en él la puesta fuera de servicio (F/S).

❖ Fallas causadas por corrosión

La corrosión más común encontrada en el lado del agua es debida al oxígeno.

Las tres maneras de que el oxígeno pueda ser admitido por el lado del agua en los sistemas de vapor son: durante la operación, el aire puede quedar encerrado en el sistema en regiones donde la presión interna es menor que la atmosférica. Usualmente, el aire es admitido en el sistema cada vez que es abierta para ser reparada o limpiada. El oxígeno libre está relacionado también como un producto de la disociación.

❖ Tipos de corrosión en calderas en el lado del agua

La corrosión superficial ataca pequeñas áreas porque comienza como un ánodo para el resto de la superficie o porque está localizado en una alta concentración de contaminantes corrosivos en el agua. Es el resultado directo de un rompimiento pasivo de una película en la superficie frecuentemente. Esto ocurre relativamente



rápido, resultando en una rápida perforación, debido al largo radio del área cátodo a ánodo.

En la corrosión con fisuras, el oxígeno es excluido de en medio de 2 superficies, depósitos o partículas en la superficie. El área con la fisura, o con los depósitos, es un área anódica en sus alrededores por las diferencias en la concentración de oxígeno. El área anódica está sujeta relativamente a un rápido ataque, debido a la pequeña relación existente alrededor del área catódica.

❖ Corrosión por oxígeno

Uno de los problemas de corrosión que se encuentra con más frecuencia es resultado de la exposición del metal de la caldera al oxígeno disuelto. Como los óxidos de hierro son un estado estable y natural, los aceros volverán a esta forma, si las condiciones son favorables desde el punto de vista termodinámico. En general, las condiciones son favorables si el acero que no está cubierto por la forma protectora del óxido de hierro se expone a agua que contenga oxígeno.

Además de la perforación de la pared del tubo, la corrosión por oxígeno es problemática desde otra perspectiva. Las picaduras por oxígeno pueden actuar como sitios de concentración de esfuerzos, fomentando de esta manera el desarrollo de grietas por fatiga con corrosión, grietas cáusticas y otras fallas relacionadas con los esfuerzos.

❖ Rotura por flujo plástico

Es una forma de daño por sobrecalentamiento de larga duración que produce una rotura de labios gruesos en la cúspide de una comba. El flujo plástico produce una deformación plástica lenta y, por último, la coalescencia de micro vacío del metal durante el sobrecalentamiento a menudo, se tendrá una pequeña fisura longitudinal en la cúspide de La rotura, suele tener bordes romos y ligeramente dentados (figura 1.1). En las cercanías, pueden existir roturas y fisuras longitudinalmente, similares pero más pequeñas.



Figura 1.1 rotura por flujo Plástico

❖ Fallas causadas por fragilización

Daños por hidrógeno esta forma de deterioro es resultado directo de las reacciones electroquímicas de corrosión en las que se libera hidrógeno en forma atómica. El daño causado por el hidrógeno se restringe a los tubos enfriados por agua que se estén corroyendo en forma activa ver (Figura 1.2).



Figura 1.2 Rotura inducida por hidrógeno

• Forma de eliminación de este tipo de falla

Dos factores críticos rigen la susceptibilidad al daño por el hidrógeno. Estos son la disponibilidad de sustancias de alto o bajo pp. y un mecanismo de concentración. Los dos deben estar presentes en forma simultánea para que ocurra el daño por el hidrógeno.



1.3 Modo de fallo

“Modo de fallo no es más que el o los procesos físicos que ocurren (o cuyos efectos se combinan) para producir una inutilización del elemento o el equipo”. Los modos de fallos se clasifican de la siguiente forma.

1. Falla por deformación elástica inducida por fuerza, temperatura o por ambas causas. Ocurre cuando la deformación elástica de un elemento de una máquina causada por las cargas o temperaturas de operación impuesta, es lo suficientemente grande para interferir en la capacidad de trabajo de la máquina.
2. Falla por fatiga. Concepto general que se aplica a la ruptura súbita y nociva de un componente mecánico en una o más partes, como resultado de la aplicación de cargas o deformaciones fluctuantes durante un intervalo de tiempo. La falla ocurre por el inicio y propagación de una grieta hasta que ésta se hace inestable y se propaga súbitamente, causando la falla.
3. Falla por corrosión. Significa que una pieza mecánica se hace incapaz de realizar la función para la que fue diseñada debido al deterioro indeseable del material, provocado por la interacción química o electroquímica con el ambiente. La corrosión con frecuencia se combina con otros modos de falla, como desgaste o fatiga. La falla por corrosión puede ser por:
 - Ataque químico directo. Implica el ataque corrosivo de la superficie de la parte mecánica expuesta al medio corrosivo, de manera más o menos uniforme.
 - Corrosión producto a la cavitación.
 - Corrosión química acelerada que se produce cuando, debido a diferencia en la presión de vapor, ciertas burbujas y cavidades de un fluido se colapsan fuertemente sobre las paredes de un recipiente de presión, haciendo que sean expulsadas partículas de la superficie y dejando ésta última desprotegida contra el medio corrosivo.

1.3.1. Técnicas para el análisis de fallos

Es un método que nos permite determinar los modos de fallas de los componentes de un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan. De esta forma se podrán clasificar las fallas por orden de importancia, permitiendo directamente



establecer tareas de mantenimiento en aquellas áreas que están generando un mayor impacto económico, con el fin de eliminarlas por completo.

Este proceso necesita de cierto período de tiempo para aplicarlo en el estudio de un sistema, un análisis detallado y una documentación acertada para poder generar una jerarquía clara y bien relacionada. Su procedimiento como tal implica las siguientes actividades:

1. Definir el sistema: Se refiere a que se debe definir claramente el sistema a ser evaluado, las relaciones funcionales entre los componentes del sistema y el nivel de análisis que debe ser realizado.
2. El análisis de los modos de falla: Consiste en definir todos los modos de falla potenciales a ser evaluados en el nivel más bajo. Por ejemplo, la pérdida del rendimiento y funcionamiento.
3. Análisis de los efectos de fallas: Define el efecto de cada modo de falla en la función inmediata, los niveles más altos de riesgos en el sistema, y la función misión a ser realizada. Esto podría incluir una definición de síntomas disponible al operador.
4. La rectificación (Opcional): Determina la acción inmediata que debe ejecutar el operador para limitar los efectos de las fallas o para restaurar la capacidad operacional inmediatamente, además de las acciones de mantenimiento requeridas para rectificar la falla.
5. Cuantificación de la tasa de Fallas (Opcional): Si existe suficiente información, la tasa de fallas, la proporción de ésta, o la probabilidad de falla de cada modo de fallo deberían ser definidas. De esta forma puede cuantificarse la proporción de fracaso total o la probabilidad de falla asociada con un efecto de un modo de fallo.
6. Análisis crítico (Opcional): Permite determinar una medida que combina la severidad o impacto de la falla con la probabilidad de que ocurra. Este análisis puede ser cuantitativo o cualitativo.
7. Acción correctiva (Opcional): Define cambios en el diseño operando procedimientos o planes de prueba que mitigan o reducen las probabilidades críticas de falla.



1.4. Descripción del Flujo Tecnológico de la instalación

El combustible llega a la Central Eléctrica desde la base de almacenamiento de combustibles de CUPET, desde la cual con sus equipos de bombeo lo trasladan hasta los tanques de recepción y almacenamiento del mismo en la CTE.

Existen dos tanques para la recepción, almacenaje y preparación del combustible que se utilizan en la CTE, estos tienen capacidad de 15000 m³ cada uno, además tienen dispositivos interiores (serpentín) y exteriores (calentador) para el calentamiento del combustible entre 65 – 70 °C, con el fin de facilitar su bombeo.

Desde los tanques se succiona el combustible por dos bombas de engranes para cada unidad, situadas en la Casa de Bombas de Primer Impulso, las cuales transportan el mismo con una temperatura de 65-70 °C hasta la Casa de Bombas de Segundo Impulso, a una presión constante de 0.45 MPa en la succión de las bombas del Segundo Impulso.

En la Casa de Bombas de Segundo Impulso el combustible es bombeado por dos bombas de alta presión, las cuales elevan la presión hasta 3.2 MPa, además existen dos calentadores de superficie que trabajan con vapor, los cuales elevan la temperatura del combustible hasta aproximadamente 145 °C. Con estas condiciones se facilita la pulverización del combustible en los quemadores de las calderas.

La estación de válvulas de regulación de la potencia de la Caldera es la que controla el suministro del combustible hacia los quemadores en dependencia de la producción de vapor que tengan las mismas.

Cada caldera consta de doce quemadores tangenciales, ubicados en tres niveles, en las esquinas del horno, cada uno puede suministrar hasta 5,7 t/h de combustible, para la pulverización son auxiliados con vapor de agua a una presión de 1 MPa y 250 °C.

Además del combustible, para el proceso de oxidación del mismo con el consiguiente desprendimiento de gran cantidad del calor, al horno de la caldera se suministra la cantidad de aire necesaria para lograr la combustión completa, este



aire es succionado de la atmósfera por dos ventiladores de tiro forzado (VTF), se precalienta en los precalentadores de aire a vapor hasta 75 °C y finalmente se eleva su temperatura hasta 315 °C en los calentadores de aire regenerativos (CAR).

Por otra parte a la caldera se le suministra agua de alimentación, la cual llega al domo para ser distribuida por los tubos alimentadores a las paredes de agua donde al absorber el calor desprendido por la combustión se transforma en una mezcla agua – vapor que retorna nuevamente al domo, en el mismo es separado en vapor del agua, el vapor saturado sale del domo y pasa por las superficies de sobrecalentamiento donde aprovechando el calor de los gases de escape se convierte en vapor sobrecalentado que sale de la caldera con 13.7 MPa y 525 °C.

El vapor producido en la caldera llega a la turbina a través de las tuberías de alta presión con 13.24 MPa y 520 °C, este vapor entra al cuerpo de alta presión de la misma a través de 4 válvulas de regulación que controlan la cantidad de vapor en dependencia de la potencia mecánica demandada por el generador eléctrico. En la turbina de vapor se transforma la energía térmica del vapor en energía cinética en los alabes fijos de la misma y la energía cinética en energía mecánica del rotor a través de los alabes móviles.

El vapor, luego haber realizado trabajo en el cilindro de alta presión, sale hacia la caldera nuevamente con 3,4 MPa y 340 °C para volver a elevar su temperatura en los recalentadores, retornando al cilindro de media presión con 520 °C y 3.2 MPa, desde el cilindro de media presión pasa al cilindro de baja presión desde donde va hacia el condensador con 0,005 MPa, aquí se condensa al ceder su calor latente al agua de mar que circula como medio de enfriamiento del condensador.

El condensado que se produce es almacenado en el pozo caliente del condensador con una temperatura de 50 °C, desde aquí es succionado por las bombas de Condensado de Primera Etapa de ejecución vertical que tienen la finalidad de elevar la presión del condensado para garantizar 0,65 Mpa en la succión de las Bombas de Condensado de Segunda Etapa para incrementar la presión hasta 4 Mpa y hacerlo circular por el Condensador de Vapor de los Sellos,



los Eyectores Principales y los Calentadores de Baja Presión, superficies de intercambio estas que aprovechan el calor del vapor proveniente de las extracciones de turbina para ir incrementando paulatinamente la temperatura del condensado al pasar por cada intercambiador, y de aquí al deareador del tanque de alimentar para facilitar su preparación como agua de alimentación de la caldera. Al condensador llega también el agua desmineralizada procedente de la planta de Tratamiento Químico del Agua, que es utilizada para reponer las pérdidas de masa que se producen en el ciclo térmico.

El condensado llega al Deareador con una temperatura de 110 °C donde por medio del calentamiento con vapor, de la extracción IV de turbina, se le elimina el oxígeno libre y los gases incondensables que son emitidos a la atmósfera, pasando el condensado al tanque de alimentación de la caldera, donde se calienta hasta 150 °C y es succionado por las Bombas de Alimentar de la Caldera.

Las Bombas de Alimentar elevan la presión del agua de alimentar hasta 15.7 MPa para incorporarla a la Caldera, pasándola antes a través de dos Calentadores de Alta Presión donde se lleva la temperatura del agua hasta 240°C, la cantidad de agua que se suministra a la Caldera es controlada por una estación de válvulas reguladoras llamadas [Rama de alimentar] que garantizan que se mantenga el balance de masa entre la cantidad de vapor que sale de la misma y la cantidad de agua que se suministra con el fin de asegurar el funcionamiento correcto de la Caldera, después el agua de alimentar pasa por el economizador alcanzando una temperatura de 280 °C pasando luego al domo.

Hasta aquí hemos visto el Ciclo Térmico de la Central Termoeléctrica, ahora veamos que sucede después de convertir la energía térmica del vapor en energía mecánica en el eje de la turbina.

El rotor del Generador Eléctrico está directamente acoplado al eje de la turbina por lo que gira a la misma velocidad que esta (3600 rpm), es un generador trifásico con una potencia activa nominal de 250 MW y máxima de 275 MW , la potencia aparente de 294.12 MVA, el factor de potencia de 0.85, voltaje nominal 15,7 kV; es enfriado por hidrógeno por la parte exterior de las bobinas y además



de esto posee un sistema de enfriamiento con agua desmineralizada por el interior de varios conductores del estator.

Los conductores de salida del Generador Eléctrico están conectados a un Transformador de Voltaje trifásico con una potencia aparente de 325 MVA, la tensión de entrada al mismo es de 15,7 kV, la tensión en la parte secundaria es de 242 kV, este transformador es el encargado de elevar el nivel de voltaje para la transmisión de la electricidad a largas distancias con el mínimo de pérdidas, la salida del mismo está conectada a través de interruptores al Sistema Eléctrica Nacional de Cuba.

1.5. Influencia del contenido de cromo en los aceros

El cromo es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados y de baja aleación. Se suele emplear en cantidades diversas, desde 0,3 a 30%, según los casos. Aumenta la dureza y la resistencia de los aceros, mejora la templabilidad, disminuye las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste y la inoxidableidad (Smith, 1998).

En presencia de una cantidad suficiente de carbono, el cromo tiende a formar carburos, y, en cambio, cuando el acero es de muy bajo contenido en carbono, es soluble en la ferrita. Los carburos formados por este elemento no son siempre carburos simples; con bastante frecuencia se presentan asociados con el carburo de hierro y a veces, forman carburos complejos de dos o más elementos. La naturaleza de estos compuestos depende del porcentaje de carbono y del contenido en elementos de aleación. En general, los carburos que forman los diferentes elementos de aleación son duros y frágiles, en especial los de cromo y vanadio son más duros y resistentes al desgaste que los demás (Apraiz, 1975).

El cromo, desde un 5% en peso, aumenta la resistencia a la oxidación del hierro en atmósfera seca. Por eso, para un satisfactorio comportamiento en atmósferas oxidantes, a temperaturas de hasta 750 °C, los aceros utilizados suelen ser de alto contenido en cromo. Simultáneamente, contenidos crecientes de cromo en solución sólida en el hierro, disminuyen la conductividad térmica de éste, y por tanto le confieren refractariedad (Belzunce, 2001; Bedolla-Jacuinde *et al.*, 2003)



Callister (1999); Dogan *et al.*, (1997) plantean que la presencia del cromo en el acero, además, al formar un film superficial de su óxido, modifica la posición del hierro en la serie electroquímica.

1.6. Degradación de material

Históricamente el caso más estudiado de degradación del material bajo cargas cíclicas ha sido el de los metales. En ellos la evolución de la fatiga consiste en la generación localizada de micro grietas (nucleación de grietas) que pueden crecer (etapa de crecimiento) hasta producir el fallo de la pieza (ruptura catastrófica estática final).

