



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

**ANALISIS DE CAUSA RAIZ DE FALLA EN UN TUBO
DE COBRE Y UN RACOR DE BRONCE
PERTENECIENTE A UNA CALDERA DE UNA
MAQUINA DE CAFE**

HAROLD NORBERTO TELLEZ NARANJO
JORGE LUIS RENGIFO ZAMBRANO

FUNDACION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2018

ANALISIS DE CAUSA RAIZ DE FALLA DE UN TUBO DE COBRE Y UN RACOR DE BRONCE PERTENECIENTE A UNA CALDERA DE UNA MAQUINA DE CAFE

HAROLD NORBERTO TELLEZ NARANJO

JORGE LUIS RENGIFO ZAMBRANO

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al
título de:

Ingeniería Mecánica

Director:

Ing. José David Castro Castro - Magister en ingeniería mecánica

Línea de investigación:

Análisis de falla y fractografía

FUNDACION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ D.C.

2018

Dedicatorias:

A Dios, mi madre Raquel y mi abuela Norma que fueron mi principal motivación; todo lo que soy y lo que he logrado ha sido gracias a sus enseñanzas, a su apoyo y a su amor único.

Jorge Luis Rengifo Zambrano

A Dios y a mis padres que siempre me apoyaron incondicionalmente en la parte moral para lograr cumplir mis metas, a mis hermanos y a mis amigos por el apoyo que me brindaron a lo largo de este tiempo.

Harold Norberto Téllez Naranjo

Agradecimientos:

A nuestro director de proyecto el Ingeniero José David Castro por su guía y por brindarnos el apoyo para realizar y sacar este proyecto adelante; sin su ayuda no hubiera sido posible desarrollarlo con éxito.

A la fundación universitaria los libertadores por brindarnos los medios para obtener un título profesional.

Al cuerpo docente por transmitirnos los conocimientos necesarios los cuales nos aportan bastante en el campo profesional e industrial.

RESUMEN

El proyecto de grado *Análisis de causa raíz de falla en un tubo de cobre y un racor de bronce perteneciente a una caldera de una máquina de café* es un diagnóstico de causas y efectos de fallas que se presentan en componentes que trabajan en una caldera, en este caso, la sección de tubería junto a un racor. Para llegar a este fin, se realizó una observación inicial de los componentes, un análisis detallado de los elementos por medio de estudios metalográficos y pruebas de dureza. Haciendo recopilación de los resultados obtenidos, se profundiza en los datos obtenidos por medio de bibliografía especializada, para hacer un diagnóstico correcto de las fallas. Después de analizados los datos, se llega a la conclusión que los componentes fallan principalmente por mala operación de la caldera, la cual no trabaja con los parámetros adecuados. Adicional a esto, la aplicación de soldadura en las uniones no es la más correcta, lo cual también juega un papel importante en la causa raíz de las fallas presentes.

Palabras clave: Metalografía, diagrama de fase, microestructura, dureza Rockwell.

ABSTRACT

The project of grade *Analysis of root cause of failure in a copper tube and a bronze fitting belonging to a boiler of a coffee machine* is a diagnosis of causes and effects of failures that are presented in componentes that work in a boiler, in this case , the pipe section next to a fitting. To reach this end, an initial observation of the components was made, a detailed analysis of the elements by means of metallographic studies and hardness tests. Compiling the results obtained, it delves into the data obtained by means of specialized bibliography, to make a correct diagnosis of the failures. After analyzing the data, it is concluded that the components fail mainly by bad operation of the boiler, which does not work with the appropriate parameters. Additional to this, the welding application in the joints is not the most correct, which also plays an important role in the root cause of the failures present.

Key words: Metallography, phase diagram, microstructure, Rockwell hardness

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. OBJETIVOS	4
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
2. MARCO TEORICO	6
2.1. CALDERAS	6
2.1.1. <i>Partes</i>	6
2.1.2. <i>Tipos de caldera</i>	10
2.1.3. <i>Clasificación</i>	12
2.2. FALLAS COMUNES EN TUBERIAS Y CUERPOS DE CALDERAS	15
2.2.1. <i>Corrosión uniforme acelerada en lado de aguas</i>	16
2.2.2. <i>Corrosión intergranular en lado de aguas</i>	17
2.2.3. <i>Corrosión por picaduras en lado de aguas</i>	18
2.2.4. <i>Oxidación y corrosión por cenizas en lado de fuegos</i>	19
2.2.5. <i>Depósito en el lado de aguas</i>	20
2.2.6. <i>Erosión por partículas, agua o vapor</i>	22
2.2.7. <i>Sobrecalentamiento de corta duración</i>	23
2.2.8. <i>Fatiga</i>	24
2.2.9. <i>Sobrecalentamiento de larga duración (fluencia lenta)</i>	25
2.2.10. <i>Corrosión – esfuerzo</i>	26

3. METODOLOGIA	28
4. ANALISIS DE RESULTADOS	30
4.1. DIAGNÓSTICO FÍSICO	30
4.1.1. <i>Diagnóstico físico de tubería de cobre</i>	30
4.1.2. <i>Diagnóstico físico del racor</i>	31
4.2. PROCEDIMIENTO	33
4.3. ESTUDIO DE DATOS	34
4.3.1. <i>Estudio del tubo de cobre.</i>	37
4.3.2. <i>Estudio del racor de bronce.</i>	44
5. ANALISIS DE FALLAS	50
6. CONCLUSIONES	51
7. BIBLIOGRAFIA	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Partes de una caldera.</i>	6
<i>Figura 2. Cámara interna de una caldera.</i>	10
<i>Figura 3. Corrosión uniforme acelerada en lado de aguas.</i>	17
<i>Figura 4. Corrosión intergranular en lado de aguas.</i>	18
<i>Figura 5. Corrosión por picaduras en lado de aguas.</i>	19
<i>Figura 6. Oxidación y corrosión por cenizas en lado de fuegos.</i>	20
<i>Figura 7. Deposito en el lado de aguas.</i>	21
<i>Figura 8. Erosión por partículas, agua o vapor.</i>	23
<i>Figura 9. Sobrecalentamiento de corta duración.</i>	24
<i>Figura 10. Fatiga.</i>	25
<i>Figura 11. Sobrecalentamiento de larga duración (fluencia lenta).</i>	26
<i>Figura 12. Corrosión-esfuerzo.</i>	27
<i>Figura 13. Tubo de cobre con signos previos de dilatacion.</i>	30
<i>Figura 14. Corte tubo de cobre con signos de porosidad y grietas.</i>	31
<i>Figura 15. Racor de bronce con muestras de fisura.</i>	32
<i>Figura 16. Corte del racor que presenta efectos de corrosion.</i>	32
<i>Figura 17. Corte de racor de bronce usado para análisis.</i>	35
<i>Figura 18. Corte de tubo de cobre para analisis inicial.</i>	35
<i>Figura 19. Probeta del tubo de cobre escogido para análisis.</i>	36
<i>Figura 20. Probeta del racor de bronce escogido para análisis.</i>	36
<i>Figura 21. Microestructura del cobre. A) Aumento 100X, B) Aumento 200X, C) Aumento 500X, D) Aumento 1000X.</i>	37
<i>Figura 22. Microestructura metal de Muntz.</i>	38
<i>Figura 23. Microestructura del cobre 500X, α = Cu y β = Zn.</i>	38
<i>Figura 24. Microestructura de la soldadura de estaño. A) Aumento 100X, B) Aumento 200X.</i>	41
<i>Figura 25. Microestructura de soldadura de estaño A) Microestructura 500X B) Microestructura Sn 30 Pb.</i>	42
<i>Figura 26. Microestructura del bronce A) Aumento 100X, B) Aumento 200X, C) Aumento 500X, D) Aumento 1000X.</i>	44

**ANALISIS DE CAUSA RAIZ DE FALLA EN UN TUBO DE COBRE Y UN RACOR DE BRONCE
PERTENECIENTE A UNA CALDERA DE UNA MAQUINA DE CAFE**

<i>Figura 27. A) Microestructura bronce al aluminio C95400 B) Microestructura Cu - Al 1000X.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 28. Procedimiento dureza Rockwell A) 71 HRB B) 77 HRB.</i>	<i>48</i>

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
<i>Diagrama 1. Metodología del desarrollo del proyecto.</i>	28
<i>Diagrama 2. Procedimiento practico en el laboratorio de la FULL.</i>	33
<i>Diagrama 3. Diagrama de fase Cu- Zn.</i>	40
<i>Diagrama 4. Diagrama de fase Sn – Pb.</i>	43
<i>Diagrama 5. Diagrama de fase Cu-Al.</i>	47

LISTA DE TABLAS

	pág.
<i>Tabla 1. Resultados Rockwell B para el bronce.</i>	48
<i>Tabla 2. Características mecánicas del bronce C95400.</i>	49

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se utilizan las calderas en diferentes industrias como en el sector de alimentos, hotelería y la medicina, entre otras; el uso o el riesgo de daño de algún elemento que hace parte del sistema, conlleva a realizar diferentes estudios a estas piezas mecánicas, ya que por el tipo de trabajo que desempeñan, tienen un riesgo muy alto de fallar y hacen parte fundamental dentro del sistema que componen.

Teniendo en cuenta la importancia de estas piezas, es primordial realizar un análisis de falla de una tubería perteneciente a una máquina de café. Lo que se busca es identificar la causa raíz de falla que se define como el método para realizar la investigación acerca del origen o la razón por la cual se produce la falla de un sistema, una línea de producción o una pieza. Este análisis se realizará mediante estudios metalográficos. Para realizar el análisis de la respectiva pieza, se deben someter a diferentes pruebas en el laboratorio con el fin de determinar e identificar la causa raíz por los cuales sufrió un daño considerable la tubería de estudio.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. ANTECEDENTES

Para el campo investigativo de analisis de fallas en la tuberia de calderas se ha trabajado con gran interes. Es por eso que los autores aplican tecnicas diferentes para la muestra de datos, entre las cuales se contempla la metalografia para obtener una observacion microestructural del material, y la difraccion de rayos X, implementada para determinar la composicion de la superficie en la cual se produjo una corrosion. Los procedimientos experimentales de los autores para la evaluacion de las fallas en la tuberia estan establecidas según el codigo ASME.

