



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**IDENTIFICACIÓN DE ALGUNOS MECANISMOS DE FALLA EN  
CALDERAS**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**  
**INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA**

**ERIKA VAZQUEZ REYES**

**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2010**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: IQM. Gerardo Arámburo Perez.

**VOCAL:** Profesor: M. en C. Sergio García Galán

**SECRETARIO:** Profesor: Dr. Francisco Javier Rodríguez Gomez

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Dr. Osvaldo Flores Cedillo

**2° SUPLENTE:** Profesor: IQM. Balbina Ojeda Ramírez

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA, UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO.**

**Asesor: IQM. Gerardo Arámburo Perez.**

**Supervisor TÉCNICO: DR. OSVALDO FLORES CEDILLO.**

**Sustentante: Erika Vazquez Reyes**



## Contenido.

Resumen.....	2
Capítulo 1.....	3
Objetivos.....	5
Capítulo 2.....	6
2.1 SOLDADURA.....	7
2.2 PRINCIPALES DEFECTOS EN LA SOLDADURA.....	9
2.3 ASPECTOS MECÁNICOS DE LA FRACTURA.....	12
2.4 FACTORES QUE INDUCEN A LA FALLA.....	13
2.4.1 FATIGA.....	14
2.4.1.1 Factores relacionados con la aleación.....	15
2.4.2 CORROSIÓN FATIGA.....	16
2.4.3 CORROSIÓN.....	17
2.4.4 CORROSIÓN POR CREVICE.....	19
2.4.5 FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO.....	20
2.4.6 CORROSIÓN INTERGRANULAR.....	20
2.4.7 AGRIETAMIENTO POR CORROSIÓN BAJO ESFUERZO (SCC).....	21
2.5 CALDERAS.....	22
Capítulo 3.....	25
3.1 PRESENTACIÓN DEL CASO.....	26
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	27
3.2.1 CUERPO DE LA CALDERA.....	28
3.2.2 TAPA DE LA CALDERA.....	32
3.2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDADURA.....	35
Capítulo 4.....	38
4.1 MATERIAL AL MOMENTO DE LA RECEPCIÓN.....	39
4.2 ANÁLISIS DE LA SELECCIÓN DE LOS ACEROS UTILIZADOS.....	51
CONCLUSIONES.....	55
Bibliografía.....	57

## Resumen.

Hoy en día, el análisis de fallas en la industria es una herramienta indispensable. El tener conocimiento de los problemas que puedan surgir, o saber de antemano las desventajas que tiene un material o un diseño, pueden ayudar a corregirlo y/o prevenirlo.

Cuando se trata de equipos que manejan altas presiones, se debe poner énfasis no solo en la adecuada selección para un proceso, sino también en un diseño que sea acorde a las necesidades de la empresa. Debe dársele un mantenimiento adecuado, y llevarse un registro de todos los movimientos que se lleven a cabo, y aunque algunos parezcan insignificantes, pueden a la larga repercutir en el tiempo de vida.

En este trabajo se llevó a cabo el análisis de fallas para una caldera con una fractura en la parte de la unión cuerpo-tapa, que acortó considerablemente el tiempo de vida. Se identificaron los principales mecanismos que la llevaron a la falla final, análisis químicos, pruebas mecánicas, y un extenso análisis de la superficie de la falla. Pudo observarse que aún cuando el material con el que se fabricó la caldera no cumplía cabalmente con las normas establecidas para la manufactura de este tipo de dispositivos, no es un factor clave en la falla. Un factor clave es la soldadura, pues presentó graves deficiencias, ya que la falta de fusión en gran parte del cordón que unía al cuerpo con la tapa y una cantidad considerable de escoria atrapada, entre otras cosas, fueron los que originaron que la unión no soportara la presión de la caldera.

# Capítulo 1.

## INTRODUCCIÓN.

Debido al aumento de la oferta de bienes y servicios, las empresas en general ofrecen garantías cada vez más extensas, comprometiéndose con el cliente a sustituir las piezas defectuosas o reparar los productos que ofrecen, en un tiempo determinado. Claro está para el cliente que las garantías se vuelven nulas cuando las condiciones de operación a las que somete el producto no son las óptimas, o cuando se utiliza para propósitos distintos a los que fue creado. Sin embargo, cuando un producto tiene un defecto de fabricación, la empresa usualmente cambia la pieza defectuosa, o si el defecto compromete el funcionamiento general, cambia todo el producto.

Pero, ¿Qué pasa cuando el producto en cuestión no vale sólo algunos pesos, sino miles, o incluso cientos de miles? En esos casos, las garantías se hacen válidas sólo cuando el producto ha sido utilizado de forma exclusiva para

lo que fue creado, cuando las condiciones de uso han sido debidamente observadas, y cuando se han seguido las indicaciones del fabricante de manera casi religiosa. Y aún así, y debido a que por lo general nadie quiere asumir responsabilidades que lleven a un costo económico, las garantías difícilmente se cumplen.

¿Cómo saber quién tiene la razón? El proveedor siempre dirá que sus productos son de la más alta calidad, y que han sido fabricados bajo estrictas normas. Y el cliente, obviamente, dirá que utilizó el producto como se le fue indicado, bajo las condiciones idóneas, y que dio el mantenimiento como se le señaló, etc. Entonces, el saber quién tiene la razón no es una cuestión fácil.

Para resolver este tipo de problemas, se ha desarrollado el análisis de fallas. A partir de una serie de procedimientos, como análisis visuales, pruebas mecánicas, metalográficas y químicas, que se realizan en el material y en la falla, puede determinarse si el origen de la catástrofe se debió a la manufactura, al diseño, o a la operación. Estas herramientas son necesarias para determinar quién es el responsable, si la empresa que fabricó el producto, o el cliente.

Definitivamente, no se va a llevar a cabo un análisis de fallas en un producto que puede ser fácilmente reemplazado por la empresa, como un electrodoméstico o una simple pieza de automóvil. Sin embargo, si se descubre por ejemplo, que en un lote de productos falla la misma pieza, entonces es necesario analizar el origen de esa falla, pues tal vez sí se trate de un problema mayor.

En el caso de calderas de vapor, las principales fallas que ocurren en servicio se deben principalmente a deficiencias en el diseño, a las condiciones de operación, a una mala selección de materiales para su construcción o a un tiempo extendido en su vida de servicio. El hecho de que ocurran este tipo de accidentes, puede tener graves consecuencias, que pueden prevenirse si se identifican a tiempo las situaciones que ocurren con mayor frecuencia en estos dispositivos.

En este trabajo de tesis se realizó el análisis de falla de una caldera mediante un examen visual, con microscopios estereoscópico, óptico y de barrido, pruebas mecánicas, químicas y análisis metalográficos. Todo esto para obtener la historia del material, y saber cuáles fueron los procesos que llevaron a la falla total. Los principales estudios sobre análisis de fallas hablan de un protocolo a seguir, por ejemplo, determinar el sitio donde empezó la fractura, su longitud, o si está asociada con una concentración de esfuerzos, etc., para así dar un veredicto lo más acercado a la realidad.

### **Objetivo.**

Identificar las principales causas que llevaron a la falla a la caldera presentada en el caso de estudio, así como los mecanismos involucrados.

## **Capítulo 2**

# **REVISIÓN DE LA LITERATURA.**

### **Introducción.**

Una caldera es un dispositivo que genera vapor o agua caliente, para su uso en procesos industriales o de calefacción. En el proceso de manufactura de una caldera grande, se pueden aplicar hasta 50,000 puntos de soldadura, siendo cada uno de ellos un sitio potencial de defectos [20].

Además de la soldadura, una caldera puede presentar defectos tanto de manufactura como de diseño: puede deberse al material con el que fue construida (en la selección de material, o material con defectos en su estructura), el diseño que puede no ser el correcto para las necesidades del cliente, o defectos derivados de una mala operación y/o un mal mantenimiento.

Las fallas que pueden encontrarse en este tipo de dispositivos y que se deben al trabajado en el metal, pueden originarse durante la transformación primaria (donde el metal se transforma en barras, placas, tubos, etc., a partir de lingotes u otras formas coladas) o durante el trabajado secundario (donde se forman productos terminados mediante procesos como de forjado en caliente o frío, extrusión, etc.). Estos procesos se realizan para proporcionarle al metal ciertas propiedades, como refinamiento y uniformidad de grano, eliminación de porosidades, resistencia a la fatiga, etc. Sin embargo, durante estos procesos se pueden desarrollar fisuras internas o en la superficie, el debilitamiento de las estructuras, distorsión, etc.

## **2.1 SOLDADURA.**

La soldadura se emplea en la manufactura de prácticamente todas las calderas. Estas soldaduras deben cumplir con los requerimientos establecidos en el código para calderas ASME (American Society of Mechanical Engineers, boiler code), y debe ser manufacturada por soldadores certificados. Una vez que una caldera se ha terminado, debe ser sometida a un tratamiento para aliviar las tensiones, ya que de lo contrario puede afectar la vida útil, debido a las presiones a las que será sometida.

La soldadura puede definirse como un proceso de unión de dos o más piezas mediante la aplicación de calor, presión, o ambos. Existen diferentes tipos de soldadura, y básicamente difieren en la aplicación del calor para llevar a cabo la fusión y en la aplicación de material de relleno. La mayoría de los procesos (Fig. 2.1) utilizan un arco que se genera con una corriente eléctrica (directa o alterna). El arco eléctrico es una fuente de calor que funde los bordes de las piezas, fusionándolas y haciéndolas una.

El material de relleno consiste en un alambre, llamado electrodo, que inicialmente consistía en un alambre desnudo (a principios del siglo XX cuando se desarrollaron los procesos de soldadura con electrodos). Ahora, estos alambres van cubiertos por una mezcla de ferroaleaciones, minerales, silicatos

y en algunos casos, materiales orgánicos [16]. Al fundirse este recubrimiento produce escoria y gases, que protegen al cordón de soldadura del ambiente. Cuando esto no es suficiente se proporciona un gas protector desde una fuente externa.

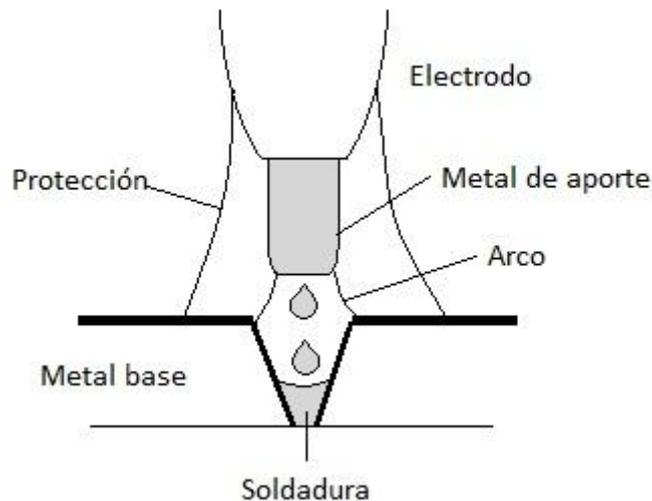


Fig. 2.1. Proceso de soldadura de arco con electrodo protegido.

La microestructura en el cordón y cerca de soldadura es diferente a la del resto del material. Se identifican algunas zonas (Fig. 2.2) como la de fusión (**ZF**), la afectada por el calor (**ZAC**), y el metal base (**MB**). La microestructura de la ZF depende de la velocidad de enfriamiento del material. La composición del metal de aporte debe ser lo más parecida al metal base, pero principalmente debe cumplir con las mismas propiedades mecánicas, como la resistencia a la fluencia, a la corrosión, etc. Si las composiciones del metal base y el metal de relleno fueran totalmente diferentes, las propiedades mecánicas en la soldadura serán diferentes que las del metal base, adicionalmente puede producirse un par galvánico, el cual podría favorecer la corrosión.

Después de la ZF, sigue una zona donde la temperatura no alcanza a fundir al metal base. A partir de ahí se observa la ZAC, en donde todos los cambios de microestructura se dan en estado sólido, y dependen de la temperatura alcanzada y de la velocidad de enfriamiento.

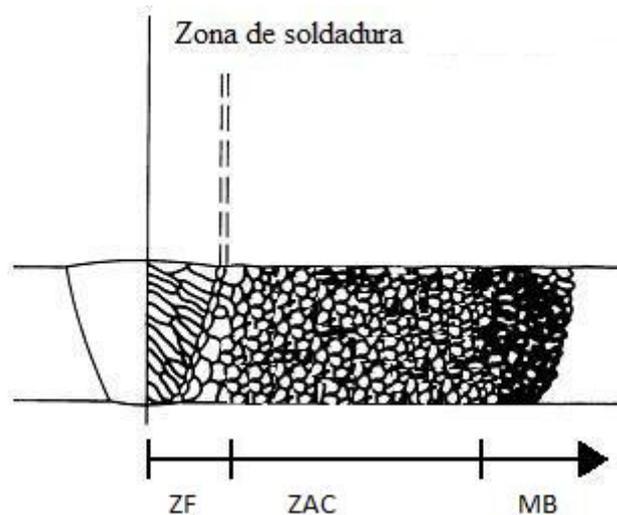


Fig. 2.2. Zonas encontradas en la soldadura: zona de fusión (ZF), zona afectada por el calor (ZAC) y metal base (MB) (Metals Handbook No. 6).