Existen modelos aplicados de predicción de vida para los materiales metálicos que tratan de medir el tiempo de vida de las dos primeras etapas, que normalmente son tratadas de manera independiente. Los modelos usados en la fase de nucleación se basan esencialmente en la teoría de las deformaciones plásticas locales, mientras que los aplicados durante la fase de propagación lo hacen mediante conceptos de mecánica de la fractura.

En cambio, el mecanismo de degradación a la fatiga de los materiales compuestos se muestra más complicado y no suele coincidir casi nunca con el de nucleación y posterior progresión de una grieta dominante. La complejidad de los sucesos de fatiga en laminados ha llevado al desarrollo de innumerables modelos de degradación, aunque desafortunadamente no existe ninguno que sea universalmente aceptado.

Por lo tanto, debido a la complejidad del problema, no existe un modelo que englobe a todos los materiales y factores que intervienen en la fatiga; como por ejemplo la dependencia del nivel de la carga, los múltiples estados de degradación, la evolución no lineal del daño, de los efectos de la secuencia de carga, de los ciclos de pequeña amplitud inferiores al límite de fatiga y de los efectos de la tensión media. Muchos modelos de degradación tan sólo consideran unos pocos factores fenomenológicos y su aplicabilidad varía caso a caso.

El objetivo último de las teorías y modelos de degradación de los materiales sometidos a cargas cíclicas es obtener una aproximación racional de la vida de un



elemento estructural. Es decir, obtener un valor esperado del tiempo durante el cual este elemento cumplirá con la función para el que ha sido concebido. Habitualmente para estimar la vida útil de un componente estructural es suficiente con la predicción de la disminución de su resistencia o bien de su rigidez (Reifsnider, 1991).

La vida estructural puede ser definida cuando, a lo largo del servicio del componente, cualquiera de ellas disminuya colocándose por debajo de unos valores admisibles, se habrá llegado al fin de su vida útil. De todas formas, el estudio de la degradación de un material podría generalizarse al seguimiento de la evolución de cualquier otra característica, sea o no estructural, aunque ésta no es una práctica demasiado habitual.

En el anexo 4 se muestra que, el objetivo de la teoría de degradación a la fatiga puede ser prever a lo largo de la aplicación de los ciclos de carga la reducción de la resistencia en cada punto del material desde el estado inicial del material (A) hasta donde la resistencia se iguala al nivel de carga aplicado (c). Llegar al punto c del diagrama significaría haber llegado al momento de rotura y por lo tanto al final de su vida útil.

Para obtener la evolución de la resistencia del material ver (curva ABC en la en el anexo 4) es necesario conocer el modelo de degradación del material en función del estado de tensiones que ha seguido el material durante toda la historia anterior de cargas cíclicas.

Si esta historia de cargas cíclicas ha mantenido unas características constantes, el punto C coincide con un punto de la curva de tensión – vida del material, denominada curva S – N.

El material estalla cuando la curva de resistencia residual se encuentra con el nivel de carga actual. Si el nivel de carga actual se ha mantenido constante, esto ocurre en un punto de la curva tensión – vida del material (curva S – N).

En general se podría afirmar que todo método de predicción de vida para un material engloba:



1. Observación experimental del proceso de acumulación de la degradación y la definición de una métrica del daño.
2. Formulación de un modelo de acumulación de daño en términos de la métrica de daño y la caracterización experimental de los parámetros del modelo utilizando experimentos simples.
3. Desarrollo de un procedimiento de adición de degradación basado en la métrica de daño para predecir la vida bajo cargas de fatiga.
4. Verificación experimental de las predicciones de vida.

El tamaño de la grieta que produce la fatiga es una apropiada métrica de daño para un metal. Utilizando una teoría de crecimiento de grieta adecuada y su parametrización mediante experimentos puede elaborarse el modelo de degradación.

Estas ecuaciones integradas ciclo a ciclo permiten predecir la vida del material. En contraste, para un polímero reforzado con fibras no es posible obtener el mismo tipo de métrica, ya que el proceso de acumulación de daño sea mucho más complejo siendo una combinación de agrietamiento de la matriz, deslizamiento fibra-matriz, deslaminación y rotura de fibras.

1.6.1. Teoría de degradación por resistencia residual

La primera teoría de degradación por resistencia residual en laminados fue propuesta por Halpin *et al.*, (1972) y por Wolff *et al.*, (1972). Estos autores utilizaron los métodos de predicción desarrollados para metales como patrón. Asumieron que el proceso de acumulación de daño podía modelarse como el crecimiento de una grieta dominante, como es el caso de los metales. Mediante la integración de una ecuación de crecimiento de grieta definieron la expresión de la función de decrecimiento de la resistencia residual. El fallo se asume en el momento en que la resistencia residual decrece por debajo de la tensión cíclica.

Esta teoría de fatiga fue completada mediante el uso de una distribución estadística de la resistencia estática representada por una distribución de Weibull de dos parámetros.

A causa de las objeciones a la aceptación de una única grieta dominante esta teoría ha sido reformulada por numerosos autores Yang *et al.*, (1983), Sendeckyj,



(1990) de estos trabajos se ha deducido que las teorías de fatiga basadas en la degradación de la resistencia residual requieren de una gran cantidad de datos experimentales para cada laminado bajo consideración lo que limita su aplicación.

Sin embargo, los modelos a fatiga basados en la degradación de resistencia residual pueden ser generalizados para poder predecir la vida a fatiga del laminado de una forma teórica.

Esto es posible mediante el uso de conceptos introducidos por Whitney (1983) a través de las teorías de fatiga empíricas para laminados multidireccionales partiendo de los datos experimentales de laminados a 90°, 45° y 0°. Estos modelos de degradación de la resistencia residual pueden extenderse para que incluyan la predicción de vida de piezas sometidas a distintos niveles de carga, ya que permiten una fácil incorporación de una teoría de acumulación de daño.

El efecto sobre la degradación de los distintos niveles de tensiones se caracteriza mediante el concepto de acumulación de daño o de degradación. El concepto subyacente a los modelos de daño acumulado consiste en que cuando el esfuerzo cambia de un nivel a otro, el estado del daño permanece momentáneamente constante, dado que el estado del daño define la situación del material en un momento de su vida a la fatiga. De esta forma, la degradación por fatiga sólo se va incrementando con la aplicación de nuevas cargas cíclicas hasta llevar el material a su fractura final.

1.7. Tensiones en las uniones soldadas.

En las uniones soldadas se pueden encontrar varios tipos de tensiones residuales fundamentalmente, se encuentran las tensiones transversales y longitudinales (o también llamadas de alargamientos), a lo largo del cordón o en toda su longitud, en las secciones transversales al cordón y las tensiones longitudinales y transversales en espesor. En dependencia de la potencia térmica de la fuente empleada, de la velocidad de soldadura, del espesor, del carácter de fijación de la pieza, la distribución de tensiones puede ser distinta (Bonifaz, 2000).

Las tensiones térmicas que se originan en los procesos de soldadura, pueden ser de tracción y de compresión. Las altas tensiones residuales a tracción son



conocidas por promover fractura y fatiga, mientras que las tensiones residuales a compresión pueden inducir a indeseables y a menudo imprevisibles pandeos globales o locales durante o después de la soldadura. Esta adversidad afecta la fabricación, el ensamblaje, y la vida de servicio de las estructuras (Parlane, 1980). Por lo tanto, la predicción y control de las tensiones residuales y la deformación a partir del proceso de soldadura es extremadamente importante.

Hoy en día numerosos investigadores dedicados al tema, hacen gran uso de la modelación por Elementos Finitos con el fin de predecir y determinar con gran exactitud los desplazamientos, las deformaciones y los valores de las tensiones residuales. (Parlane, 1980; García y Burgos, 2002, 2003; Masubuchi, 1980; Goldak y Moashi, 1999; Micharelis, 2003; Meo y Vignjevic, 1999).

1.7.1. Agrietamiento por soldadura en tubos.

Fue Watanabe (1962) en el año 1962, el primero en reportar grietas laminares en estructuras soldadas. Más tarde durante los años de la década de los sesenta aparecieron muchos trabajos al respecto, especialmente en Inglaterra, donde fue creado un comité nacional para atender este problema. Entre otros, se pueden destacar los trabajos de (Nangel ,1969; Meyer ,1968; Wormington ,1967; Nicholls, 1968).

El agrietamiento laminar se presenta en la mayoría de los casos, asociado al acto de la soldadura, en los primeros momentos fue considerado como un defecto de la misma.

Sin embargo, en la actualidad esta demostrado de que la causa fundamental parte de un defecto del metal base, específicamente relacionado con inclusiones no metálicas alargadas o en cadenas en dirección del laminado.

Según lo planteado anteriormente, es importante conocer si existe el peligro de agrietamiento laminar, en el caso de la reparación por soldadura de componentes de calderas de vapor, que por las condiciones de explotación presentan problemas de degradación estructural, Para medir la susceptibilidad al agrietamiento laminar se han usado diferentes métodos y técnicas. En la literatura se pueden encontrar:

- Métodos metalográficos.
- Métodos de medición de propiedades mecánicas en la dirección z.



- Métodos de soldadura.

1.7.2. Rotura en materiales dúctiles

Cada vez son más los procesos de ingeniería avanzada cuyo estudio requiere el conocimiento y modelización de los procesos de deformación y rotura de materiales dúctiles en condiciones dinámicas. Ejemplos de estos problemas son los procesos de fabricación por conformado y corte (Molinari, 2002); (Rojek, 2001), (Bäaker, 2002), el análisis del comportamiento frente a choque de estructuras de vehículos ligeros (Reyes, 2002), automóviles, helicópteros), la predicción de la propagación de fisuras en paneles de pequeño espesor (Chabanet, 2003), típicos en la industria aeronáutica, el diseño de protecciones contra impacto balístico.

Los aceros constituidos por ferrita/martensita combinan alta resistencia y excelente conformabilidad (Molinari, 2002; Bäaker, 2002). Se obtienen por una transformación intercrítica y enfriamiento rápido desde la región bifásica ferrita/austenita.

El control de la estructura de partida, del recocido intercrítico y del enfriamiento posterior permite conseguir una gama amplísima de proporciones de los dos constituyentes y de su topología.

La predicción del comportamiento mecánico de tales aceros, conocido el comportamiento individual de las fases componentes, es una tarea que involucra estudios teóricos, experimentales y numéricos. Actualmente, el problema continúa sin resolverse en su totalidad; esto se debe principalmente al reparto irregular de tensiones y deformaciones que se producen en materiales bifásicos policristalinos, ocasionado por las complejas relaciones geométricas (número de granos, morfología) y diferente distribución espacial de las fases.

Desde el año 1850, se ha reconocido que un metal sometido a esfuerzos repetidos o fluctuantes fallará a un esfuerzo mucho más bajo que el necesario para producir la fractura en una sola aplicación de carga. Este tipo de fallas ocurridas bajo condiciones dinámicas y durante largos períodos de servicio se conocieron con el nombre de fallas por fatiga. Posteriormente se ha ido desarrollando con gran intensidad el estudio del mecanismo de fractura por fatiga y en la actualidad se ha



llegado a afirmar que el 90 % de todas las fracturas en servicios se deben al mecanismo de fatiga (Molinari, 2002).

Es importante considerar que las entallas en las piezas reducen notablemente la resistencia a la fatiga de los aceros, pudiendo llegar a veces a reducirse la resistencia a la fatiga a la mitad o a un cuarto de la resistencia del acero. Las fundiciones, en cambio, no son sensibles al efecto del entalle.

Las roturas por fatiga se acentúan cuando las piezas están descarburadas superficialmente y suelen disminuir las roturas cuando las piezas de aceros están cementadas o nitruradas y también, cuando han sido sometidas a un trabajo en frío de la superficie que endurece la zona periférica. La fatiga ha sido extensamente investigada en estudios previos (Rojek, 2001 y Chabanet, 2003).

1.8. Generalidades y naturaleza de la corrosión bajo tensión

En los últimos años han sido numerosos los trabajos específicos y obras generales publicados sobre este tema, ello se debe, sin duda, a la importancia práctica que presenta este tipo de corrosión que da lugar a la fisuración y rotura del material y que viene provocada por la acción combinada de esfuerzos mecánicos estáticos y de un agente químico corrosivo.

Mejía y Maldonado (2004) plantean que los esfuerzos pueden ser internos o superficiales o de ambos tipos conjuntamente, se ha comprobado que, para que se produzca este tipo de corrosión es preciso que el acero o material soporte esfuerzos de tracción, pues los de compresión no sólo provocan el fenómeno, sino que, en ocasiones, puede ejercer una acción protectora.

Las tensiones causantes de la corrosión pueden ser de origen externo, es decir, aplicadas al material por cualquier medio, o bien inherentes al mismo, por ejemplo: residuales de operaciones de trabajado en frío o de tratamientos térmicos u operaciones de soldadura e incluso originadas en proceso de precipitación o de transformación estructural (Hochmann, 1968).

La corrosión bajo tensión puede darse tanto en materiales metálicos como no metálicos, es decir, que puede considerarse como una propiedad asociada al estado sólido.



Laufgang (2003) considera que con respecto a los aceros inoxidable, se puede afirmar que de modo general, en presencia de determinados agentes corrosivos resultan susceptibles a la rotura de carácter intergranular, cualquiera que sea su estructura: Austenítica, ferrítica o martensítica. Las roturas de este tipo están relacionadas con los procesos, que convierten a los aceros en susceptibles a la corrosión intergranular. En cambio, las roturas de carácter transgranular se observa solamente en los aceros inoxidable con estructura austenítica.

1.8.1. Corrosión producida por la quema del petróleo

El fenómeno de la corrosión puede definirse como el ataque químico o electroquímico que experimentan los materiales metálicos al interactuar con un medio agresivo, siempre y cuando conlleve al deterioro de dicho material. Es importante aclarar el hecho de que el fenómeno de la corrosión conduce inevitablemente al deterioro o destrucción del equipo o material, produciendo una disminución de su valor de uso y acortando, por tanto, la vida útil del mismo, ya que no siempre un ataque químico produce deterioro.

El fenómeno de la corrosión está directamente vinculado a la exposición de los metales a los agentes ambientales, de forma que aquellos metales que carecen de protección quedan sometidos a los procesos químicos de oxidación y reducción, esto es la corrosión, perdiendo sus características físicas y sus propiedades mecánicas.

En el caso del crudo nacional con 40 % de fuel se obtienen valores de corrosión más elevados que en el caso que se consume fuel solamente, y esto se debe a la alta concentración de azufre, vanadio y otros componentes que viene en el crudo nacional, los cuales hacen mucho más agresivo el fenómeno de corrosión. Para el caso de la mezcla se obtuvo que la ley de crecimiento de la capa que rige es una ley compleja debido a que los gases presentes en dicha mezcla no son puros, aparte de la complejidad de los productos de la combustión, por lo que es de esperarse un comportamiento cinético complejo para la formación de las películas de productos de corrosión.



También se observa que a medida que aumenta el tiempo de exposición las velocidades de corrosión tienden a aumentar, y con un tiempo de exposición de 4h las muestras se destruyeron totalmente (Matos *et al.*, 2003).

El contenido en azufre de los fuelóleos puede variar desde menos de un 1% en los fuelóleos ligeros, hasta un 3,5 % en los fuelóleos residuales y pesados. Durante el proceso de combustión, todo el azufre contenido en el combustible se convierte en SO₂ o en SO₃ que, en conjunto, producen las emisiones contaminantes SO_x y cuyo control es objeto de preocupación medioambiental, aparte de que los compuestos sulfurosos presentes en los humos pueden provocar problemas de corrosión en la caldera y en los equipos ubicados dentro del circuito de humo.