E. Espejo y J. C. Martinez, ingenieros mecanicos de la Universidad Nacional de Colombia, realizaron un estudio en una caldera acuotubular perteneciente a una planta generadora de electricidad, la cual presentaba un recurrente fenómeno de agrietamiento en los tubos del generador de vapor en la zona de los codos alrededor de las mirillas del hogar, el cual llevó a la fuga de vapor y paradas no programadas de mantenimiento. Para encontrar la causa del problema los ingenieros analizaron en el laboratorio una serie de tubos que presentaban fallas y otros retirados de zonas similares de la caldera, llevándose a cabo estudios de composición química, metalografía, fractografía y difracción de rayos X sobre las muestras obtenidas, encontrándose que la fisura se produjo por corrosión bajo tensión. Las picaduras eran bastante severas en la zona del codo de las tuberías, y en menor proporción y profundidad se encontraron en zonas rectas, indicando ello que los esfuerzos residuales causados por la deformación plástica acentuaron el problema pero no fueron la causa raíz. Como conclusión del estudio los autores determinaron que la causa raíz de falla más probable, fue la utilización durante la construcción de la

caldera de tuberías cuya dureza era superior a lo recomendado por el código ASME. [1]

J. J. Coronado Marin, ingeniero mecanico y profesor de la Universidad del Valle, realizo una investigación acerca de las fallas presentadas por fisura radial del exterior de los tubos del sobrecalentador de una caldera acuotubular. Para el análisis cuantitativo de la composición química de los elementos del tubo, el autor uso un espectrómetro de emisión atómica, con lo cual analizo que el exterior de los tubos presentaron una capa de color blanco-rojizo en la cual se encuentran cadenas parafinicas: C-H, grupos funcionales: C-O, N-H y compuestos de azufre, esta capa frágil impide la transferencia de calor, causando un aumento de temperatura del tubo. La falla se presentó por termo fluencia debido al sobrecalentamiento de larga duración, la microestructura del tubo de acero en el lado externo presento: crecimiento de grano, globulizacion de la cementita y fisuras intergranulares que producen pérdidas de las propiedades mecánicas del acero. [2]

1.2. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente el uso de calderas es de mucha importancia en la industria en general; en el caso específico de las calderas que están incorporadas en las máquinas de café, sufren fallas frecuentes en su tubería y en muchos de los casos no se conoce la causa principal de la falla, por lo cual, los mantenimientos se limitan a ser netamente correctivos que se centran en la sustitución constante de piezas. Este tipo de mantenimiento ocasiona gastos elevados porque la tubería es fabricada en cobre y los racores en bronce, y por su precio en el mercado, se debe contemplar un alto presupuesto para los mantenimientos de estos equipos. Adicionalmente, se presentan perdidas monetarias y de tiempo debido a las paradas no programada del equipo.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Las calderas son de uso esencial y fundamental en la industria de alimentos. Estas son utilizadas para suministrar energía en forma de vapor, que es transportado a altas presiones y elevadas temperaturas a través de nuestro componente de estudio. Teniendo en cuenta la función que cumple dicho elemento se pretende realizar un análisis que está enfocado en hallar la causa principal de falla de una tubería perteneciente a una máquina de café. Tiene una importancia bastante alta porque se quiere conocer la razón por la cual está fallando la tubería, y también se busca disminuir los costos de mantenimiento correctivo y de tiempo perdido por paradas no programadas que se tienen en marcha.

Lo que aporta este análisis basado en estudios y pruebas de laboratorio, es dar a conocer la causa real de la falla. Además si conocemos de antemano las causas de falla del elemento de estudio, se pueden prevenir accidentes o daños en la maquinaria.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- Realizar el análisis de causa raíz de falla en una tubería de cobre y un racor de bronce perteneciente a una caldera acuotubular de una máquina expreso de café modelo IBERITAL IB7.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características microestructurales y de dureza del material de estudio.

- Aplicar la metodología RCA para encontrar la causa raíz de falla del elemento de estudio.

2. MARCO TEORICO

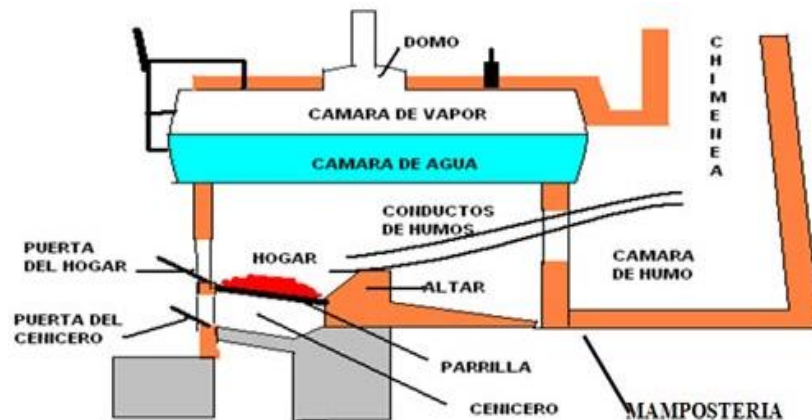
2.1. CALDERAS

Una caldera se puede describir como un recipiente metálico y cerrado, la cual es destinada a producir vapor o calentar agua, por medio de la acción del calor a una temperatura superior a la temperatura ambiente, y una presión mayor que la atmosférica o mediante la aplicación de calor generado por combustibles, electricidad o energía nuclear. El vapor que contiene la caldera se genera por medio de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, inicialmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. [3]

2.1.1. Partes

Figura 1. Partes de una caldera.

Abarca, P. *Descripción de calderas y generadores de vapor* [Imagen]. Recuperado de:
<http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/descripcion-de-caldera-y-generadores-de-vapor.pdf>



A continuación se hará una descripción detallada de las partes de una caldera, las cuales están evidenciadas en la Figura 1.

Hogar o Fogón. Es el espacio donde se produce la combustión. Se le llama también con el nombre de cámara de combustión.

Puerta Hogar. Es una pieza metálica, abisagrada, aislada generalmente en su interior con ladrillo refractario o de doble pared, por donde se alimenta de combustible sólido al hogar y se hacen las operaciones de control de fuego.

Emparrillado. Son piezas metálicas en formas de rejas, generalmente rectangulares o trapezoidales, que van en el interior del hogar y que sirven de soporte al combustible sólido. Debido a la forma de reja que tienen, permiten el paso del aire principal que sirve para que se produzca la combustión.

Las parrillas deben adaptarse al combustible y cumplir los siguientes requisitos:

- Deben permitir convenientemente el paso del aire
- Deben permitir que caigan las cenizas
- Deben permitir que se limpien con facilidad y rapidez
- Deben impedir que se junte escoria
- Los barrotes de la parrilla deben ser de buena calidad para que no se quemen o deformen
- Deben tener buena durabilidad
- Algunos diseños de parrillas permiten que por su interior pase agua para refrigerarlas y evitar recalentamientos

Cenicero. Es el espacio que queda bajo la parrilla y que sirve para recibir las cenizas que caen de ésta. Los residuos acumulados deben retirarse periódicamente para no obstaculizar el paso de aire necesario para la combustión.

Puerta del Cenicero. Es aquella que se utiliza para realizar las funciones de limpieza del cenicero. Mediante esta puerta regulable se puede controlar también la entrada del aire primario al hogar.

Altar. Es un pequeño muro de ladrillo refractario, ubicado en el hogar, en el lado opuesto a la puerta del hogar y al final de la parrilla, debiendo sobrepasar a ésta en aproximadamente 30 cm.

Los objetivos del altar son:

- Impedir que al avivar los fuegos desprendan partículas de combustibles o escoria al primer tiro de los gases.
- El altar forma también el cierre interior del cenicero.
- Imprimir a la corriente de aire de la combustión una distribución lo más uniforme posible y una dirección ascensional vertical en todo el largo y ancho de las parrillas.
- Restringir la sección de salida de los gases calientes aumentando su velocidad, lo cual facilita su mezcla y contacto íntimo con el aire, haciendo así que la combustión sea más completa.

Mampostería. Se llama mampostería a la construcción de ladrillos refractarios o comunes que tiene como objeto:

- Cubrir la caldera para evitar pérdidas de calor al exterior
- Guiar los gases y humos calientes en su recorrido.
- Para mejorar el aislamiento la mampostería se dispone, a veces, en sus paredes de espacios huecos (capas de aire) que dificultan el paso de calor al exterior.
- En algunos tipos de calderas, se ha eliminado totalmente la mampostería de ladrillo, colocándose solamente aislamiento térmico en el cuerpo principal y cajas de humo.

- Para este objeto se utilizan materiales aislantes, tales como lana de vidrio recubierta con planchas metálicas.

Conductos de Humos. Es aquella parte de la caldera por donde circulan los humos y los gases calientes que se han producido en la combustión, en estos conductos se realizan la transmisión de calor al agua que contiene la caldera.

Caja de Humo. Corresponde al espacio de la caldera en el cual se juntan los humos y gases después de haber entregado su calor y antes de salir por la chimenea.

Chimenea: Es el conducto de salida de los gases y humos de la combustión hacia la atmósfera, los cuales deben ser evacuados a una altura suficiente para evitar perjuicios o molestias a la comunidad. [4]

Cámara de Agua. Es el volumen de la caldera que está ocupado por agua en un estado de líquido saturado, y tiene como límite superior un cierto nivel mínimo del que no debe descender nunca el agua durante su funcionamiento. Es el comprendido del nivel mínimo visible en el tubo de nivel hacia abajo.

Cámara de Vapor. Es el espacio o volumen que queda sobre el nivel superior máximo de agua y en el cual se almacena el vapor generado por la caldera. Mientras más variable sea el consumo de vapor, mayor debe ser el volumen de esta cámara. En este espacio o cámara, el vapor debe separarse de las partículas de agua que lleva en suspensión. Es por esta razón que algunas calderas tienen un pequeño cilindro en la parte superior de esta cámara, llamado “domo” y que contribuye a mejorar la calidad del vapor.

Cámara de Alimentación de Agua. Es el espacio que se ubica entre los niveles máximos y mínimos de agua. Durante el funcionamiento de la caldera se encuentra ocupado por agua y/o vapor, según sea donde se encuentre el nivel de agua.

En la Figura 2, se muestra una forma detallada de como están distribuidas las distintas cámaras dentro del recipiente de la caldera

Figura 2. Cámara interna de una caldera.

Abarca, P. Descripción de calderas y generadores de vapor [Imagen]. Recuperado de:
<http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/descripcion-de-caldera-y-generadores-de-vapor.pdf>



2.1.2. Tipos de caldera

De acuerdo al flujo de agua y de gases en el interior de la tubería o por la disposición de los fluidos, hay 2 grandes tipos calderas industriales:

- Pirotubulares o de tubos de humo.
- Acuotubulares o de tubos de agua.

Pirotubulares. En este tipo de calderas el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente, y rodea a los tubos, por donde circula fuego y gases producto de un proceso de combustión. Generalmente tiene un hogar integral, llamado caja de fuego, limitado por superficies enfriadas por agua. [3]

Ventajas

- Menor costo inicial, debido a la simplicidad de diseño en comparación con las acuotubulares de igual capacidad.
- Mayor flexibilidad de operación, ya que el gran volumen de agua permite absorber fácilmente las fluctuaciones en la demanda de vapor.
- Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación, porque las incrustaciones formadas en el exterior de los tubos son más fáciles de atacar y son eliminadas por las purgas.
- Facilidad de inspección, reparación y limpieza.

Desventajas

- Mayor tamaño y peso que las acuotubulares de igual capacidad.
- Mayor tiempo para subir presión y entrar en funcionamiento.
- Gran peligro en caso de explosión o ruptura, debido al gran volumen de agua almacenado.
- No son empleadas para altas presiones. [5]

Acuotubulares. En este tipo de calderas, transporta agua o vapor en el interior de la tubería y los gases calientes se hallan en contacto con las caras exteriores de ellos. Son de un volumen pequeño de agua. Las calderas acuotubulares son las empleadas casi exclusivamente cuando se quiere obtener elevadas presiones y

gran rendimiento, debido a que los esfuerzos desarrollados en los tubos por las altas presiones se traducen en esfuerzos de tracción en toda su extensión. La limpieza de estas calderas se realizan de manera sencilla ya que las incrustaciones se quitan utilizando dispositivos empleados para limpiar tubos, accionados mecánicamente o por medio de aire. La circulación del agua en este tipo de caldera alcanza velocidades considerables con lo que se consigue una transferencia eficiente del calor; es decir, se eleva la capacidad de producción de vapor. [5]

Ventajas

- Menor peso por unidad de potencia generada.
- Al tener un volumen pequeño de agua en relación a su capacidad de evaporación, puede ser puesta en marcha rápidamente.
- Mayor seguridad para altas presiones.
- Mayor eficiencia.

