

DETERMINACIÓN MEDIANTE METALOGRAFÍA IN SITU DE LAS POSIBLES
AFECTACIONES MICROESTRUCTURALES SUFRIDAS EN LA CALDERA DE
BIENESTAR UNIVERSITARIO DE LA UIS

CRISTIAN DAVID DIAZ JAIMES

JOSÉ JOAQUIN JIMENEZ RIVERA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

DETERMINACIÓN MEDIANTE METALOGRAFÍA IN SITU DE LAS POSIBLES
AFECTACIONES MICROESTRUCTURALES SUFRIDAS EN LA CALDERA DE
BIENESTAR UNIVERSITARIO DE LA UIS

CRISTIAN DAVID DIAZ JAIMES

JOSÉ JOAQUIN JIMENEZ RIVERA

TRABAJO DE GRADO PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

DIRECTOR

JULIAN ORLANDO HERRERA ORTIZ
MAGISTER EN INGENIERÍA DE MATERIALES

CODIRECTOR

ANA EMILSE COY ECHEVERRIA
DOCTORA EN CIENCIA Y TECNOLOGIA DE MATERIALES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser nuestro guía en el camino recorrido hacia la culminación de esta meta, por nuestros padres y familiares para que fueran ellos los que nos acompañaron con su amor y apoyo que se reflejó en cada paso de nuestra carrera.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirnos ser parte de ella, a los docentes por su conocimiento aportado a nuestra formación profesional y en extensión a lo personal, especialmente a la Doctora Ana Emilse Coy quien con dedicación y paciencia nos brindó las pautas necesarias para el desarrollo de este proyecto, Ingeniero Julián Orlando Herrera por su orientación profesional y al ingeniero Carlos Andrés Galán por habernos brindado la oportunidad de trabajar con él, siendo un gran tutor y en su momento nuestro punto de admiración.

A los amigos y hoy colegas que la vida nos regaló, para que nos acompañaran en esta etapa, complementando nuestros conocimientos, regalándonos enormes sonrisas y experiencias inolvidables.

Al grupo de investigación GIMAT por facilitarnos los equipos necesarios para efectuar los ensayos de inspección, así como a los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalurgia y Ciencia de Materiales por tendernos la mano en cada momento de este proceso.

Cristian David Diaz Jaimes.

José Joaquín Jimenez Rivera.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO REFERENCIAL	16
1.1. DEFECTOS ASOCIADOS A LAS CALDERAS.....	17
1.1.1. Sobrecalentamiento de larga duración	17
1.1.2. Sobrecalentamiento de corta duración	19
1.1.3. Termofluencia (creep)	20
1.1.4. Esferoidización de la perlita.....	20
2. OBJETIVOS.....	21
2.1. OBJETIVO GENERAL	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	22
3.1. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES DEL ACERO ASTM A192.....	22
3.1.1. Caracterización microestructural por réplica metalográfica	23
3.1.2. Caracterización microestructural por metalografía tradicional.....	25
3.2. SELECCIÓN DE LAS ZONAS CRÍTICAS DE ESTUDIO.....	26
3.3. CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA DE LAS ZONAS SELECCIONADAS	27
3.4. PROPOSICIÓN DE ACCIONES PREVENTIVAS PARA EL ADECUADO FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA	27
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	28
4.1. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES DEL ACERO ASTM A192.	28

4.1.1. Tubo de acero ASTM A 192 prístino	28
4.1.2. Tubo de acero ASTM A 192 removido de la caldera pirotubular de Avidensa Mac-Pollo.....	29
4.2. SELECCIÓN DE LAS ZONAS CRÍTICAS DE ESTUDIO	32
4.3. CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA DE LAS ZONAS SELECCIONADAS	33
4.3.1. Hogar de la caldera	34
4.3.2. Placas tubo posterior y frontal	34
4.3.3. Tubos termoconductores	36
4.4. PROPOSICIÓN DE ACCIONES PREVENTIVAS PARA EL ADECUADO FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA.....	37
5. CONCLUSIONES	39
6. RECOMENDACIONES.....	40
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	413

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Rotura por flujo plástico	18
Figura 2. Falla por sobrecalentamiento de corta duración	20
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología experimental	22
Figura 1. Fotografía del tubo removido de la caldera de Avidensa Mac-pollo con presencia de pigmentos en la superficie	23
Figura 5. Fotografía del área utilizada para la técnica de inspección por medio de réplicas metalográficas y metalografía tradicional en el tubo de la caldera de Avidensa Mac-pollo fabricado de acero ASTM A-192.....	24
Figura 2. Micrografías ópticas a 100X, 500X y 1000X de la sección transversal del acero prístino A192, atacado con nital al 2%, tomadas mediante: a) metalografía tradicional y b) réplica metalográfica	28
Figura 7. Micrografías ópticas a 100X y 500X de la sección transversal del acero A192 removido de caldera de Avidensa Macpollo, atacado con nital al 2%, tomadas mediante metalografía tradicional y réplica metalográfica	30
Figura 8. a) vista frontal de la caldera pirotubular. b) componentes internos en estudio de la caldera pirotubular. 1. Tubos de transmisión de calor. 2. cámara de combustión. 3. Tapa tubo posterior.....	33
Figura 9. Réplicas metalográficas de la cámara de combustión atacada con nital al 2% a) Imagen tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X.....	34
Figura 10. Réplicas metalográficas de la placa tubo posterior atacada con nital al 2% a) Imagen tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X.....	35

Figura 11. Réplicas metalográficas de la placa tubo frontal atacada con nital al 2%
a) Imagen tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X.....35

Figura 12. Réplicas metalográficas del handhole 1 atacada con nital al 2% a) Imagen
tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X c) Imagen tomada a 1000X37

Figura 13. Réplicas metalográficas del handhole 2 atacada con nital al 2% a) Imagen
tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X37

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química del tubo removido de la caldera pirotubular de Avidesa Mac-pollo.....	31

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Condiciones de trabajo y características generales de la caldera.	44
Anexo B. Ubicación de las aperturas que permiten el acceso a los tubos termoconductores de la caldera.	45

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN MEDIANTE METALOGRAFÍA IN SITU DE LAS POSIBLES AFECTACIONES MICROESTRUCTURALES SUFRIDAS EN LA CALDERA DE BIENESTAR UNIVERSITARIO DE LA UIS

AUTORES: CRISTIAN DAVID DÍAZ JAIMES**

JOSÉ JOAQUIN JIMENEZ RIVERA**

PALABRAS CALVES: Caldera pirotubular, metalografía no destructiva, réplicas metalográficas.

DESCRIPCIÓN: Se realizó metalografía “In Situ” en la caldera pirotubular, ubicado en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander y perteneciente a la división de Bienestar Universitario, con el fin de determinar las posibles alteraciones microestructurales, especialmente de los componentes del hogar (tuberías, cámara de combustión y placas tubo frontal y posterior) los cuales son los puntos más críticos dentro del funcionamiento del equipo en cuanto a variables de presión y temperatura se refiere. Las placas tubo y cámara de combustión están fabricados de acero ASTM A285 grado C y los tubos termoconductores en acero ASTM A192. Se obtuvieron réplicas metalográficas bajo los parámetros establecidos por la norma ASTM E1351 como técnica de inspección complementaria en la evaluación de dichos componentes. Se obtuvo información microestructural del estado actual de la caldera y posteriormente fueron analizados teniendo como punto de comparación una tubería en estado prístino y otra expuesta a condiciones reales de operación en la caldera pirotubular de la fábrica de Avidesa Mac-pollo, de este modo se identificaron leves cambios en su microestructura que no afectan el funcionamiento y la eficiencia de este equipo intercambiador de calor. Finalmente se indicaron acciones preventivas y de control que permitan la prolongación de su vida útil.

* Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Julián Orlando Herrera, Codirector: Ana Emilse Coy

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF MICROSTRUCTURAL DAMAGE IN THE STUDENT WELFARE BOILER AT THE UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER THROUGHET IN-SITU METALLOGRAPHY.

RESEARCHERS: CRISTIAN DAVID DÍAZ JAIMES AND JOSÉ JOAQUIN JIMENEZ RIVERA

KEYWORDS: Pyrotubular Boiler, non-destructive metallography, metallographic duplicates.

DESCRIPTION:

The non-destructive technique of metallography "In Situ" was carried out in a steam generating device, which is located at the Division of Student Welfare's facilities of the Universidad Industrial de Santander. In order to determine, the possible structural micro alterations of the metal in service, especially of household components (pipes, combustión chamber and front and rear tube plates). Which are the most critical points within the operation of the equipment in terms of pressure and temperature variable refers.