Existen dos elementos de gran importancia a tener en cuenta que son el contenido de asfáltenos y de sales totales, sin dejar de prestar especial atención al contenido de azufre. Dados los contenidos de vanadio y sodio de estos combustibles pueden llegar a provocar una velocidad de corrosión que va desde moderada a significativa en dependencia de cómo se encuentre presente la concentración de dichos elementos.

Por otra parte dada la alta concentración de sales que generan un volumen de cenizas importante, que puede estar entre 43 y 100 kg/día por caldera, las que si no son tratadas convenientemente producen una alta velocidad de ensuciamiento de las superficies de transferencia.

Las materias sólidas son partículas de hollín o coque, subproductos del proceso de combustión que constituyen el residuo propio de la combustión incompleta. En las unidades que queman fuelóleos, estas partículas sólidas se generan cuando las gotitas de combustible atomizado sufren una destilación fraccionada parcial durante las diversas fases del proceso de combustión, liberando partículas huecas relativamente grandes ricas en carbono (C), llamadas *cenosferas*, que se configuran en la primera fase del proceso de combustión, y no resultan afectadas por la combustión posterior en la atmósfera medioambiental de un hogar convencional; pueden absorber los SO_x en fase gaseosa y, por tanto, contribuyen a la formación del hollín ácido.



La combustión incompleta de las moléculas pesadas que forman parte de los petróleos industriales o residuales, también llamados Combustóleos en México, Crudo de Castilla en Colombia y Fuel Oil en general, resultan exageradamente agresivas para el interior de Hornos y Calderas, pero verdaderamente criminales cuando se liberan en forma de humo al ambiente (partículas o inquemados, sólidos en suspensión) y son respirados por seres vivos, incluyendo seres humanos, animales y vegetales, se impregnan en paredes, equipos, instrumentos o llegan a contaminar el agua de recipientes, ríos o mares.

Si la combustión fuese completa, en este caso las partes por millón que representan los metales serían cenizas volantes y el azufre se convertiría en SO_2 , minimizando totalmente sus efectos contaminantes de la atmósfera y su daño para la salud. Inclusive compuestos tan tóxicos y peligrosos para la salud como los Tiofenos, al disociarse en sus componentes y combustionar, terminan siendo CO_2 , H_2O y SO_2 que se libera a la atmósfera.

1.8.2. Modelos basados en la mecánica del daño.

Como alternativa a estas aproximaciones basadas en modelos micromecánicos, se pueden citar los modelos basados en Mecánica del Daño, donde las variables que describen el daño del material, representan, en un sentido estadístico, la distribución de microdefectos y son consideradas variables de estado, cuya evolución debe ser determinada como parte del modelo.

La Mecánica del Daño se construye rigurosamente sobre la base de la Termodinámica de sólidos con variables internas. Se supone que la respuesta del material depende de su estado microestructural y que este se puede describir con un número finito de variables internas. La primera definición de la variable de daño como variable mecánica se debe a (Kachanov, 1996) quien diferenció entre el área nominal y el área efectiva y determinó una variable escalar de daño asociada a una dirección espacial.

La Mecánica del Daño es una teoría de carácter general que se puede aplicar para explicar fenómenos como fractura frágil, dúctil, fatiga y fluencia. La cuestión fundamental es describir correctamente las leyes de evolución del daño, las cuales



deben ser definidas a partir del conocimiento de los fenómenos físicos responsables, en cada caso, de los procesos de daño. (Lemaitre, 1985) explica detalladamente la teoría aplicada a los diferentes fenómenos antes mencionados.

Dentro de este tipo de modelos destaca el de Rousselier, (1987), esencialmente, el modelo supone una función de plasticación compuesta por dos términos aditivos, el primero coincide con la función de Von Mises, mientras que el segundo tiene en cuenta la influencia de la variable de daño en el campo tensional. La variable de daño, se asocia a la porosidad del material y su correspondiente ley de evolución se obtiene mediante las hipótesis de conservación de la masa e incompresibilidad del material no dañado (sometido a deformaciones plástica) durante el proceso de deformación.

Aunque este modelo está menos extendido que el de Gurson, ha sido utilizado por distintos investigadores para analizar el comportamiento en rotura de distintos tipos de probetas (Kachanov, 1996) y en la actualidad, sigue recibiendo una considerable atención, habiéndose propuesto extensiones aplicables a problemas y viscoplásticos así como al problema de la propagación de fisuras en materiales dúctiles (Besson, 2001; Bishop, 1945).

1.8.3. Método de diagnostico y control

Los métodos de diagnostico y control que se utilizan para inspeccionar y determinar si el material o cordones de soldaduras poseen algún defecto interno son:

- Control por ultrasonido
- Control por rayos x
- Control por partículas magnético

Estos métodos han tomado gran auge, fue aplicado por primera vez en la URSS por SOKOLOV en los años 1929-1930, según Piñero (1982).

También la norma europea UNE-EN 10160 marzo (2000), avala el método para el examen por ultrasonido de las discontinuidades internas de los productos planos no recubiertos.



Según la norma NRIB002:98

Al diseñar las piezas y los elementos principales de las calderas y líneas principales de vapor, los valores de las tensiones admisibles se seleccionan según los límites de resistencia a la fluencia lenta a la temperatura de trabajo, a las 100 000 horas de trabajo, para cada acero determinado.

En el curso de la explotación, los aceros que trabajan a altas temperaturas sufren complejos procesos como son: paso de los elementos a la fase carburo, transformaciones de la microestructura, crecimiento de las dislocaciones, empeoramiento de las propiedades mecánicas, deformación permanente por la fluencia lenta, etc. Estos procesos dependen entre otros factores a la temperatura de trabajo, del régimen de explotación, del estado inicial del metal, etc.

El control sistemático de los metales, tanto base como aporte, de los equipos y agregados de los generadores de vapor tiene como objetivo aumentar la confiabilidad y disponibilidad de éstos durante su explotación. Por medio de este control se detectan fuentes de probables fallos, los que pueden ser provocados por disímiles causas, entre ellas:

Desviaciones técnicas impermisibles durante el proceso de fabricación.

Desviaciones técnicas impermisibles durante el proceso de montaje.

Desviaciones técnicas impermisibles durante el proceso de explotación.

1.8.4. Definiciones de partes y mediciones de los generadores de vapor

Superficie de calentamiento: Son aquellas tuberías, serpentines y tubos por cuyo interior se trasiega el vapor y/o agua que se calienta con los productos de la combustión del horno y a lo largo del recorrido de los gases, mediando como superficie de intercambio la pared de los mismos.

Tuberías conductoras de vapor y agua: Son aquellas tuberías o tubos a través de los cuales son trasgados algunos de estos fluidos o su combinación e incluyen todo tipo de tubos o tuberías interconectoras que no forman parte de la superficie de calentamiento y las líneas de agua de alimentar, vapor vivo y vapor que ha realizado trabajo.



Fluencia: Aumento continuado de la deformación de un cuerpo al estar sometido a un esfuerzo mecánico constante.

Fluencia lenta (inglés Creep): Arrastre. Aumento de las deformaciones plásticas de un cuerpo sometido a altas temperaturas y presiones durante un período de tiempo determinado. La magnitud de la deformación depende de la tensión, temperatura y tiempo. Los frecuentes cambios de temperatura, es decir, los frecuentes arranques y paradas de los equipos termoenergéticos aumentan la velocidad de fluencia lenta sobre el valor que le correspondería para la operación estable.

1.9. Conclusiones del capítulo 1

- ✓ El estudio de diferentes fuentes reveló que existen gran cantidad de trabajos realizados sobre la corrosión bajo tensiones en aceros.
- ✓ El análisis bibliográfico referido al mecanismo de rotura, posibilitó profundizar en los elementos teóricos, así como de los factores que favorecen la rotura de los aceros aleados.
- ✓ Se fundamentan las teorías que estudian el comportamiento de la resistencia mecánica de metales sometidos a medios agresivos.
- ✓ Se fundamentan controles y métodos para determinar las desviaciones impermisibles.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La metalografía es el estudio de las características estructurales o de constitución de un metal o una aleación, para relacionar ésta con las propiedades físicas y mecánicas. Sin duda la parte más importante de la metalografía es el examen microscópico de una probeta adecuadamente preparada. Tales estudios proporcionan una abundante información sobre la constitución del metal o aleación investigada.

En la proyección, diseño y explotación de los tubos de las paredes del generador de vapor es necesaria, la realización de experimentos metalográficos. Esta técnica ha sido siempre una potente herramienta para el tratamiento, verificación de hipótesis y la solución a los problemas de averías en elementos y equipamientos industriales.

Como objetivo de este capítulo.

Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema.

2.2. Fundamentación de las propiedades a investigar

Las fallas de equipos que operan a temperaturas elevadas constituyen uno de los principales análisis de estudios de las industrias eléctricas del país, por las grandes pérdidas económicas y los negativos efectos sociales que implican.

En este caso, se requiere de un análisis más completo, ya que las temperaturas y el tiempo afectan la durabilidad de los mismos bajo la acción de los esfuerzos.

Sin embargo, un análisis del tiempo de rotura o falla no está completo sin los consiguientes criterios metalográficos para establecer el mecanismo de la falla inicial, para ello es necesario una apropiada manipulación y selección de las muestras.

Las roturas en los tubos del sobrecalentador y en las paredes del generador de vapor son de constante preocupación debido a las considerables pérdidas económicas y efectos secundarios que implican; por lo que se hace necesario definir las regularidades del comportamiento mecánico de los mismos. Dichas

regularidades se caracterizan por rasgos peculiares de la aleación, el procedimiento de soldadura, el medio corrosivo en el que se encuentra y la variación de dureza producto a elevadas temperaturas.

Lo expuesto trae consigo el empleo de técnicas de ensayos para identificar el carácter de la rotura en los tubos de los sobrecalentadores de vapor (sc) y en las paredes. Para ello se planificaron los experimentos y cálculos siguientes:

2.3. Composición química del acero

En la tabla 2.1 encontramos la composición química del acero aleado.

Acero aleado: Se da el nombre de aceros aleados a los aceros que además de los cinco elementos: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre, contienen también cantidades relativamente importantes de otros elementos como el cromo, níquel, molibdeno, etc., que sirven para mejorar alguna de sus características fundamentales.

Los elementos de aleación que más frecuentemente suelen utilizarse para la fabricación de aceros aleados son: níquel, manganeso, cromo, vanadio, wolframio, molibdeno, cobalto, silicio, cobre, titanio, zirconio, plomo, selenio, niobio, aluminio y boro.

Tabla 2.1. Composición química del acero aleado 15020.

Material	C	V	Mn	Cr	P	Mo	Si
Patrón pared	0,12-0.20	-	0.5-0.8	-	0,02	0.25-0.35	<0.35

2.3.1. Selección y preparación de muestras para el análisis microestructural

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: selección, corte, desbaste, pulido, desengrasado y lavado, las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma (ASTM E 3 – 95 y Norma NC 10 – 56: 86). *NC 10-56:86 y ASTM E3-95*.

1. Selección de la muestra.
2. Toma o corte de la muestra.
3. Preparación de la muestra.
4. Ataque químico de la muestra.

5. Análisis microscópico.
6. Obtención de microfotografías

2.3.2. Selección de las muestras

La selección de las muestras para realizar el análisis microestructural es de gran importancia, se debe garantizar una probeta representativa del material a examinar en el microscopio. Las probetas seleccionadas deben tener las mismas características del metal estudiado y ser útil para el ensayo propuesto.

Según el libro registro de averías de mantenimiento de la CTE Felton, las zonas de roturas más frecuentes en los tubos de las paredes ha sido en tramos rectos y también próximos a curvas, (ver anexo 1) y en el sobrecalentador son los tramos cercanos a codos y en soldadura.

2.3.3. Corte de las probetas

La operación de corte de la probeta se realizó con sierra mecánica o sinfín mecánico, con refrigeración constante para evitar el calentamiento producido por la fricción durante el proceso, y que pudiera provocar transformaciones en la estructura por cambios de fase. Las probetas fueron normadas según norma ASTM E 646 – 00.

2.3.4. Desbaste de las muestras

El desbaste de las muestras se efectúa sobre papeles abrasivos de diferentes grados, colocados sobre discos giratorios. Al pasar de un abrasivo a otro, debe girarse la probeta 90 grados y desbastar hasta que se borren por completo las huellas del abrasivo anterior, teniendo siempre el cuidado de lavar la probeta con agua abundante.

Se aconseja pasar la probeta por toda la serie de abrasivos: 120, 150, 160, 200, 400, 600, 1000, pues eliminar algún abrasivo retarda la operación en vez de acelerarla.

Conviene emplear un papel nuevo para cada probeta, los papeles usados se emplean para finalidades específicas porque sus partículas abrasivas desgastadas tienden a producir distorsión del metal superficial.

También debe tenerse en cuenta que la superficie opuesta de la probeta debe ser paralela para facilitar el soporte en el microscopio.

Al final del desbaste, deben lavarse con agua abundante tanto las probetas como las manos del operador para evitar que las partículas del abrasivo o del metal en la etapa del desbaste pasen a la pulidora lo cual los haría inservibles.

2.3.5. Pulido de las muestras

El pulido de una probeta metalográfica tiene por objeto eliminar de su superficie las rayas finas producidas en la última operación de desbaste y conseguir una superficie sin rayas y con alto pulimento (Kehl, George).

La pulidora metalográfica empleada es marca MONTASUPAL (alemana), la cual está ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM, para lograr el acabado final, en ella se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo (Pasta GOI).a continuación mostramos las probetas que fueron tomadas del metal que ya trabajó en la pared (figura 2.1).



Figura 2.1 Muestras pulidas

2.3.6. Limpieza, lavado y secado de las probetas antes del ataque químico

Después de la adecuada preparación de las superficies, las probetas se lavan con acetona para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir cuidando no frotar la superficie pulida. Posteriormente se limpian con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad (Kehl, George).

2.3.7. Ataque químico de las muestras seleccionadas

Inmediatamente después de la limpieza de las superficies a investigar, se procedió a realizar el ataque por inmersión de las muestras durante 5 segundos con el reactivo nital, al cuatro por ciento (mezcla de cinco mL ácido nítrico (HNO_3) diluido en 95 mL alcohol, (según normas cubanas de ensayo de materiales 04 – 61 / 1984). Después de atacadas, las superficies de las muestras se lavan con agua destilada y posteriormente con alcohol, para finalmente secarlas en aire caliente.

2.3.8. Análisis microestructural por el método de examen microscópico

Para el análisis microestructural se empleó un microscopio óptico binocular, que está dotado de una cámara instalada el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe (2006), que refleja la micrografía en el computador. Para observar las probetas, se nivelaron en un dispositivo con plastilina, según norma (ASTM E 3 – 95; NC 10 – 55: 86 y NC 04 – 77: 86). La muestra de la figura (2.2), con dureza de HB 150 (ASTM E 112), se corresponde con la estructura metalográfica del centro de la muestra patrón del acero 15020 empleado en los tubos de la pared del generador de vapor y en la figura (2.3) se muestra la estructura metalográfica de los tubos del sobrecalentador.