## 2.2 PRINCIPALES DEFECTOS EN LA SOLDADURA.

Los defectos más comúnmente encontrados en la soldadura son:

**Porosidades:** Las reacciones que ocurren en el electrodo, incluyen la descomposición del recubrimiento en escoria y gases que protegen al cordón de soldadura cuando se encuentra en estado líquido. Algunos de esos gases, o aquellos que pueden formarse si la superficie a soldar no se encuentra limpia, pueden disolverse en el metal líquido. Aún cuando la solubilidad de estos gases en estado sólido baja precipitadamente, pueden quedarse algunas burbujas atrapadas, formando porosidades. La distribución de los poros puede ser uniforme o lineal. Cuando la porosidad se encuentra cerca de las superficies, tiene un efecto negativo en las propiedades mecánicas de la soldadura. Para evitar los poros (mas no eliminarlos por completo), se debe contar con materiales limpios y secos, además de mantener una corriente y una longitud de arco apropiadas.

**Inclusiones de escoria:** El material con el que se recubre el electrodo contiene en algunas ocasiones ferroaleaciones parcialmente fundidas. Éstas y los otros polvos de los que se constituye, algunas veces son demasiado gruesas y no alcanzan a fundirse durante el proceso de soldado, así que pasan

a la escoria y pueden quedar atrapadas en el cordón de soldadura. Las inclusiones pueden encontrarse como partículas aisladas o como bandas - continuas o intermitentes-. Esto puede solucionarse manteniendo la temperatura del electrodo lo suficientemente alta como para fundir todos los componentes del recubrimiento.

**Exceso de penetración de la soldadura.** Esto se da cuando el cordón de soldadura penetra más allá de lo que se tiene contemplado, tanto que puede llegar al otro lado de la pieza y verse como una protuberancia, o como una concavidad en el otro lado de la soldadura. Si la concavidad es severa, puede causar fracturas en el metal base. Estas fracturas no se observarían a simple vista, o mediante radiografías. Las concavidades pueden reducir significativamente la vida de fatiga. Este defecto es causado frecuentemente por una poco apropiada técnica de soldado, por una preparación deficiente de la junta, o por un alineamiento ineficiente de la junta.

**Falta de penetración en la junta:** Involucra la penetración incompleta de la soldadura en la junta. Cuando se le aplica un doble cordón a las partes a soldar, puede que existan defectos en los pases hechos a los lados.

Una penetración inadecuada es un defecto muy serio, ya que es un detonante potencial de fallas por fatiga mecánica, térmica, agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (SCC, por sus siglas en inglés) y corrosión. Se debe a electrodos demasiado largos, altas velocidades de soldado, o bajas corrientes en el proceso.

**Fusión incompleta.** Se debe a una baja corriente en el proceso de soldado, que evita que las partículas del recubrimiento del electrodo se fundan por completo, o si la superficie a soldar no está limpia. Cuando se encuentra este defecto en un porcentaje bajo (10% o menos del grosor de la pared), las fallas son poco frecuentes [17]. Sin embargo, si la fusión incompleta es severa, o si se da en la superficie de las paredes, puede llevar a una falla por fatiga mecánica, térmica, o SCC, debido a que la resistencia mecánica se ve comprometida. Esto puede minimizarse si las superficies a soldar están libres

de líquidos o materiales extraños, si se incrementa la corriente o si se baja la velocidad de soldado.

Así mismo, pueden encontrarse defectos tanto superficiales como internos.

#### **Defectos superficiales:**

- Desajustes evidentes en las partes soldadas.
- Exceso de soldadura, que cause mayor convexidad de la deseada.
- Porosidad.
- Fracturas en frío o en caliente.
- Salpicaduras de soldadura en el metal base.
- Interrupción del arco.

#### **Defectos internos:**

- Fracturas debajo del cordón de soldadura.
- Porosidad debida a gases atrapados.
- Fusión incompleta.
- Penetración inadecuada.
- Fracturas durante la solidificación.

La presencia de uno o más de estos defectos en una caldera en servicio puede dar origen a una serie de fallas que pueden poner en peligro su desempeño, disminuyendo su vida de servicio u ocasionando una falla que lleve a una fractura total. Sin embargo, la sola presencia de estos defectos no es sinónimo de falla, sino que puede darse por diferentes causas.

### **2.3 ASPECTOS MECÁNICOS DE LA FRACTURA.**

Para que la falla final ocurra, tiene que pasar antes por tres estados principales.

- Inicio de la grieta.
- Velocidad lenta de propagación.
- Velocidad rápida de propagación o falla final.

El tiempo que pasa desde que la grieta inicia hasta que el componente falla, depende de ciertos factores, ya sea ambientales, mecánicos, metalúrgicos, termodinámicos, o una combinación de éstos.

En los metales las microgrietas comienzan en la superficie, en la intercara entre las inclusiones y la matriz, o en algunas ocasiones desde la inclusión. Los esfuerzos a los que está sometido el material causan que la microgrieta crezca, uniéndose a otras microgrietas o creciendo de manera individual, pudiendo encontrar algún otro defecto o límite de grano que la detenga. Cuando esto no sucede, la microgrieta crece hasta alcanzar algunos milímetros de longitud. Para que la grieta crezca y se vuelva un riesgo de fractura en el material, deben coincidir algunos factores, como un estado de esfuerzos -ya sea aplicados o residuales- o un ambiente propicio, entre otros. Sin embargo, algunos materiales son más susceptibles que otros para desarrollar grietas que lleven a una fractura.

Para saber si un material es susceptible a sufrir fractura, debe tomarse en cuenta el factor de intensidad de esfuerzo, los esfuerzos promedio, el saber si las grietas crecen independientemente de los esfuerzos, y la dependencia de la grieta a la velocidad de deformación, entre otros factores.

El factor de intensidad de esfuerzo es un parámetro que describe la relación que existe entre la carga aplicada y la longitud de una grieta. Describe el estado del esfuerzo en la punta de la grieta, ya sea aplicado o residual, y depende de la geometría, la longitud de la fractura y la distribución de la carga en el material. Considera tres tipos de fractura (Fig. 2.3): por tensión (modo I), por deslizamiento de planos (modo II), y por corte (modo III).

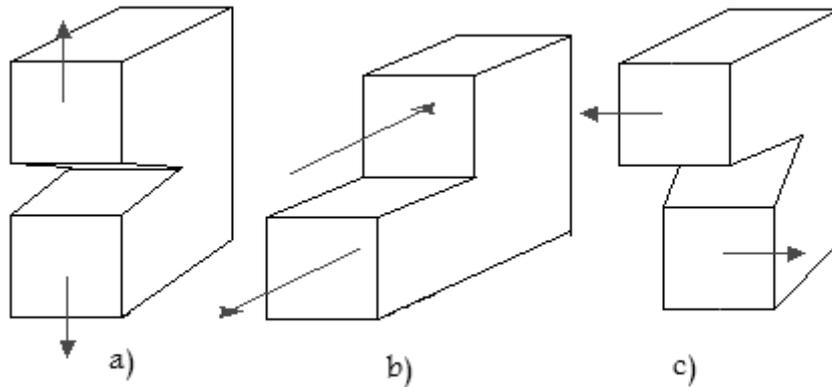


Figura 2.3. Tipos de fractura: a) por tensión; b) por deslizamiento de planos, y c) por corte.

La expresión básica para la intensidad de esfuerzo es:

$$K_I = \sigma \cdot (\pi \cdot \alpha)^{0.5}$$

Donde  $\sigma$  es el campo de esfuerzos responsable de la apertura que hace la carga (en el modo I), y  $\alpha$  es la profundidad de la grieta desde el límite de la placa [10].

## 2.4 FACTORES QUE INDUCEN A LA FALLA.

Una falla se define como un “defecto material de un objeto que merma su resistencia”, y en una caldera en servicio puede darse por varios factores. El ambiente de operación puede no ser el más adecuado para su funcionamiento, pues las variaciones de temperatura, humedad relativa, o pH en el medio pueden afectar la estructura. El diseño puede no ser el más adecuado para las operaciones que se realizan. En cuanto a la operación, puede ocurrir que se den fallas por sobrecarga, fatiga, agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo, etc. Y con respecto a la soldadura, puede inducir al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo, ruptura por esfuerzo, fallas por sobrecarga, fractura inducida por hidrógeno, etc.

Algunas de las fallas más importantes que se encuentran en calderas son:

### 2.4.1 FATIGA.

En Metalurgia, el término fatiga se aplica a cambios progresivos y permanentes en las propiedades del metal, debido a esfuerzos o deformaciones repetidas o fluctuantes. Estos cambios por lo general llevan a fracturas o fallas.

Existen varios tipos de fatiga, dependiendo de los motivos que llevan a estos cambios en el metal. La **FATIGA MECÁNICA** se da debido a las fluctuaciones externas en los esfuerzos o deformaciones. La **FATIGA POR CREEP** es la causada por cargas cíclicas que actúan en conjunto con altas temperaturas. Cuando no solo la carga fluctúa sino también la temperatura, se le llama **FATIGA TERMOMECÁNICA**, y cuando las fluctuaciones de los esfuerzos y deformaciones se llevan a cabo en presencia de un medio agresivo se le llama **CORROSIÓN FATIGA**.

Las grietas microscópicas son inevitables, puesto que se generan en los defectos del metal, como en las inclusiones, los límites de grano, dislocaciones o picaduras. Pueden presentarse debido a los tratamientos térmicos, trabajado mecánico, en la soldadura, y en cualquier fenómeno que sirva como concentrador de esfuerzos. Las grietas de fatiga inicial pueden encontrarse en los defectos que se encuentran debajo de la superficie, como los cambios en la forma de la pieza, picaduras, inclusiones, límites de grano fragilizados, rasgaduras, etc.

Para que un metal falle debido a fatiga, debe darse un proceso complicado de inicio y crecimiento de grietas debido a deformaciones plásticas cíclicas, que depende de varios factores como la intensidad de la deformación, la frecuencia de los esfuerzos, etc.

La falla por fatiga da como resultado un cambio permanente y localizado. Para que se llegue a la falla por fatiga, deben existir esfuerzos cíclicos, tensiles

y deformación, ya que mientras que los esfuerzos cíclicos y la deformación comienzan con la fractura, los esfuerzos tensiles provocan su crecimiento.

Las fracturas que se observan debido a este fenómeno, inician en regiones con altas concentraciones de esfuerzos cíclicos de magnitud suficiente como para causar la fractura. Debido a estos esfuerzos la falla se propaga a través del material hasta que se observa una fractura. Se observan una o más grietas causadas por el esfuerzo que sobrepasa al esfuerzo de fluencia, y las grietas se inician en las bandas de fatiga o en los límites de grano. Se pueden observar también estrías paralelas al frente de la grieta [22].

#### **2.4.1.1 Factores relacionados con la aleación.**

La mayoría de las aleaciones pueden sufrir de fatiga bajo ciertas condiciones. Estas condiciones son específicas para cada aleación, y la alteración de alguna de estas condiciones puede minimizar o potenciar el daño. Por lo tanto, es importante conocer la química general, local, y la estructura metalúrgica del metal, así como también su historia en cuanto a tratamientos mecánicos, químicos o térmicos, para determinar la susceptibilidad de sufrir este fenómeno.

Algunos aspectos que hay que tomar en cuenta son:

- Distribución de fases.
- Tamaño y forma del grano.
- Precipitaciones en los límites de grano.
- Segregación en los límites de grano.
- Trabajado mecánico.
- Tipo y distribución de las segregaciones.

Al hablar de segregaciones, deben considerarse los elementos aleantes y las impurezas, aún en bajas concentraciones (aún presentes como trazas). En

general, todas las aleaciones aunque contengan aún pequeñas cantidades de elementos aleantes son susceptibles a sufrir fatiga, ya que los elementos intersticiales y las impurezas que se segregan hacia los límites de grano generan una composición química local diferente de la matriz, por lo que los límites comienzan a disolverse, o a crear zonas anódicas, que pueden fomentar la corrosión.

#### **2.4.2 CORROSIÓN FATIGA.**

La fatiga de un componente metálico se da por los esfuerzos cíclicos y las deformaciones a las que está sometido; sin embargo, el tiempo que tarde el componente en fallar debido a la fatiga puede acelerarse debido a la presencia de un ambiente corrosivo [2].

En la superficie metálica existen heterogeneidades como granos, picaduras, o fases (por ejemplo las laminillas de ferrita y cementita que forman a la perlita), que en presencia de un medio acuoso crean celdas galvánicas. Debido a la interacción del metal con el medio forma una capa de óxido en la superficie que puede ayudar al metal a disminuir la corrosión; sin embargo, los lugares en donde se encuentra una imperfección, ésta se ve favorecida. Por la acumulación de esfuerzos las imperfecciones dan lugar a grietas que van expandiéndose, por lo que se tiene material fresco, en donde se el proceso se repite. En las grietas puede actuar también la corrosión por crevice, pues en éstas el medio acuoso se estanca y sus condiciones cambian con respecto al seno de la solución. La precipitación o segregación en los límites de grano también puede causar un adelgazamiento en la capa de óxido, así que las grietas se forman precisamente en los límites de grano. Con el tiempo las grietas se encuentren con otras, creando grietas más grandes.

La corrosión por fatiga puede llegar al punto de falla debido a múltiples variables, que influyen de diversas maneras al crecimiento de la o las grietas. Éstas variables pueden ser:

- . Tipo mecánicas: la forma, frecuencia y velocidad de la carga de fatiga y los esfuerzos residuales.
- . Variables geométricas: tamaño y geometría de la fractura, grosor del espécimen y el lugar donde reside la fractura.
- . Tipo metalúrgicas: composición química, microestructura, tratamiento, tamaño y forma del grano, distribución de las impurezas y los elementos aleantes, modo de deformación.
- . Tipo ambientales: ambiente, presión parcial, temperatura, pH, etc.

Existen principalmente dos procesos que llevan a la corrosión por fatiga: la disolución anódica y la fragilización por hidrógeno.