The tube and combustion chamber plates are made of ASTM A285 grade C steel and the ASTM A192 steel conductive tubes. Metallographic replicas were obtained under the parameters established by the ASTM E1351 standard as a complementary inspection technique in the evaluation of said components. Microstructural information of the current state of the boiler was obtained and later analyzed with a pipeline in a pristine state and another one exposed to real operating conditions in the pyrotubular boiler of the factory of Avides Mac-pollo, in this way they were identified slight changes in its microstructure that do not affect the operation and efficiency of this heat exchanger equipment. Finally, preventive and control actions that allow the extension of its useful life were indicated.

* Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Adviser: Julian Orlando Herrera Ortiz, Coadviser: Ana Emilse Coy

INTRODUCCIÓN

El uso de energía y la generación de la misma es de vital importancia para el funcionamiento del mundo actual; uno de los métodos usados para tal propósito han sido las calderas, las cuales son equipos que proporcionan vapor permitiendo la realización de diferentes procesos en sectores como: la industria alimentaria, textil, papelera, cementera, entre otras. Para la obtención de dicha energía es necesario que estos equipos estén sometidos a condiciones de alta presión y temperatura durante tiempos prolongados. Por lo tanto es probable que en el transcurso de su vida útil tiendan a sufrir problemas de corrosión, sedimentación y alteraciones microestructurales del acero con el cual están fabricadas, lo que conlleva a la pérdida de las propiedades mecánicas y por ende a la reducción de la vida útil de este componente o una falla acelerada del mismo. En este orden de ideas, es necesario que, además de realizar los controles de rutina, se conozca el estado del material durante su vida útil a través de un control mediante análisis microestructural. Este control puede realizarse mediante la técnica no destructiva de metalografía in situ, ya que dicha técnica permite generar un criterio de aceptación del material sin alterar, destruir o desensamblar el equipo en funcionamiento [1].

El presente estudio fue realizado en la caldera pirotubular ubicada en la división de Bienestar Universitario de la Universidad Industrial de Santander, y que se emplea para generar vapor utilizado para la cocción de alimentos al servicio de la comunidad universitaria. Este dispositivo generador de vapor fue instalado y puesto en funcionamiento en 2009. A partir de esta fecha nunca se le ha efectuado una valoración del estado microestructural de sus componentes. El análisis se realizó con el propósito de conocer el estado actual, en términos microestructurales, del hogar de la caldera, placas tubos y tubos termoconductores, e indicar acciones que ayuden a aumentar la vida útil del equipo intercambiador de calor.

1. MARCO REFERENCIAL

La mayoría de problemas que se producen en equipos generadores de vapor surgen de la omisión de técnicas de inspección, de ahí que uno de los factores de mayor relevancia es mantener la integridad de cada uno de sus componentes aplicando estas técnicas. El 70% de las calderas que operan en Colombia se concentran en zonas residenciales, comerciales e industriales densamente pobladas, las cuales están expuestas a factores de riesgos, que pueden dar lugar a incendios, explosiones, lesiones personales, muertes, graves deterioros a bienes materiales y al ambiente [1].

Según la National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors el 85 % de los accidentes más frecuentes en calderas tienen relación con operación a bajo nivel de agua y errores de manipulación o mantenimiento deficiente [2]. Además de esto, debido a las altas temperaturas y presiones a las cuales operan las calderas, se pueden generar diferentes alteraciones microestructurales y por ende fallas a corto y largo plazo o en su defecto la reducción en la eficiencia de calor transmitido. Sólo en el año 2016 fueron registrados múltiples accidentes en Latinoamérica, entre los cuales se destacan el ocurrido en Venezuela en el matadero la Vigía, donde a causa de la acumulación de gases dentro de la caldera generó la explosión de la misma. Otro caso fue en Colombia, donde estalló una caldera acuotubular, debido a la escasa cantidad de agua suministrada al equipo, provocando la ruptura del tambor en su parte inferior de manera longitudinal y a su vez pérdidas materiales y humanas [3].

Actualmente la Universidad Industrial de Santander cuenta con una caldera pirotubular dentro de sus instalaciones, la cual está en funcionamiento desde el año 2009 alimentada con agua carente de un tratamiento previo que permita la purificación y por ende mejore la eficiencia del equipo.

1.1. DEFECTOS ASOCIADOS A LAS CALDERAS

Debido a las altas temperaturas y presiones que se presentan en las calderas, estas tienden a sufrir deterioro, fallas y alteraciones macro y microestructurales en algunos de sus componentes que se hallen sometidos durante varios años a dichas condiciones o cuando este tipo de equipos carecen de procedimientos establecidos para el mantenimiento y servicio de los mismos, malas rutinas de mantenimiento o abusos y descuidos durante la operación, o la falta de equipos complementarios a la caldera que contribuyan a disminuir su deterioro [4].

Uno de los puntos claves para preservar la integridad de la caldera es el agua de alimentación, ya que esta transporta sólidos disueltos, en suspensión y gases [5]. Cuando ingresa al equipo recibe un aporte intenso de calor, elevando su temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición, se evapora y sale de la caldera. El vapor generado en condiciones ideales no posee sólidos, razón por la cual permanecen en el interior de la caldera y dependiendo de su naturaleza, precipitan y se depositan sobre los tubos termoconductores generando problemas de corrosión, erosión, pérdida de eficiencia, falla en los tubos termoconductores, etc. [6] [7].

En las calderas se pueden presentar dos tipos de sobrecalentamiento: El de larga y corta duración.

1.1.1. Sobrecalentamiento de larga duración. El sobrecalentamiento de larga duración es una condición en la que la temperatura del metal sobrepasa los límites de diseño durante días, semanas, meses o más tiempo. Este tipo de sobrecalentamiento es la mayor causa de fallas en calderas que cualquier otro mecanismo, debido a que la resistencia mecánica del acero disminuye al aumentar la temperatura, incrementando la probabilidad de rotura causada por la presión interna normal de la caldera. La temperatura máxima permisible de diseño es en función de la composición química del tubo. Es así como conforme aumenta la cantidad del elemento de aleación, en particular de elementos como el cromo y el

molibdeno, pueden ser toleradas las temperaturas más elevadas [6]. De esta manera se puede establecer que el sobrecalentamiento de larga duración dependerá de la temperatura, el tiempo que se mantenga a dicha temperatura y de la composición del tubo [4] [8].

Asociados al sobrecalentamiento de larga duración se encuentran otros tipos de defectos que permiten saber la existencia de esta alteración. Entre ellos, la rotura por flujo plástico el cual produce una rotura de labios gruesos en la cúspide de tubos que hayan sufrido deformación en forma de comba como se puede observar en la Figura 1. Dicha deformación es generada al encontrarse sometido el componente a altas temperaturas. El flujo plástico produce una deformación plástica lenta y la coalescencia de micro-vacíos del metal durante el sobrecalentamiento, generando la falla [8].

Figura 1. Rotura por flujo plástico [9].



Los daños provocados por este tipo de sobrecalentamiento no aparecen de manera automática, ya que a pesar de que se pueden tener cambios microestructurales pequeños en la pared del tubo, muchas veces estos cambios influyen poco en la reducción de la vida en servicio o en un debilitamiento significativo del tubo. Pero si el sobrecalentamiento se mantiene durante largos periodos de tiempo provocará que dicha pieza falle. Aunque a veces es posible encontrar sobrecalentamiento de larga y de corta duración juntos, las fallas debidas a sobrecalentamiento de larga duración a veces se hallan relacionadas con ataque químico y desgaste significativo

del metal, mientras es muy raro encontrar un sobrecalentamiento de corta duración asociado a un ataque químico [8].

1.1.2. Sobrecalentamiento de corta duración. Este tipo de defecto se encuentra presente en los tubos que son enfriados por vapor o por agua. Entre los componentes de la caldera que tienden a sufrir de este tipo de falla se encuentran los sobrecalentadores y recalentadores; pero en algunas ocasiones, cuando el nivel del agua es bajo, las fallas ocurren en las cercanías de los colectores de vapor. Otra condición que promueve este tipo de sobrecalentamiento se presenta en el arranque, cuando el flujo de vapor es poco. Además, tiene lugar cuando la temperatura del tubo se eleva por encima de los límites de diseño durante un tiempo corto. Durante el sobrecalentamiento las temperaturas del metal son de al menos 454 °C y sobrepasan los 730 °C [8].

Con frecuencia este tipo de sobrecalentamiento resulta más sencillo identificar a partir de un examen metalográfico, ya que permite analizar microestructuralmente la presencia de depósitos internos significativos, así como la ausencia de grandes cantidades de magnetita formada térmicamente. Aunque también es posible de forma macro pues se podría mostrar expansión uniforme de los tubos y roturas violentas. En algunas ocasiones este tipo de falla no tiende a producir combadura en los tubos afectados pero bajo ciertas condiciones es probable que se presente. En general, en una rotura por calentamiento de corta duración, no existirán depósitos internos gruesos, ya que no es probable que estos depósitos sean la causa de la rotura [7] [8].