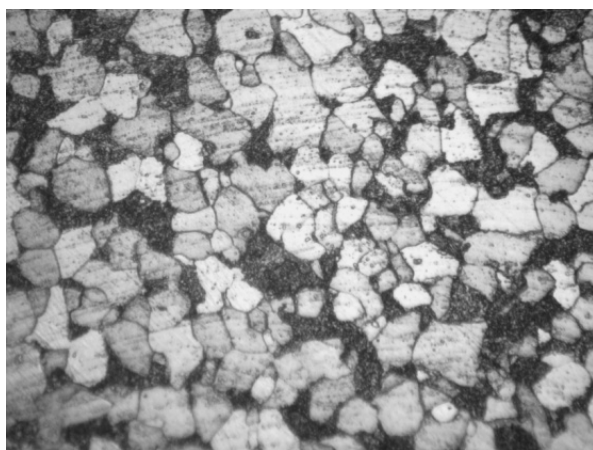


Figura 2.2 Estructura metalográfica 200x

La estimación del grado microestructural del acero de una muestra de un Agregado determinado, se basa en la comparación de la microestructura obtenida de dicha muestra, con una serie de imágenes de microestructuras del referido acero en forma de escala.

El tipo de microestructura de esta escala o las fases que posee esta microestructura, está determinado por las transformaciones que ocurren en el acero durante el proceso de su fabricación incluyendo el tratamiento térmico correspondiente, el cual a su vez le da las características técnicas y propiedades mecánicas que se requieren de él.

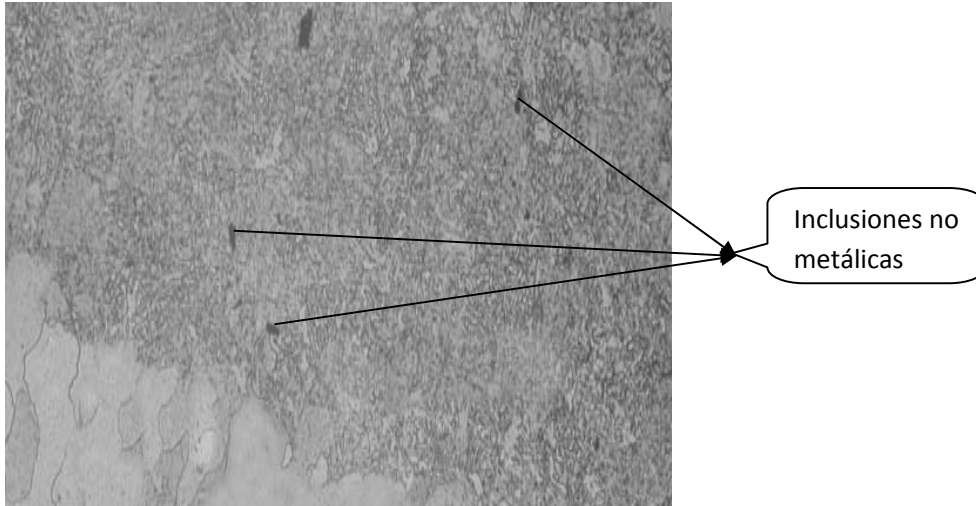


Figura 2.3 Estructura metalográfica 200x

Se aplicaron técnicas de microscopía óptica (MO) con un microscopio óptico NOVEL modelo NIM - 100 de magnificación hasta 800X y cámara acoplada el cual se encuentra en la figura (2.4).



Figura 2.4 Microscopio óptico NOVEL

La observación de la superficie a analizar es necesario fotografiarla para procesar la información. La observación microscópica permite reconocer la presencia de inclusiones no metálicas como sulfuros, silicatos, aluminatos, óxidos, microporosidades, microgrietas y grafito.

2.4. Propiedades mecánicas del acero de baja aleación 15020

Se puede observar en la tabla 2.2 las Propiedades mecánicas a altas temperatura del acero aleado 15020

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas del acero 15020

Propiedades	Unidad	Valor
Dureza	HB	140-180
Resistencia a la tracción	$R_m (N/mm^2)$	460-630
Límite elástico	$R_p (N/mm^2)$	300

2.5. Cálculo de resistencia, Determinación de la presión

Se tiene un contorno cilíndrico cerrado, en el que actúan elevadas temperaturas. El método de cálculo de resistencia de los generadores de vapor se basa en la comparación cuantitativa de la tensión permisible y la tensión originada por la carga que actúa sobre el elemento. Durante los cálculos es necesario considerar los criterios de presión y temperatura de cálculo según generadores de vapor de Beatón, Recio (1994).

Tabla 2.4 Magnitudes empleadas en los cálculos.

Propiedades	U.med.	Magnitudes
Temperatura interior	°C	421
Temperatura exterior	°C	1150
Temperatura de saturación	°C	335
Tensión nominal permisible	Atm.	132
Coeficiente de seguridad	-	0.9
Coeficiente de Poisson	-	0.3
Diámetro interior tubos de la pared	mm	52
Diámetro exterior tubos de la pared	mm	57



Densidad del flujo térmico	10^{-4} W/m^2	17-45
Coefficiente de transferencia de calor	$10^{-3} \text{ W/m}^2\text{°C}$	9.3-17
Modulo de elasticidad	N/mm^2	210
Coefficiente de expansión térmica	10^{-6} °C^{-1}	17.4
Conductividad térmica	$\text{W/m}^2\text{°C}$	16
Radio interior tubos sobrecalentador	mm	11.9
Radio exterior tubos sobrecalentador	mm	15.9
Presión interior en tubos sobrecalentador	N/mm^2	14

$$P_{cal} = P_{sobr} + \sum P + \sum Ph \quad (2.1)$$

Donde:

P_{cal} , Presión de cálculo, MPa

P_{sobr} , Presión en el cabezal de salida del sobrecalentador, MPa

$\sum P$, Pérdidas hidráulicas en los conductos de vapor, el elemento que se calcula hasta el cabezal de salida del sobrecalentador, MPa

$\sum Ph$, Presión hidráulica de la columna de agua situada sobre el elemento, MPa

2.5.1. Temperatura de cálculo en la pared exterior del elemento

Es la temperatura a la cual se escoge la tensión permisible del elemento que se calcula, para los elementos que no reciben calor, la temperatura de cálculo se toma igual a la del medio que circula por ellos, para los elementos que reciben calor, la temperatura de cálculo se obtiene por la ecuación según generadores de vapor de Beatón, Recio (1994).

$$tc = ts.t + q\beta \cdot \left(\frac{1}{\alpha_2} + 2 \frac{\delta_p}{\lambda} \cdot \frac{1}{\beta + 1} \right) \cdot \mu \quad (2.2)$$

Donde:

tc , temperatura de cálculo de la pared exterior del elemento, ($^{\circ}\text{C}$)

$ts.t$, temperatura de la sustancia de trabajo, ($^{\circ}\text{C}$)

q , densidad del flujo térmico que incide sobre el elemento, (W/m^2)

α_2 , coeficiente de transferencia de calor de la superficie interna del tubo a la sustancia de trabajo y se calcula por ecuaciones criterios, $(W/m^2 \cdot ^\circ C)$

δ_p , espesor de la pared, m

λ , coeficiente de conductividad térmica del metal del elemento, $(W/m \cdot ^\circ C)$
coeficiente que tiene en cuenta la distribución irregular del calor por el perímetro de tubo

β , relación entre el diámetro exterior e interior del elemento.

$$\beta = \frac{D_2}{D_1} \quad (2.3)$$

Debido a que el resultado del coeficiente de transferencia de calor es poco confiable y por estos tubos circula un flujo de dos fases cuya calidad varía a lo largo del tubo podemos utilizar ecuaciones simplificadas (2.4) para el cálculo de la temperatura de cálculo, estas ecuaciones se encuentran en el anexo 2. Según generadores de vapor de Beatón, Recio (1994).

$$t_c = t_s + 60 \quad (2.4)$$

Donde:

t_s , temperatura de saturación, $^\circ C$

La temperatura de saturación se tomó de la tabla 6 de fundamentos de las operaciones unitarias de Cabrera y Gandón (2004) se encuentra ubicada en el anexo.

2.5.2. Determinación de la tensión permisible del material

En los cálculos de resistencia es importante la tensión permisible del material (G), la cual se utiliza para determinar el espesor mínimo de la pared del elemento, así como la presión máxima permisible a la que puede someterse el elemento que se calcula según generadores de vapor de Beatón, Recio (1994).

$$(G) = \eta G_p \quad (2.5)$$

Donde:

η , coeficiente de seguridad del elemento, para los elementos que reciben calor

$\eta = 0.9$ según generadores de vapor de Beatón, Recio (1994)

G_p , tensión nominal permisible.

Al no aparecer en la tabla de generadores de vapor de Beatón, Recio (1994) la tensión nominal permisible del acero aleado 15M, tomamos el más próximo, en este caso es el 12XM este valor se encuentra en la tabla 2.1, ya que es el material con el que sustituimos en las averías, este lo encontramos en tabla en anexo 3. de generadores de vapor de Beatón, Recio (1994).

2.5.3. Espesor de la pared del tubo

El espesor de la pared de estos elementos es importante considerarlo ya que son de forma cilíndrica y trabajan a presión se puede calcular según generadores de vapor de Beatón, Recio (1994).por las siguientes ecuaciones:

$$S = \frac{P \cdot D_{int}}{2\varphi(G) - P} + C \quad (2.6)$$

$$S = \frac{P \cdot D_{ext}}{2\varphi(G) - P} + C \quad (2.7)$$

Donde:

D_{int} , diámetro interior del elemento, (mm)

D_{ext} , diámetro exterior del elemento, (mm)

φ , coeficiente de resistencia del elemento, $\varphi = 1$

C , incremento al espesor calculado de la pared, (mm)

2.6. Condición de resistencia

Las ecuaciones (2.2) y (2.6) pueden utilizarse para los elementos que contienen agua, mezcla de agua y vapor (pared de la caldera) si se cumplen las siguientes condiciones de resistencia:

$$\frac{S-C}{D_{ext}} \leq 0.18, \frac{S-C}{D_{int}} \leq 0.28 \quad (2.8)$$

2.6.1. Cálculo de tensiones en el sobrecalentador

También se tiene que, con una relación $\frac{a}{b} \geq 0,75$, el mismo posee un radio interior $a=11,9$ mm y exterior $b=15,9$ mm.

La tensión radial para el sobrecalentador se determina por la ecuación (2.9). (Craig, 2002).

$$\sigma_r = \frac{\alpha E (T_a - T_b)}{2(1-\mu) \left(\ln \frac{b}{a} \right)} \left[\left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \left(\frac{b^2}{r_m^2} - 1 \right) \ln \left(\frac{b}{a} \right) - \ln \left(\frac{b}{r_m} \right) \right] \quad (2.9)$$

Donde:

T_a , temperatura interior, °C

μ , coeficiente de poisson

T_b , temperatura exterior, °C

a , radio interior, (mm)

b , radio exterior, (mm)

α , coeficiente de expansión térmica

E , coeficiente de elasticidad, (N/mm^2)

σ_r , tensión radial, (N/mm^2)

r_m , radio medio de la tubería, (mm)

$$r_m = \sqrt{axb} \quad (2.10)$$

2.6.2. Determinación de la tensión tangencial

La tensión tangencial para el sobrecalentador se determina por la ecuación (2.11). (Craig, 2002).

$$\sigma_z = \frac{\alpha E (T_a - T_b)}{2(1-\mu) \ln \frac{b}{a}} \left[1 - \left(\frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) \ln \left(\frac{b}{a} \right) - 2 \ln \left(\frac{b}{r_m} \right) \right] \quad (2.11)$$

σ_z , tensión tangencial, (N/mm^2)

2.6.3. Tensión equivalente

En los tubos expuestos a altas temperaturas se producen grietas en la superficie exterior como resultado de las tensiones equivalentes que son menores que las tensiones admisibles, las cuales se determinan según (Craig, 2002).

$$\sigma_{eq} = \sigma_r - \nu \sigma_z \leq [\sigma] \quad (2.12)$$

Donde:

$$[\sigma] = 180 MPa$$

ν , coeficiente de relaciones de tensiones admisibles

$$\nu = \frac{[\sigma]_t}{[\sigma]_c} \quad (2.13)$$

Donde:

$[\sigma]_t$, tensión normal admisible a tracción, (N/mm^2)

$[\sigma]_c$, tensión normal admisible a compresión, (N/mm^2)

Debido a que el material tiene un comportamiento igual en ambas tensiones el valor de $\nu=1$

2.6.4. Variación del radio interior

La variación del radio interior se determina por la ecuación (2.14) y (2.15) según (Craig, 2002).

$$\Delta r_1 = \frac{\alpha}{E} \left[P_1 \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \mu \right) - 2 P_2 \frac{b^2}{b^2 - a^2} \right] \quad (2.14)$$

$$\Delta r_2 = \frac{\alpha}{E} \left[2 P_1 \frac{a^2}{b^2 - a^2} - P_2 \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \mu \right) \right] \quad (2.15)$$

Donde:

Δr_1 , variación del radio en el interior del tubo, mm

Δr_2 , variación del radio en el exterior del tubo, mm

2.6.5. Tensión producida por presión de trabajo

Para obtener los valores de tensiones producidas por la presión de trabajo se aplica el método de Craig. Jr 2002.

$$\sigma_z = \frac{P_1 a^2 \left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right) - P_2 b^2 \left(1 + \frac{a^2}{b^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (2.16)$$

$$\sigma_r = \frac{P_1 a^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) - P_2 b^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{b^2 - a^2} \quad (2.17)$$

Donde:

P_1 , presión en el interior del tubo, N/mm^2

P_2 , presión en el exterior del tubo igual a la presión atmosférica. La cual es despreciada.

2.7. Métodos para el control de superficies.

Para la realización del control de metales y la determinación de las desviaciones impermisibles antes y después de las averías se utilizan los siguientes métodos:

Ensayos destructivos.

Son los métodos que conllevan la destrucción total o parcial del elemento a controlar.

Ensayos mecánicos:

Los ensayos mecánicos se realizan a la temperatura ambiente (20°C) y a la temperatura de trabajo del elemento para determinar sus propiedades mecánicas y consta de:

- Ensayo de tracción.
- Ensayo de choque o impacto.

- Ensayo de dureza.
- Ensayos de fluencia lenta.

2.7.1. Control de propiedades químicas

Son los métodos utilizados para determinar la presencia de elementos y compuestos químicos en los aceros, así como sus cantidades y proporciones, son los siguientes:

- Análisis químico cuantitativo.
- Estiloscopía o análisis espectral.
- Análisis de carburos.

2.7.2. Ensayos metalográficos

Son los métodos utilizados para determinar la estructura del acero y otros tipos de defectos con a ayuda del microscopio, son los siguientes:

- Macroestructura. Es el estudio de los metales con aumento de hasta 100 X.
- Microestructura. Es el estudio de los metales con aumentos mayores de 100 X.

En el proceso de determinación del grado microestructural del metal de una zona o muestra de referencia, durante el microanálisis, se valoran los cambios estructurales de la microestructura del metal ocurridos durante su explotación, comparándolos con la imagen de la microestructura que se establece como patrón dentro de la escala microestructural del acero de referencia, y por su grado, se establece el grado microestructural de esa muestra o zona analizada.

2.7.3. Ensayos no destructivos

Son los métodos de control que permiten la explotación posterior del elemento controlado y que no producen ninguna destrucción o alteración de su capacidad de trabajo.

Control por onda de ultrasonido

Este método se basa en las propiedades de las ondas de ultrasonido, con la cual se barre toda la zona a controlar, detectándose la presencia de discontinuidades en el material por el retorno de las ondas al reflejarse en las mismas.