### **2.4.3 CORROSIÓN.**

Cuando el metal se pone en contacto con un medio acuoso, se forma inmediatamente un potencial electroquímico, debido a las reacciones que se desarrollan. Algunas de estas reacciones forman productos no metálicos, que son llamados productos de corrosión. Un ambiente puede ser inocuo, pero algunas variaciones en la temperatura, concentración de los solutos, pH, potencial electroquímico, o en el mezclado, pueden ocasionar un ambiente propicio para que ataque al metal [2].

Se ha propuesto un mecanismo que explica el crecimiento de la grieta debido al ambiente. Este mecanismo explica una secuencia de pasos y puede determinar el proceso limitante de crecimiento de la grieta, independientemente de los mecanismos de fractura debido a la tensión (Fig. 2.4). Los pasos incluyen:

1. Transporte de masa de alrededor de la grieta hacia la punta de la grieta.
2. Reacciones en la solución cerca de la grieta.
3. Adsorción de la superficie en o cerca de la punta de la grieta.
4. Difusión en la superficie
5. Reacciones en la superficie.

6. Absorción en el seno de la superficie.
7. Difusión del seno hacia la zona plástica enfrente de la grieta.
8. Reacciones químicas en el seno.
9. Velocidad de ruptura de las cadenas interatómicas.

Cuando el ambiente se modifica, se altera la velocidad de los pasos que controlan la velocidad de propagación de la grieta, ya sea acelerándolos o reduciéndolos.

El ambiente en el que operan los equipos comerciales puede estar o no estar controlado. En ambientes controlados, la composición del ambiente es específica para mantener la calidad del producto, o prevenir la corrosión en los equipos. En ambientes no controlados, los equipos están expuestos a los productos de las reacciones que ahí se producen, por lo tanto están expuestos también a un amplio rango de ambientes que resulten del proceso en el que se encuentren. Obviamente trata de cuidarse el equipo, mediante el diseño y otros procesos de protección, pero el ambiente pocas veces se controla. En ambientes controlados, pueden entrar impurezas debido a operaciones mal realizadas, o quedar impurezas en los equipos durante la limpieza, por ejemplo. Las impurezas pueden acumularse en resquicios propios del diseño del equipo o en defectos del mismo, causando crevice, que es muy común en juntas y otros ensambles, donde es casi imposible que el medio fluya de manera correcta, o provocar agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (SCC, por sus siglas en inglés). La temperatura puede potenciar el daño que causa el medio acuoso, ya que interviene con la cinética de las reacciones.



metales involucrados, formación de capas pasivas, la composición del medio, pH, temperatura, agitación, y la cantidad de oxígeno [1].

#### **2.4.5 FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO.**

La fragilización por hidrógeno es un mecanismo de corrosión fatiga. El metal entra en contacto con hidrógeno ya sea en ambientes con altas concentraciones de este gas, o cuando el metal está en condiciones que favorecen la aparición de este elemento, como por ejemplo en un estado de sobre protección catódica. Ya que está en contacto con el hidrógeno, ya sea en forma de átomo o protón, se difunde hacia las partes susceptibles de la microestructura, como huecos o microfracturas, causando una aceleración de la velocidad de crecimiento de la fractura.

#### **2.4.6 CORROSIÓN INTERGRANULAR.**

La corrosión intergranular es un tipo de corrosión influenciada por variables metalúrgicas. Ocurre cuando la velocidad de corrosión en el límite de grano es mayor que la del interior del grano, debido a que la composición química es diferente. La diferencia entre la composición puede deberse a que durante el enfriamiento precipita primero una fase, provocando que algún elemento se agote, o debido a que algunos átomos se segreguen hacia los límites de grano. Estos fenómenos pueden aumentar la velocidad de corrosión en los límites de grano con respecto a la velocidad en la matriz. El proceso de corrosión intergranular es local, así que muchas veces puede pasar mucho tiempo antes de que este sea perceptible en la estructura [11].

La corrosión selectiva es un tipo de corrosión intergranular en donde uno de los constituyentes de la aleación se disuelve preferentemente con respecto a otro, dejando una estructura alterada, que sufre un decremento en sus propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión, dureza o ductilidad.

La corrosión intergranular puede presentarse de forma más localizada y particular, en estructuras que han sido sometidas a laminación, por ejemplo, en donde los granos se alargan y la microestructura da señales de ese proceso. La corrosión por exfoliación es aquella en donde los granos elongados aparecen en líneas paralelas a la superficie, y aparece de forma intergranular en los límites de grano, separando las capas de material. Este tipo de corrosión se presenta en materiales deformados, siendo las aleaciones de aluminio en donde puede observarse con mayor frecuencia, debido a que este tipo de aleaciones son las que se utilizan para ese propósito.

#### **2.4.7 AGRIETAMIENTO POR CORROSIÓN BAJO ESFUERZO (SCC).**

El agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (Stress Corrosion Cracking, SCC) es un fenómeno que se presenta en distintas aleaciones debido a la acción conjunta de esfuerzos tensiles, un ambiente agresivo y un material susceptible. Así, se forman grietas que crecen lentamente y debido a una intensidad de esfuerzos más bajos que aquellos que provocan la fractura en situaciones en las que no existe un ambiente agresivo. Este tipo de falla se presenta como finas grietas que pocas veces muestran evidencia de corrosión en la superficie, o de distorsión en la estructura. Por tanto, la fractura que se observa es frágil, aún en los materiales dúctiles [7].

La falla por SCC es muy común durante el servicio. Los esfuerzos tensiles que se requieren para que se presente pueden ser aplicados o residuales. Los tratamientos térmicos, el trabajado mecánico, y los procesos de manufactura, como por ejemplo la soldadura, pueden dejar esfuerzos residuales que junto con los aplicados durante el servicio, propagan el SCC. Estos esfuerzos no tienen que ser tan altos para causar daño, pues por lo general los que causan agrietamiento son pequeños, o se encuentran por debajo del esfuerzo de fluencia. Los esfuerzos se concentran en las heterogeneidades que se encuentran en la superficie, como dislocaciones, inclusiones o picaduras. La grieta se forma, y debido al ambiente agresivo, su superficie se corroe, y crece debido a las ligeras deformaciones que sufre el

metal; la capa pasiva que se formó se rompe, dejando metal desnudo y permitiendo que la grieta crezca. Sin embargo, este fenómeno no es rápido; por el contrario, la grieta inicia y se propaga con una velocidad muy baja, hasta que los esfuerzos que se encuentran en las uniones del metal pasan del esfuerzo de fractura.

## **2.5 CALDERAS.**

Una caldera es, básicamente, un productor de vapor. Transmite el calor que viene de una fuente externa al fluido que contiene. Este fluido, ya sea agua o vapor, debe alimentarse de acuerdo con la presión, temperatura, calidad y cantidad para lo que fue creada. Idealmente, una caldera debe ser simple en su construcción, de bajo costo de mantenimiento, un diseño que se adecue a las propiedades de expansión y contracción del material, un horno que tenga una combustión altamente efectiva y una excelente razón de transferencia de calor, además de que sea segura de acuerdo a las especificaciones [21].

Todos los componentes de una caldera, como son tubos, tambores, y otros, están sometidos a un esfuerzo constante y altas temperaturas. Es por eso que los materiales de los que está constituida deben ser los ideales para estas condiciones. Los materiales utilizados para construir una caldera deben cumplir con las especificaciones y requerimientos para la construcción de recipientes a presión, y el código que se utiliza por lo general es el Código de Calderas y Recipientes a Presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME, por sus siglas en inglés). A partir de este código es que se construyen la mayoría de las calderas, ya que da los requerimientos básicos en cuanto a material, diseño, y seguridad.

El acero es el material con el que se construyen la mayoría de las calderas y recipientes a presión. Debe ser de primera calidad, y su composición extremadamente controlada, ya que la presión, pero sobre todo la temperatura, pueden afectar en la composición con el paso del tiempo, y crear algunas de

las fallas de las que se ha hablado anteriormente. Algunos elementos aleantes que son deseados en este tipo de materiales son los siguientes:

- **Manganeso.** El manganeso en el acero ayuda a desoxidar el baño de la aleación; además de facilitar el trabajo mecánico, fortalece a la ferrita, incrementando el valor de la resistencia a la fluencia y la dureza, con una buena ductilidad en caliente. En los aceros bajo carbón, se agrega en cantidades de 1 a 1.5% para mejorar la resistencia. Los sulfuros de manganeso le dan maquinabilidad e incrementan la fuerza de la ferrita, además de bajar la temperatura a la cual se forma la martensita durante un proceso de temple.
- **Silicio.** El silicio también ayuda a desoxidar el baño, incrementando la fuerza de la ferrita pero sin causar una pérdida significativa de ductilidad. En los aceros bajo carbono se agrega en orden de 0.5% en combinación con el manganeso, para fortalecer a la ferrita.
- **El cromo** ayuda a incrementar la resistencia a la corrosión y a la oxidación.
- **El titanio** se utiliza para incrementar el esfuerzo de fluencia y en menor grado, la resistencia a la tensión de la aleación, y el aluminio, junto con el titanio, ayudan a controlar el tamaño de grano.

Estos elementos ayudarán a mejorar las características del acero. El acero que se utiliza es laminado hasta el grosor deseado y sometido a un tratamiento térmico para aliviar tensiones. También puede utilizarse otro tipo de materiales como hierro colado, que tiene como ventaja que es más resistente a la corrosión que el acero, pero con la desventaja de que tiene una baja resistencia a la tensión.

## **Capítulo 3**

### **CASO DE ESTUDIO.**

El caso de estudio que se presenta es una caldera de vapor de agua en donde se presentó una falla catastrófica, que imposibilitó su funcionamiento. Se realizó la caracterización del material con el que se hizo la caldera y la soldadura; Además también se realizó un análisis de la falla, mediante los protocolos establecidos para este efecto. Siguiendo la información que se tiene en el marco teórico, se estableció el origen de la falla, y las causas posibles de la fractura. En este capítulo, se describen las técnicas empleadas para la obtención de datos, y se muestran los resultados.

#### **3.1 PRESENTACIÓN DEL CASO.**

El análisis de fallas se llevó a cabo en una caldera en forma cilíndrica, en donde una de las tapas se desprendió del cuerpo parcialmente, por la parte de la unión en la soldadura. Una explosión por el vapor contenido generó una abertura de aproximadamente 1m de longitud, que comúnmente se conoce como “boca de pescado” (Fig. 3.1). El cuerpo de la caldera tiene un espesor de 2.2cm, mientras que la tapa de 1cm. Al momento de recibir la muestra se desconoce el tipo de acero, la calidad del agua que se usaba, y el mantenimiento que se le dio durante el servicio. El tiempo aproximado de servicio fue de 15 años, cuando se había estimado de 20 años.



Fig. 3.1. Lugar donde ocurrió la fractura.

La parte dañada de la caldera se cortó de manera que pudieran ser examinadas tanto la falla del cuerpo como de la tapa. El arreglo de las partes se muestra en la figura 3.2. Puede verse en la imagen que la caldera tenía algunos depósitos en su interior, presumiblemente carbonatos debido a la calidad del agua que se manejaba.

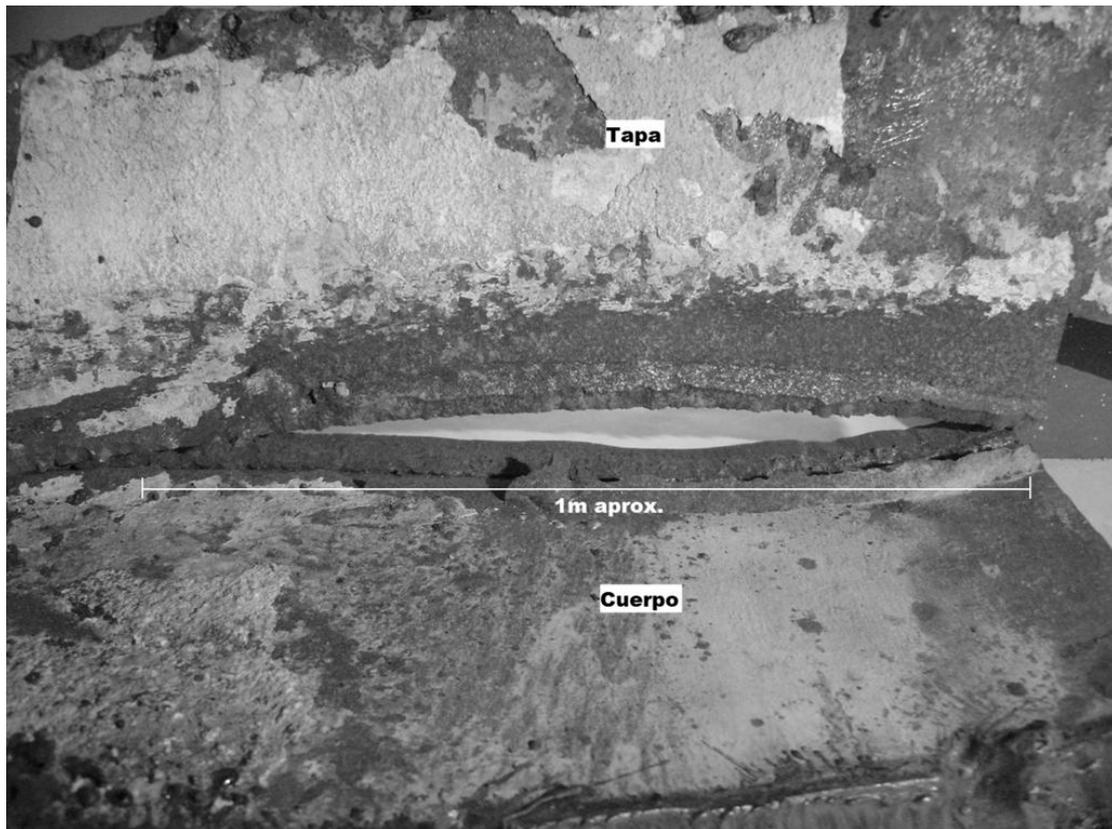


Fig. 3.2. Muestras de la parte dañada.