Desventajas

- Su costo es mayor.
- Deben ser alimentadas con agua de gran pureza, ya que las incrustaciones en el interior de los tubos son, a veces, inaccesibles y pueden provocar roturas de los mismos.
- Debido al pequeño volumen de agua, le es más difícil ajustarse a las grandes variaciones del consumo de vapor, siendo necesario trabajarlas a mayor presión que la necesaria en las industrias. [5]

2.1.3. Clasificación

La clasificación general de las calderas de acuerdo a su uso es el siguiente:

Por su configuración:

- Vertical.

- Horizontal.

Según su movilidad o instalación:

- Fija o estacionaria.
- Móvil o portátil.

Atendiendo a la circulación de los gases:

- Recorrido en un sentido (de un paso).
- Con retorno simple (de dos pasos).
- Con retorno doble (de tres pasos).

Con respecto a su forma de calefacción:

- Cilíndrica sencilla de hogar exterior.
- Con un tubo hogar (liso o corrugado).
- Con dos tubos hogares (liso o corrugado).
- Con tubo Galloway (calderas horizontales o verticales).
- Con tubos múltiples de humo (igneotubulares o pirotubulares).
- Con tubos múltiples de agua (hidrotubulares o acuotubulares).
- Con tubos múltiples de agua y tubos múltiples de humo (acuopiro-tubular o mixtas).

Según la presión de trabajo:

- Baja presión. 0 a 2,0 kg/cm²
- Media presión. 2,0 a 10 kg/cm²
- Alta presión. 10 a 225 kg/cm²
- Supercríticas. más de 225 kg/cm²

Según su generación:

- De agua caliente.

- De vapor saturado o recalentado.

Según el ingreso de agua a la caldera:

- Circulación natural: el agua se mueve por efecto térmico.
- Circulación forzada: el agua circula mediante el impulso de una bomba.

Por el mecanismo de transmisión de calor dominante:

- Convección.
- Radiación.
- Radiación y Convección.

Por el combustible empleado:

- Combustibles sólidos.
- Combustibles líquidos.
- Combustibles gaseosos.
- Combustibles especiales (licor negro, bagazo, etc.).
- De recuperación de calor de gases.
- Mixtas.
- Nucleares.

Por el tiro:

De tiro natural. Es una corriente de aire ascendente ocasionada por la diferencia de densidades del aire caliente contra el aire frío de la atmósfera. En las calderas antiguas se requería que la chimenea tuviera una gran altura, para crear un tiro natural.

De tiro inducido. Extrae los gases de la cámara de combustión y los expulsa hacia la chimenea, pero el inconveniente que tiene es que el ventilador que extrae el aire de la cámara se encuentra trabajando en una zona conflictiva por la elevada

temperatura, donde hay gases corrosivos y sólidos como ceniza, que pueden llegar a estropear las paletas de los ventiladores, lo que requiere un mantenimiento frecuente, por ello; su utilización no es muy usual. Este sistema ya no requiere una chimenea alta.

De tiro forzado. Este sistema hace entrar aire a la caldera por medio de ventiladores. Este es el quemador más usual, debido a que además de controlar la mezcla aire-combustible, las partes metálicas del ventilador trabajan frías.

Por el modo de gobernar la operación:

- De operación manual.
- Semiautomáticas.
- Automáticas. [3]

Las calderas y otros tipos de equipos de plantas de vapor están sujetos a una variedad de fallas que involucran uno o más mecanismos severos. El más notorio de estos mecanismos es la corrosión, que también incluye la erosión; los procesos mecánicos ambientales, que incluyen la corrosión bajo esfuerzo y daño por hidrógeno; las fracturas, que pueden subdividirse en fracturas de la fatiga, fracturas termales de la fatiga, y ruptura de la tensión; y la distorsión la cual esta relacionada con la expansión térmica. [6]

2.2. FALLAS COMUNES EN TUBERIAS Y CUERPOS DE CALDERAS

Estas fallas pueden generalmente clasificarse como defectos de diseño, defectos de fabricación, operaciones indebidas y un inadecuado tratamiento del agua. La mayoría de las fallas en generadores de vapor ocurren en componentes presurizados, que son las tuberías y recipientes a presión que constituyen una

buena porción del sistema de generación de vapor. Con pocas excepciones, las fallas en los componentes presurizados están confinadas relativamente a componentes de pequeño diámetro utilizados para la transferencia de calor en las calderas. [6]

2.2.1. Corrosión uniforme acelerada en lado de aguas

Por las altas temperaturas se genera una capa de magnetita muy gruesa que aísla térmicamente al metal del tubo, subiendo aún más su temperatura, además, estas capas tienden a ser porosas y frágiles, lo que facilita el ataque corrosivo.

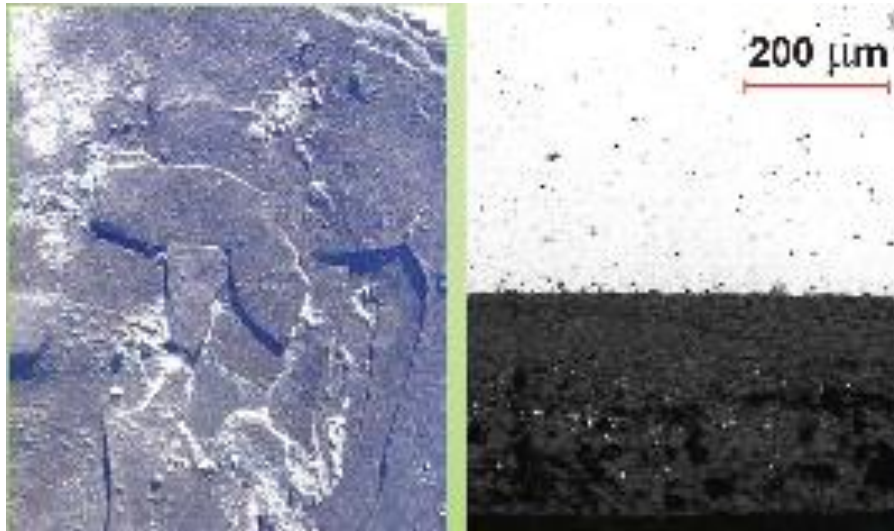
Algunas Causas:

- Depósitos en el lado de aguas de las tuberías que disminuyen el flujo y la transferencia del calor.
- Contacto directo del tubo con llama, con cenizas o combustible incandescente.
- Deficiencias en procedimientos de arranque.
- Problemas en el control del nivel de agua.

En la Figura 3, se evidencia una capa gruesa y agrietada de magnetita, y una sección metalográfica de magnetita gruesa y porosa.

Figura 3. Corrosión uniforme acelerada en lado de aguas.

U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>.



2.2.2. Corrosión intergranular en lado de aguas

La corrosión se da de manera preferente en límites de grano del material de la tubería, llegando a generar desprendimiento de los granos.

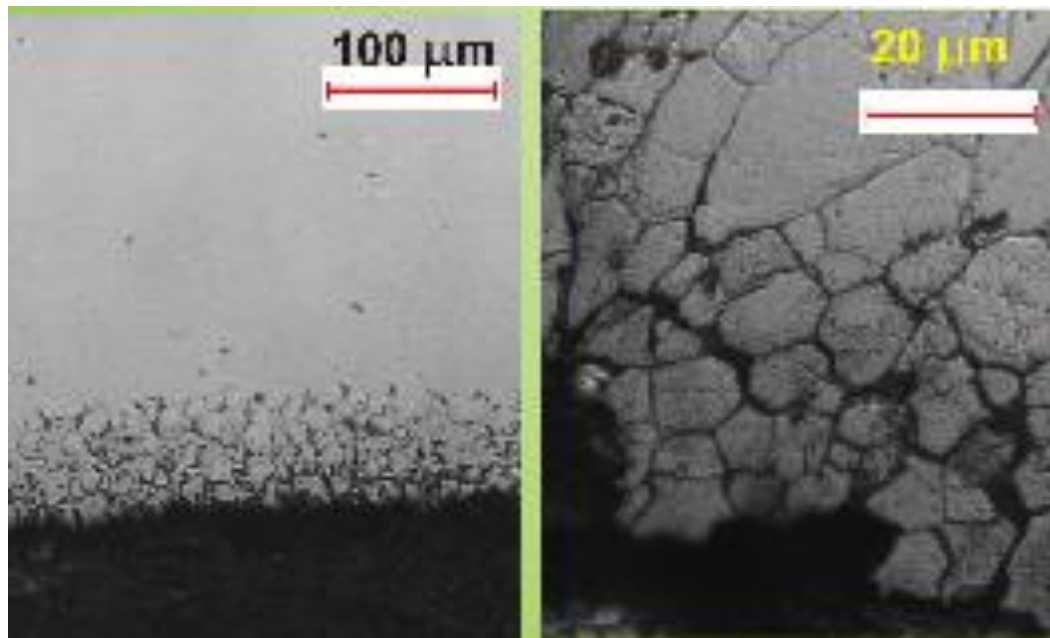
Algunas Causas:

- Susceptibilidad de límites de granos del material o sus zonas adyacentes a corroerse, por precipitación o segregación de elementos o compuestos químicos, producto de ciclos térmicos de fabricante o servicios
- Alta temperatura y altos esfuerzos residuales o de servicios contribuyen al fenómeno

En la Figura 4 se puede observar las secciones metalográficas de tubería con corrosión intergranular.

Figura 4. Corrosión intergranular en lado de aguas.

U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaeespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>.



2.2.3. Corrosión por picaduras en lado de aguas

En la superficie de los elementos se forman zonas de corrosión preferencial que se profundizan con el tiempo. Estas picaduras son potenciales núcleos de grietas de fatiga o corrosión – esfuerzo.

Algunas causas:

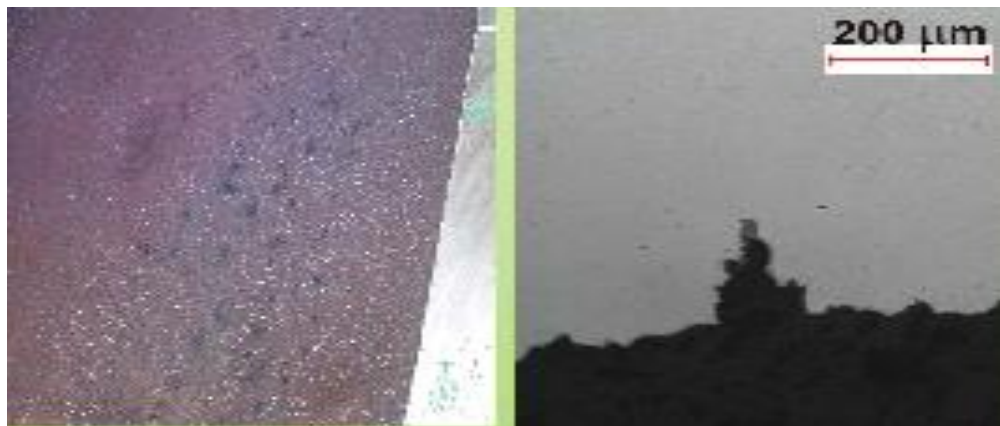
- Tratamiento deficiente del agua de alimentador de la caldera que la deja con alto contenido de oxígeno

- Capas de magnética o depósitos porosos y/o agrietados que atrapan fluido y favorecen su ataque
- Procedimientos deficientes en paradas que permiten el ingreso de aire al interior de las tuberías

En la Figura 5 se observan las picaduras debajo de la capa de magnetita, junto a la sección metalográfica de las picaduras en sí.