Control por radiografía

Este método se basa en las propiedades de las radiaciones ionizantes, rayos X o gamma, de atravesar los cuerpos sólidos e impresionar las placas fotosensibles.

Los dos métodos anteriores se utilizan para detectar defectos internos, tales como grietas, falta de penetración, poros, inclusiones de escoria, impurezas, falta de fusión, etc.

2.7.4. Control de las superficies

Para este control se utilizan los métodos siguientes:

- Líquidos penetrantes (se recomienda en superficies pulidas).
- Ataque ácido.
- Polvos magnéticos. (se recomienda en piezas de fundición)

Estos métodos se utilizan para detectar defectos superficiales en los elementos controlados.

2.7.5. Control dimensional

Este control se efectúa mediante la medición de las dimensiones de los elementos (diámetro, espesor, longitud, olividad, etc.) verificando si los resultados cumplen con las tolerancias y requisitos de la norma e instrucciones técnicas.

Lo que hace más ventajoso el diagnóstico de los elementos que trabajan a presión en el generador de vapor, de este modo se puede diagnosticar la posibilidad de un fallo en la superficie de un elemento analizado, recomendando así las posibles soluciones al ejecutar la reparación.

2.7.6. Método de control a realizar y plazos

- Horno del generador de vapor

Elemento a controlar	control	Volumen	Plazos	observaciones
Paredes y tubos.	Inspección visual.	Al 100 % de la superficie de las paredes del horno.	Antes del inicio de la explotación.	Se hará énfasis en la detección de vejigas, zonas de corrosión por gases, zonas de corrosión por vanadio a altas temperaturas, otros tipos de



corrosión, salideros, tubos desalineados y pérdidas de soportes y tranques.

Medición diametral.	100 % tubos de las paredes del horno.	Antes explotación.	
	Al 100 % de los tubos de mayor carga térmica en 3 niveles.	A las 8 000, 25 000 y después cada 25 000 horas.	Si fuese necesario se utilizarán cuñas para la separación y medición de los tubos. Se cortarán tramos de tubos de acero al carbono que presenten aumento de diámetro mayores del 3.5 % del diámetro exterior nominal y del 2.5 % para los aceros aleados; o que se le detecten frecuentemente grietas, piteras, salideros o zonas de corrosión intensa. Se enviarán las moquetas al laboratorio para su investigación. Estos tubos serán sustituidos.
Medición de espesor.	Al 50 % de los tubos en la zona de mayor carga térmica y al 10 % de los tubos.	Antes del inicio de la explotación y a las 100 000 horas.	Si se detectan zonas con espesores por debajo del valor mínimo admisible, se ampliará el control al
	Al 20 % de los tubos en la zona de mayor carga térmica en 3 niveles.	A las 8 000, 25 000, 75 000, 125 000 y después cada 25 000 horas.	100 % de los tubos. Se enviarán moquetas al laboratorio para su estudio y respuesta. En base a dicho estudio se determinará la fecha de la próxima medición o la sustitución de los tubos.
Ensayos mecánicos	Al menos de 3 muestras en la zona de mayor carga térmica y no menos de 2 muestras de cada una de las otras	Antes del inicio de la explotación y a las 100 000 y 200 000 horas.	
Análisis químico y metalográfico.			



paredes del horno.

▪ Sobrecalentadores y recalentadores

Tubos y serpentines	Control visual.	Todas las superficies accesibles.	Antes del inicio de la explotación y durante las reparaciones.
Medición de	En el 5 % de las curvas. Cálculo de ovalidad y adelgazamiento.	Antes del inicio de la explotación.	
Espesores.	En el 5 % de las curvas que sean accesibles o zonas cercanas a ellas. Cálculo de ovalidad y adelgazamiento.	Cada 50 000 horas.	
	En el 5 % de los tubos de salida y de los serpentines de los sobrecalentadores que trabajan a una temperatura de 450 ° C en adelante.	Antes del inicio de la explotación y cada 25 000 horas.	Se sustituirán los tubos y serpentines cuyo diámetro presente un valor 2.5 % superior al diámetro nominal. Se enviarán moquetas al laboratorio para su estudio. Se aumentará el control al 100 % al llegarse a dicho valor.
Estiloscopía.	Al 5 % de los serpentines de acero aleado.	Antes del inicio de la explotación.	Si se detectara algún acero inadmisibles, se aumentará el control al 100 %.
Metalografía, ensayos mecánicos y análisis químico.	No menos de 2 muestras de cada paso de sobrecalentamiento o recalentamiento.	Antes del inicio de la explotación y posteriormente cada 50 000 horas de explotación.	

Estos métodos de control antes y después de las averías se deben realizar como formas de diagnóstico en el control de las superficies de intercambios, estas fases de trabajo o investigaciones preliminares las encontramos en los anexos 5-9, en estos se recogen unas series de datos a tener en cuenta para la investigación.



2.8. Conclusiones del capítulo 2

Se han fundamentado las propiedades a investigar a partir de las necesidades de la descripción y caracterización del acero al carbono de baja aleación sometido a temperaturas extremas, para definir sus principales regularidades a través del empleo de métodos científicos de investigación.

La realización de los ensayos permite obtener información de la composición química, la dureza del material analizado. Además posibilitan establecer el Comportamiento microestructural del acero a elevadas temperaturas.

Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una base experimental actualizada, tecnologías, software y equipamiento que garantizan la precisión y fiabilidad de los resultados.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental y a partir de los mismos, las expresiones matemáticas que describen las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero, durante el proceso de evaporación del vapor. Así mismo se revela a partir del análisis metalográfico y los modelos experimentales obtenidos.

Finalmente, se realiza una evaluación de las causas que originan la rotura en los tubos de la pared y del sobrecalentador del generador de vapor.

El **objetivo** del capítulo es:

Realizar la valoración de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.2 Resultado del análisis químico

El promedio de la composición se muestra en la tabla 3.1. Como se observa, la composición química del material está dentro del rango establecido para la aleación, el que se corresponde con el acero 15020 de acuerdo con las especificaciones de norma checa y en la (DIN15MO3).

Tabla 3.1. Composición química del acero 15020 (15mo3)

Material	C	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Si
Probetas pared	0,20	0,67	0,18	0,2	0,1	0,34	0,20
Probetas Sc	0,20	0,46	0,23	0,08	0,77	0,59	0,23

3.3 Resultado del análisis metalográfico

En las micrografías, se muestran imágenes de la estructura metalográfica presente en la probeta patrón antes de ser sometida al proceso de explotación, arrojó una estructura típica del acero al carbono bajo aleado, como se observa en la figura 3.1. La micrografía revela la presencia de una matriz ferrítica con bordes de los granos bien definidos.

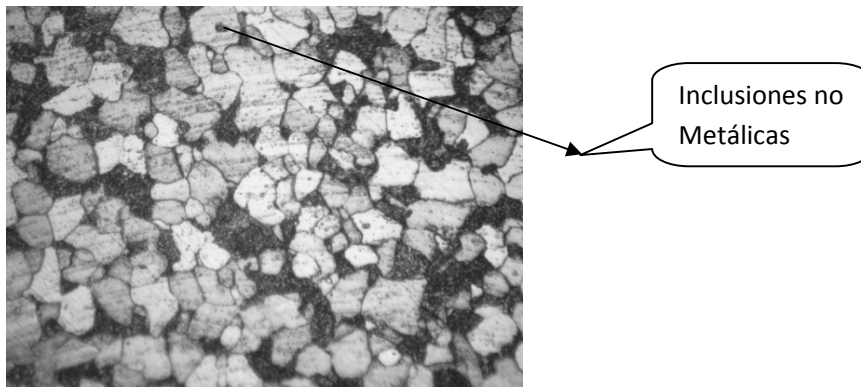


Figura 3.1 Estructura metalográfica del acero de baja aleación.

En la micrografía, se muestra la imagen de la estructura metalográfica presente en la probeta sometida al proceso de explotación, la misma arrojó una estructura típica del acero al carbono bajo aleado, como se observa en la figura (3.2).

En la figura se muestra la microestructura del acero 15020, donde se observa una estructura metalográfica de ferrita + perlita a 200x, típico de los aceros hipoeutectoide con (0.20% de c), con la existencia de inclusiones no metálicas, fases secundarias en la estructura donde comienza la aparición de sorbitas de diferentes tamaños, en relación al aumento de la matriz ferrítica (fase de Ferrita). y configuración en la muestra, grano más pequeños, engrosamiento en la frontera del grano donde hay mayor acumulación de defectos y donde el valor de la energía libre del sistema se eleva considerablemente, lo trae consigo un aumento de las tensiones a nivel cristalino.

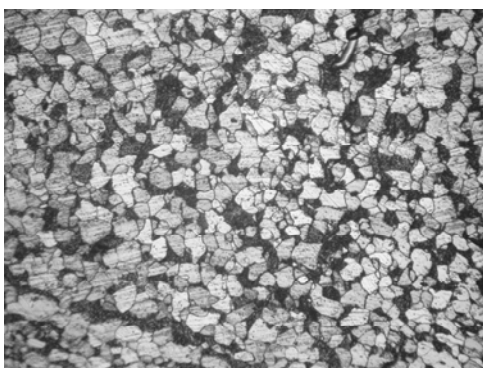


Figura 3.2. Estructura metalográfica del acero de la pared.

En la figura 3.3 se observa el relieve de la tubería del sobrecalentador, en las micrografías, se muestran imágenes de la estructura metalográfica presente en la probeta patrón antes de ser sometida al proceso de explotación, la misma arrojó una estructura típica del acero de baja aleación, la micrografía revela la presencia de una matriz austenítica con presencia de aisladas inclusiones y bordes de los granos bien definido. Se puede apreciar la existencia de inclusiones no metálicas de forma acicular, fases secundarias en la estructura de diferentes tamaños y configuración en la muestra.

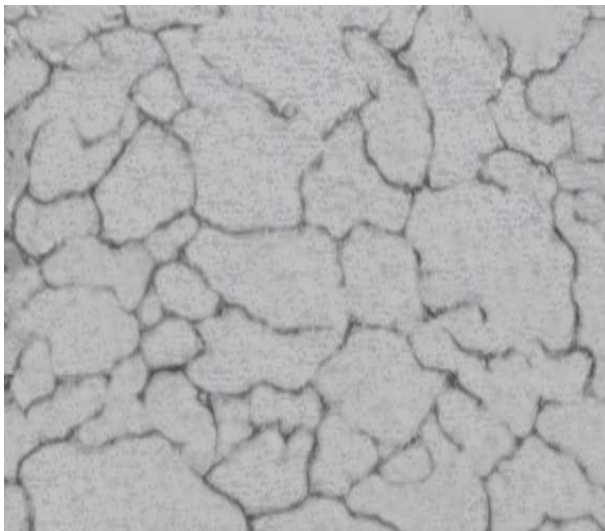


Figura 3.3 Estructura metalográfica del acero del sobrecalentador.

La figura 3.4 muestra una estructura transitoria austenita + ferrita, donde la martensita se descompuso para formar sorbitas o carburo fino coalescido en una matriz de ferrita.

En la parte superior de la figura se observa el cordón de soldadura, el cual presenta dos tipos distintos de estructura, siguiendo una orientación definida.

Como se puede observar la estructura austenítica del material base, se ve afectada significativamente por las altas temperaturas que se alcanzan en la zona

afectada por el calor (ZAC). La austenita es de alta resistencia a la tensión, al impacto y al mismo tiempo dúctil, pero su capacidad de resistencia disminuye al verse afectada por las altas temperaturas.

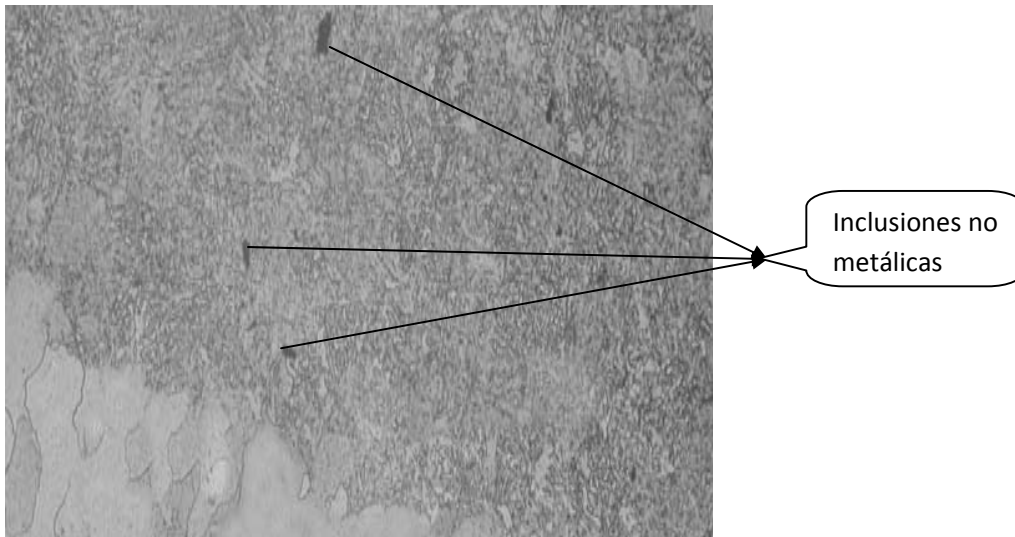


Figura 3.4 Estructura metalográfica de la zona de influencia.

El resultado obtenido en la microestructura para la muestra (3.4), se observa que presentan dos tipos de estructuras: una de ellas acicular, donde los granos disminuyen el tamaño en comparación con la muestra patrón del sobrecalentador.

Cuando la red de carburos es continua, la envoltura empobrecida en cromo alrededor de los granos es atacada selectivamente, coincidiendo con lo planteado por (Lefèvre, 1993 y Davis, 1997), el cromo presenta otro inconveniente desde el punto de vista de la soldabilidad operatoria, y es que forma óxido de cromo, favoreciendo la corrosión intergranular como se observa en la figura (3.5).

En el peor de los casos, la capa empobrecida en cromo se corroe completamente y los granos se separan del metal base. En este caso el material queda sensibilizado, es decir existen áreas empobrecidas en cromo que puedan ser atacadas en estos ambientes corrosivos.

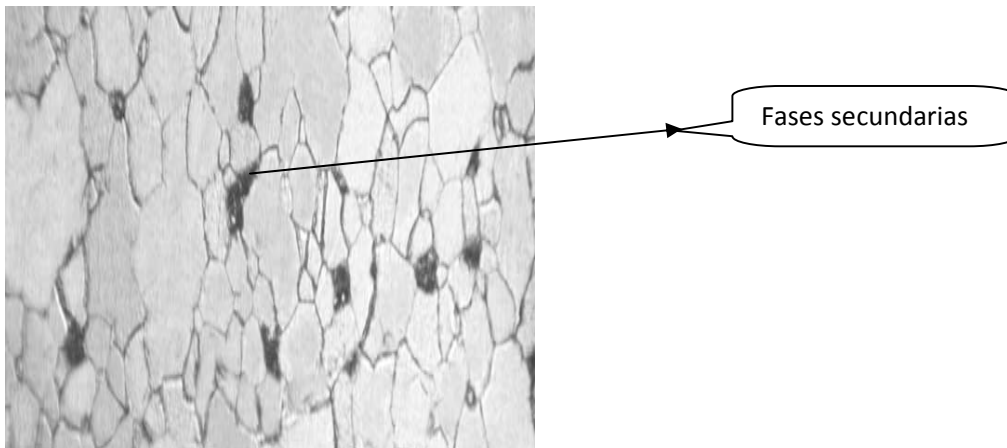


Figura 3.5 Estructura metalográfica del acero del sobrecalentador

Como ya ha sido descrito, las probetas de acero de baja aleación utilizadas en el trabajo experimental, muestran en su estructura inclusiones no metálicas de forma acicular, y mallas de carburos por la frontera de sus granos.