En el sobrecalentamiento de corta duración, se puede presentar una rotura longitudinal de paredes gruesas o una rotura longitudinal con forma de boca de pez como se observa en la Figura 2. A temperaturas elevadas, la resistencia mecánica del metal se reduce en forma marcada [8].

Figura 2. Falla por sobrecalentamiento de corta duración [9].



1.1.3. Termofluencia (creep). Los materiales sometidos a condiciones simultáneas de esfuerzos mecánicos y temperaturas elevadas tienden a sufrir un proceso denominado "creep", fenómeno que provoca transformaciones de la estructura con disminución progresiva en su resistencia mecánica. Asociado a esto, el fenómeno provocará la rotura del material en un determinado periodo de tiempo. Con lo anterior se hace evidente que la termofluencia es función del tiempo, la temperatura y la tensión. El control apropiado de dichas condiciones evitará la presencia de este mecanismo de daño y prolongará la vida de diversos tipos de componentes en plantas de generación de potencia, refinerías de petróleo y calderas [1] [8].

1.1.4. Esferoidización de la perlita. Los aceros al carbono usados en calderas sufren normalmente transformaciones microestructurales detectadas metalográficamente, dentro de las que comúnmente se encuentra la esferoidización de los carburos laminares de la perlita. Este fenómeno microestructural se presenta como consecuencia de la disminución de energía libre del sistema, que acompaña la reducción de la superficie de la interface de la cementita, siendo esto favorecido por el trabajo a altas temperaturas. En este sentido, el análisis cualitativo del grado de esferoidización sirve para evaluar la vida residual de un componente en servicio [1].

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar mediante metalografía in situ las posibles afectaciones microestructurales sufridas en la caldera de Bienestar Universitario de la UIS.

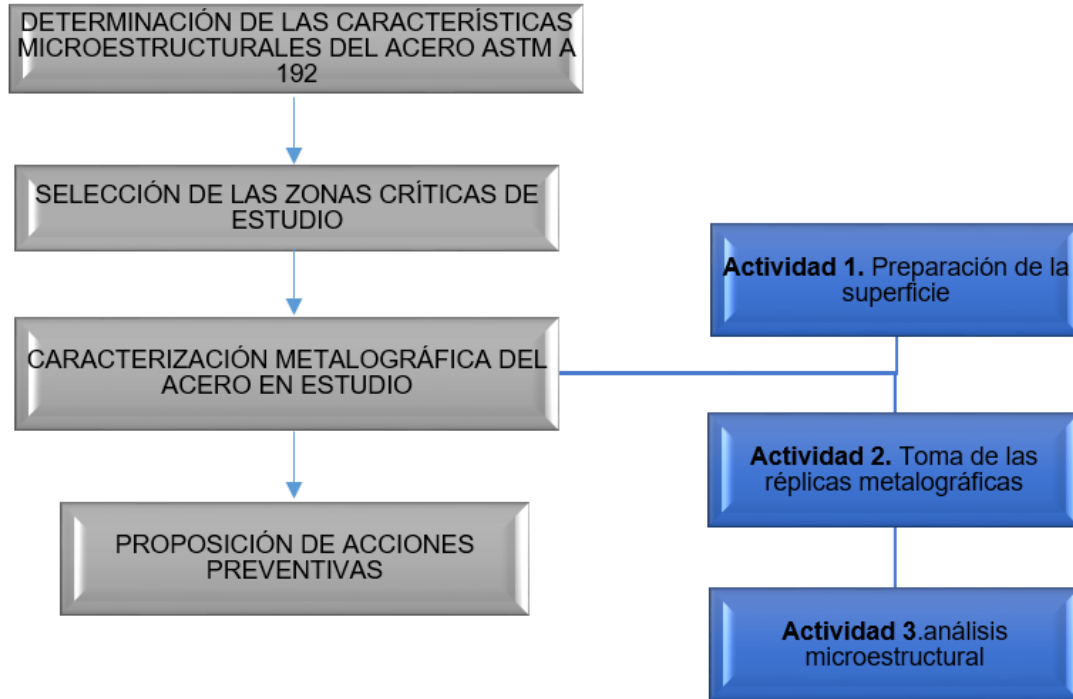
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características microestructurales mediante metalografía tradicional y por réplica del acero ASTM A192 para tubería de caldera pirotubular, en estado prístino y al ser expuesto en condiciones reales de operación.
- Determinar las zonas críticas de la caldera pirotubular de Bienestar Universitario que permitan el acceso para la inspección mediante metalografía in situ.
- Evaluar el grado de afectación que presenta las zonas inspeccionadas a partir del análisis de su microestructura.
- Proponer las acciones que permitan el adecuado funcionamiento de la caldera pirotubular a partir del estudio microestructural realizado.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la Figura 3 se presenta un esquema de la metodología experimental utilizada para la realización del presente trabajo.

Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología experimental



3.1. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES DEL ACERO ASTM A192

Se realizó el análisis microestructural de dos probetas de acero ASTM A192, empleando la técnica no destructiva de metalografía In situ y la técnica tradicional de metalografía destructiva, siguiendo las normas ASTM E1351 [10] y ASTM E3 [11], respectivamente. Identificando de esta manera la morfología de sus microconstituyentes en esta prístino y al ser expuesto en condiciones reales de operación ya que los tubos termoconductores de la caldera pirotubular ubicada en la división de Bienestar Universitario están fabricados del mismo acero.

Las probetas utilizadas corresponden a dos tubos de acero ASTM A192, cuya composición según la norma, presenta carbono (0,06-0,18%), manganeso (0,27-0,63%), fósforo (0,035% máx), azufre (0,035% máx), silicio (0,25% máx) y otros componentes en menor cantidad [12]. Los tubos fueron suministrados por la empresa Avidensa Mac-pollo ubicada en la ciudad de Girón-Santander. Uno de ellos corresponde a un tubo prístino y el otro tubo hace parte de uno de los componentes removidos en una de las calderas pirotubulares pertenecientes a la empresa, con una longitud de 50", diámetro 2,5" y espesor de 0,25" (Figura 4). Dicha caldera trabaja con carbón mineral como combustible, se encuentra en operación desde hace tres años; su presión de trabajo es de 130 [Psig] y el vapor generado alcanza los 150 °C [12].

Figura 4. Fotografía del tubo removido de la caldera de Avidensa Mac-pollo con presencia de pigmentos en la superficie.



3.1.1. Caracterización microestructural por réplica metalográfica. Para realizar la determinación de las características microestructurales de la probeta seleccionada se siguieron las etapas que a continuación se describen:

Preparación de la superficie. En primera instancia se seleccionó la zona mostrada en la Figura 5 para la respectiva inspección. Debido al estado de la superficie en el que se encontró la probeta, fue necesario realizar un desbaste manual con papel de carburo de silicio (SiC) número 80, lo que permitió la remoción de sedimentos y

óxido presentes en la tubería. Luego se procedió a realizar un desbaste automático con papel de SiC número 120, 240, 400, 600 y 1200 evitando el arrastre de algún tipo de impurezas provenientes de los alrededores del área en preparación y la limpieza de la misma, ya que podría contaminar la superficie e interferir en la interpretación de los resultados. A continuación, se realizó la etapa de pulido de la superficie utilizando paños, y pasta de diamante de $1\mu\text{m}$ y $0.25\mu\text{m}$ como abrasivo. El desbaste automático y pulido de la superficie fue efectuado con el equipo American Rotary Tools modelo NE 129 control unit- ARTCO Nakanishi electer Emax, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la Universidad Industrial de Santander. Posteriormente, con objeto de revelar la microestructura, el área pulida de la tubería fue sobreatacada con Nital al 2% (ácido nítrico y alcohol etílico), humedeciendo algodón con dicha sustancia y aplicando en la superficie preparada 15 pasadas. Finalmente, la superficie se limpió con alcohol y se secó con aire caliente [11].

Figura 5. Fotografía del área utilizada para la técnica de inspección por medio de réplicas metalográficas y metalografía tradicional en el tubo de la caldera de Avidesa Mac-pollo fabricado de acero ASTM A192.



Toma de las réplicas metalográficas. El procedimiento de inspección se realizó bajo la norma ASTM E1351 donde hace referencia en primera instancia a corroborar

que el área de interés esté completamente limpia. Para la toma de la réplica se procedió a humedecer con acetona el papel de réplica, Transcopy Replicas Foil Struers, en toda la superficie que iba a estar en contacto con el material de estudio. Posteriormente, se ubicó en el sitio deseado haciendo presión sobre la misma por 1 minuto y se dejó actuar la réplica durante 4 minutos para garantizar el copiado de la superficie. Finalmente, con el uso de pinzas, se retiraron cuidadosamente y se resguardaron entre dos vidrios porta objetos para evitar su deterioro. Se tomaron dos réplicas del mismo punto para asegurar la veracidad de la información a analizar.