## 3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

Se realizó la caracterización del material para así precisar si fue o no parte del problema. Tanto el cuerpo como la tapa fueron objeto de diferentes análisis físicos y químicos, para saber el tipo de aleación que se trataba, y si cumplía con las especificaciones que se requieren en las normas para la construcción de recipientes a presión. Se tomaron imágenes del material, desde la recepción, mediante un microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) para obtener toda la información posible, antes de comenzar con los análisis. De esta manera, pudieron caracterizarse el cuerpo, la tapa, y la soldadura de la caldera.

### 3.2.1 CUERPO DE LA CALDERA.

Del cuerpo de la caldera se cortaron varias piezas (Fig. 3.3) de la parte más alejada de la falla, para no comprometer la evidencia, y así obtener material lo más sano posible.

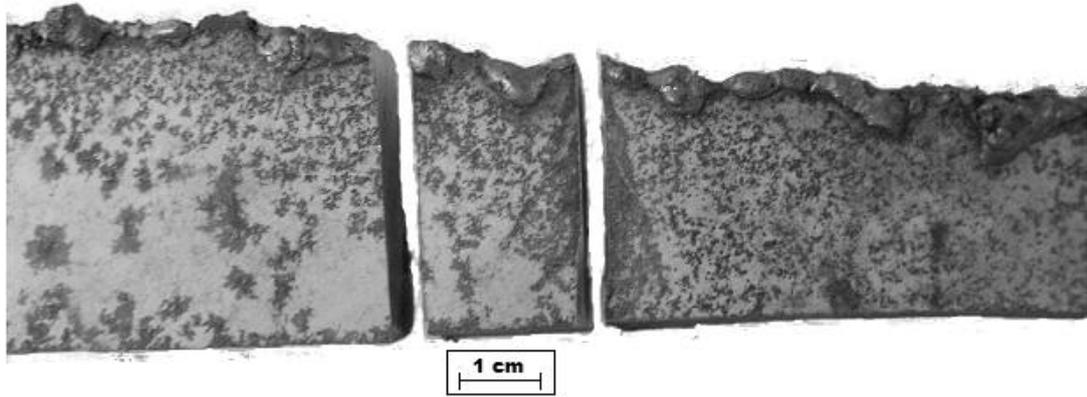


Fig. 3.3. Corte de las probetas para caracterización.

El análisis para obtener la composición química se realizó con un espectrómetro de emisión de chispa. La tabla 1 muestra los resultados obtenidos.

**Tabla 1. Composición química del cuerpo de la caldera**

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0.0881	0.1746	1.114	0.0105	0.0079	0.035	0.0333	0.0199
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%Pb	%Fe
0.0309	0.005	0.0164	0	0.0198	0	0.0051	98.4

Los elementos aleantes con mayor presencia en este acero son el manganeso, silicio y por supuesto, carbón. Esta aleación cuenta también con una cantidad muy baja de cromo, molibdeno, aluminio y titanio. De acuerdo al **ASTM Metals Handbook No. 1**, la composición química del cuerpo concuerda con las aleaciones (tabla 2) **A537** (Placa de acero al carbón-manganeso-silicio tratada en caliente) ó **A662** (Placa de acero al carbón-manganeso para servicios a temperaturas bajas y moderadas). Aunque tienen una composición química muy parecida, el valor de sus propiedades mecánicas es diferente (tabla 3). Ambas son aleaciones que cumplen con las especificaciones para placas que se utilizarán a presión (acero en placa para recipientes a presión), como en el caso de la caldera.

**Tabla 2. Composición química de las aleaciones A 537 y A 662.**

ASTM	grado	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	Otros
------	-------	----	-----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-------

	o tipo										
A 537	1, 2	0.24	0.7-1.6	0.035	0.04	.15-.40	0.25	0.25	0.08	0.35	
A 662	A	0.14	0.9-1.35	0.035	0.04	.15-.40	0.3	0.4	0.12	0.4	
	B	0.19	0.85-1.5	0.035	0.04	.15-.40	0.3	0.4	0.12	0.4	
	C	0.2	1.1-1.6	0.035	0.04	.15-.40	0.3	0.4	0.12	0.4	

**Tabla 3. Especificaciones de las propiedades mecánicas de las aleaciones A 537 y A 662**

ASTM	Tipo o grado de material	Resistencia a la tracción		Resistencia a la fluencia		Elongación mínima en 200mm (8 in), %	Elongación mínima en 50 mm (2 in), %
		Mpa	Ksi	Mpa	ksi		
A 537	1	450-585	65-85	310	45	18	22
	2	485-620	70-90	315	46	....	20
	2	515-655	75-95	380	55	....	22
A 662	A	400-540	58-78	275	40	20	23
	B	450-585	65-85	275	40	20	23
	C	485-620	70-90	295	43	18	22

**Tabla 4. Datos obtenidos en el ensayo de tensión.**

% Reducción de área:	66.8
% Deformación:	30.9
Resistencia a la tensión (Mpa)	380
Resistencia a la fluencia (Mpa)	269

Para el ensayo de tensión, se realizaron probetas planas de acuerdo a la norma ASTM E-08 (Fig. 3.4). El ensayo se llevó a cabo en el Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM Campus Cuernavaca, con un equipo universal para ensayos mecánicos Instron modelo 4206, a una velocidad de cabezal de 0.5 mm/minuto.

Se obtuvo la curva esfuerzo-deformación correspondiente a la Fig. 3.5, y de esta curva, se presentan los datos en la tabla 4.

El porcentaje de deformación de la probeta concordó con todas las aleaciones. El valor de la resistencia a la tensión fue demasiado bajo para todas las aleaciones, el valor mínimo de la resistencia a la tensión de estas aleaciones es de 400MPa, que corresponde a la A662-A. En cuanto al valor de la resistencia a la fluencia, puede ubicarse también en esta aleación, ya que es la que presenta el valor más bajo, de hasta 275MPa.

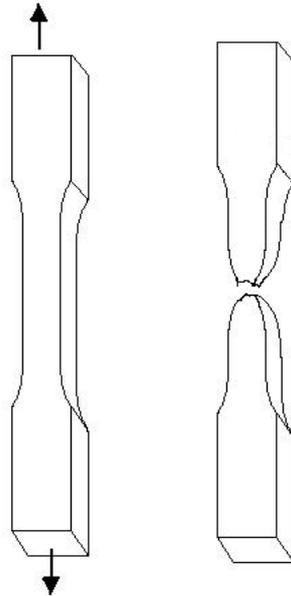


Fig. 3.4. Ensayo de tensión.

La prueba de dureza se realizó con durómetro marca. Rockwell. Con él se realizaron pruebas de dureza Brinell, mediante la penetración de una bola de acero de 10 milímetros. La dureza Brinell se calcula mediante la fórmula:

$$BHN = \frac{P}{\left(\frac{\pi D}{2}\right) \left(\sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

Donde:

D= Diámetro de la esfera de acero en mm.

P= Carga aplicada en Kg.

d= Diámetro de la impresión en mm.

Se utilizó una carga de 3000 Kg, y el diámetro de la impresión fue de 5.8mm, con lo cual se obtuvo una dureza BHN de 103.

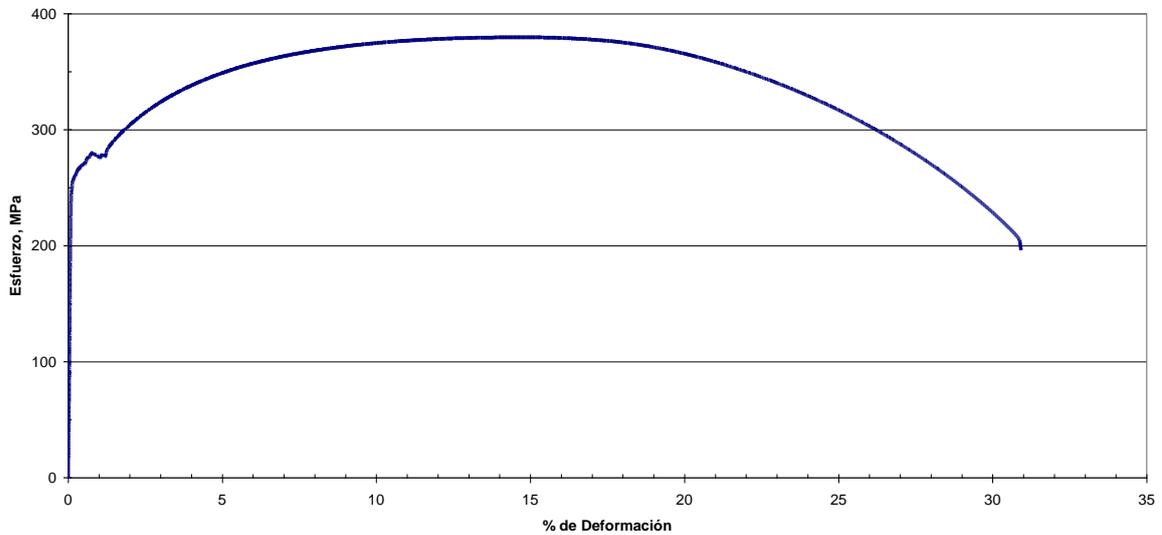


Fig. 3.5. Curva esfuerzo-deformación del acero correspondiente al cuerpo de la caldera.

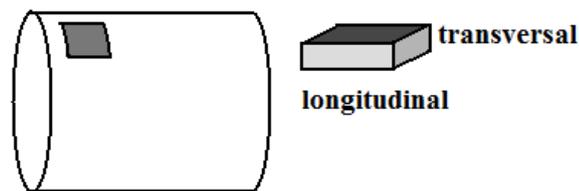


Fig. 3.6. Forma de corte de la caldera para el examen metalográfico.

Se realizaron exámenes metalográficos para conocer la microestructura del material y saber si tenía algún tipo de impurezas o imperfecciones. Las metalografías se realizaron en la parte transversal y longitudinal del material, y las probetas se cortaron como se indica en la figura 3.6. Las muestras se prepararon y se atacaron con nital al 3%, para revelar la microestructura existente.

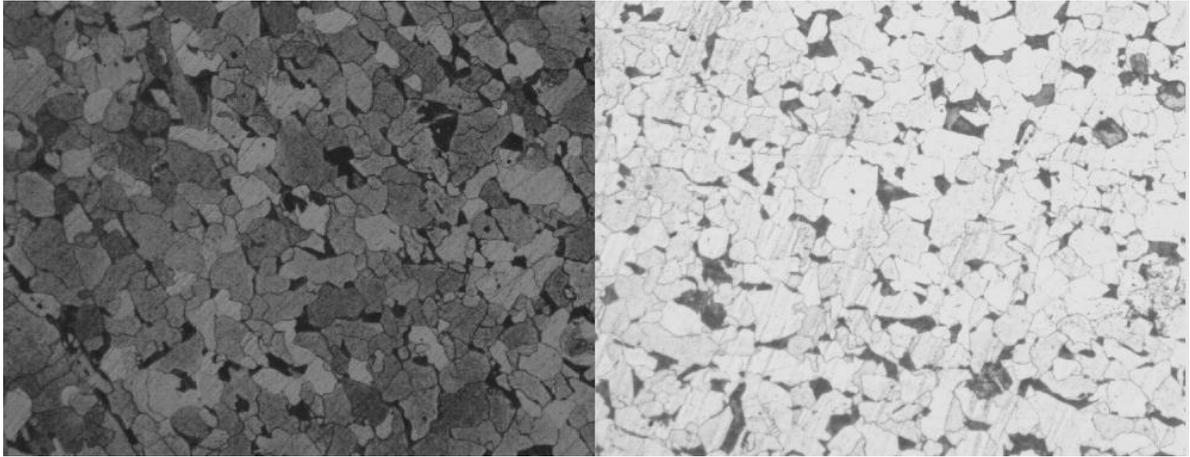


Fig. 3.7. Microestructura del cuerpo de la caldera. a) Longitudinal, y b) Transversal.

En la figura 3.7 se muestran las metalografías obtenidas. Se observa la microestructura de grano uniforme y bandas de perlita en una matriz ferrítica, mayormente equiaxial, impurezas e inclusiones, además de cierta porosidad. El material presentó líneas de flujo debido al laminado en caliente en toda su constitución; una constante en estas marcas fue la presencia de inclusiones, principalmente sulfuros de manganeso.

Las impurezas siguen las bandas de perlita, e incluso forman bandas a lo largo del material. Aunque estas bandas pueden afectar el desempeño del material, debido a su forma alargada, las hojuelas presentan puntas redondeadas, y aunque su presencia es visible, no es un factor de gravedad para la estructura del material, y por lo tanto la microestructura no podría ser la clave de la falla.

### 3.2.2 TAPA DE LA CALDERA.

Al igual que con el cuerpo de la caldera, se realizaron cortes en la parte más alejada de la falla para obtener material sano; se obtuvieron probetas para realizar un análisis químico, donde se obtuvieron los resultados obtenidos en la tabla 5.

**Tabla 5. Composición química de la tapa de la caldera.**

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
----	-----	-----	----	----	-----	-----	-----

0.1142	0.2498	1.103	0.02	0.015	0.019	0.032	0.013
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%Pb	%Fe
0.0587	0.0032	0.012	0	0.004	0	0.005	98.4

Esta composición, de acuerdo al **Metals Handbook No. 1**, y al igual que el material del cuerpo de la tapa, puede pertenecer a las aleaciones **A537** o **A662** (tablas 2 y 3). Esto debido a que las aleaciones no tienen una diferencia importante en el porcentaje de los elementos aleantes presentes: la única diferencia realmente perceptible es en la cantidad de carbono (0.088% para el material del cuerpo y 0.114% para el material de la tapa). La cantidad de titanio en el cuerpo puede ser considerado un microaleante, pero en el material de la tapa, el porcentaje mostrado puede manejarse como traza. Ninguno de los dos materiales tiene una cantidad suficiente para que la aleación cambie, por tanto pueden considerarse dentro de la misma.