La cantidad de Sorbita y de Perlita es ínfima, generalmente en los bordes del grano austenístico. Según las referencias (Hale, 2001; Mast Home Page, 2001, Callister, 1999, Norma NEIB 1098-040:2002), la frontera del grano es el sitio de mayor acumulación de defectos y donde el valor de la energía libre del sistema se eleva considerablemente. Esta elevación de la energía libre, trae consigo un aumento de las tensiones a nivel cristalino.

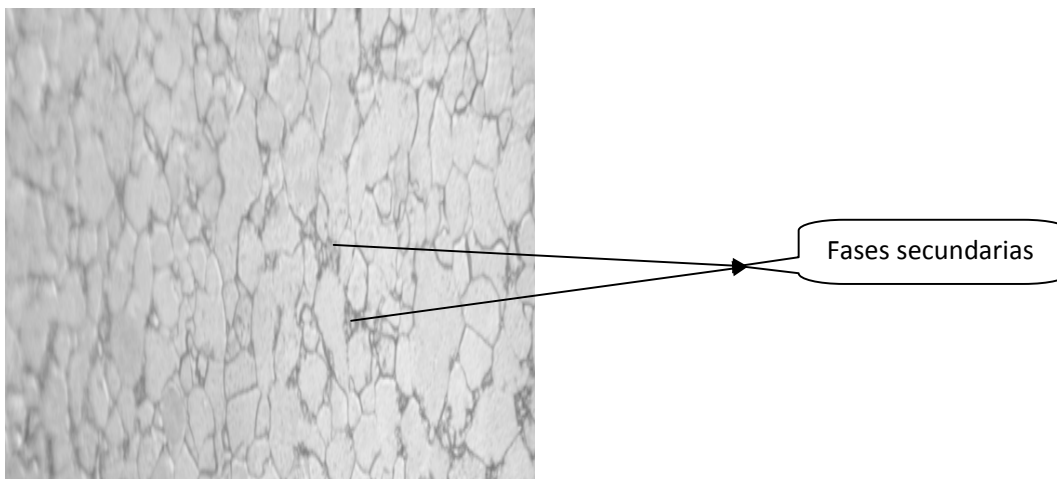


Figura 3.6 Muestra deformada plásticamente del acero del sobrecalentador

Según Callister, (1999), la causa por lo que una disminución del tamaño del grano trae como consecuencia un aumento de la dureza de las fases metalográficas, se debe a dos motivos. La primera es que, al disminuir el tamaño del cristal aumentan el número de fronteras del grano en un mismo volumen (figura 3. 6); esto trae como consecuencia una elevación de las tensiones a nivel cristalino. La otra causa es que, en los metales y aleaciones policristalinas, los bordes de los cristales constituyen un obstáculo, en el que se acumulan las dislocaciones.

3.3.1. Medición de espesores en la superficie de donde se tomaron las muestras (mm)

Las diferencias de espesores en las áreas cercanas a las averías, tomadas de la mocheta colapsada y medición de dureza (HV) de las probetas en la pared se encuentran en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Medición de espesores y dureza en el material estudiado.

Superficie	N°	medición	Dureza HV	Superficie	N°	Medición
Pared	1	4.85	140-150	Sobrecal.	1	3.04
	2	4.73	130-136		2	2.84
	3	3.82	130-134		3	3.10

Estos valores demuestran que hay relación entre la presión y la variación de temperatura, a mayor cantidad de variaciones de la temperatura, mayor es la deformación y mayor posibilidad de que colapsen los tubos.

3.4. Resultados del cálculo de resistencia mecánica

La presión de cálculo, se determina a través de la ecuación (2.1), según “Generadores de Vapor”. Este valor es tomado de las “instrucciones para el régimen de la caldera de 855T/H, 525/525°C”, $P_c = 14 \text{ MPa}$.

La temperatura de cálculo, puede determinarse con ayuda de la ecuación (2.2), en la práctica la misma es determinada por la ecuación simplificada (2.4), $t_c = 460^\circ\text{C}$.

El espesor de la pared calculado por la ecuación (2.6) es de $S = 6\text{mm}$. Lo que se corresponde con el espesor de montaje, aunque en algunas zonas la medición de espesor está entre $S = 5,8 - 4,2\text{ mm}$, aún permisibles.

La tensión permisible del material según la ecuación planteada (2.5) es de $(G) = 12,5\text{MPa}$,

La ecuación de condición de resistencia se cumple para la pared del elemento de la ecuación (2.8) y nos permite conocer que es menor, $0,1 \leq 0,18 ; 0,1 \leq 0,28$ en ambos casos, lo que no sobrepasa el límite de resistencia.

Tenemos que la tensión radial y circunferencial provocada por la temperatura según las ecuaciones (2.9) y (2.11) en el sobrecalentador respectivamente son de $\sigma_r = 150\text{N/mm}^2$ y la tensión circunferencial es de $\sigma_\theta = -0,59\text{N/mm}^2$

La condición de resistencia planteada en la ecuación (2.12), permite conocer los valores de la tensión normal máxima generada por la temperatura de trabajo, lo que demuestra que los máximos son $\sigma_{eq} = 88,5\text{N/mm}^2$ este alcanza el 45% de las tensiones de cadencia mínima del material objeto de estudio.

$$\sigma_{eq} = 88,5\text{N/mm}^2 < [\sigma] = 180\text{MPa}$$

Las deformaciones radiales en el interior y exterior del sobrecalentador se determinan por las ecuaciones (2.13) y (2.14), respectivamente, cuyos valores son $\Delta r_1 = 2,7\text{mm}$, $\Delta r_2 = 2,6\text{mm}$ las deformaciones radiales interior y exterior no alcanzan valores tan significativos, pero están dentro de los límites, estas deformaciones pueden comenzar a ser mayores si el generador tiene varias salidas repetidas por emergencia, no tomando en cuenta los valores de presión en el exterior del sobrecalentador.

Sin embargo la deformación radial en el interior del sobrecalentador alcanza valores significativos, ($\Delta r_1 = 2,7mm$), en comparación con los del exterior, ya que en el interior del tubo están las mayores presiones, ($13,9 - 15,87 MPa$) esto genera que en determinadas secciones del sobrecalentador de vapor aparezcan cambios de forma, aumento de las deformaciones plásticas de la superficie sometida a altas temperaturas y presiones durante un período de tiempo.

La magnitud de la deformación depende de la tensión, temperatura y tiempo, Las variaciones de temperatura, producto a los frecuentes arranques y paradas del generador de vapor, ver anexo 13. Por lo que se puede afirmar que aunque los valores de esfuerzos obtenidos por métodos analíticos no alcanzan las tensiones límites, son considerados peligrosos, debido a la variación de temperatura a la cual trabajan las superficies de intercambio del Generador de vapor.

La condición de resistencia planteada en la ecuación (2.9), permite conocer los valores de la tensión normal máxima producto de la presión de trabajo, a través de ella podemos plantear, que la rotura en las tuberías no es producto a las cargas externas, sino las producidas por los esfuerzos combinados (presión -temperatura) pueden alcanzar la mitad de la tensión admisible, por consiguiente para materiales que trabajan a temperaturas que varían entre (415 - 750) °C estos valores de tensiones son los suficientemente grandes para ocasionar la rotura.

$$\sigma_{eq} = 63,5N/mm^2 < [\sigma] = 180MPa$$

Esto trae consigo que las variaciones de temperatura en el rango de trabajo expuesto provoquen apariciones de grietas, discontinuidades en el material, tanto externas como internas a medidas que se precipiten los metales aleados con el carbono en los bordes del grano de la estructura, estas variaciones y defectos que provocan las roturas, pueden ocurrir en todas las superficies de intercambio de los generadores de vapor.

En el anexo (13) se demuestra gráficamente la relación entre la presión de trabajo y la temperatura máxima admisible. El agregado fabricado de este material está limitado a operar a temperaturas inferiores a 496 °C cuando va a estar sometido a las presiones de trabajo de nuestros generadores de vapor (135-140 atm.). Valores superiores de temperatura ocasionan deformaciones plásticas que conducen a las fallas del mismo.

3.6. Valoración económica

Cuando se realiza una parada por avería, el tiempo mínimo de parada de la caldera es 24 horas como promedio para el enfriamiento y 24 horas para realizar el cambio, Lo que imposibilita la generación aproximada de 41040 tonelada de vapor sobre calentado.

Un factor negativo e importante a considerar, son los gastos por concepto de reparación. Según las estadísticas, durante una parada se sustituye un promedio de 6 m de tubo de acero de baja aleación 15020 (15Mo 3) en la pared de la caldera o se cambia el tramo del sobrecalentador cuando este lo permite, generando un gasto de 80,1465 CUC por tubo, además se usan 5 kg de alambre 80S-D2, con un costo de 22,25 CUC y electrodo 7018-A1, con un costo de 8,9571 CUC, en oxígeno y acetileno 53,67 CUC y en mano de obra 764,17 en MN ya que la unión pone el respaldo en divisa, representando un total de 165,0236 CUC.

Tabla 3.2. Gastos por concepto de reparación de averías.

Código	Descripción	UM	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Gp. VIII	Soldador	hh	24	2,04	48,96
Gp V	Soldador	hh	24	1,90	45,60
A	Tubero	hh	24	2,12	50,88
B	Tubero	hh	24	1,90	45,60
Total MN					764,17
80S-D2	Alambre	Kg	5	6,90	22,25
7018 A1	Electrodo	kg	5	3,648538	
A213T1	tubo	u	1	80,1465	80,1465
	Acetileno	b	1	28,602	28,602
	Oxígeno	b	2	25,068	50,136
Total CUC					181,1345



Las salidas de líneas de un bloque de la termoeléctrica Lidio Ramón Pérez de imprevisto quita el 13% de energía disponible, obligando al país a utilizar los grupos emergentes (fuel oil y diesel), lo que hace que la generación sea más costosa para el país, ya que la termoeléctrica de Felton consume el crudo nacional que abarata el costo del MW y los grupos emergentes trabajan con fuel oil y diesel.

3.7. Análisis medio ambiental

Calidad del aire en el entorno de la Empresa Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”. Los generadores de vapor de la Empresa Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez” expulsan los gases por una chimenea de 150 m de altura y 6.72 m de diámetro.

La zona de ubicación de la planta está poco poblada, siendo los núcleos poblacionales más cercanos los de Felton, (ubicado al norte, a unos 2 km, aproximadamente de la planta, aunque existe una población poco densa que se extiende desde ahí hasta una distancia de unos 500 metros de la misma) y Cuatro Caminos, (ubicado aproximadamente a unos 2.5 km al Sur de la planta).

La ocurrencia de los vientos en las direcciones Norte y Sur, que son las que dirigen los gases hacia los poblados antes mencionados, tiene una frecuencia de ocurrencia media anual de 1.8 y 1.6 %, respectivamente. En la zona ubicada al Oeste y Oeste-Suroeste de la Empresa Termoeléctrica, sobre la que influyen los vientos predominantes no existen objetivos significativos que puedan verse afectados por las emisiones de Empresa Termoeléctrica.

La valoración de las afectaciones sobre la calidad del aire en los alrededores de la Empresa Termoeléctrica se realiza a partir de la determinación de la concentración de contaminantes expulsados a la atmósfera por la chimenea y de la correspondiente concentración que provocan los mismos en el aire a nivel del suelo en distintos puntos de la zona de ubicación, como resultado de la dispersión de estos contaminantes en el aire.



Los puntos fundamentales que se consideraron en el estudio correspondieron a los núcleos poblacionales más cercanos y específicamente el poblado de Felton.

La protección del medio ambiente se ha convertido, en los últimos años, en una de las cuestiones que más inquietan a la humanidad. Los adelantos técnicos de que dispone el hombre para explorar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población, han dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad, tales como: el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, los ruidos y la pérdida de los valores estéticos del medio circundante entre otros.

No es por lo tanto casual que las organizaciones científicas, sociales, políticas, los estados y gobiernos de muchas partes del mundo se hayan preocupado por tomar medidas que de una forma u otra, están dirigidas a garantizar un uso racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente.

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues en este medio es donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentran los vapores, ruidos, gases etc.

A partir del proceso de generación de vapor en la termoeléctrica se generan contaminantes que causan afecciones respiratorias al personal que opera la planta y la población que vive en las áreas circundantes, así como daños al ecosistema, entre ellos se encuentran las cenizas, el ruido, los aceites, el calor y los gases producto de la combustión.

De los gases productos de la combustión los elementos más nocivos son:

Los óxidos de azufre: Durante el proceso de quemado de un combustible se forma el SO_2 y en menor medida el SO_3 . Sus cantidades dependen del contenido de azufre en el combustible.

Los efectos nocivos más importantes de estos óxidos son:



- ❖ Afectaciones en las vías respiratorias de los seres humanos y animales.
- ❖ Formación de lluvias ácidas con graves consecuencias ecológicas.

El monóxido de carbono: (gas incoloro e inodoro) es el resultado de una combustión incompleta de los elementos en los combustibles orgánicos, por ello la magnitud que se emite a la atmósfera, depende esencialmente de la calidad con que se efectúe el proceso de combustión.

Los efectos nocivos más importantes son:

- ❖ Afectaciones a la capacidad respiratoria de personas y animales.
- ❖ Creación de stress psicológico y alteración de las habilidades motoras.

Los óxidos nitrosos (NOx): Son el resultado de la combustión del nitrógeno del combustible y del aire. Este término incluye un alto número de especies gaseosas, pero las más significativas, según las cantidades emitidas son: el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido nítrico (NO). De acuerdo al nivel de nocividad el más peligroso de los dos resulta el NO₂.

Los efectos perjudiciales más relevantes son:

- ❖ Creación de desórdenes respiratorios en seres humanos y animales.
- ❖ Reducción de la visibilidad por adsorción del espectro visible para el hombre.
- ❖ Afectaciones a las plantas por lluvias ácidas.
- ❖ Aceleración de la corrosión y la degradación material.
- ❖ Contribución a la formación del smog sobre las ciudades.
- ❖ Se le asocia también con la formación de ozono en las zonas bajas de la atmósfera. El cual resulta un tóxico para el hombre.
- ❖ Se le atribuyen también propiedades cancerígenas.

Como elemento fundamental para reducir la contaminación de la atmósfera con los gases productos de la combustión y su efecto en la población circundante está, además de realizar la clasificación exhaustiva de los desechos producidos durante el mantenimiento de las calderas para su posterior tratado y neutralización.



3.8. Conclusiones parciales del capítulo 3

- En los tubos del sobrecalentador y en la pared del generador de vapor, la zona afectada es relativamente tolerante al crecimiento del grano y a la precipitación de fases frágiles e intermetálicas que provocan la aparición de grietas y la rotura de los mismos.
- El análisis metalográfico demostró que las estructuras mostradas presentan transformaciones que pueden afectar la resistencia del material a las temperaturas expuestas.

CONCLUSIONES GENERALES

- El análisis metalográfico, permitió determinar que se produce la reducción del tamaño de grano, así como variaciones en la dureza, desde 130HV hasta 150HV, en la zona de colapsada, presencia de grietas internas y formación de fases secundarias.
- La distribución de tensiones, realizada a partir de los cálculos y las características que presenta la microestructura de la probeta ensayada, permite observar que se origina el desplazamiento del material por deformación plástica
- Los cambios bruscos en la temperatura de operación disminuyen las propiedades elástico- plásticas del material de los tubos objeto de estudio, favoreciendo la propagación de grietas generadas durante el proceso de soldadura y la disminución de la resistencia a la corrosión en las zonas afectadas térmicamente,
- Las variaciones de temperatura y tensiones ocasiona, además, expansiones y contracciones continuas del material, originando que en la estructura del elemento los defectos internos propios de fabricación del material precipiten en fases secundarias duras, sobre todo en la dirección longitudinal de la línea de laminación.