Análisis microestructural. El análisis de las réplicas para la determinación de las características microestructurales de la tubería se realizó con el microscopio óptico Olympus GX71, del Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

3.1.2. Caracterización microestructural por metalografía tradicional. Este ensayo destructivo fue realizado en el área mostrada en la Figura 5, la cual fue utilizada anteriormente para la inspección mediante réplicas metalográficas. El procedimiento se realizó bajo la norma ASTM E3. A continuación se explican las etapas para la preparación metalográfica:

Corte. Se obtuvieron dos cortes de manera mecánica, uno longitudinal y otro transversal, por medio de discos abrasivos de Al_2O_3 , manteniendo refrigerada y lubricada la muestra durante este procedimiento para así evitar quemaduras o alteraciones por transferencia de calor en la microestructura del acero.

Montaje. Con el fin de obtener una mejor manipulación de las muestras en las siguientes etapas de la preparación, éstas fueron montadas en baquelita mediante un montaje en caliente.

Desbaste. Inicialmente se realizó un desbaste grueso con papel de carburo de silicio (SiC) número 80, luego se procedió a realizar un desbaste fino con papel de SiC número 120, 240, 400, 600 y 1200 teniendo en cuenta los aspectos de rotación, limpieza y presión uniforme de la muestra durante esta etapa.

Pulido. Para el pulido final de la superficie se utilizó paños, y pasta de diamante de $3\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$ y $0.25\mu\text{m}$ como abrasivo. Además, con objeto de mostrar la microestructura en el área pulida de la tubería fue atacado el tubo con Nital al 2% mediante método de inmersión, sosteniendo la muestra de 15 a 20 segundos.

Análisis microestructural. El estudio de las características microestructurales de las micrografías obtenidas mediante el procedimiento antes descrito se efectuó con el microscopio óptico Olympus GX71, del laboratorio de metalografía ya mencionado.

3.2. SELECCIÓN DE LAS ZONAS CRÍTICAS DE ESTUDIO

La caldera de Bienestar Universitario consta de ciertos componentes que permiten su funcionamiento pero que no necesariamente están expuestas a las mismas condiciones de trabajo como son: tuberías externas, válvulas, manómetro, chimenea, tanque de almacenamiento, entre otros. Como primera etapa de inspección en proyectos simultáneos, se realizaron diferentes pruebas no destructivas como: medición de espesor por ultrasonido industrial, inspección visual, partículas magnéticas en cordones de soldadura y termografía infrarroja, con el fin de conocer el grado de afectación a nivel macro. Por otra parte, este equipo al ser un intercambiador de calor presenta en su proceso altas temperaturas y presiones que deben ser soportadas por algunos elementos entre los cuales encontramos: tubo de combustión, placas tubo y tubos termoconductores. Por lo cual, se decidió estudiar dichos componentes por medio de metalografía In Situ para conocer su estado actual y posibles afectaciones microestructurales sufridas durante el servicio. Las condiciones de trabajo con las cuales opera la caldera pirotubular están descritas en el anexo A. [4] [5]

3.3. CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA DE LAS ZONAS SELECCIONADAS

La caracterización microestructural se realizó mediante metalografía no destructiva in situ y para esto fue preparada un área de cada zona seleccionada siguiendo el apartado descrito en el numeral 3.1.1

3.4. PROPOSICIÓN DE ACCIONES PREVENTIVAS PARA EL ADECUADO FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA

A partir del estudio realizado anteriormente en la caldera pirotubular ubicada en la división de Bienestar Universitario de la UIS, se propusieron recomendaciones preventivas que permitan el correcto funcionamiento y por ende la integridad microestructural de cada uno de los elementos evaluados.

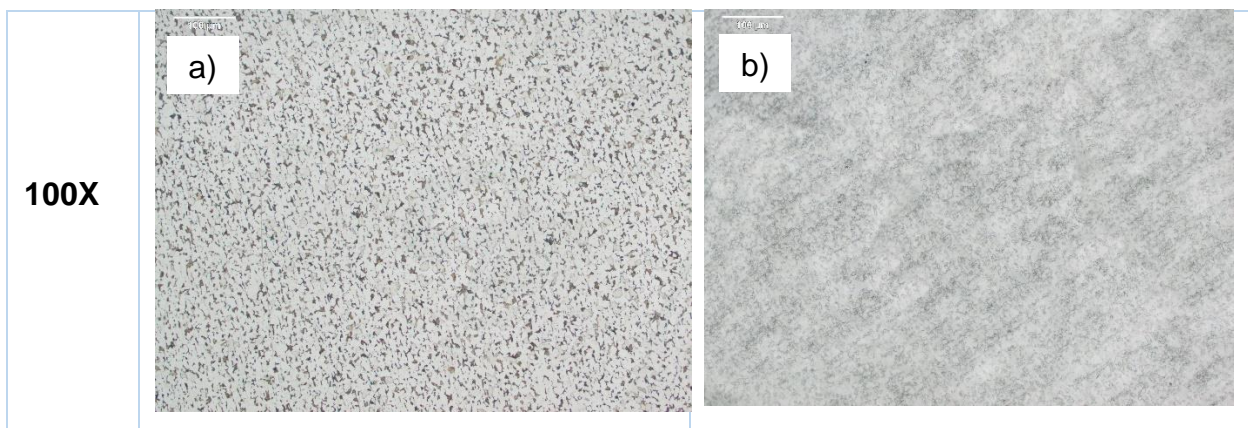
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

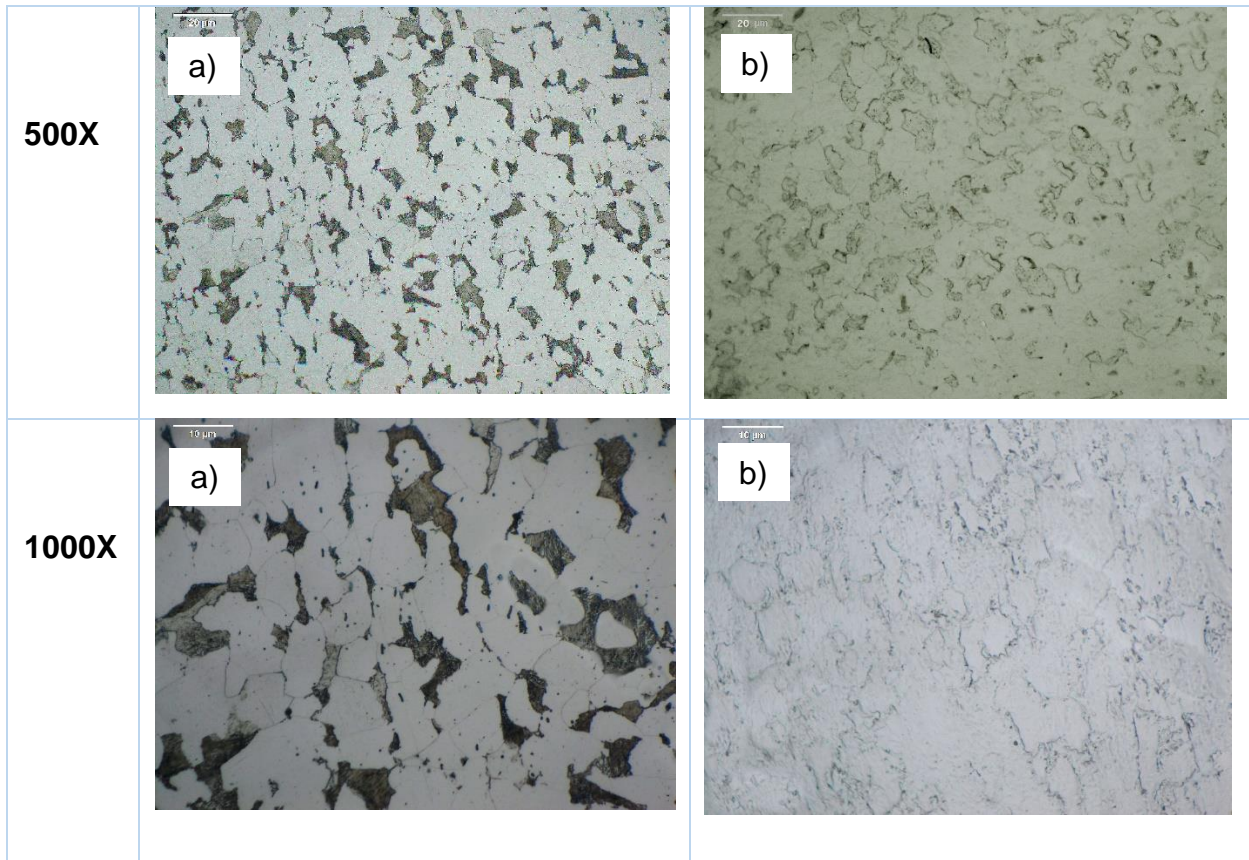
4.1. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES DEL ACERO ASTM A192.