Figura 5. Corrosión por picaduras en lado de aguas.

U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaeespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>.



2.2.4. Oxidación y corrosión por cenizas en lado de fuegos

En el lado de fuego altas temperaturas producen capas oxidadas gruesas. También se pueden tener gruesas capas de cenizas, las cuales a altas temperaturas se pueden fundir y producir corrosión líquida. Los mecanismos de corrosión pueden ser uniforme o por picaduras.

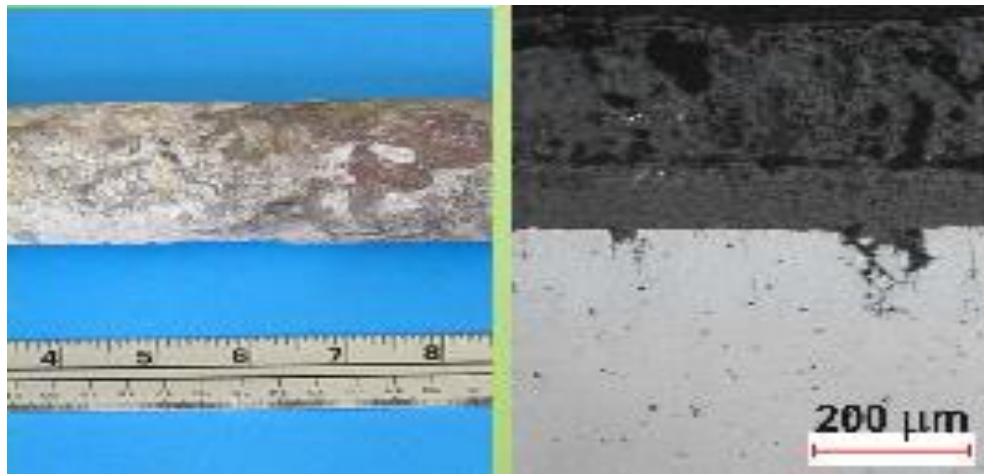
Algunas causas:

- Altos contenidos de vanadio, sodio y azufre en el combustible favorecen la fusión de parte de las cenizas.
- Exceso de oxígeno en la relación aire – combustible o alto contenido de azufre favorecen la oxidación
- Capas muy gruesas de cenizas

En la Figura 6 se muestran depósitos gruesos de cenizas en la tubería y la metalografía de capa de oxidación gruesa y porosa.

Figura 6. Oxidación y corrosión por cenizas en lado de fuegos.

U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>.



2.2.5. Depósito en el lado de aguas

Sobre las superficies quedan residuos sólidos, los cuales disminuyen el flujo y la transferencia de calor, lo que dará una mayor temperatura que acelera la oxidación y por lo tanto engruesa la capa de magnetita aislando aún más el tubo, esto

finalmente desemboca en sobrecalentamiento. Las zonas especialmente susceptibles a formar depósitos están en el evaporador

Algunas causas:

- Tratamiento deficiente del agua de alimentación que la deja con un numero alto de sólidos en suspensión
- Procedimiento de tratamiento de agua deficiente que deje en esta solidos provenientes de las sustancias utilizadas para el tratamiento
- Productos de corrosión de equipos precaldera

En la Figura 7, se puede apreciar un deposito estratificado de diferentes compuestos y un deposito de un solo compuesto.

Figura 7. Deposito en el lado de aguas.

U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaeespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>.



2.2.6. Erosión por partículas, agua o vapor

Se presenta perdida de espesor de la tubería por la incidencia directa sobre ella un chorro de partículas abrasivas, combustibles participado, ceniza, agua o vapor.

Algunas causas:

- Agrietamiento de una tubería cercana que genera chorros de agua o vapor que inciden en el tubo
- Excesiva generación de cenizas
- Molienda deficiente del combustible solido
- Contaminación del combustible o aire de aire de combustión por sólidos en suspensión

En la Figura 8, se puede apreciar una erosión provocada por chorro de agua y por chorro de vapor.

Figura 8. Erosión por partículas, agua o vapor.

U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>



2.2.7. Sobrecalentamiento de corta duración

Se presenta una importante expansión del elemento, las superficies de grieta son delgadas (labio delgado), producto del alargamiento de los granos en caliente. Se produce por sobrecalentamiento momentáneo del tubo (más de 550° C).

Algunas causas:

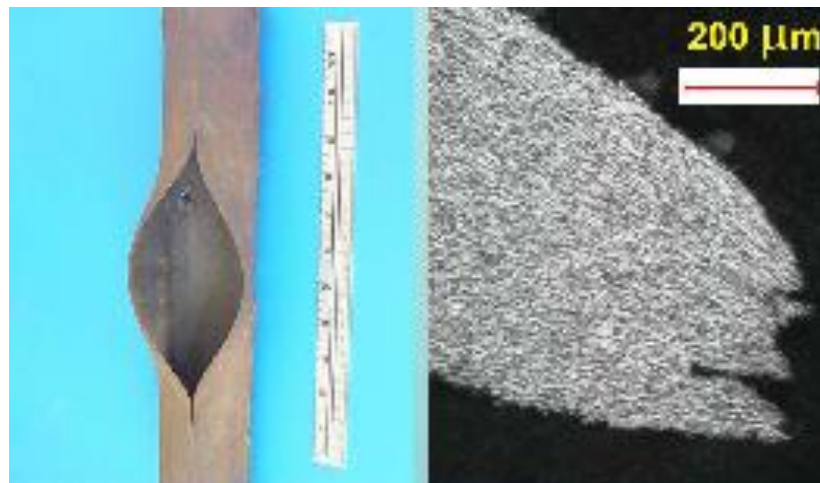
- Contacto directo del tubo con la llama, combustible o cenizas incandescentes.
- Flujo deficiente de agua y/o vapor por el tubo, por problemas en el control del nivel de agua o por un mal procedimiento de arranque del equipo.

- Obstrucción del tubo por ejemplo por depósitos.

En la Figura 9, muestra una tubería que sufre un agrietamiento de labio delgado, y también se observa la sección metalográfica de la grieta.

Figura 9. Sobrecalentamiento de corta duración.

U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>



2.2.8. Fatiga

No hay expansión del elemento. Las cargas de fatiga pueden provenir de ciclos de presión o vibraciones (fatiga mecánica), o también de ciclos térmicos (fatiga térmica). La corrosión acelera la velocidad del agrietamiento (corrosión – fatiga)

Algunas causas:

- Ciclos de presión por fuera de los parámetros de diseño.
- Concentradores de esfuerzo como juntas soldadas.
- Esfuerzos residuales de fabricación o soldadura altos.

- Errores de diseño o montaje que generan vibración y/o dilataciones y contrataciones térmicas altas.
- La suma de un ambiente corrosivo severo a lo anterior por inadecuado tratamiento del combustible o del agua.

En la Figura 10, se observa el cuerpo de una caldera pirotubular que presenta agrietamiento en la superficie por fatiga.

Figura 10. Fatiga.

U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaeespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberias>
decaldera



2.2.9. Sobre calentamiento de larga duración (fluencia lenta)

Se presenta expansión del tubo, las superficies de grieta son gruesas (labio grueso), por formación de micro-cavidades y posterior descohesión intergranular. Hay también globulización de la cementita y en algunos casos formación de grafito. Se produce por sobre calentamiento continuado a temperaturas del orden de 600°C.

Algunas causas:

- Capa gruesa de oxidación en lado de aguas

- Formación de depósitos en el interior de las tuberías que las aíslan térmicamente.
- Llamas cercanas o cenizas incandescentes

En la Figura 11, se observa una tubería que presenta un agrietamiento de labio grueso, y la sección metalográfica de la grieta.

Figura 11. Sobre calentamiento de larga duración (fluencia lenta).

U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>



2.2.10. Corrosión – esfuerzo

No hay expansión del tubo. Las grietas normalmente son múltiples e intergranulares y pueden ser ramificadas.

Algunas causas:

- Material con dureza elevada producto de un deficiente proceso de fabricación.

- Esfuerzos residuales de soldadura elevados por procesos de pre y postcalentamiento inapropiados.
- Deficiencia en el tratamiento del agua de alimentación. [6]

En la Figura 12, se aprecia una tubería con un agrietamiento causado por corrosión-esfuerzo, junto a su sección metalográfica de la zona agrietada.

Figura 12. Corrosión-esfuerzo.

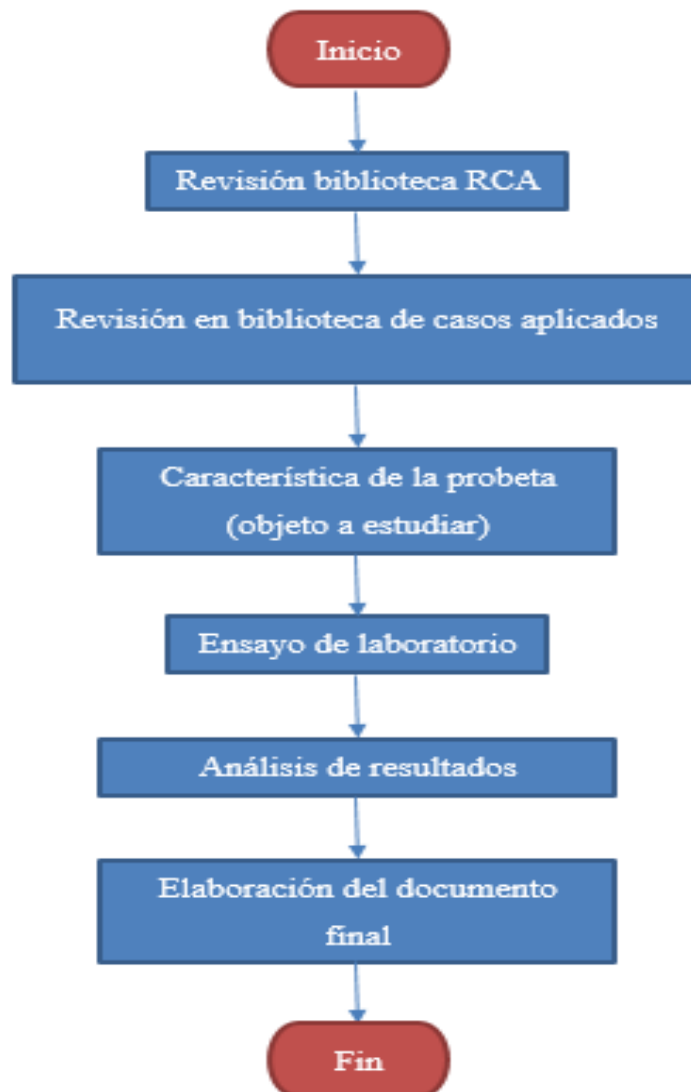
U. N. d. Colombia, *Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera*, 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaespejo/classroomnews/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>



3. METODOLOGIA

Para el desarrollo de este proyecto, se siguieron una serie de procedimientos (ver Diagrama 1), los cuales se describen con más detallan a continuación, y mostrando en que consiste cada uno de ellos.