RECOMENDACIONES

1. Recomendamos el empleo de aditivo base Boro (sofft free), ofertado por la firma Coreana AMPELOS, con la finalidad de crear una capa de Ferrato de Boro que difunde entre los átomos de la superficie del metal de los tubos protegiéndolos contra la oxidación y prolongando de esa manera los mantenimientos y la vida útil del agregado.
2. Controlar en cada mantenimiento si la substancia añadida como aditivo esta cumpliendo con la función, por medio de análisis metalográficos.
3. Realizar periódicamente un control in situ de la microestructuras, en paradas que lo permitan.
4. Trabajar en función de mejorar en la operación de regulación de frecuencia de la unidad para evitar el deterioro de los tubos.

BIBLIOGRAFÍA

1. AVERY H.S. Materials for de Mining Industry Climax Molybdenum Co., Vail, CO, 43-77, July 1974.
2. ANSYS. Versión 12.0. 2011. Users Guide. Swanson Analysis Systems, Inc.
3. APRAIZ J. Aceros Especiales, Editorial Dossat S. A., Madrid 1975
4. BESSON, J., STEGLICH, D., Brocks, W., Modeling of crack growth in round bars and plane strain specimens, International Journal of Solids and Structures 38 (2001) 8259{8284.
5. BONIFAS E.A. Finite Element Analysis of heat flow in single-pass arc welds. Welding Journal. May 2000.
6. BORENSTEIN, S. W. Microbially influenced corrosion handbook. Woodhead, Cambridge. 1994.
7. BURSTOW, M.C., Howard, I.C., Predicting the effects of crack tip constraint on material resistance curves using ductile damage theory, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 19 (1996) 461{474.
8. BISHOP, R.F., HILL, R., MOTT, N.F., The theory of indentation and hardness tests, Proceeding of the Physical Society 57 (1945) 147{159.
9. BÄAKER, M., RÄOSLER, J., SIEMERS, C., A finite element model of high speed metal cutting with adiabatic shearing, Computers and Structures 80 (2002) 495{513.
10. BELZUNCE F.J. Aceros y Fundiciones: Estructuras, Transformaciones, Tratamientos Térmicos y Aplicaciones Universidad de Oviedo, 2001.
11. CALLISTER W.D. Ciencia e Ingeniería de los Materiales I Ed. Reverté, S.A., 1999.
12. CALLISTER, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7. 1999.
13. CABRERA E., GANDON J. Fundamentos de las operaciones unitarias 2004
14. COLECTIVO DE AUTORES. Generadores de vapor .Editorial Pueblo y Educación .Ciudad de la Habana, 1970 .520 p
15. CRAIG, JR. Mecánica de Materiales. Departamento de Ingeniería Mecánica.

Universidad de Utah. Ed. Prentice Hall. Segunda Edición 2002, C-267-480137.

16. DAVIS J. R. Heat-Resistant Materials (American Society for Metals, Specialty Handbook, U.S.A. (1997).

17. DOGAN Ö.N., HAUKE J.A., Laird II G Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons Metallurgical and Materials Transactions A; Vol.28A, June 1997.

18. FERNÁNDEZ DÍAS, P. Centrales térmicas. <http://libros.redsauce.net/>

19. <http://www.arqhys.com/html.rincondelvago.com/generacion-de-vapor>.

20. GARCÍA, J.; VILLA, G.; HERNÁNDEZ, L.; CASTILLO, M. 2007. La precipitación de carburos intergraníticos y su efecto en las propiedades mecánicas de un acero inoxidable austenítico tipo 310. 8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Del 23 al 25 de Octubre de 2007. Cusco. Colombia.

21. GORDÓN J., MELIÁN M. C. Metales para instalaciones termoenergéticas 1984

22. GOLDAK J., MOASHI G. Numerical Aspect of modelling weld. Moashigu, Carleton University. ASM Handbook, Vol 6 Welding, Brazing and Soldering.1999.

23. JACUINDE A., ARIAS L., AND HERNANDEZ B. Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Iron Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 12(4), p.371-382, August 2003.

24. KACHANOV, L.M., Time of the rupture process under creep conditions, Izv. Akad. Nauk. S.S.S.R. Otd. Tekh. Nauk 8 26{32.

25. Kehl, George; Fundamentos de la práctica metalográfica.

26. KHANNA A.S., High Temperature Oxidation and Corrosion ASM International, United States, 2002.

27. LAI, G. Y.: Heat Resistant Materials for Furnace Parts, Trays and Fixtures: Heat treating. ASM Handbook, Ohio: ASM International Vol.1. 1992. Págs: 510-518.

28. MANUAL DE OPERACIONES DE LA CTE, 2001

29. MATOS, R.; BARBADOS, I.; NAVARRO. P., Corrosión en generadores de vapor en la refinería Hermanos Díaz. XXIII (2) 23 - 30, 2003.

30. MEJIA I.; MALDONADO C. Determinación de Esfuerzos Residuales en la soldadura de placas de acero Inoxidable austenítico mediante el Método de Hole

- Driling. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michuacana de San Nicolás de Hidalgo. XV congreso Nacional de Soldadura. Querétaro, México.2004.
31. MEJÍA, C.; LOUBERT, R.D.; *et al.* S31ago, Universidad Tecnológica de la Mixteca. “Determinación de esfuerzos residuales generales durante la soldadura de placas de acero inoxidable austenítico mediante el método de Hole Drilling”, según norma ASM 837-99, p.12, 2006.
32. MEYER, H. J. Grietas Laminares en Construcciones Soldadas. II Conf. On Significance of Defecte in Welds, Welding Inst. London.1968.
33. NANGEL, D. Tensión y propiedades de deformación de aceros estructurales en la dirección del espesor. Metal Const. Nro 2 , Vol. 64. 1969.
34. NICHOLLS, D. M.; Grietas laminares en Aceros Laminados en Caliente. Brit. Welding Journal. Nro 3, Vol. 15. 1968.
35. NORMA CUBANA: NC 10-56:86. Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo.
36. NORMA CUBANA: NC 04-61:84. Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo.
37. NORMAS INTERNASIONALES:
- ASTM E 3-95. Preparation of Metallographic Specimens
 - ASTM A 297-95. Heat-Resistant Cast Alloys
 - ASTM E 384-89. Test Methods for Microhardness of Materials
 - ASTM Wegst, 1995 DIN 1.4541 laminado austenítico.
38. PÉREZ L. Generadores de vapor 1972
39. RECIO R., BEATÓN P. Generadores de vapor. Ediciones ISPJAN.
40. ROUSSELIER, G., Ductile fracture models and their potencial in local approach of fracture, Nuclear Engineering and Design 105 (1987) 97{111.
41. RODRÍGUEZ, H. “*Metalurgia de la soldadura*”. Editorial Pueblo y Educación 1987. 613 pp.
42. SMITH W. F. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales Mc Graw Hill, Madrid 1998.

Anexo 1

Fractura del tubo de la pared de la caldera



a.



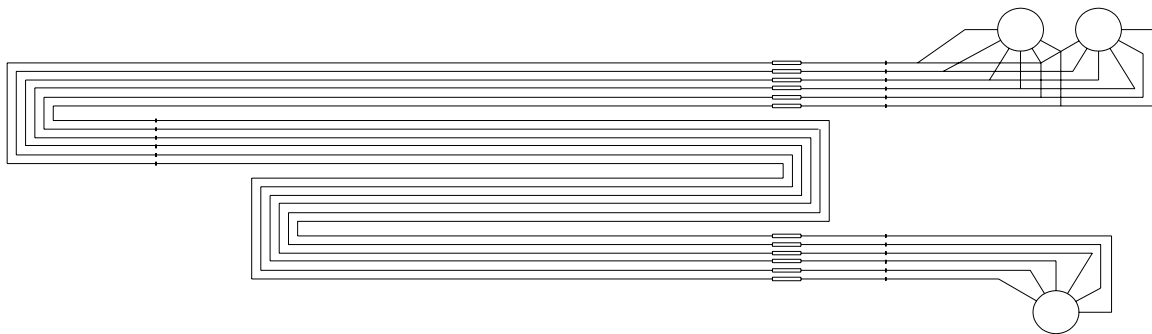
b.

Anexo 2

Sobrecalentador averiado



Codo fracturado



CARACTERISTICAS DE LAS TUBERIAS	
Superficie (m ²)	2041
Pcal. (MPa)	15,49
Tcal. entrada (°C)	455
Tcal salida (°C)	482
S min., ø 32x3,2 (mm)	2,1
S min., ø 32x3,6 (mm)	2,27
S min., ø 38x4 (mm)	2,71
S cal, ø 32x3,2 (mm)	2,84

Anexo 3

Ajuste del equipo para barrido de superficie.

OPERATOR: EDDY E GUERA TAMAYO INSTRUMENT SN: USN50

CODE:1 PROBE SN:97-8537

LOCATION: CAL BLOCK SN: PATRON ESCALONADO Y V1

JOB NAME:

TEST COMMENTS: AJUSTE DEL EQUIPO PARA DISFERENTES ESPESORES HASTA 50 MM .

SIGNATURE: _____ DATE: _____

8.0 dB

CAMPO: 50.0 mm VEL.MAT: 5415 m/s RETARDO: 0.367 us

EMISOR: HIGH MEDICION: 0 - 1 UMBR.-a: 40 %

SUPRES: 28 % MODO MED: PICO a-INICIO: 5.5 mm

RECTIF: COMPLETA ASCAN: HOLLOW ANCH.-a: 12.3 mm

UMBR.-b: 30 % CERO us: 0.338 LLAMAR: OFF

B-INICIO: 10 % MEMO.: OFF J DATOS: 7

ANGULO: OFF VALOR X: 0.0 mm

ESPESOR: 25.0 mm

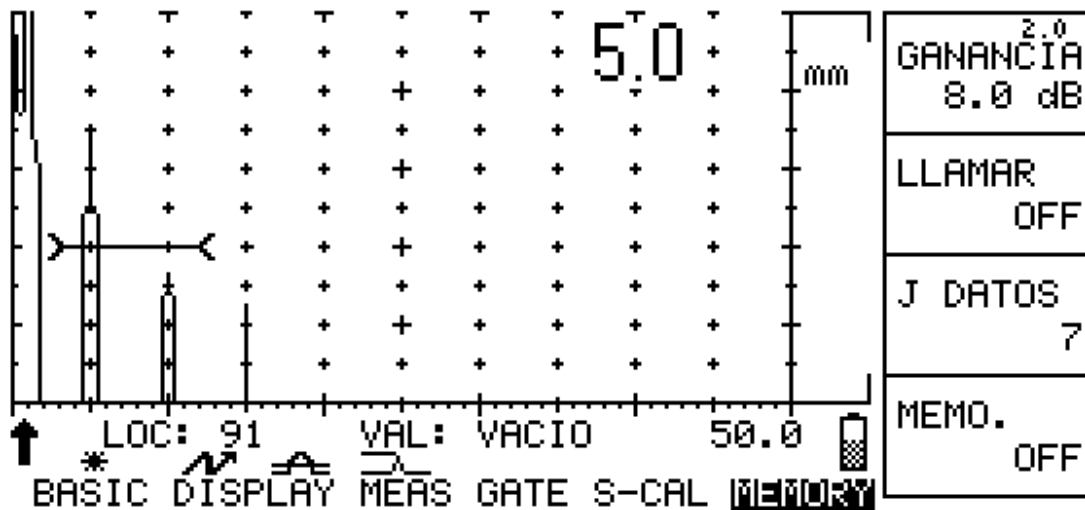
AMPLITUD: % SCREEN HT

MODO CONGELA: FREEZE ALL

VEL. #1: 5918 m/s

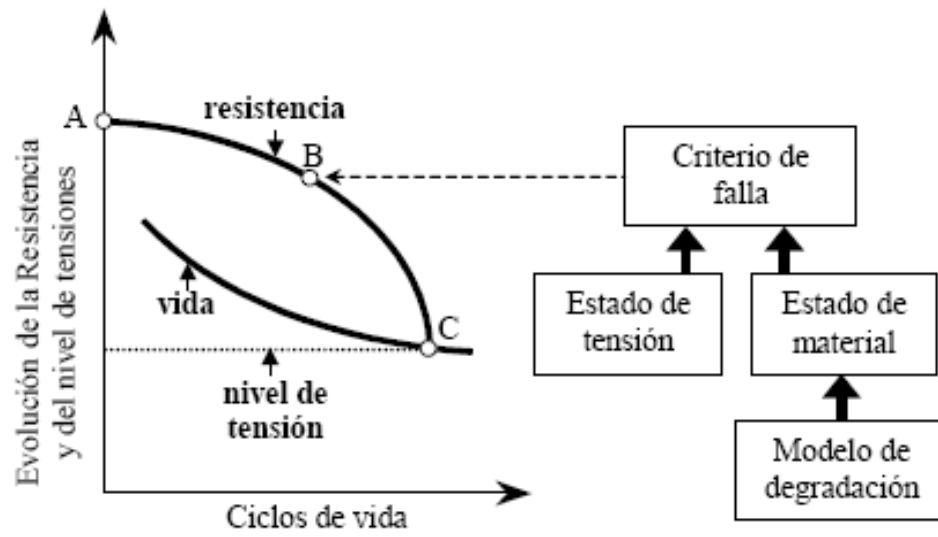
VEL. #2: 3353 m/s

PUERTA A: COINCIDENC



Anexo 4

Visión esquemática de la previsión a la fatiga de un material (Reinfsnider, 1991).



Anexo 5

FASES DE TRABAJO

2. Investigaciones Preliminares.

Al ocurrir una avería en las tuberías y serpentines de las calderas, por parte de las centrales eléctricas, se deberán realizar los siguientes trabajos o investigaciones preliminares.

2.1 Control visual

- 2.1.1 Revisión visual del tubo averiado fundamentalmente en la zona de fallo en una longitud mínima de 500 mm. a partir de los vértices de la rotura a ambos lados de la misma.
- 2.1.2 Revisión visual de los serpentines o tubos aledaños al tubo averiado con el fin de encontrar posibles defectos como grietas y/o posibles daños ocurridos a los serpentines o tubos cercanos producto del vapor o golpes recibidos por el tubo averiado

2.2 Control diametral

- 2.2.1 El control diametral se realizará a un nivel igual al del fallo al menos 5 hileras y/o a ambos lados del tubo averiado.

2.3 Documentación gráfica

- 2.3.1 Toma de fotografías que destaquen los detalles, defectos y efectos sobre el agregado del serpentín o tubo averiado.
- 2.3.2 Formulario del agregado, con la numeración de los elementos donde ocurrió el fallo, señalando el nivel y longitud del fallo. Defectos y aumento de diámetros encontrados durante la revisión visual. (véase Fig. 9)
Destacar la ubicación de la zona del fallo según:
 - a) Radiantes. De frente al fuego (cara de fuego) y posterior al fuego (cara que no ve el fuego).
 - b) Convectivos. De frente al flujo de gases. Posterior al flujo de gases y lateral al flujo de gases.(véase Fig. 1)
- 2.3.3 Al realizar las fotografías se identificarán los extremos o vértices del fallo, y la misma identificación se anotará en el formulario donde aparece el extremo averiado, para la posterior identificación de la posición correcta de la moqueta en el serpentín o tubo. (véase Fig. 2 y 3)

Anexo 6

2.3.4 Señalar en el formulario los lugares de fallo similares y fecha en que ocurrieron las mismas, en el agregado averiado.