Los resultados obtenidos en este inciso acerca de la microestructura del acero ASTM A192 en estado prístino y al ser expuesto a condiciones reales de operación, son el parámetro de comparación para el análisis de las réplicas metalográficas realizadas en la caldera pirotubular de Bienestar Universitario de la UIS.

4.1.1. Tubo de acero ASTM A 192 prístino. La Figura 6 muestra las micrografías ópticas tomadas mediante metalografía tradicional y por réplica, a diferentes aumentos. Se puede observar una microestructura típica para este tipo de aceros, compuesta por granos equiaxiales de color claro que corresponden a la ferrita y zonas oscuras de perlita muy bien definidos con la metalografía tradicional. En la réplica con cierta dificultad se pueden observar zonas claras de ferrita, con relieves que definen levemente el límite de grano y zonas grisáceas que corresponden a la perlita. El tamaño de grano de este acero es el número 8 según la norma ASTM E112 [13].

Figura 6. Micrografías ópticas a 100X, 500X y 1000X de la sección transversal del acero prístino A192, atacado con nital al 2%, tomadas mediante: a) metalografía tradicional y b) réplica metalográfica



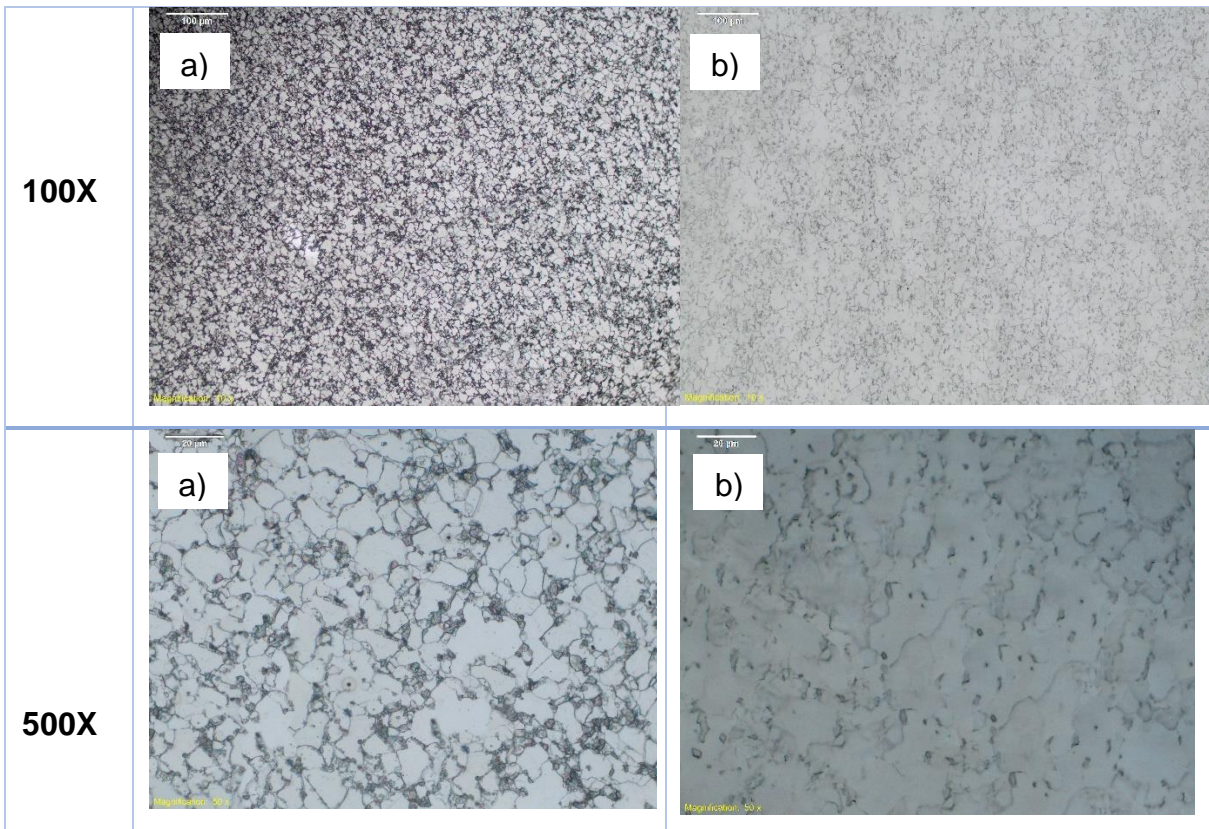


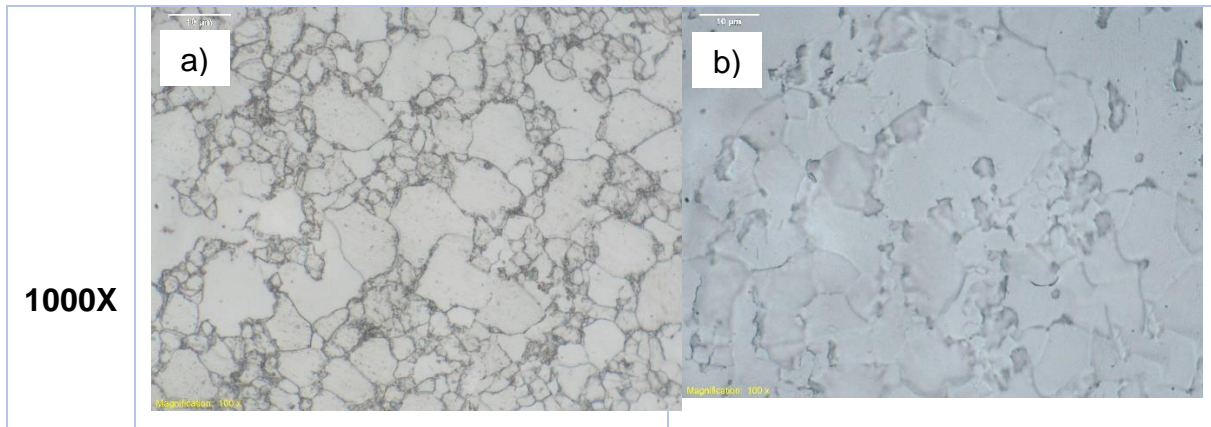
4.1.2. Tubo de acero ASTM A 192 removido de la caldera pirotubular de Avidensa Mac-Pollo. Antes de hacer el análisis microestructural del tubo removido de la caldera pirotubular, mediante las dos técnicas metalográficas, se realizó una inspección visual donde se logró observar zonas con pigmentos de color gris, blanco y rojo, pertenecientes a algún tipo de pintura, así como la presencia de sedimentos. También se evidenció corrosión uniforme, picaduras y costras en la parte externa de la muestra (figura 4). Las afectaciones superficiales mencionadas fueron consecuencia de una serie de variables no controladas como la calidad del agua suministrada y la falta de mantenimiento, las cuales podrían ocasionar cambios microestructurales reduciendo de este modo la vida útil de dicho componente.

En la Figura 7 se muestra la microestructura del tubo de acero ASTM A192, tomadas a diferentes aumentos y mediante las dos técnicas metalográficas. Se puede

apreciar una microestructura compuesta por granos equiaxiales pertenecientes a la ferrita de tonalidad blanca al microscopio y zonas oscuras que normalmente correspondería a la perlita (ferrita y cementita). El análisis a 1000X mediante metalografía tradicional y por réplicas metalográficas permite visualizar el crecimiento amorfo que ha sufrido el grano y la globulización que sufre la cementita con difusión de esta hacia los límites de grano, sitios de mayor energía donde se revelan como puntos oscuros, esto debido a las altas condiciones de trabajo en función de presión, temperatura y tiempos prolongados a los que es sometida la pieza en estudio. El tamaño de los granos observados presentan un leve crecimiento respecto al tubo prístino (figura 6) grado 7 según la norma ASTM E112 [13].

Figura 7. Micrográficas ópticas a 100X y 500X de la sección transversal del acero A192 removido de caldera de Avides Macpollo, atacado con nital al 2%, tomadas mediante: a) metalografía tradicional y b) réplica metalográfica





Este proceso de esferoidización es provocado por el escalonamiento de la cementita en aquellos puntos donde la energía libre es mayor como las dislocaciones y defectos de crecimiento, facilitando la disolución de esta en la ferrita. Favorecida también por el aumento de la solubilidad del carbono en la ferrita (de 0.008%C en masa a temperatura ambiente pasa a 0.032%C en masa a 720 °C) [14].

Finalmente, por medio de la técnica de espectrometría de emisión óptica por chispa, usando el método Fe100, se obtuvo la composición química de este acero como se observa en la Tabla 1, con pérdida mínima de carbono haciendo referencia a una descarburación provocada por la difusión de estos átomos hacia los límites de grano.