Al igual que en el ensayo de tensión del material del cuerpo de la caldera, se realizó una probeta plana (subsize), de acuerdo a la norma **ASTM E-08**. Se obtuvo la curva esfuerzo-deformación de la figura 3.8, en donde se nota que hubo un período de transición de deformación elástica a plástica. El valor de resistencia a la fluencia se obtuvo entonces tomando el valor más alto y el más bajo, y realizando un promedio. Los datos de resistencia a la tensión se muestran en la tabla 6.

El porcentaje de deformación obtenido en la prueba mecánica fue de 30%, lo mismo que en la probeta del cuerpo. Tuvo una resistencia a la tensión de 441MPa, lo que descarta a las aleaciones A537-1, A662-C. Sin embargo, se obtuvo un valor de resistencia a la fluencia de 334Mpa, que sólo está por debajo en la aleación A 537-2.

**Tabla 6. Datos obtenidos en el ensayo de tensión.**

% Reducción de área:	58.8
% Deformación:	30.2
Resistencia a la tensión (Mpa)	441
Resistencia a la fluencia (Mpa)	334

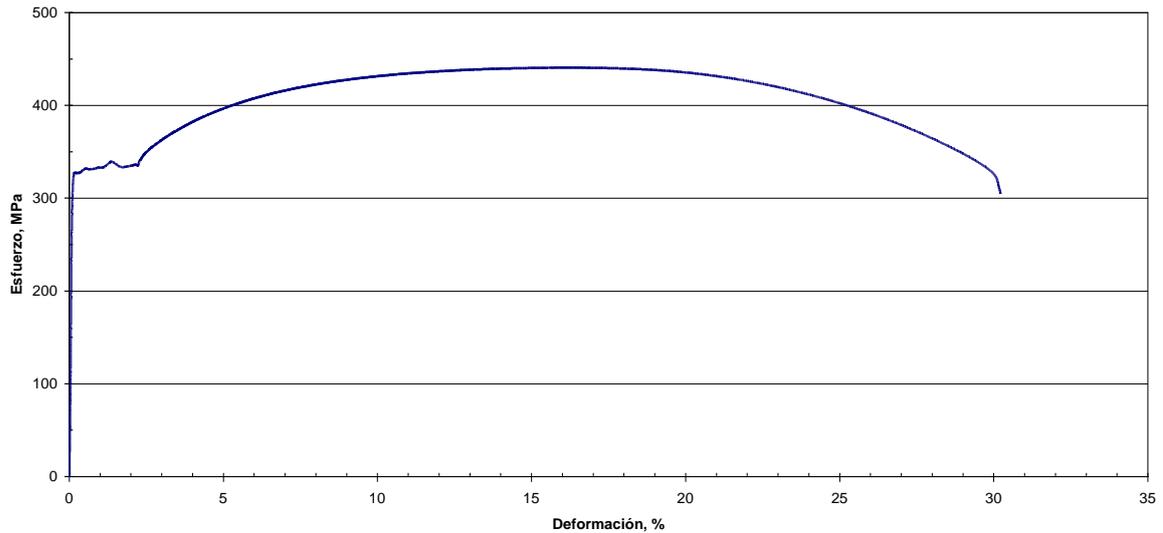


Fig. 3.8. Curva esfuerzo-deformación para la aleación de la tapa.

En la prueba de dureza, el indentador dejó una marca de 5.5 mm, por lo tanto se obtuvo una dureza BHN de 116.

En cuanto a los exámenes metalográficos, la tapa de la caldera mostró una microestructura muy parecida a la mostrada en el cuerpo (Fig. 3.9), es decir, una microestructura de grano uniforme formada de granos de perlita bandeados, en una matriz ferrítica, donde puede observarse el flujo del laminado.

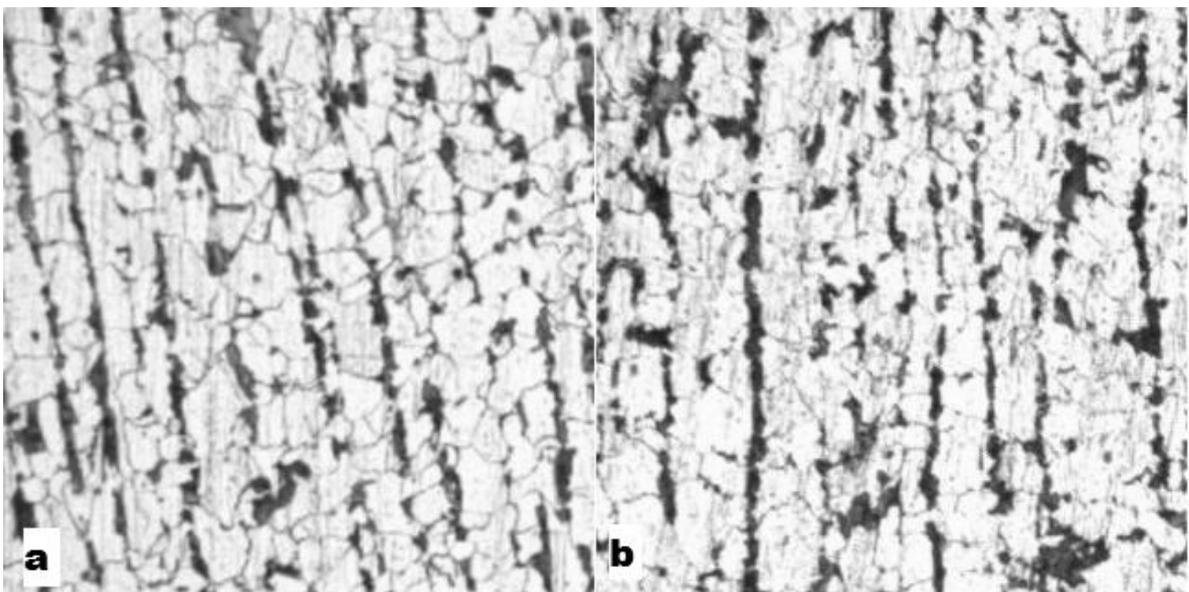


Fig. 3.9. Microestructura de la tapa de la caldera: a) parte longitudinal, b) parte transversal.

### 3.2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA SOLDADURA.

Al igual que los materiales de la tapa y del cuerpo, la parte de la soldadura se analizó para saber qué tipo de electrodo se utilizó. Se analizó químicamente con el espectrómetro de emisión de chispa, y los resultados se encuentran en la tabla 7.

**Tabla 7. Composición química en la zona de la soldadura.**

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0.0801	0.2637	0.517	0.0173	0.007	0.02	0.034	0.022
%Al	%Co	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%Pb	%Fe
0.0084	0.0107	0.011	0.004	0.009	0.022	0.005	99

Se realizó un examen metalográfico tanto de la soldadura como de la zona de afectación térmica (Fig. 3.10). Para este efecto, se preparó la zona y se atacó con nital 3. Una vez atacada la pieza se observó una división (D) entre la soldadura y el metal base, lo que indica que no hubo una fusión entre las partes. Es decir, se unieron, mas no se fusionaron.

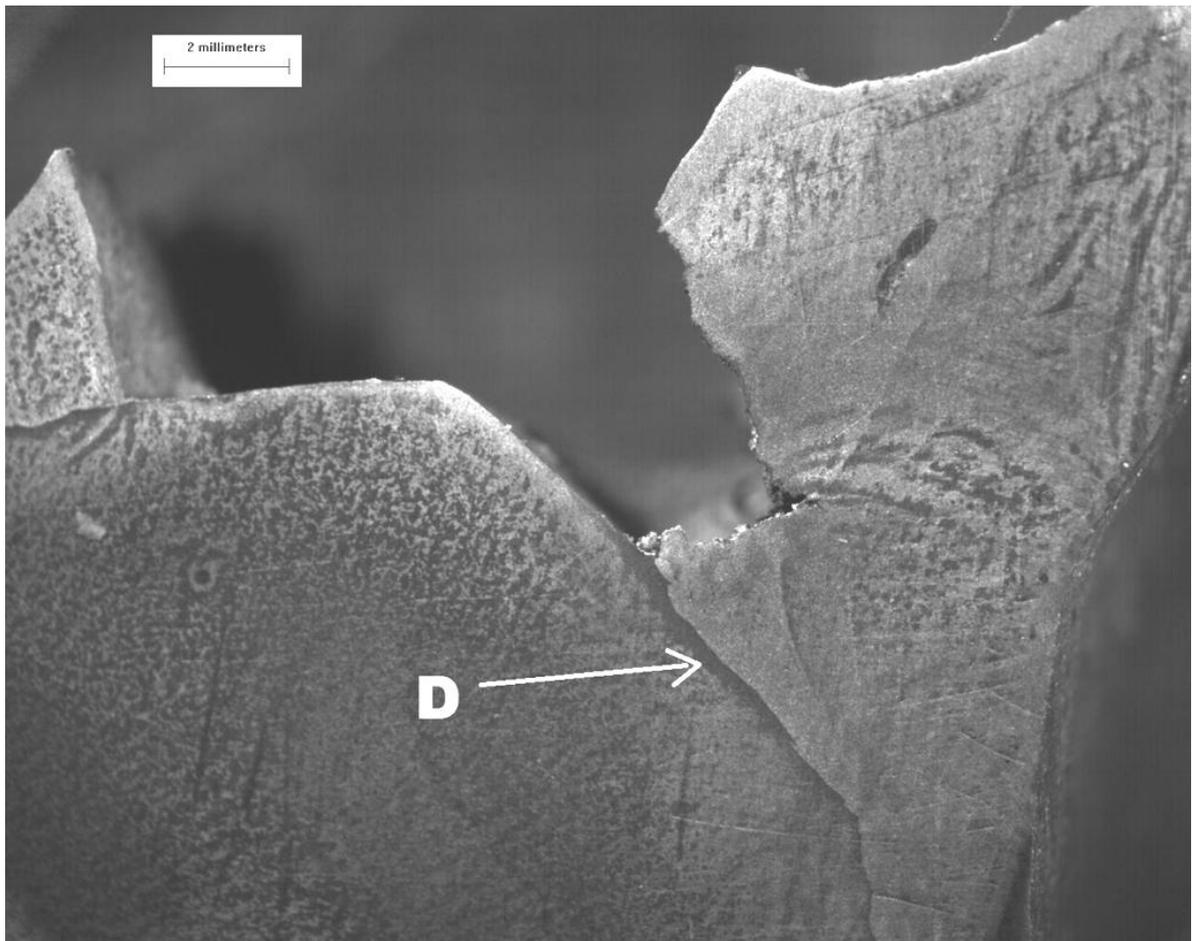


Fig. 3.10. Falta de fusión en la soldadura.

En la figura 3.11 a) se observa el cambio en el tamaño de grano que generó el calor del proceso en la ZAC: granos de ferrita y perlita al azar, que se hacen más pequeños entre más se acercan a la zona de fusión, mientras que en la zona más alejada de la ZAC, los granos se parecen a la microestructura del metal base. En la parte b) se observa la zona de la soldadura que muestra en su microestructura ferrita acicular en su mayoría, debido a la velocidad de enfriamiento.

Para corroborar y analizar los daños que había sufrido la parte de la unión entre el cuerpo y la tapa, se seccionaron las piezas en partes más pequeñas, se limpiaron, y se observaron en el microscopio estereoscópico, donde pudo analizarse con mayor detalle la superficie de la soldadura. Los resultados se analizarán en el capítulo 4.

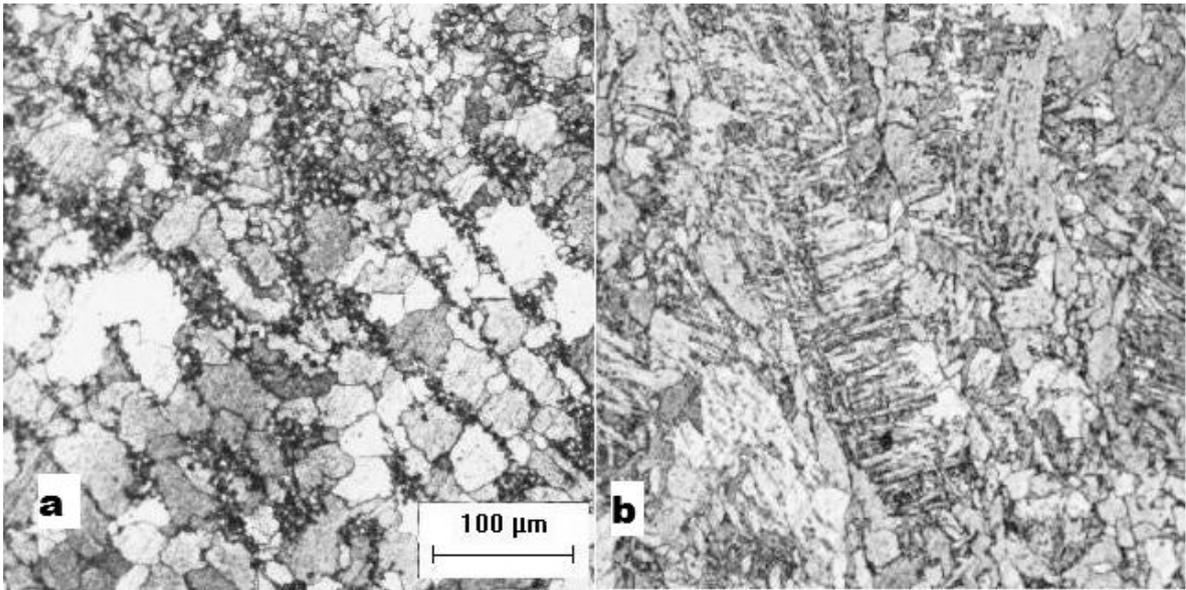


Fig. 3.11. a) zona de afectación por calor. b) microestructura de la soldadura.