Diagrama 1. Metodología del desarrollo del proyecto.



- REVISIÓN RCA: Se realizara revisión en libros especializados acerca de la teoría de RCA
- REVISIÓN EN BIBLIOTECA: Se realiza revisión y aproximación de los casos aplicados reportados en artículos científicos, en base de datos especializadas.
- CARACTERÍSTICA DE LA PROBETA: Exponer las condiciones de trabajo del elemento de estudio e indagar cual es la supuesta causa de falla según los afectados o el fabricante.
- ENSAYO DE LABORATORIO: Corte y pulimiento de muestras, identificación de microestructura del material y fallas microscópicas, prueba de dureza.
- ANÁLISIS DE RESULTADO: Se realiza el análisis de los datos obtenidos en las pruebas, y se estructura la información.
- ELABORACIÓN DEL PROYECTO FINAL: Se realiza la compilación de todos los resultados obtenidos en las pruebas y se realiza la elaboración del documento final.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. DIAGNÓSTICO FÍSICO

4.1.1. Diagnóstico físico de tubería de cobre

Este elemento pertenece a una caldera de una máquina de café la cual desempeña la función de transportar un fluido a altas temperaturas y a considerables presiones. Se encuentra ubicado en uno de los contadores volumétricos haciendo el retorno del fluido. Estos factores tanto de temperatura como de presión pueden dar indicios de las posibles fallas secuenciales que presentan las tuberías tanto en su parte interna como en su parte externa.

Después de realizar el análisis visual se puede evidenciar que el elemento presenta pequeñas fracturas especialmente en sus uniones de soldadura y también se puede observar que la parte interna de la tubería presenta cierta dilatación lo cual hace que se deforme plásticamente, tal como lo muestra la Figura 13.

Figura 13. Tubo de cobre con signos previos de dilatacion.



Después de una inspección más detallada del elemento se pueden apreciar nuevas rasgos físicos producidos por la falla (ver Figura 14):

- Rastros de agujeros en la parte transversal
- Porosidad en sus cavidades
- Grietas en la parte interna de la tubería

Figura 14. Corte tubo de cobre con signos de porosidad y grietas.



4.1.2. Diagnóstico físico del racor

Este elemento también perteneciente al ciclo de la caldera, el cual está compuesto de bronce y cobre, cumple la función de unir los tubos de cobre entre sí para direccionar el flujo a través de la tubería. Después de realizar una inspección visual a esta pieza mecánica, se puede evidenciar que presenta fallas físicas como fisuras y fugas, lo cual ocasionaba un escape considerable del fluido, como se ve en la Figura 15. Adicionalmente presenta en su parte interna signos de oxidación, erosion-corrosion y picaduras dentro del material, como se observa en la Figura 16.

La acción correctiva que se emplea en estas uniones es aplicación de soldadura para reforzar las partes vulnerables entre uniones, y también se realizaba como una solución temporal para dar una funcionalidad al sistema de caldera.

Figura 15. Racor de bronce con muestras de fisura.



Figura 16. Corte del racor que presenta efectos de corrosion.



4.2. PROCEDIMIENTO

Para el desarrollo del respectivo análisis de los componentes, se tomaron muestras metalográficas con el fin de inspeccionar con mayor detalle el comportamiento de dichos elementos. Adicionalmente, se realizó una prueba de dureza por método Rockwell para dar un mayor análisis del elemento de estudio. El desarrollo de estos estudios se llevó a cabo en el laboratorio correspondiente a la FULL.

Para obtener una toma de muestras, se realizó el siguiente procedimiento (ver Diagrama 2):

Diagrama 2. Procedimiento practico en el laboratorio de la FULL.



1. Inicialmente se cortaron los elementos de estudio, por medio de una cortadora de disco, para obtener probetas las cuales serían usadas para un mejor análisis y simplificar el estudio de dicho material.
2. A continuación se realizó un lijado de las probetas, con lijas de numerología 60, 100, 220, 360, 600, 1000 y 1200 respectivamente, con el objetivo de reducir las imperfecciones superficiales en el área de corte, y así obtener una sección transversal más pulida.
3. Luego se procede a pulir las probetas con un paño, y se le va adicionando alúmina para optimizar el proceso, y así obtener un brillo espejo con una mayor perfección de la superficie.
4. Una vez obtenido las probetas con su pulido correspondiente, se realiza un ataque químico con nital al 5% a la superficie tratada, para dar una mayor visualización a la microestructura del material una vez se coloque en el microscopio.
5. Después se hace la respectiva observación de las probetas en el microscopio y se toma evidencia de lo observado por medio de imágenes digitales.
6. Luego se realiza una prueba de dureza por método Rockwell
7. Finalmente se recopila la información obtenida en el laboratorio (tanto microestructura como dureza) para su respectivo análisis teórico

4.3. ESTUDIO DE DATOS

Para el desarrollo de un correcto análisis, se realizó el correspondiente procedimiento práctico en el laboratorio de la FULL, de la cual se pueden destacar ciertos aspectos:

- Inicialmente se contaban con tres probetas para el análisis del tubo y dos probetas correspondientes al racor (Figura 17 y Figura 18)

Figura 17. Corte de racor de bronce usado para análisis.



Figura 18. Corte de tubo de cobre para analisis inicial.



- Después de avanzar con el proceso en el laboratorio, se determinó que ciertas probetas contaban con una geometría ligeramente más compleja, razón por la cual se simplifico el estudio y se analizó una probeta por cada componente. (Figura 19 y Figura 20).

Figura 19. Probeta del tubo de cobre escogido para análisis.



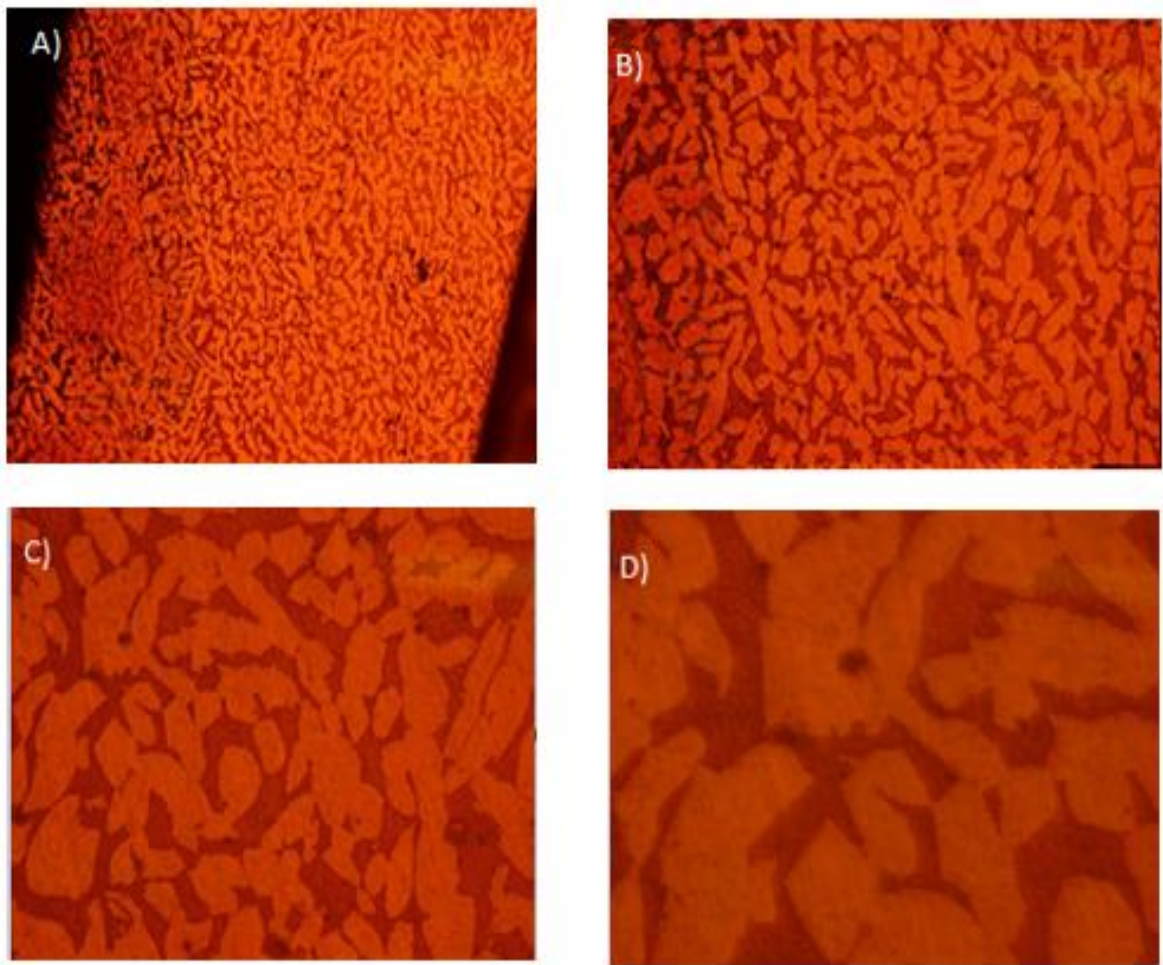
Figura 20. Probeta del racor de bronce escogido para análisis.



4.3.1. Estudio del tubo de cobre.

Después de realizar la observación en el microscopio se recopilaron las siguientes imágenes:

Figura 21. Microestructura del cobre. A) Aumento 100X, B) Aumento 200X, C) Aumento 500X, D) Aumento 1000X.



Teniendo en cuenta las muestras anteriores se procede a realizar la comparación con fuentes de información específica (ver Figura 22) y una de las muestras tomadas en el laboratorio (ver Figura 23) para determinar el material de estudio.

Figura 22. Microestructura metal de Muntz.