Tabla 1. Composición química del tubo removido de la caldera pirotubular de Avides Mac-pollo

Elemento	Composición (%)
Carbono	0.057
Manganeso	0.597
Fósforo, máx.	0.0092

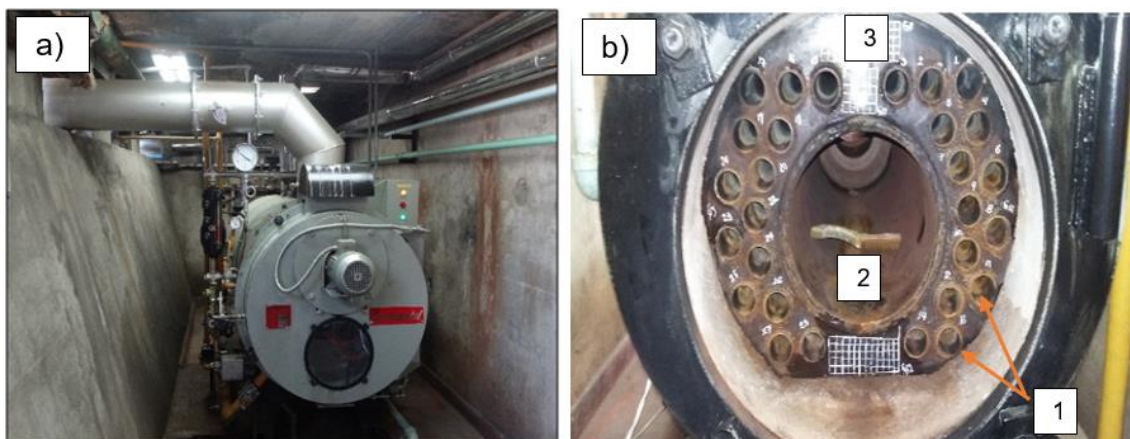
Azufre, máx.	0.013
Silicio, máx.	0.197

4.2. SELECCIÓN DE LAS ZONAS CRÍTICAS DE ESTUDIO

La caldera pirotubular objeto de estudio consta de un número de partes que ayudan a su correcto funcionamiento, pero sólo algunas de ellas se encuentran sometidas a altas presiones y temperaturas, así como condiciones de trabajo extremas (generación de depósitos, incrustaciones y corrosión). Entre estas partes se encuentran: la cámara de combustión, las placas de tubo frontal y posterior y el hogar, el cual está constituido por una serie de 24 tubos de transformación de calor que a su vez encierran la zona de radiación de la caldera. El esquema ilustrativo de la caldera en evaluación se presenta en la Figura 8 y posee las siguientes características:

- Placa Tubo en lámina de acero ASTM A 285 GR.C en calidad certificada 3/8" (9,525mm) [15].
- Cámara de combustión corrugada en lámina de acero al carbono ASTM A285 GR. C [15].
- Tubos termoconductores fabricados en acero ASTM A192 [12].
- Vaso de presión en lámina de acero al carbono en calidad certificada 1/4" (6,35mm)
- Accesorios. Las uniones y accesorios en el cuerpo de presión de la caldera son de clase 3.000 según las normas del código ASME B-31. 3. [16] [17].

Figura 8. a) vista frontal de la caldera pirotubular. b) componentes internos en estudio de la caldera pirotubular. 1. Tubos de transmisión de calor. 2. cámara de combustión. 3. Tapa tubo posterior



La caldera posee dos puertas que permiten la entrada por la parte frontal y posterior al hogar de la misma (cámara de combustión). Además, cuenta con cuatro pequeñas aperturas (Handhole) de aproximadamente 5.5" de radio (ver anexo B, Figura 3), de las cuales sólo se tuvo acceso a dos de ellas. El Handhole 1 (H₁) corresponde a la apertura lateral derecha (ver anexo B, Figura 2), la apertura lateral izquierda corresponde al Handhole 2 (H₂) (ver anexo B, Figura 1) donde se analizó el tubo más próximo a la entrada, siendo éste representativo de aquellos que se encuentran a su alrededor (ver anexo C).

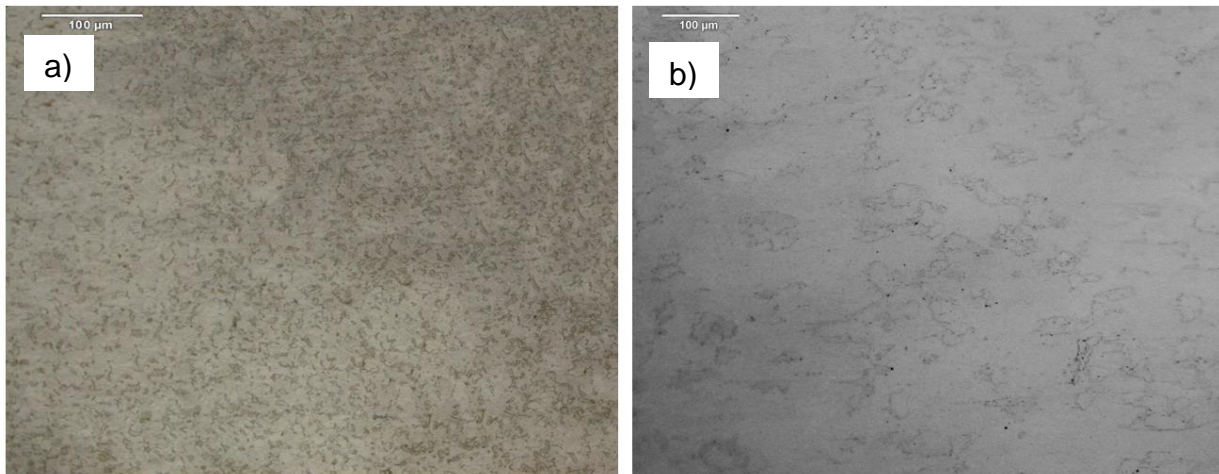
4.3. CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA DE LAS ZONAS SELECCIONADAS

Los componentes de la caldera que se analizan son los mencionados y representados en la figura 8b y corresponden a: tapas tubo frontal y posterior, cámara de combustión y los handhole 1 y 2 por los cuales se tuvo acceso a los tubos termoconductores. Estos últimos componentes como se puede apreciar en las imágenes (anexo C. Figuras 5, 6 y 7) presentan una capa de sedimento o costras de color naranja-rojizo en toda su superficie que fueron fáciles de remover, fenómeno que hace referencia a las impurezas provenientes del agua sin

tratamiento previo a la alimentación de la caldera, pero que no impiden la transferencia de calor y por ende no se sobrepasan las temperaturas críticas de diseño llegando a generar pérdida de material y sedimentos de morfología más rugosa .

4.3.1. Hogar de la caldera. La Figura 9 hace referencia a la inspección realizada por réplicas metalográficas en la parte interna de la cámara de combustión, la cual no está en contacto con agua y está fabricada acero hipoeutectoide ASTM A285 grado C [15]. Se observa un tamaño de grano pequeño 7-8 ASTM partiendo del relieve que se origina al realizar dicho ensayo no destructivo. Este grano equiaxial representa a la ferrita presente en la matriz del acero donde también es posible diferenciar tonalidades grisáceas correspondientes a la perlita. Por otra parte, presenta leve precipitación de carburos debido a la difusión atómica propia de un equipo que ha estado 8 años en funcionamiento, pero como se observa a 500X figura 9 b no implica un daño acelerado o la presencia en más de un sector de la réplica en estudio.

Figura 3. Réplicas metalográficas de la cámara de combustión atacada con nital al 2% a) Imagen tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X



4.3.2. Placas tubo posterior y frontal. Con base en el relieve presentado en las micrografías, se aprecia en las figuras 10a y 11a un tamaño de grano 8 según la

norma ASTM E112 uniforme y equiaxial. Además, se observa zonas claras referente a la ferrita y tonalidades grisáceas correspondientes a la perlita que es habitual encontrar en un acero ASTM A285 grado C [13], dicha microestructura no muestra signos de cambios microestructurales, es decir, nunca se expuso el material a temperaturas o condiciones de trabajo superiores a las de diseño tal y como se presenta a mayores aumentos en las figuras 10b y 11b donde no se observa la transformación de la perlita y precipitación de carburos.