La figura 3.12 es un esquema del tipo de soldadura que se ocupó para la caldera. El diseño de una junta puede ayudar a maximizar la resistencia del material a soldar, y en algunos casos están diseñadas para que sea necesario soldar sólo el 50% de la superficie a unir. En este caso se trató de un diseño tipo corner, pero no se realizó de manera correcta.

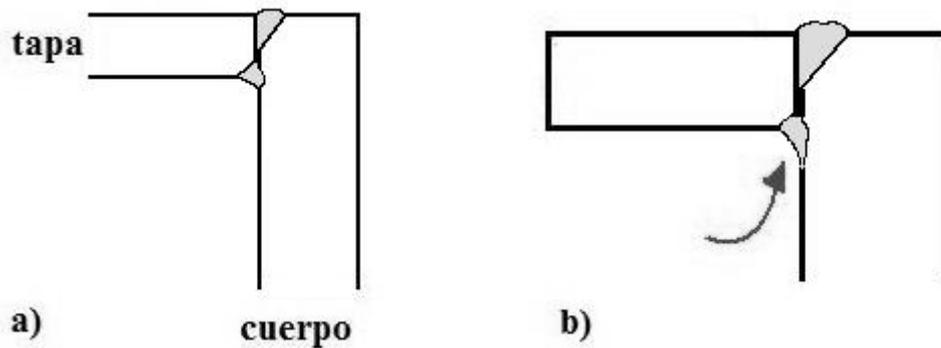


Fig. 3.12. a) Diseño de la soldadura en la caldera. b) La flecha indica la parte dañada de la soldadura.

## Capítulo 4

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En este capítulo, se analizarán las imágenes obtenidas de las distintas partes de la caldera, además de los resultados obtenidos en las distintas pruebas a las que fue sometido el material, para así obtener resultados que lleven a un entendimiento de por qué falló la caldera.

Se obtuvieron gran cantidad de imágenes utilizando los microscopios óptico y electrónico de barrido. Estas imágenes darán una idea del estado físico, y se podrá observar la influencia de los esfuerzos a los que fue sometido el material. Debido a que no se cuenta con alguna bitácora de trabajo o de mantenimiento de la caldera, la evidencia encontrada en estas imágenes será la que determine si el material es el adecuado para este tipo de estructuras, si la manufactura es la correcta, o si fue cuestión de un mal mantenimiento.

## 4.1 MATERIAL AL MOMENTO DE LA RECEPCIÓN.



Fig. 4.1 a) Las paredes de la caldera, tapa y cuerpo.



Fig. 4.1 b) parte de la soldadura en el cuerpo.

Desde que las piezas se recibieron, se encontró óxido en la parte interna del cordón de soldadura; esto hizo suponer que el agua se estuvo filtrando hacia el Interior. En la figura 4.1 se tienen dos perspectivas de la soldadura: en la parte a) se aprecian tapa y cuerpo y los óxidos entre la unión, así como la falta de fusión, incluso un hueco en el cordón de soldadura (S). La estructura no presentaba un desgarre en las paredes, así que puede decirse que la

soldadura no se “arrancó” debido a la falla, sino que la soldadura no estaba unida a la tapa cuando la falla ocurrió. En la parte b) se observa la corrosión causada por los huecos y la falta de fusión de la soldadura, lo que permitió el paso del vapor.

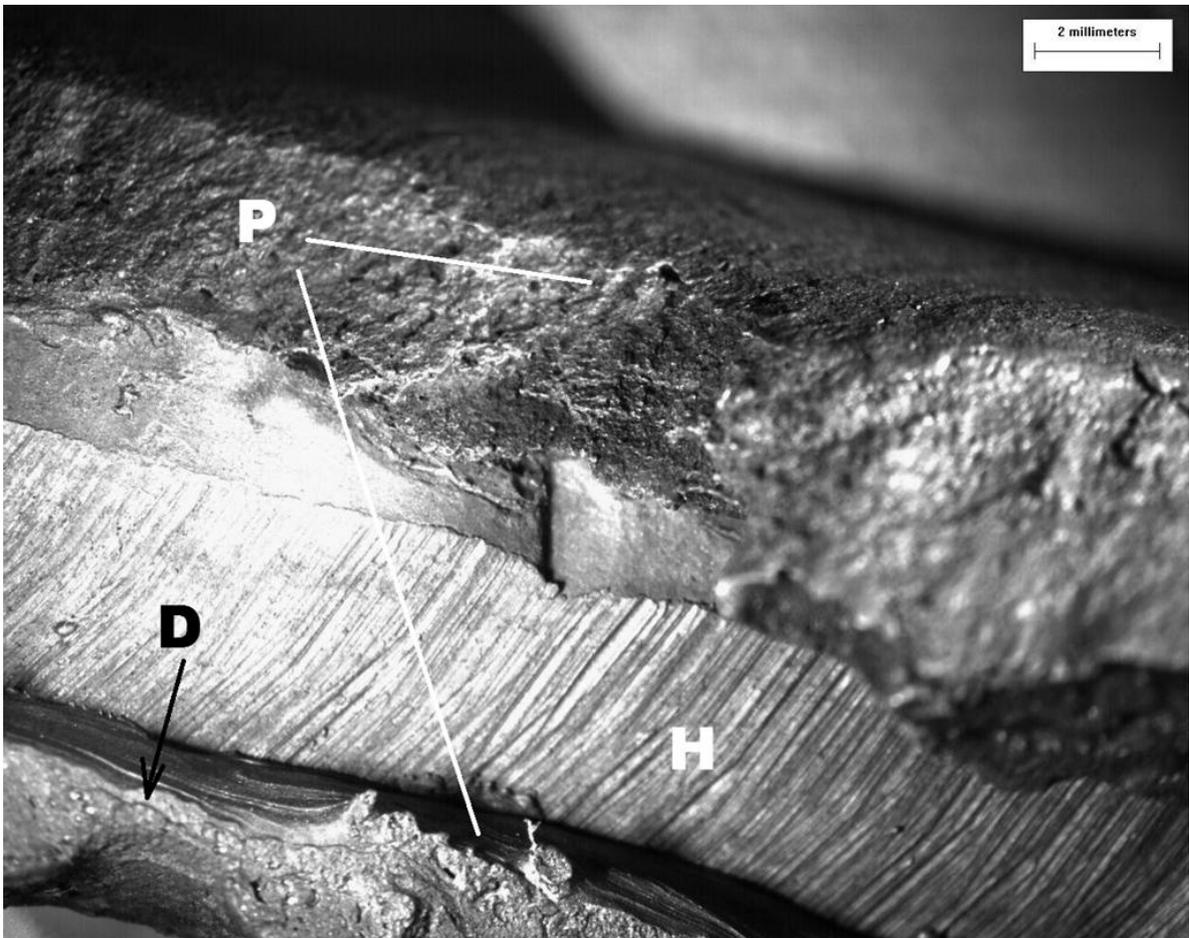


Fig. 4.2 a) Parte soldada del cuerpo de la caldera.

En la figura 4.2 a) puede observarse a detalle la soldadura y el corte que se realizó en el cuerpo para soldar las partes (se aprecian las líneas de corte). En los bordes superior e inferior se observa flujo plástico (P), que tal vez se generó durante la etapa de falla catastrófica de la caldera. La presencia de óxidos entre estas líneas de flujo indican que esta parte no fue arrancada de golpe, sino que pasó mucho tiempo para que llegara a la falla.

Las líneas también indican que fueron producidas por los ciclos de presión que se ejercieron en el interior de la caldera, que en la zona defectuosa de la soldadura eran mayores, debido a que la sección de unión era menor en

comparación con toda la sección del cuerpo y la tapa. Existe otra sección muy delgada (D) debido al poco aporte de soldadura. Estas partes delgadas fueron las que en primera instancia permitieron la entrada del medio al interior de las cavidades.

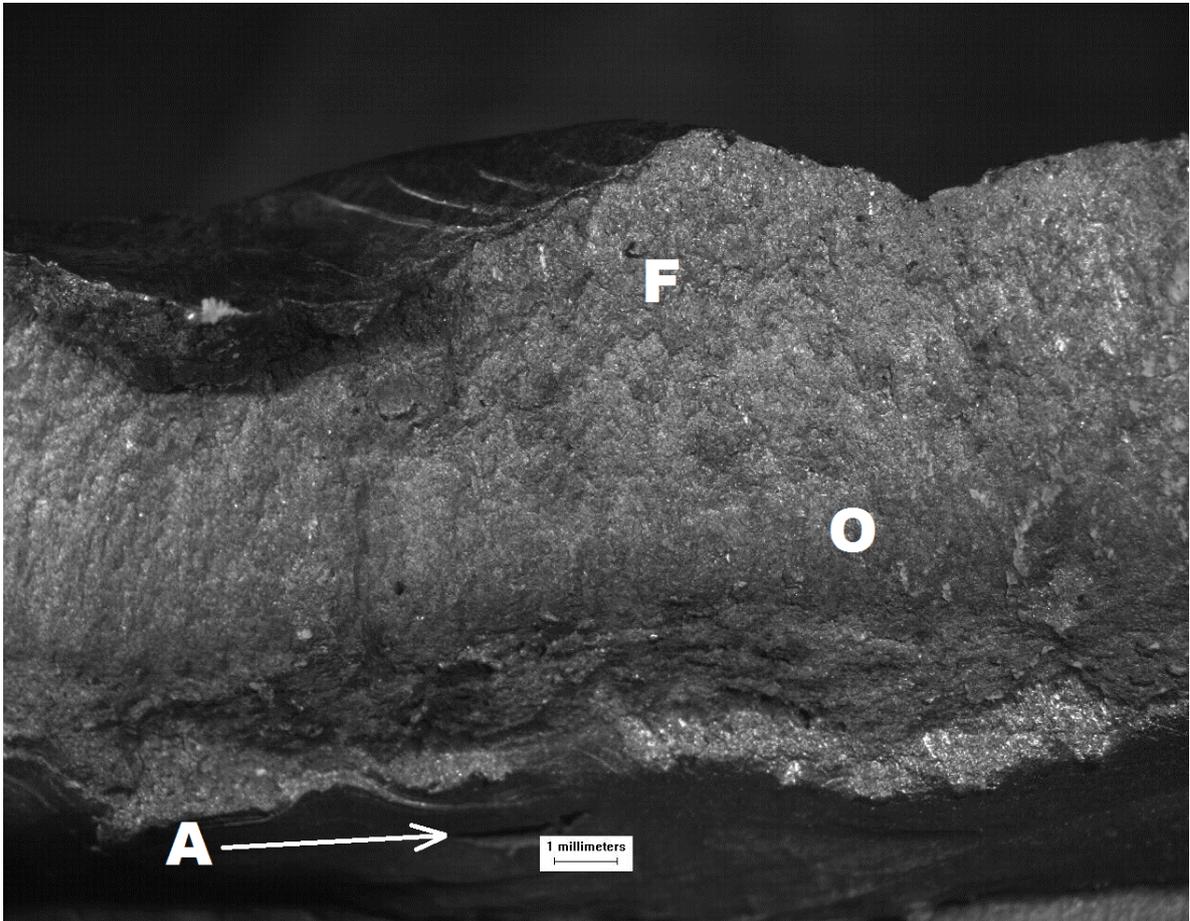


Fig. 4.2b. Zona de unión en la parte del cuerpo de la caldera.

La figura 4.2 b) muestra un acercamiento a la zona más ancha de la soldadura. En la parte baja se muestra evidencia de agrietamiento (A), y al parecer, lo que son algunas capas de óxido (O), mientras que la parte superior es ya el material de la caldera, en donde pueden observarse unas líneas verticales, producto del esfuerzo al que fue sujeto. Las líneas de flujo en el centro de la pieza están perpendiculares a la base, mientras que del centro y hacia arriba se observa una fractura frágil (F), la cual corresponde con la última sección de la soldadura en fallar. Los óxidos se encontraron desde la parte interna de la soldadura y hacia arriba, hasta donde se encontró la fractura frágil. Esto es un indicativo de corrosión fatiga, ya que el medio agresivo

penetró en la soldadura haciendo más delgada la zona de unión, y al estar bajo la presión ejercida por el vapor no soportó más y finalmente se dio la falla.

La parte de la soldadura donde se localizó la falla se limpió con ácido acético al 3% (vinagre) para remover grasa y óxidos, dejando limpia y visible la parte de la fractura. La figura 4.3 muestra la parte central de la “boca de pescado” que se formó. En la parte del centro hacia la izquierda puede observarse un hueco, que presumiblemente ya estaba antes que se generara la falla. Este material es de la soldadura, y se aprecia en la figura 3.10, sólo se unió al material, mas no se fusionaron, de ahí que puede considerársele al cordón de soldadura como uno de los puntos más débiles de la caldera. A partir del hueco y hacia la izquierda de la imagen se observan líneas paralelas que corresponden al avance de la falla, cada una de ellas se formó mientras la falla avanzaba y se detenía. De la parte central y hacia la derecha, se observan también líneas paralelas, pero son más suaves.