Aguilar, J. *Cobre y sus aleaciones* [Imagen]. Recuperado de:
http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/cml/12-Cobre_aleaciones.pdf

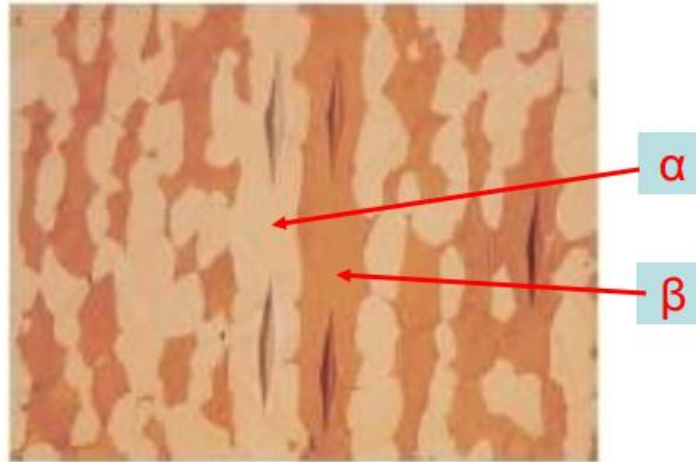
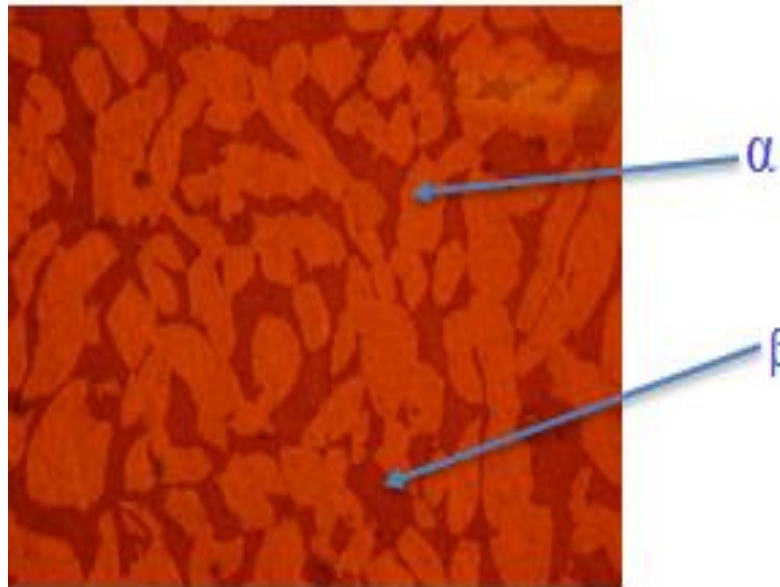


Figura 23. Microestructura del cobre 500X, α = Cu y β = Zn.



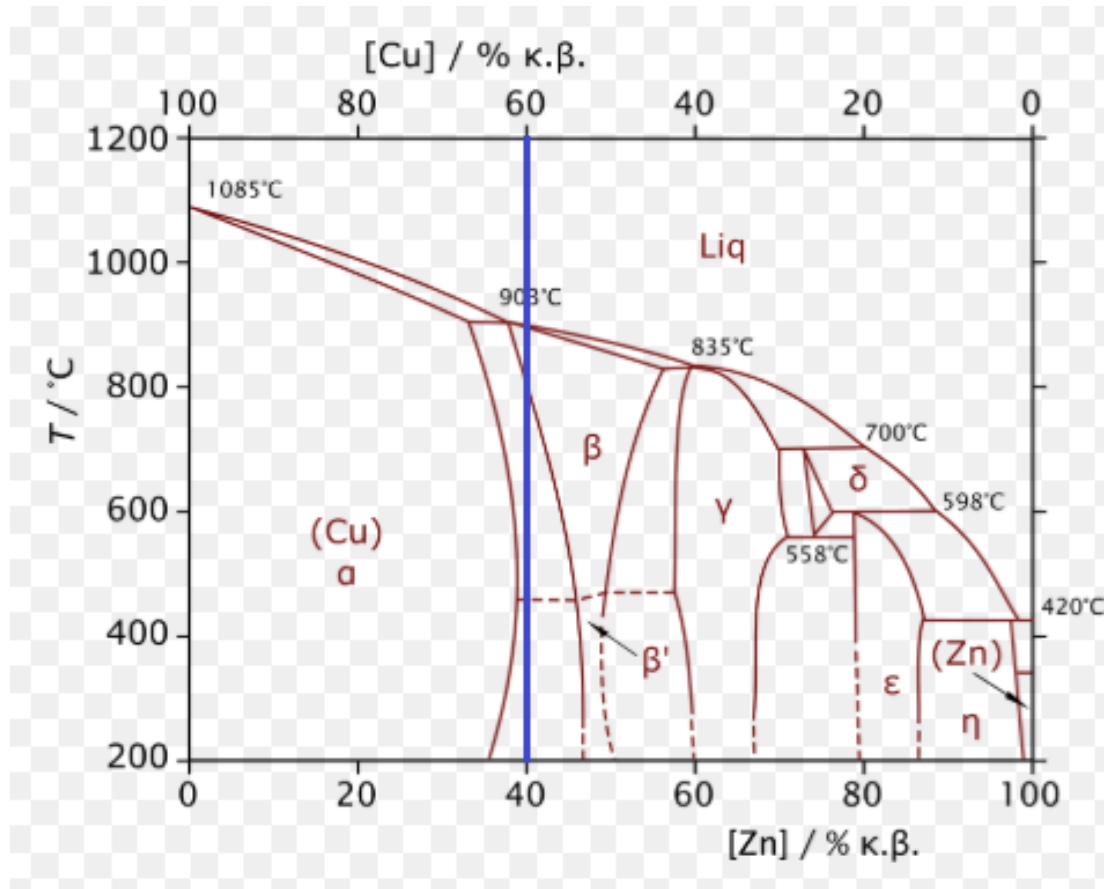
Observando y analizando las microestructuras se pueden observar zonas claras (α) y zonas oscuras (β). Realizando la revisión de esta información se puede dar una deducción que el tubo no es en su totalidad de cobre, sino que tiene una aleación de zinc, dando formación al latón.

Analizando la similitud de las microestructuras mostradas, se puede suponer que el material de estudio es un cobre C28000 según la UNS (sistema unificado internacional de designación de aleaciones), también conocido como metal de Muntz, el cual está compuesto por un 40% de zinc y el porcentaje restante de cobre. Este material se caracteriza principalmente por su dureza y resistencia a la corrosión, y además tiene excelente conformabilidad en caliente y forjabilidad por troquelado, y su aspecto presenta un color rojizo o amarillo pálido dependiendo del contenido de zinc. Algunas aplicaciones en la industria son las láminas de panel arquitectónico, tuercas y pernos grandes, barras de soldadura, placas de condensado, intercambiador de calor y tuberías de condensado. [6]

Adicionalmente, se realiza un análisis del tipo de material en el diagrama de fase Cu-Zn, donde se observa que esta aleación se acerca mucho a uno de los puntos peritéticos. Además su composición está en mayor parte por componente α , y el restante es de componente β como se evidencia en el Diagrama 3, lo cual corrobora la información anterior sobre la microestructura obtenida.

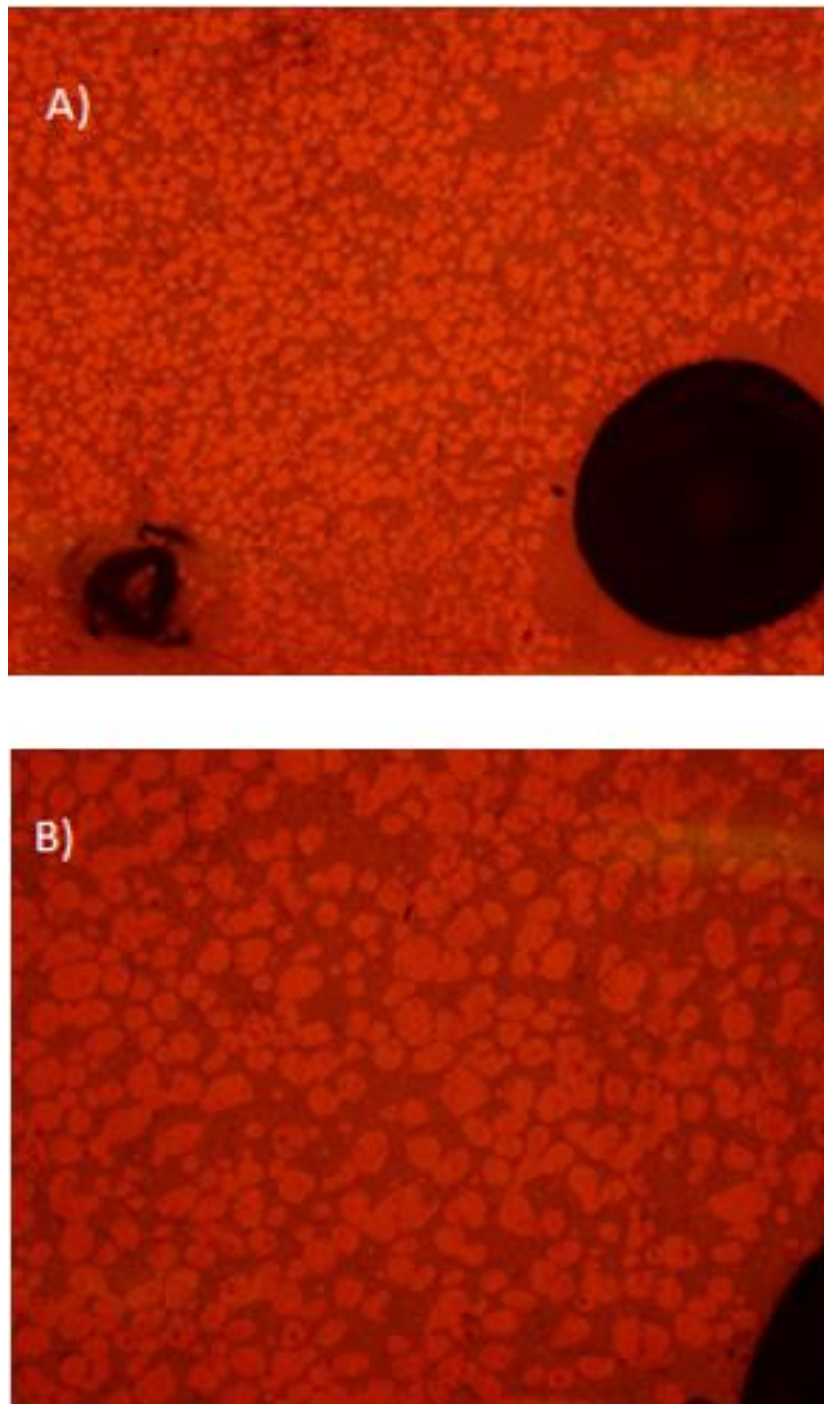
Diagrama 3. Diagrama de fase Cu- Zn.

Martínez, A. (2010) *Fractura a velocidades de impacto en distintos grados de copolímeros de propénelo-etileno* [Imagen]. Recuperado de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-11-Diagrama-de-fases-cobre-zinc_fig3_43800443



Para profundizar el análisis del tubo, se recopilaron muestras metalográficas que componen la soldadura en dicho elemento. En esta estructura se puede evidenciar que su superficie microscópica presenta unas burbujas o poros la cual podemos asociar a una mala aplicación de soldadura en el material. (Figura 24)

Figura 24. Microestructura de la soldadura de estaño. A) Aumento 100X, B) Aumento 200X.



Analizando la similitud de las microestructuras mostradas, como se evidencia en la Figura 25, se puede suponer que el material de la soldadura es una aleación de estaño con un 30% de plomo, por sus características este material es usado como elemento de unión entre dos metales como el bronce, latón o hierro, mediante el proceso de soldadura blanda (Soldadura que funde a menos de 200°C).

Figura 25. Microestructura de soldadura de estaño A) Microestructura 500X B) Microestructura Sn 30 Pb.

B) Tomado de ASM Handbook volume 9, Metallography and microstructure, pag 956.