Figura 4. Réplicas metalográficas de la placa tubo posterior atacada con nital al 2% a) Imagen tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X

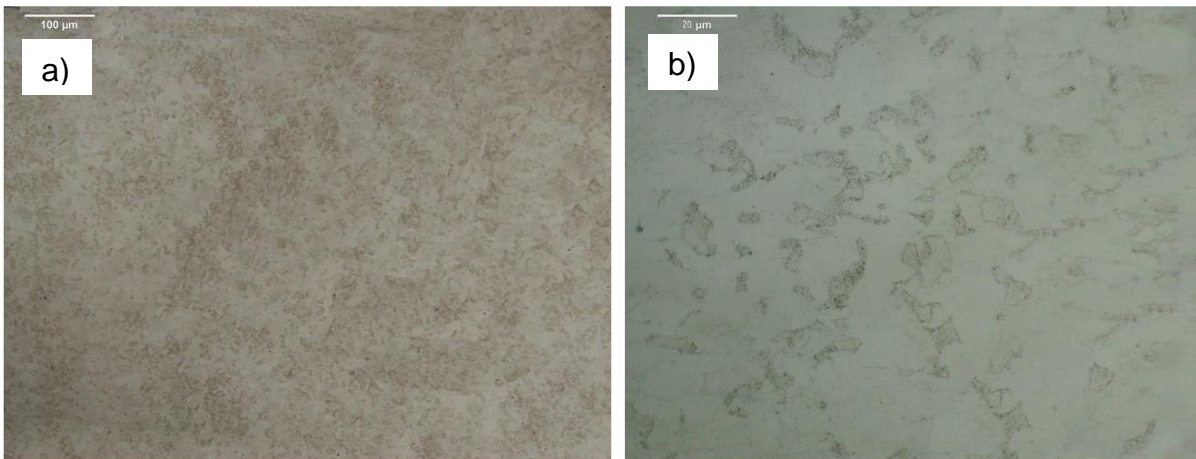
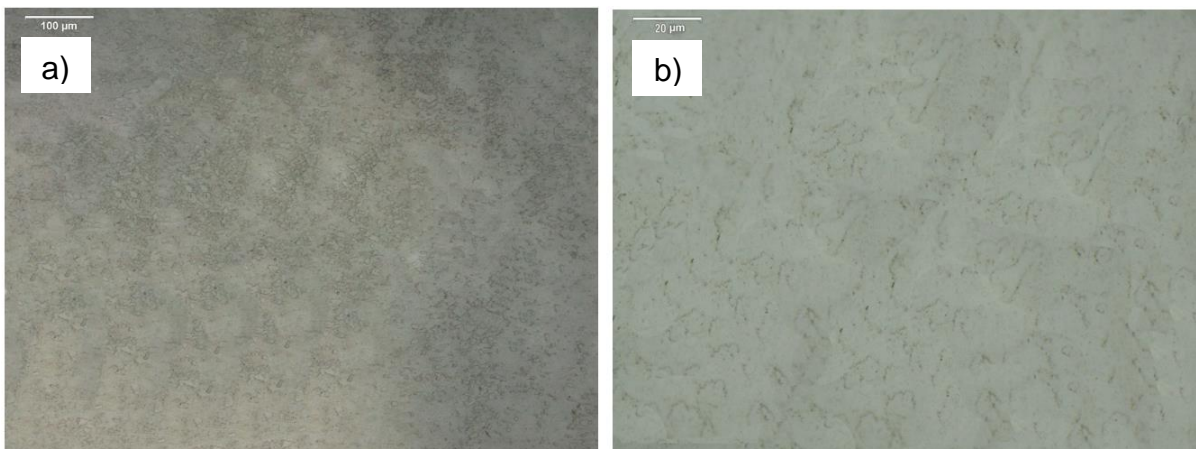


Figura 5. Réplicas metalográficas de la placa tubo frontal atacada con nital al 2% a) Imagen tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X



4.3.3. Tubos termoconductores. Es importante tener en cuenta que las condiciones de trabajo para los tubos termoconductores a los cuales se tuvo acceso por medio del Handhole 1 y 2 son de las mismas, ya que estos se encuentran a la misma altura en el hogar. Dicha zona es propensa a presentar problema debido a que si el agua suministrada no es suficiente, dichos componentes estarían recibiendo energía calórica la cual no sería transmitida al agua para la generación de vapor, provocando posibles alteraciones en su microestructura. En las Figuras 12a y 13a, se observa un tamaño de grano grado 8 según la norma ASTM E112, los tubos presentan una microestructura compuesta de granos equiaxiales de tonalidad blanca correspondientes a la ferrita y zonas ligeramente más oscuras referentes a la perlita, típico de un acero al carbono ASTM A192 [17].

Estas micrografías no presentan alteraciones respecto a las reveladas en el tubo prístino (Figura7) ya que se observa granos de forma angular y no se generan zonas suavizadas lo cual podría ser una indicación que la tubería no ha estado expuesta a temperaturas por encima de los 482 °C la cual es la máxima recomendada a esfuerzos bajos ya que por encima de esta temperatura la vida útil se reduciría significativamente al verse afectada por precipitación de carburos y globulización de la cementita presente en la perlita [18].

Figura 6. Réplicas metalográficas del handhole 1 atacada con nital al 2% a) Imagen tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X c) Imagen tomada a 1000X

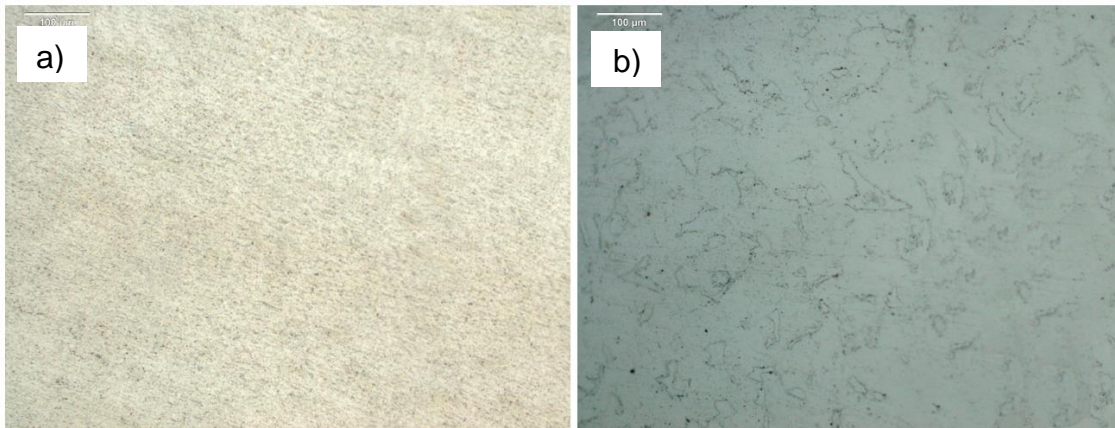
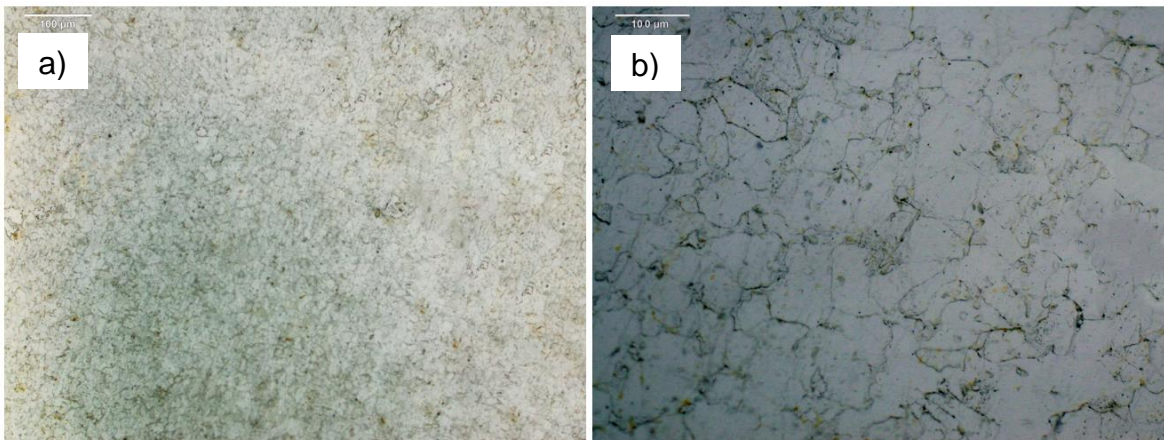


Figura 7. Réplicas metalográficas del handhole 2 atacada con nital al 2% a) Imagen tomada a 100X b) Imagen tomada a 500X



4.4. PROPOSICIÓN DE ACCIONES PREVENTIVAS PARA EL ADECUADO FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA.

A partir de la microestructura revelada en los elementos evaluados por metalografía in situ se presentan diversas recomendaciones o sugerencias que podrían favorecer el buen desempeño de la caldera, su protección e integridad ayudando a la vida útil de la misma:

Como primera medida y debido a lo encontrado en el interior de la caldera, es de vital importancia la instalación de un suavizador de la dureza del agua suministrada, que contribuya a la reducción de depósitos que actualmente presenta la caldera, ya que es el factor más influyente en la generación de cambios microestructurales y por ende el riesgo de la integridad del equipo.