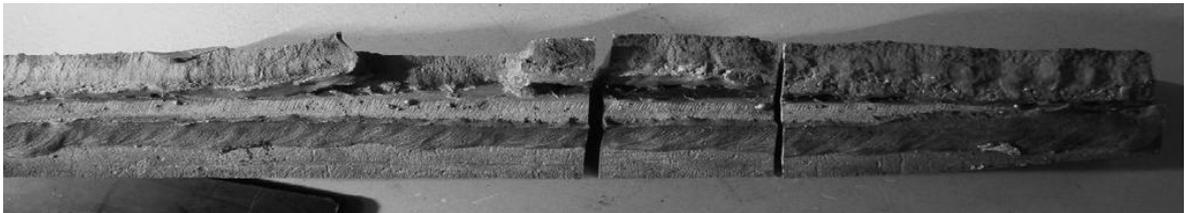


Fig. 4.3. La parte central de la “boca de pescado” en la caldera.

Se realizó un análisis a la región central, donde parece ser el inicio de la fractura (Fig. 4.4). En la imagen a) se observa que la fractura inició en la parte donde no hubo penetración ni fusión completa de la soldadura (F). Aquí se generó una intercara entre el cuerpo y la tapa (en la figura 3.10 se muestra el corte transversal de una región cercana a esta zona). La línea punteada (P) muestra perfectamente el límite donde penetró la soldadura. Se observan líneas que van desde la esquina superior y hacia el centro, líneas que avanzan y que indican que la ruptura (al menos en esa zona) comenzó en esta parte. La imagen b) es la parte donde la cavidad termina y comienza nuevamente el cordón de soldadura. Aquí también pueden verse las líneas de flujo que indican cómo es que comenzó a desplazarse el material. También se observa el frente de oxidación (O) asociado a la penetración del medio agresivo a través de un poro en la superficie del cordón de soldadura (P).

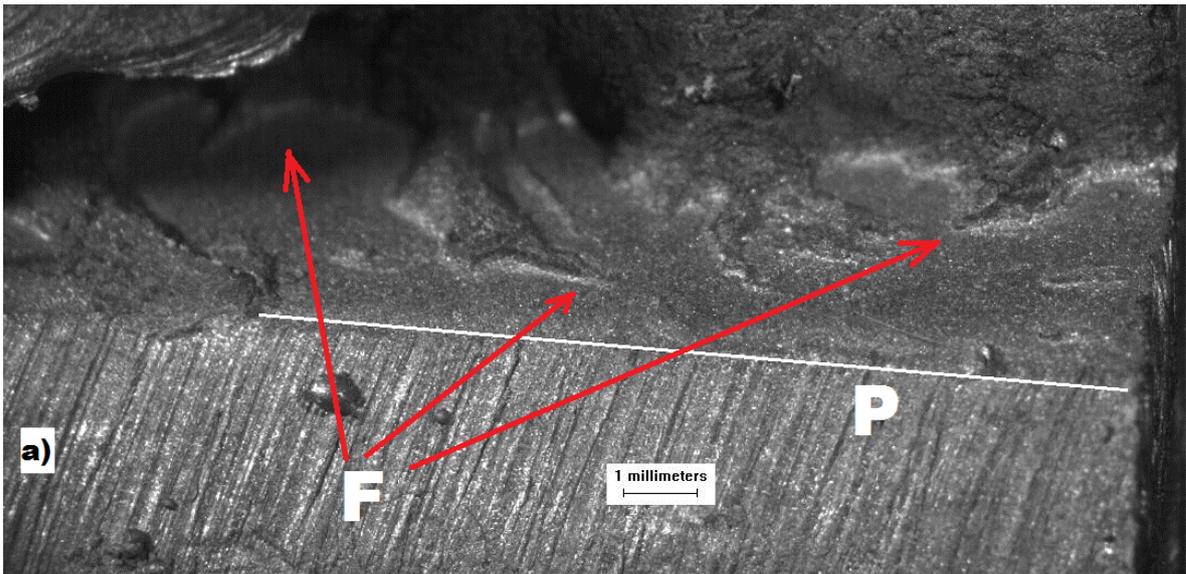


Fig. 4.4 a) Parte donde presumiblemente comenzó la fractura

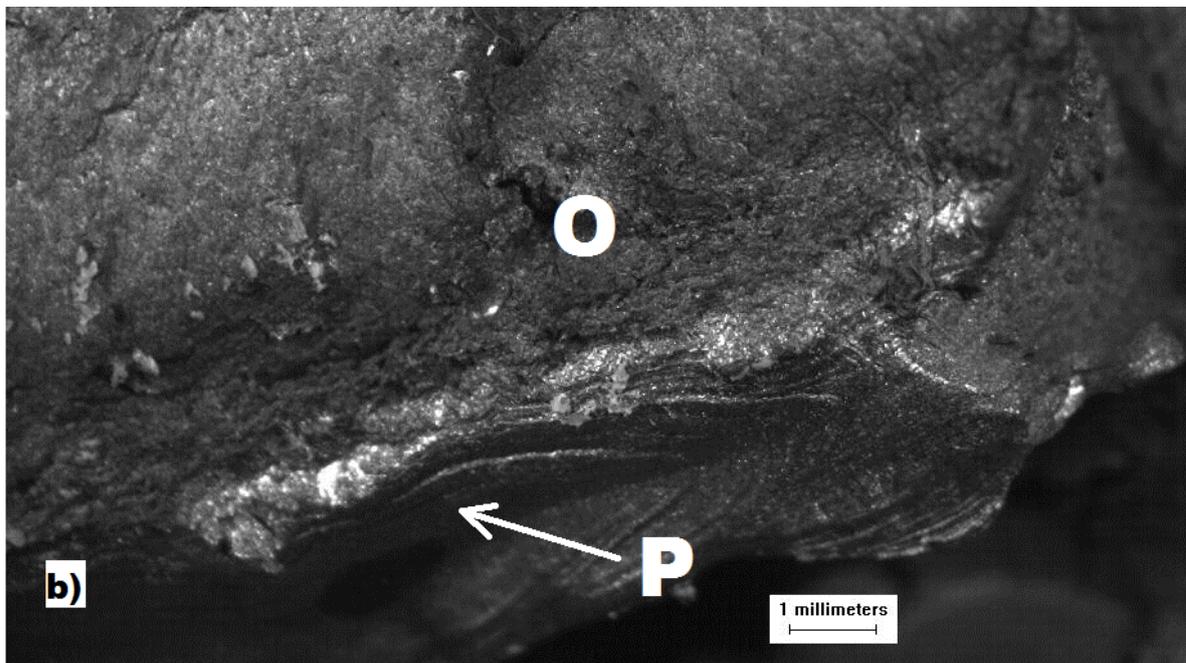


Fig. 4.4 b) Parte donde presumiblemente comenzó la fractura.

La figura 4.5 muestra una fotomicrografía y tres imágenes obtenidas con el SEM.

La parte a) muestra una parte de la tapa donde puede verse por las líneas de laminado, que el material se deformó plásticamente debido a la velocidad de deformación durante la última etapa de la falla.

La parte b) es una imagen del SEM de la misma zona en donde puede notarse una gran cantidad de poros. Estos pueden ser, ya sea propios del material o generados por la deformación plástica alrededor de las inclusiones no metálicas, en donde los pequeños huecos se alargaron y provocaron que el material se arrancara. Puede notarse rastros de exfoliación por corrosión (E), dado que el material se ha corroído por la parte de una de las bandas que dejó el proceso de laminado.

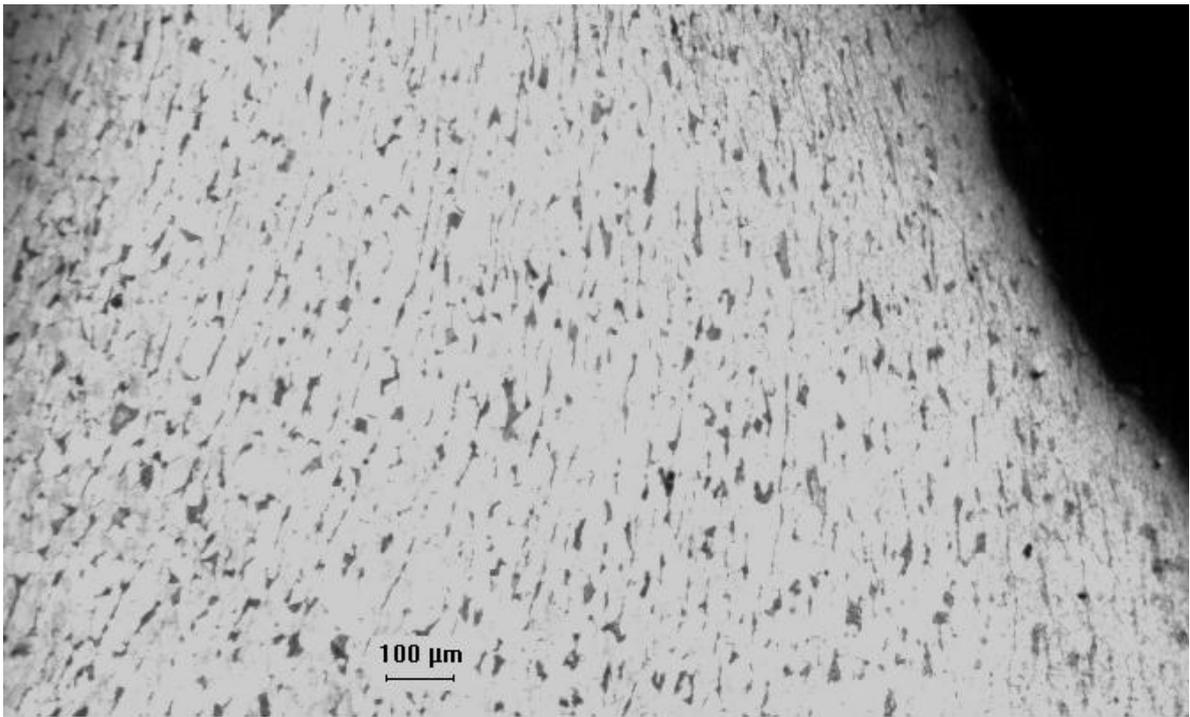


Fig. 4.5 a) Fotomicrografía de una parte deformada de la tapa.

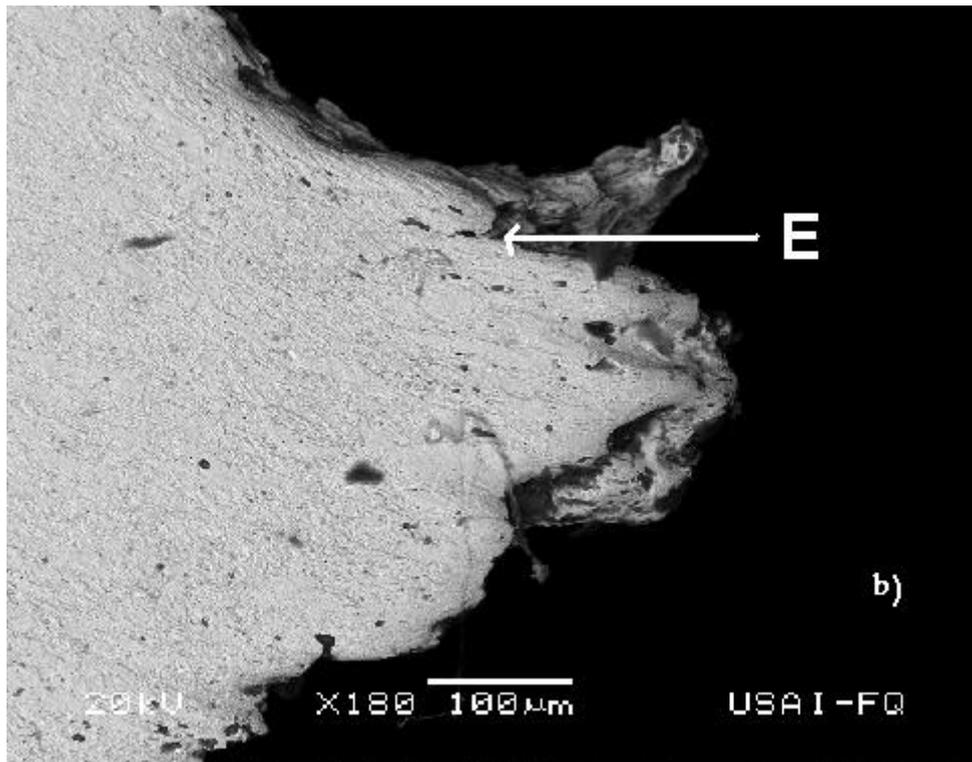


Fig. 4.5 b) Imagen de SEM de una zona deformada, en la tapa.

La parte c) es una imagen del SEM donde se observa una parte de la tapa donde el inicio de la grieta que dio origen al desprendimiento de material forma de pequeñas “olas”, que indican cómo es que se desgarró. Cada uno de los puntos en donde termina la “ola” es un lugar en donde el avance de la grieta creada por el esfuerzo se detuvo y la concentración de esfuerzos se acumulaba hasta reiniciar la grieta por la ruta de menor energía de propagación. En la imagen se observa cómo la grieta se detuvo en algún poro o inclusión, se estacionó y el proceso de avance comenzó nuevamente hasta que se generó una cavidad de mayor tamaño. Aquí puede observarse el crecimiento de grieta en un proceso de SCC descrito en el capítulo 2. El material muestra distorsión en la estructura debido a los esfuerzos aplicados; sin embargo, el hecho de que se vea cómo es que se detuvo la grieta en los poros, puede indicar que la velocidad de propagación fue baja. En las paredes de la grieta se observan poros que crecieron y formaron microgrietas, además de que las “olas” presentes en la grieta tienen las puntas redondeadas, lo que hace evidente la presencia de un medio agresivo.