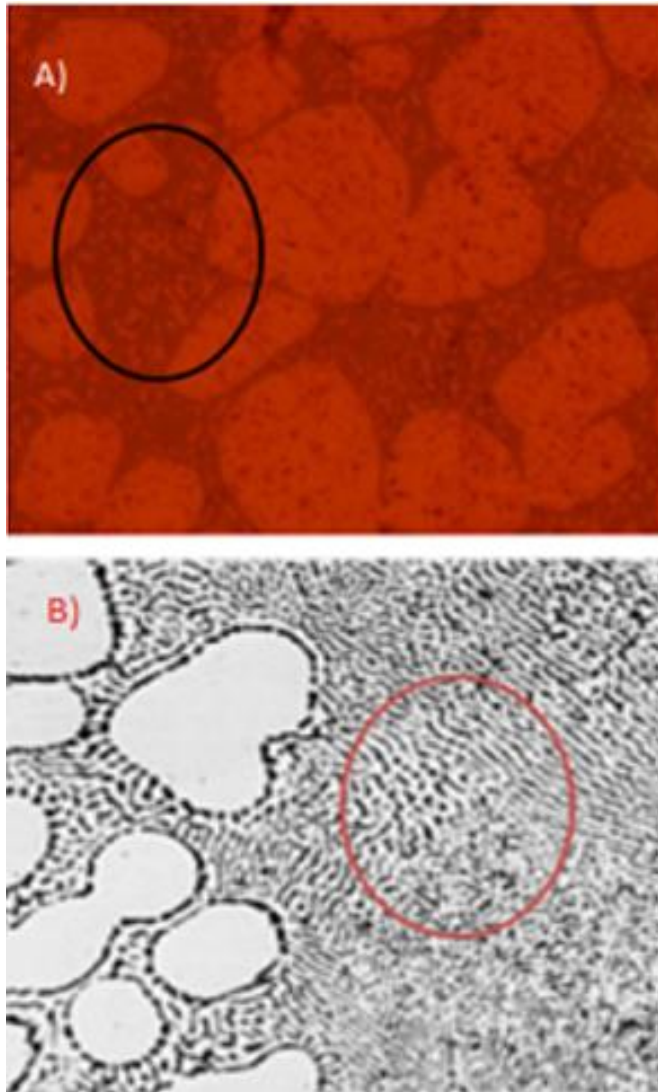
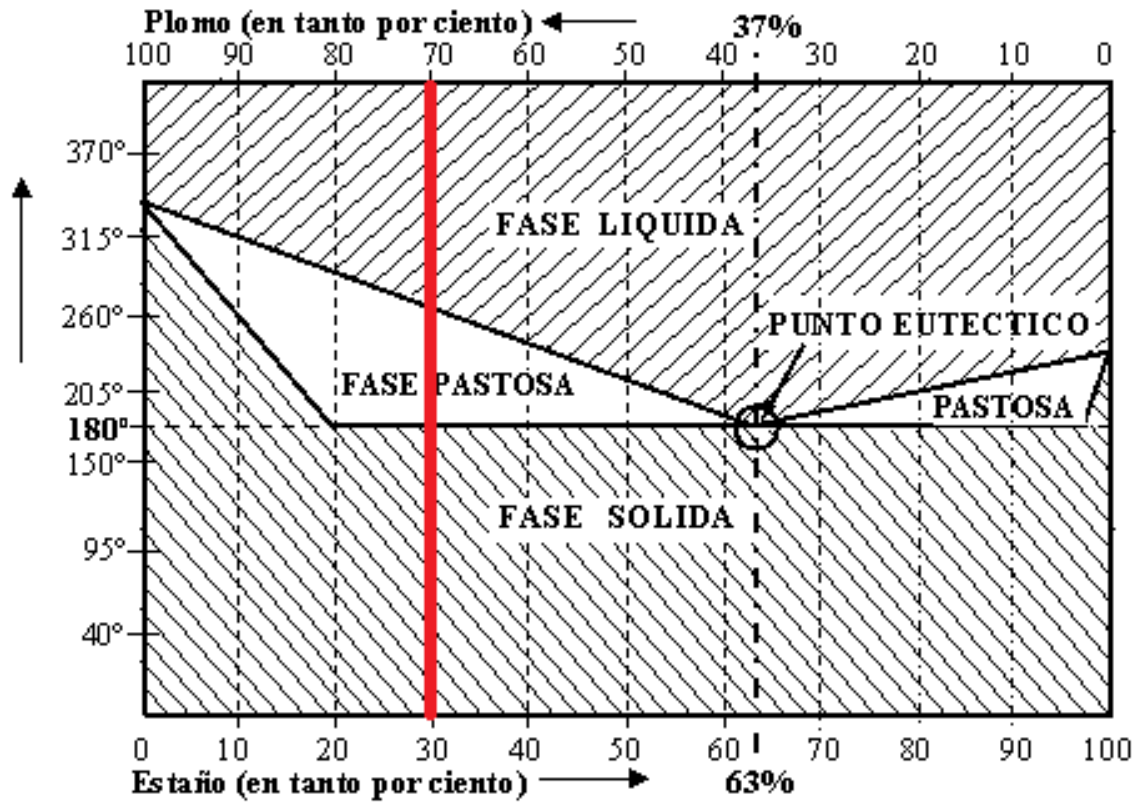


Diagrama 4. Diagrama de fase Sn – Pb.

Polimeni, H. (2011) Soldadura en electrónica [Imagen]. Recuperado de:
<http://www.mailxmail.com/curso-soldadura-electronica/soldante>

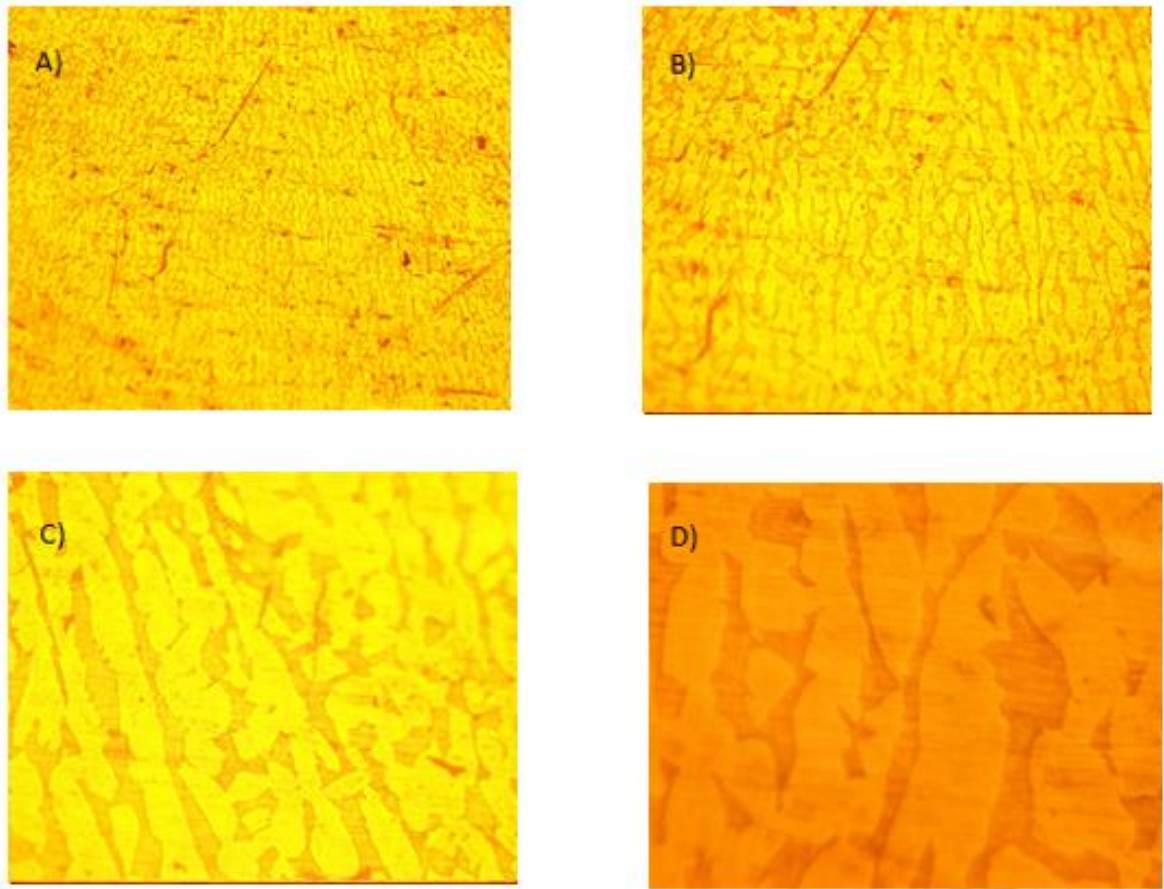


Se realiza un análisis del tipo de material en el diagrama de fase Sn-Pb, donde se observa en el Diagrama 4 que esta aleación con 30% de plomo presenta 3 fases que son: Fase líquida, fase pastosa (estado intermedio entre sólido y líquido) y fase sólida. Adicionalmente podemos observar que solo una aleación correspondiente al 63% de estaño y 37% de plomo tienen un punto eutéctico concluyendo que todas las aleaciones estaño-plomo tienen 3 fases. [7]

4.3.2. Estudio del racor de bronce.

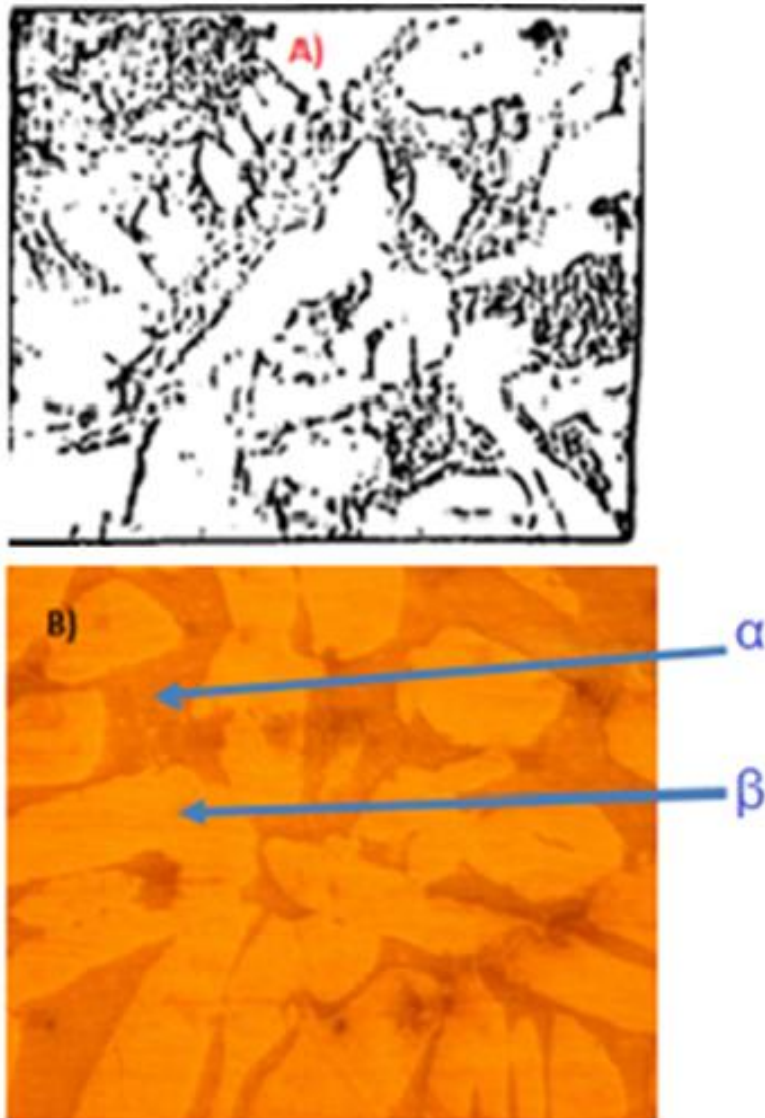
Después de realizar la observación en el microscopio se recopilaron las siguientes imágenes:

Figura 26. Microestructura del bronce A) Aumento 100X, B) Aumento 200X, C) Aumento 500X, D) Aumento 1000X.