Es también de gran importancia anualmente realizar este y otros estudios por medio de ensayos no destructivos, como modo de prevenir y conocer el comportamiento y estado del equipo. Para este estudio y evaluación se cuenta con la ayuda del grupo GIMAT de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

De igual forma se recomienda brindar capacitación acerca de los riesgos y principios básicos de funcionamiento de la caldera pirotubular, que permita una correcta manipulación por parte del operario, logrando de esta manera el aumento en su vida útil.

Por último, resulta importante aclarar el por qué la caldera de Bienestar Universitario no presenta alteración microestructural marcada o de riesgo como las que presenta la caldera de Avidesa Mac-pollo que lleva menos tiempo de funcionamiento. Lo anterior es debido al combustible utilizado en dicha fábrica el cual es con coque o carbón, produciendo mayores desechos y necesita más tiempo para generar la energía calórica. También esta caldera opera 24/7 y solo realiza pausas cortas para recarga de coque. El tercer factor es que a dicha caldera no se le realiza la limpieza anual que si es realizada en la caldera de bienestar, debido a que el combustible es coque y este contamina mucho más la caldera así que se haría necesario efectuar esta limpieza en tiempos más cortos y no solo una vez al año. Lo anterior implica más gasto para la compañía y pausa de par días lo que resulta no rentable para la empresa. Esta prefiere según estudios no efectuar mantenimiento interno, solo usar continuamente la caldera y cada cierto tiempo cambias las piezas que hagan falta siempre efectuando un seguimiento a todo el equipo.

5. CONCLUSIONES

Las características microestructurales del acero ASTM A192 utilizado en la fabricación de tubos termoconductores para calderas pirotubulares se determinaron mediante metalografía tradicional y por réplica, observando sus microconstituyentes (ferrita y perlita) en estado prístino y la transformación que sufre la cementita presente en la perlita al ser expuesto a condiciones reales de operación.

Las zonas críticas que presenta la caldera pirotubular de bienestar universitario se seleccionaron teniendo en cuenta su modo de operación. Dichas zonas corresponden a elementos expuestos a altas temperaturas y presión, donde se encuentra el hogar de la caldera, placas tubo y tubos termoconductores. Estos componentes son los encargados de soportar el inicio de la llama y a su vez el transporte de los gases generados por la combustión que permiten el calentamiento del agua y su posterior evaporación.

Se analizaron microestructuralmente los componentes de la caldera pirotubular mediante réplicas metalográficas, las cuales indican que el acero no ha experimentado crecimiento de grano y mantiene su morfología angular, siendo esto un indicio de que el acero no ha sufrido ningún tipo de alteración; es decir, la temperatura de trabajo, nunca excedió la de diseño durante 8 años de operación, por lo cual no se disminuyó la energía interfacial que pudiera producir cambios significativos en el límite de grano o transformaciones en sus microconstituyentes.

Se sugirieron acciones preventivas respecto al estudio realizado en la caldera de Bienestar Universitario, haciendo énfasis en el mantenimiento, operación y la dureza del agua suministrada a este equipo intercambiador de calor, para de este modo evitar alteraciones microestructurales que afecten el correcto funcionamiento y reduzca su vida útil.

6. RECOMENDACIONES

A partir del estudio realizado en la caldera pirotubular de bienestar universitario se sugieren acciones preventivas y recomendaciones:

El alcance de la técnica por medio de réplicas metalográficas se encuentra ligada a la metalografía tradicional, ya que en este ensayo se evalúan tonalidades grisáceas y relieves que corresponden a los límites de grano, que sin el conocimiento previo de como se observa dicha microestructura en metalografía tradicional se hace muy difícil evaluar.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio del Trabajo, "Fondo de Riesgos Laborales de la República de Colombia," 25 Febrero 2010. [Online]. Available: <http://fondoriesgoslaborales.gov.co>. [Accessed 2 Junio 2016].
- [2] Thermal Engineering, "Thermal Engineering," [Online]. Available: <http://www.thermal.cl>. [Accessed 2 Junio 2016].
- [3] Fundación Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra - UPSA, "CENASE Unidad de Educación Continua UPSA," 2016. [Online]. Available: <http://cenace.upsa.edu.bo>. [Accessed 12 Diciembre 2017].
- [4] R. Port and H. Herro, "Guía Nalco para el Análisis de Fallas en Calderas," in *Guía Nalco para el Análisis de Fallas en Calderas*, McGraw-Hill, 1997, pp. 1-2, 8-10, 18-19, 29-38, 47-48, 50-51.
- [5] S. Marin and A. Arteaga, Evaluación del Estado Actual de la Caldera de Bienestar Universitario UIS Empleando Ensayos No Destructivos, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [6] D. Viera, "Slide Share," 13 Junio 2012. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net>. [Accessed 5 Junio 2016].
- [7] Idreco Sudamericana SA, "Consultora de Aguas," Septiembre 1990. [Online]. Available: <http://www.cdaguas.com.ar>. [Accessed 8 Junio 2016].
- [8] W. Chávez, C. Paredes and J. Pacheco, "ResearchGate," [Online]. Available: <https://www.researchgate.net>. [Accessed 8 Junio 2016].
- [9] E. Espejo and J. Martinez, "Análisis de Falla de Elementos Mecánicos," 6 Septiembre 2013. [Online]. Available: <https://sites.google.com>. [Accessed 8 Julio 2016].
- [10] American Society for Testing and Materials, *ASTM E1351-01*, 2012.
- [11] American Society for Testing and Materials, *ASTM E3*, 2017.

- [12] American Society for Testing and Materials, *ASTM A192*, 2017.
- [13] American Society for Testing and Materials, *ASTM E112*, 2013.
- [14] A. Criado Martí, L. García, M. Cartón, A. Criado Portal, C. Dietz and J. Martínez, "Morfología de la Cementita en Aceros Arqueológicos que Han Sufrido Incendio," *Revista de Metalurgia*, pp. 257-265, 2013.
- [15] American Society for Testing and Materials, *ASTM A285 GR-C*, 2012.
- [16] American Society of Mechanical Engineers, *ASME B-31.3*, 2013.
- [17] Calderas Continental LTDA, *Manual de Operación de Caldera Piro-tubular Horizontal Modelo E52C30C-2G*.
- [18] American Society for Testing and Materials, *ASTM A192*, 2013.

BIBLIOGRAFÍA

G. SPOSITO; C. WARD; P. CAWLEY; P.B. NAGY; C. SCRUBY. A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels. Available online 2 June 2010. <http://ezproxy.uis.edu.co:2084/science/article/pii/S0963869510000654>

MARTA LÓPEZ JENSSEN Y ANA HIDALGO AEDO. Réplicas metalográficas como ensayo no destructivo usadas para la evaluación metalúrgica del material de tubos de caldera. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007

RICARDO E. PAUER. Lo que ocurre en el interior de la caldera. Seminario sobre intercambio iónico, Agua y Energía, Rosario. 1990, septiembre. Disponible en:http://www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/09_Lo_que_ocurre_en_el_int.pdf. [Citado el 8 de junio del 2016]

ROBERT D. PORT.; HARVEY M. HERRO. Guía nalco para el análisis de fallas en calderas. Traducción por Ing. Jose H. Pérez C. escuela militar de ingenieros, México. Derechos reservados 1997, respecto a la primera edición en español por McGraw-Hill/Interamericana editores S.A.1-2,8-10,18-19,29-38,47-48,50-51.

V. V. ARTAMONOV. Applied investigations of the inspection and diagnostics of power generating facilities. Available online 17 May 2011. <http://ezproxy.uis.edu.co:2097/article/10.1134/S1061830911020033>



ANEXOS

Anexo A. Condiciones de trabajo y características generales de la caldera.

Las características mostradas a continuación son las condiciones de trabajo para las cuales estaba programada la caldera de bienestar universitario, desde su instalación hasta la fecha en que se culmina esta inspección por medio de ensayos no destructivos.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Tipo de caldera: Horizontal de tipo piro tubular	Ubicación: Bienestar Universitario BU
Tiempo de operación: 8 años continuos	Marca: Continental
Presión de diseño: 150 [PSI]	Año de fabricación: 2007
Presión de operación: 100 [PSI]	Combustible: Gas natural
Fecha de elaboración: 03-12-2015	SIN TRATAMIENTO DE AGUA Y SIN SUAVIZADOR
Temperatura de los gases: Indicador dañado	Purga: Solo de la caldera a las 6:00 PM
Hora de arranque: 6:00 AM	Hora de parada: 6:00 PM
Nivel del tubo pyrex del macdonell: 80%	Presión regulada de gas combustible: 0.5 [psi]
Quemador: Esta cubierto por una carcasa	
Presión de entrada del gas combustible: 5 [psi]	

Anexo B. Ubicación de las aperturas que permiten el acceso a los tubos termoconductores de la caldera.

<p>Figura 1. Ubicación del handhole 2 (H₂)</p>	<p>Figura 2. Ubicación del handhole 1 (H₁)</p>
	
<p>Figura 3. Apertura del handhole 1 y 2</p>	