2.4 Datos y parámetros de trabajo

2.4.1 Se investigará y anotará la temperatura máxima alcanzada por el agregado y el tiempo de duración de la misma antes del momento del fallo, en caso de existir registradores, si no se tomará la lectura más cercana al momento del fallo.

2.4.2 Se investigará y anotará la presión máxima alcanzada por el agregado y tiempo de duración de la misma, estando en servicio la unidad y antes del momento del fallo, en caso de no existir control en el agregado se tomará la presión máxima en el domo y duración de la misma.

2.4.3 Se recogerá y anotará la cantidad de horas de operación:

- Del agregado desde su montaje.
- Del agregado desde el último mantenimiento general.
- De los serpentines o tubos averiados desde su montaje o reposición.

2.5 Frecuencia o régimen de trabajo de la unidad

2.5.1 Se informará el régimen de trabajo de la unidad, siendo esta el por ciento de horas de servicio, reserva o fuera de servicio en períodos normales de operación entre mantenimientos capitales.

2.5.2 Cantidad de entradas y salidas de servicio de la caldera desde su montaje y desde el último mantenimiento general.

2.6 Situación de trabajo en la caldera en el momento de fallo

2.6.1 Se informará la condición del equipo antes de la avería, esto es lo siguiente:

- Entrando en línea la unidad.
- Saliendo de línea la unidad.
- Estando en servicio la unidad.
- Generación de vapor en el momento del fallo.

2.7 Documentación existente en la central eléctrica

2.7.1 Si la avería ocurriese antes del primer mantenimiento general, después del montaje, se revisará el certificado de los tubos de los serpentines del agregado averiados.

2.7.2 Se recogerá y anotará el número del lote de los tubos.

Anexo 7

- 2.7.3 Se revisará y verificará el cumplimiento del control de las propiedades mecánicas de los tubos, según las normas técnicas vigentes.
- 2.7.4 Se revisará y verificará el cumplimiento del control de las propiedades químicas y metalográficas de los tubos, según las normas técnicas vigentes.
- 2.7.5 Se revisará y verificará el cumplimiento del control de la composición química del metal por estiloscopia, de los serpentines del agregado, mediante el informe del organismo de montaje, este último en el caso de los aceros aleados.
- 2.7.6 Se recogerán e informarán los parámetros de trabajo del agregado de la unidad y dimensiones de los elementos según el diseño o proyecto:
- Diámetro del tubo.
 - Espesor del tubo.
 - Material del tubo.
 - Temperatura nominal del trabajo del agregado.
- 2.7.7 Si la avería ocurriese después de un mantenimiento general, se realizará el trabajo indicado anteriormente y además se revisará y verificará el cumplimiento de las propiedades mecánicas, químicas y metalográficas, mediante los informes sobre las investigaciones realizadas en mochetas del agregado en cuestión, en anteriores mantenimientos generales.
3. Tecnología para la obtención y construcción de las muestras y probetas necesarias para el análisis de la avería
- 3.1 Corte de las muestras del tramo averiado del serpentín o tubo averiado. El corte se hará a una distancia de 300 mm. como mínimo de cada vértice del fallo. (véase Fig. 3)
- 3.2 Codificación de sus extremos para su posterior identificación. Se realizarán marcadores de acero colocando las letras A y B sobre la cara del elemento que contenga la abertura. (véase Fig. 3)
- 3.3 Codificación en el formulario de la posición correcta de la probeta. (véase Fig. 3)
- 3.4 Revisión visual de la probeta
- 3.4.1 Se realizará una revisión visual de la superficie exterior o interior de la muestra a través de la abertura producto del fallo y se anotarán las características de -----
----- las dimensiones de la ruptura y el estado del metal en las distintas zonas de la muestra.

Anexo 8

- 3.5 Trazado sobre la muestra de las zonas de donde se obtendrán las para los ensayos de tracción, de aplastamiento y metalografía
- 3.5.1 Las muestras para la metalografía serán 7 como mínimo, con unas dimensiones de (25 x 25) mm. y se tomarán obligatoriamente, una de cada vértice de la abertura, una de cada lado o labio de la abertura, una de la cara posterior a la cara de la abertura, una muestra que se encuentre a una distancia mínima de 200 mm. de los vértices de la abertura o zona afectado en la avería.
En caso de que en la superficie interior se detectarán grietas o rajaduras, en la revisión visual de la mocheta, se tomarán muestras para la metalografía en esta zona de manera que la muestra incluya la grieta o parte de esta.
Las muestras para la metalografía, se obtendrán mediante corte por segueta manual o mecánica con refrigerante. No se permite el corte oxiacetilénico. Las muestras para la metalografía se identificarán con números, hechos con marcadores de acero y sobre una esquina de la muestra.
- 3.5.2 Las muestras para la construcción de las probetas para los ensayos de tracción , serán cuatro (4) como mínimo y se trazarán en la misma zona o anillo. En los casos en que estos no se puedan sacar de una misma zona se podrán tomar de otra.
Las zonas para las muestras de ensayos de tracciones se elegirán de manera que estas sean rectas y no presenten ningún defecto o deformación. (véase Fig. 4)
Las longitudes iniciales de las probetas se tomarán de la norma NC 04-02. Para el trazado de las muestras para las probetas de tracción, se tomarán las dimensiones que se obtengan por la norma NC 04-08 ($L_t + B$) y se le sumarán por el largo (L_t) y por el ancho (B) 6 mm., si el corte se efectúa por medios mecánicos ó 15 mm. si el corte se realiza por oxicorte. (véase Fig. 5)
- 3.5.3 Las muestras para las probetas de ensayos al aplastamiento tendrán una longitud igual a una vez el diámetro más 6 mm., si el corte se realiza por medios mecánicos o una longitud de 1 vez el diámetro más 15 mm., si el corte se efectúa por oxicorte.
Estas muestras para las probetas del ensayo de aplastamiento serán de cilindros que se obtengan al realizar cortes transversales al eje de la mocheta, como se puede observar en la Fig. 4.
Estos cilindros o anillos para el aplastamiento no podrán contener muestras para ensayos de tracción ni metalografía y serán tres (3) probetas como mínimo.
La cara de los cilindros u de los otros segmentos que coincidan con la cara en la que sucedió la rotura, se marcará con la letra R, las cuales se ubicarán sobre una línea imaginaria longitudinal que pase sobre el centro de la rotura, y a continuación 1,2, según el orden del segmento partiendo de la punta marcada con A. (véase Fig. 4)
- 3.5.4 Las líneas o trazado por las que se realizará el oxicorte, deberán estar alojadas a una distancia mínima de 30 mm. de los bordes de las muestras para las metalografía.
- 3.5.5 El trazado se realizará con pintura y las marcas de letras y números se harán con marcadores de letras y números para acero.

Anexo 9

5.8 Análisis y obtención de las propiedades mecánicas mediante los ensayos de tracción, las cuales son:

- R_m : Resistencia a la tracción. (kg / cm^2)
- $R_{0.2}$: Resistencia en el límite 0.2. (kg / cm^2)
- S: Elongación permanente porcentual. (%)
- Z: Estricción. (%)
- HB: Dureza Brinell.
- HR: Dureza Rockwell
- HV: Dureza Vickers. (para las mediciones de microdureza)

5.9 Se realizarán mediciones de dureza Rockwell o Brinell en las cabezas de las probetas para los ensayos de tracción y no menos de tres mediciones por cada probeta.

5.10 Se realizarán mediciones de microdureza sobre los distintos agregados que se detecten durante las pruebas metalográficas.

5.11 Análisis y resultados de la composición química por estiloscopía y por análisis químicos cuantitativos, de los elementos siguientes: C; Mn; Si; Cr; Mo; V; Ni; P; S; S y otros elementos según la característica del aceros.

5.12 En el caso de los aceros aleados, se efectuará el análisis de carburos.

5.13 Análisis de la plasticidad del acero mediante los ensayos de aplastamiento de los cilindros o anillos.

5.14 Realización de los estudios metalográficos. Los estudios metalográficos se realizarán sobre toda la superficie transversal de las muestras para la metalografía tomándose posteriormente micrografías de las zonas o puntos más característicos.

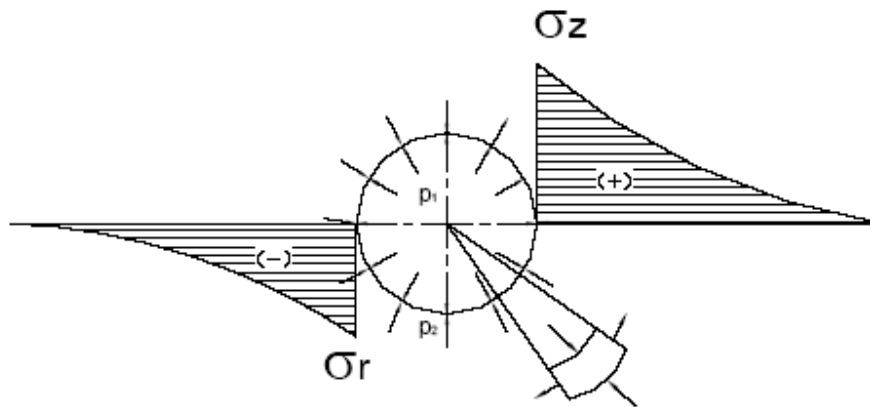
5.15 Las micrografías de cada punto se tomarán en magnificaciones de 100 X, 500 X y 1000 X, sobre la zona de la muestra pulida.

Las cuestiones fundamentales a investigar serán;

- Tipos de estructuras.
- Grado de cada estructura encontrada.
- Tamaño de grano, grado.
- Microgrietas, tipo y carácter de las mismas.
- Descarburización de las superficies.
- En los aceros aleados la presencia de carburos en los límites de granos.
- Gratificación, grado.
- Esferoidización de la perlita. Grado.
- Globulización de los carburos. Grado.
- Alineamiento de la ferrita-perlita. Grado.
- Orientación de los granos.

Anexo10

Distribución de tensiones en el interior de la superficie.



Anexo11

TABLA 2.5

Superficie de calentamiento	$q \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2$	$\alpha \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
Pantallas situadas en el horno	17 - 47	9,3 - 17
Sobrecalentadores convectivos	3 - 3,5	1,7 - 2,3
Sobrecalentadores radiantes	11,5 - 14	2,3 - 2,9
Economizadores	2,3 - 4,5	1,2 - 2,2

En los tubos evaporadores el cálculo del coeficiente de transferencia de calor α es muy difícil y el resultado es poco confiable debido a que por ellos circula un flujo de dos fases cuya calidad varía a lo largo del tubo. En estas normas aparecen también ecuaciones simplificadas para el cálculo de t_c , en otros elementos del generador de vapor. Estas fórmulas se dan en la tabla 2.6 /13/.

TABLA 2.6

TEMPERATURA DE CÁLCULO DE LA PARED (t_c)

Denominación	Fórmula de cálculo, $^\circ\text{C}$
<u>Domos</u>	
Situados fuera del conducto de gases o bien aislados	$t_c = t_s$
No aislados, situados en los conductos de gases convectivos	$t_c = t_s + 1,2S + 10$
Igual para $t_g > 500^\circ\text{C}$, pero no mayor de 900°C	$t_c = t_s + 2,5S + 20$

Continuación tabla 2.6

Denominación	Fórmula de cálculo, $^\circ\text{C}$
<u>Cabezales</u>	
Cabezales de economizadores y pantallas que no reciben calor.	$t_c = \bar{t}$
<u>Tubos evaporadores</u>	
En los generadores de vapor con circulación natural, independientemente de la presión de trabajo y para los generadores de vapor de circulación forzada, con $p \leq 16,0 \text{ MPa}$.	$t_c = t_s + 60$
<u>Tubos de los sobrecalentadores</u>	
Tubos del sobrecalentador principal y del recalentador	$t_c = t_{sobr} + 80$
Sobrecalentador convectivo para $p \leq 2,5 \text{ MPa}$ y $T \leq 425^\circ\text{C}$.	$t_c = t_{sobr} + 70$
<u>Tubos de los economizadores</u>	
De los generadores de vapor con circulación natural.	$t_c = t_s + 30$

donde:

- t_c - temperatura de cálculo de la pared del elemento, $^\circ\text{C}$
- t_s - temperatura de saturación, $^\circ\text{C}$
- t_{sobr} - temperatura del vapor sobrecalentado, $^\circ\text{C}$
- $\bar{t}$ - temperatura media de la sustancia de trabajo, $^\circ\text{C}$

Anexo12

Metal	A 20 °C				A 400 °C
	ρ kg/m ³	C_p kcal/kg °C	K kcal/mh °C	α 10 ⁻⁵ m ² /s	K kcal/mh °C
Acero, Al, carbono (0,5 % C)	7 330	0,111	46	1,47	36
Acero, Al, cromo (10 % Cr)	7 790	0,11	27	0,88	25
(20 % Cr)	7 690	0,11	19	0,665	21
(30 % Cr)	7 630	0,11	16	0,525	-
Acero, Al, cromo-níquel (18 % Cr, 8 % Ni)	7 820	0,11	14	0,445	16
Acero, Al, manganeso (10 % Mn)	7 800	0,11	15	0,50	-
Acero, Al, níquel (invar, 36 % Ni)	8 140	0,11	9,2	0,278	-
Acero, Al, silicio (5 % Si)	7 420	0,11	16	0,55	-
Acero, Al, wolframio (10 % W)	8 310	0,100	42	1,36	-
Aluminio puro	2 710	0,214	196	9,46	196
Bronce (75 % Cu, 25 % Sn)	8 670	0,082	22	0,86	-
Bronce de aluminio (95 % Cu, 5 % Al)	8 670	0,098	71	2,33	-
Cobre puro	8 950	0,0915	332	11,80	312
Constantán (60 % Cu, 40 % Ni)	8 920	0,098	19,5	0,61	25
Duraluminio (94-96 Al, 5-3 Cu, trazas Mg)	2 790	0,211	141	6,66	-

(Continuación Tabla 13)

Metal	A 20 °C				A 400 °C
	ρ kg/m ³	C_p kcal/kg °C	K kcal/mh °C	α 10 ⁻⁵ m ² /s	K kcal/mh °C
Estaño	7 300	0,0541	57	3,88	-
Hidronalid (91-95,9-5 Mg)	2 610	0,216	97	4,80	-
Hierro puro	7 900	0,108	62	2,02	42
Hierro dulce (C < 0,5 %)	7 850	0,112	51	1,64	39
Hierro fundición	7 270	0,102	45	1,72	-
Latón (70 % Cu, 30 % Zn)	8 520	0,092	95	3,41	126
Latón rojo (85 % Cu, 9 Sn, 6 Zn)	8 700	0,092	52	1,80	-
Magnesio puro	1 750	0,242	147	9,71	131
Molibdeno	10,200	0,060	117	5,35	-
Níquel, 99,9 %	8 900	0,1065	77	2,28	51
Plata, 99,9 %	10 500	0,0559	350	16,5	310
Plata alemana (62 % Cu, 35 % Ni, 22 % Zn)	8 620	0,094	21,4	0,75	42
Plomo	11 210	0,031	29,8	2,38	24,1
Wolframio	19 350	0,0321	140	6,27	109
Zinc	7 140	0,0918	96,4	4,10	80

Anexo 13