Al analizar la microestructura se puede observar que el material no presenta ninguna clase de falla en su estructura, de este análisis podemos deducir que el material usado en esta aplicación es el indicado para el trabajo determinado.

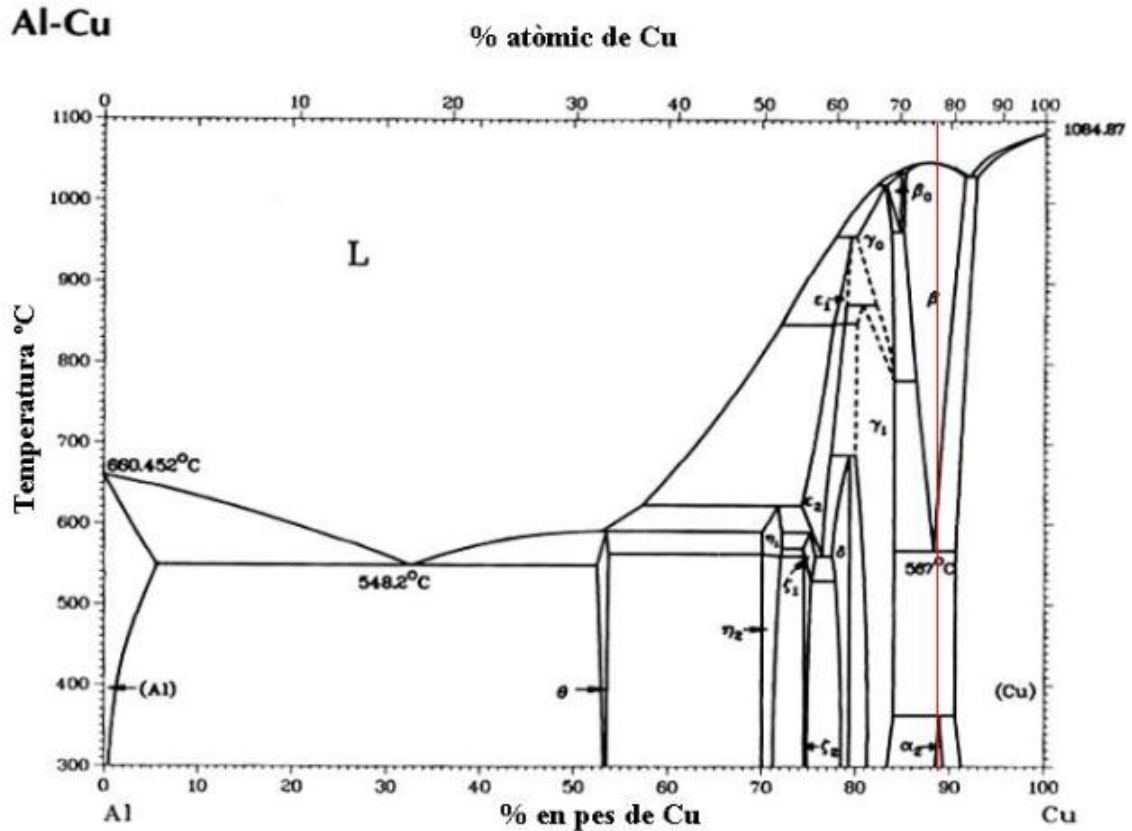
Figura 27. A) Microestructura bronce al aluminio C95400 B) Microestructura Cu - Al 1000X.
Vasconez, M, (1997). *Caracterización de la aleación bronce-aluminio*. [Imagen]. Recuperado de:
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4503/1/7023.pdf>



Analizando la similitud de las microestructuras mostradas anteriormente (Figura 27), se puede suponer que el material de estudio es un bronce aleado con aluminio C95400 según la UNS (sistema unificado internacional de designación de aleaciones), el cual está compuesto por un 85% de cobre, 11% aluminio y el porcentaje restante de Hierro . Observando y analizando las microestructuras se pueden observar zonas claras (α) que corresponden a la composición de cobre, zonas oscuras (β) que corresponden al aluminio y encontramos pigmentos en menor proporción pero con una mayor tonalidad que posiblemente corresponda al hierro. Esta aleación se caracteriza por tener una excelente resistencia a la corrosión y al desgaste. El refuerzo con solución sólida, trabajo en frío y precipitación de fase rica en hierro contribuyen a estas características. Las aleaciones que contienen altos grados de aluminio pueden ser templadas y revenidas. Los bronce al aluminio se usan en piezas metálicas marinas, ejes y piezas de bombas y válvulas para el procesamiento de agua salada, aguas ácidas marinas, ácidos no oxidantes y fluidos de procesos industriales. También su usan como cojinetes cilíndricos partidos y deslizadoras de máquina herramienta para uso industrial. Las piezas fundidas de bronce al aluminio tienen una resistencia excepcional a la corrosión, alta resistencia, tenacidad y resistencia al desgaste. También presentan buenas características de fundido y soldado. [8]

Diagrama 5. Diagrama de fase Cu-Al.

U. Barcelona, *Bronce de aluminio eutectoide templado*. [Imagen]. Recuperado de:
<http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/bronze-de-aluminio-eutectoide-templado>



Al observar el diagrama de fase Cu –Al (Diagrama 5), se puede ver la relación de las fases α - β , la línea correspondiente a la aleación se encuentra muy cercana al punto eutectoide del diagrama.

Para el estudio del bronce también se realizó pruebas de dureza tipo Rockwell en el laboratorio de la FULL.

Al realizar el respectivo procedimiento de dureza Rockwell B, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 1. Resultados Rockwell B para el bronce.

PRUEBA	DUREZA (HRB)
1	71
2	77
3	78

Figura 28. Procedimiento dureza Rockwell A) 71 HRB B) 77 HRB.



El objetivo de estas pruebas de dureza realizadas en la probeta de bronce, era recopilar mas informacion sobre el tipo del material que se esta analizando. De acuerdo a los datos obtenidos se hace una comparacion del valor nominal junto a los valores obtenidos en el laboratorio de lo cual se observa lo siguiente:

La dureza maxima mostrada en la Tabla 1 es de 78 HRB, y el dato teorico de la dureza en un bronce de aluminio C95400 mostrada en la Tabla 2 es de 90 HRB, lo cual se evidencia un margen de error relativamente pequeño. Con esto tambien se puede dar un indicio que el material ha sufrido perdidas en sus propiedades fisicas debido a la funcion que desempeña en la caldera, en la cual involucra elevadas presiones y altas temperaturas del fluido.

Tabla 2. Características mecánicas del bronce C95400.

Broposa. *Bronce al aluminio C95400*. [Imagen]. Recuperado de:

<http://www.broposa.com/documentacion/bronze-alaluminio-sae68b.pdf>

ESFUERZO A LA TENSION Kg/m.	% ALARGAMIENTO EN 50 mm.	DUREZA BRINELL (3000 kg.)	DUREZA ROCWELL (CIFRAS NOMINALES)	CONDUCCION TERMICA C.G.S.
15.4	40	183	90 B	15

5. ANALISIS DE FALLAS

Finalmente, con los datos recopilados anteriormente y realizando las comparaciones correspondientes de los datos obtenidos, se procede a realizar un diagnostico concreto de la posible causa raiz de las posibles fallas presentadas en los componentes de la caldera.

PIEZA	FALLAS
TUBO DE LATÓN	De acuerdo a los resultados obtenidos, el material presenta falla de corrosión por picadura posiblemente por un tratamiento deficiente de agua. También presenta una expansión del material originado por capas de oxidación en el interior de la tubería. Adicionalmente con las muestras de soldadura se puede dar un diagnóstico que indica la mala aplicación de esta soldadura llevando por este error a fallar la pieza.
RACOR DE BRONCE	De acuerdo a los resultados se puede apreciar que la estructura de bronce no sufrió daños significativos, pero este componente al estar expuesto a la mala aplicación de soldadura causó que la unión con la tubería presentara una falla de corrosión debido a que circula el fluido a altas temperaturas.

6. CONCLUSIONES

- Al realizar el estudio de los materiales se pudo comprobar que los elementos seleccionados en el sistema de calderas son los adecuados para su óptima operación y usualmente la falla es ocasionada por una mala operación del sistema o por falta de un correcto mantenimiento que va directamente relacionado con la correcta ejecución de la soldadura sobre las piezas.
- El análisis metalográfico fue un factor importante ya que por medio del analisis microestructural, se pudo observar detalladamente el comportamiento de los elementos de estudio, y adicionalmente dar una suposicion del tipo de material con el cual se esta trabajando.
- Se concluye que despues de realizar el estudio y analisis del tubo de laton fallo debido a corrosion por picadura esto, a causa del mal tratamiento que se le dio al fluido que recorria por la tuberia.
- Se evidencia que despues de realizar el estudio y analisis del racor de bronce se encontro que este es el material adecuado para su uso en la implementacion en el sistema de calderas, esto debido a las excelentes propiedades de resistencia a la corrosion y al desgaste, pero sus fallas son consecuencia de factores externos como la mala aplicación de soldadura.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Espejo y J. C. Martinez, *Analisis De La Falla Por Agrietamiento Experimentada En Tuberías*, Pereira, 2007.
- [2] J. J. Coronado Marin, *Mecanismo de falla de los tubos del sobrecalentador de una caldera acuotubular*, Cali, 2007.
- [3] M. A. Sonco Choque, *Guia de mantenimiento de calderas pirotubulares*, La Paz, 2015.
- [4] Estrucplan, «Partes principales que componen una caldera,» Estrucplan, 2011. [En línea]. Available: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2953>.
- [5] P. Abarca Bahamondes, *Descripcion de calderas y generadores de vapor*.
- [6] W. Chavez, C. Paredes y J. Pacheco, «Causa de fallas en calderas,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/286929469_Causa_de_Fallas_en_Calderas.
- [7] U. N. d. Colombia, «Modos de Falla Típicos en Tuberías de Caldera,» 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/afallaespejo/classroom-news/modosdefallatipicosentuberiasdecaldera>.
- [8] A. I. H. Committee, *Properties and Selection Noun Ferrous Alloys and Special-Purpose Material*, United State Of America: ASM METAL HANDBOOK, 1992.
- [9] H. G. Polimeni, «Mailxmail,» 11 Enero 2011. [En línea]. Available: <http://www.mailxmail.com/curso-soldadura-electronica/soldante>. [Último acceso: 27 Mayo 2018].

- [10] I. C. A. Mexico, «La ventaja del cobre,» [En línea]. Available:
<https://www.procobre.org/es/wp-content/uploads/sites/2/2018/03/ventajadelcobre.pdf>.
- [11] S. Capital, «Salud Capital,» [En línea]. Available:
http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img_upload/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Soldadura_de_Estano_Plomo.pdf. [Último acceso: 26 05 2018].