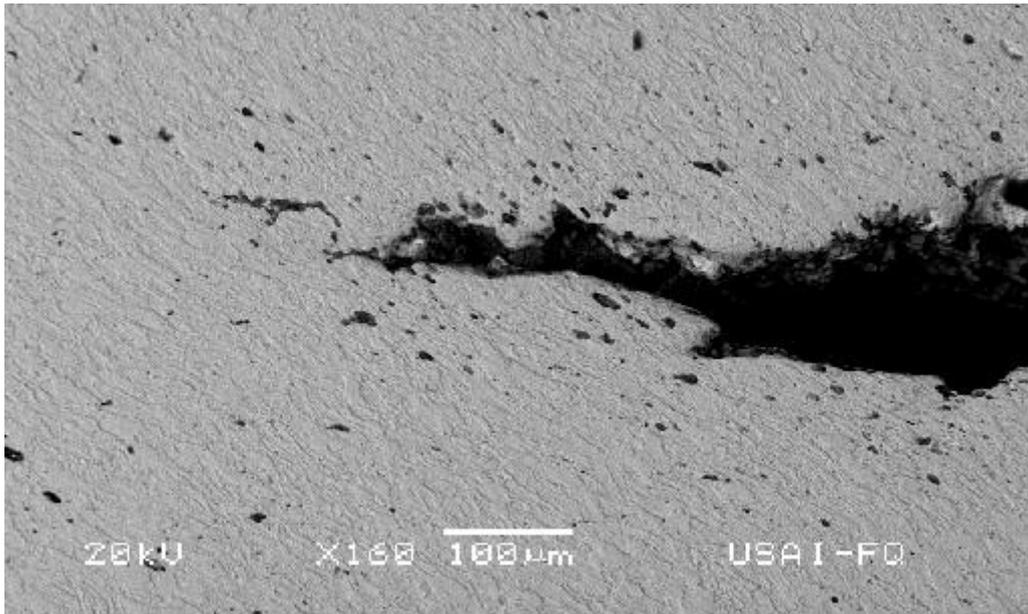


Fig. 4.5 c) Imagen de SEM que muestra una grieta en la parte de la tapa.

Donde el material está aún unido, se observa que la grieta se desvía, debido a alguna inclusión o defecto en el material. Mientras que las paredes se han desgastado, la punta de la grieta tiene una forma afilada. La ruta que sigue la grieta puede asociarse a la distribución de las inclusiones no metálicas.

La figura 4.5 d) es una imagen del SEM donde se observa el material deformado, además de gran cantidad de poros que debido al esfuerzo al que el material fue sometido, formaron huecos más grandes, que se alargaron en dirección al flujo plástico. Se observan las líneas de flujo, y el material al arrancarse sigue estas líneas, lo que indica corrosión intergranular. Puede observarse también el atrapamiento de escoria con tamaños de alrededor de  $20\mu\text{m}$ , además de regiones que sirven como concentradores de esfuerzos, donde es más fácil que crezcan las cavidades.

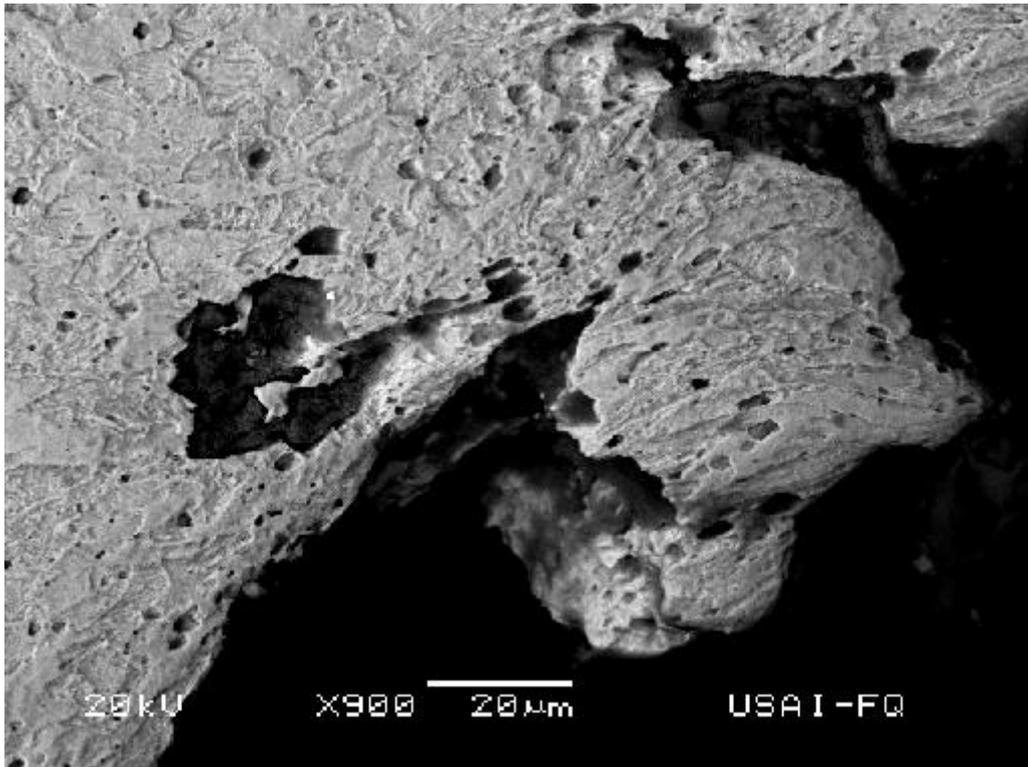


Fig. 4.5 d) Imagen de SEM de la tapa, donde se observa parte de la soldadura.

Se observó en el SEM la zona donde se localizó la falla. Las primeras imágenes se realizaron a bajos aumentos para observar la superficie del material. La figura 4.6 muestra cuatro de las imágenes obtenidas.

La parte a) es una imagen a 22x, y muestra una parte del metal unido a la soldadura. Se encontraron huecos (indicados con la flecha) a lo largo de la parte analizada, lo que respalda la conclusión de que la soldadura tuvo serias deficiencias. En algunos lugares la soldadura y el metal no se fusionaron, sólo se unieron, y dieron lugar a huecos como éste, que favorecen la corrosión por crevice.

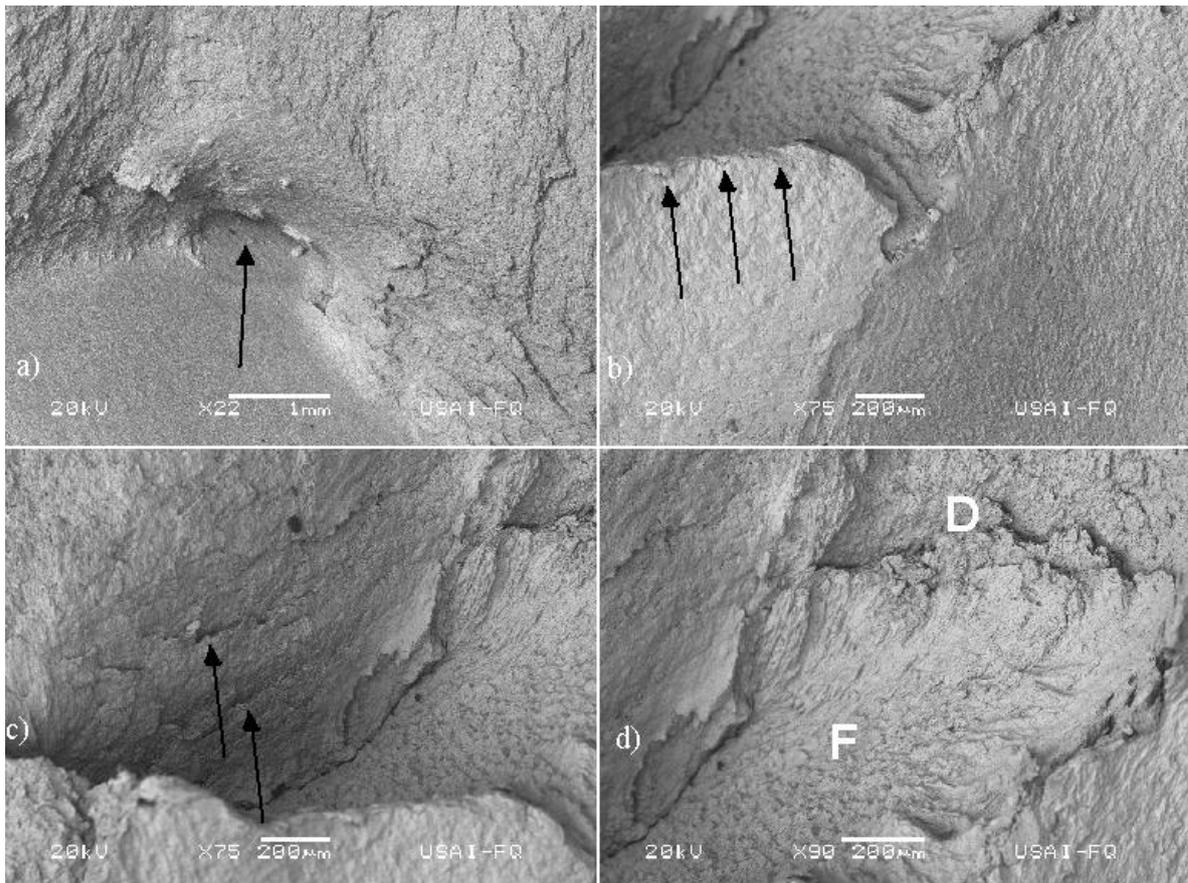


Fig. 4.6. Parte de la falla observada en el SEM.

La figura 4.6 b) es una imagen a 75x. En la parte superior izquierda se observa una grieta que va a lo largo del inicio de la soldadura, y en los bordes puede identificarse la evidencia de flujo plástico (marcado por las flechas).

En la figura 4.6 c) se observa otra región de la grieta contigua a la imagen anterior, en donde además el material muestra algunas grietas en la parte superior; éstas se generaron probablemente por fatiga, se nota la forma de estrías, que indica frotamiento entre las superficies.

En la figura 4.6 d) se muestra una imagen que se tomó a 90x, muestra el estado general de la fractura en donde pueden identificarse dos zonas: la de fatiga (F) y desgarre (D). La zona de fatiga se encuentra muy cerca de los huecos que se encontraron. Tal como se observó en la figura 4.2 b), la disminución en el grosor de la unión cuerpo-tapa, pudo provocar el desgarre y la falla final. El desgarre en esta zona, así como en las anteriores, se debió a la entrada del medio a la cavidad entre los cordones de soldadura.

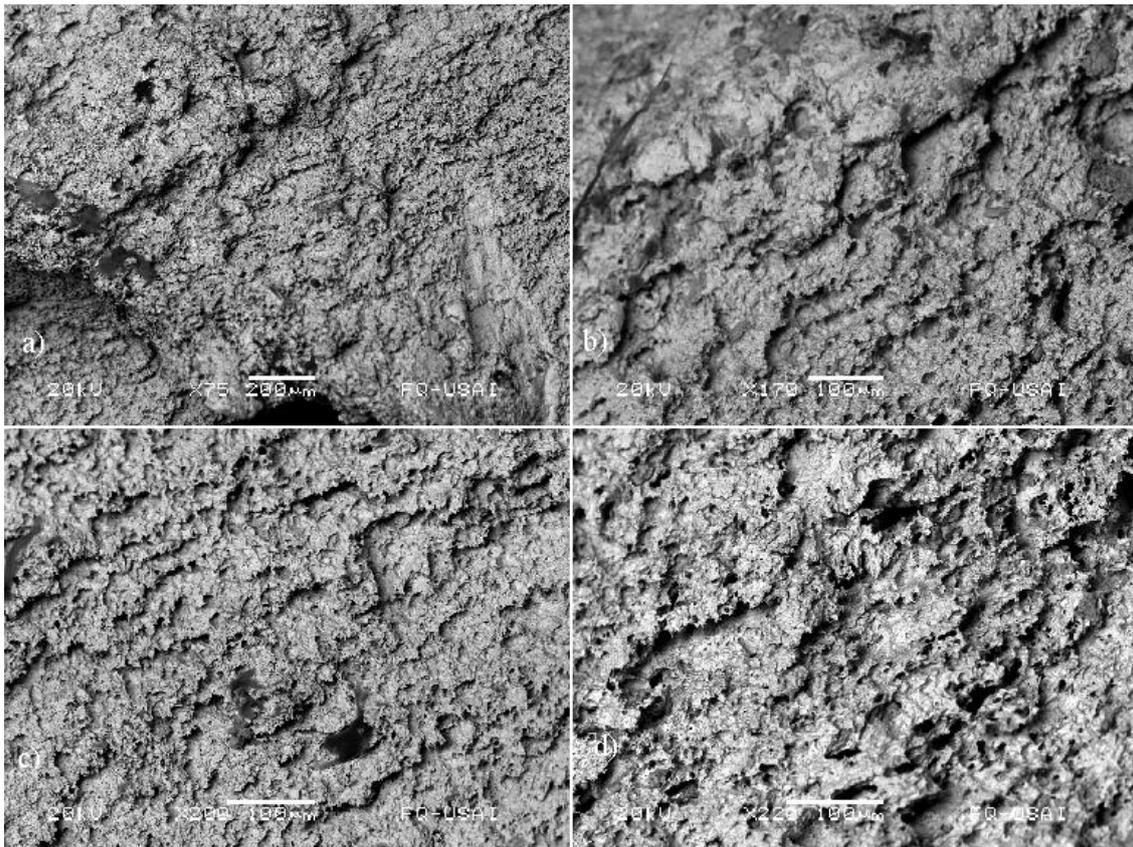
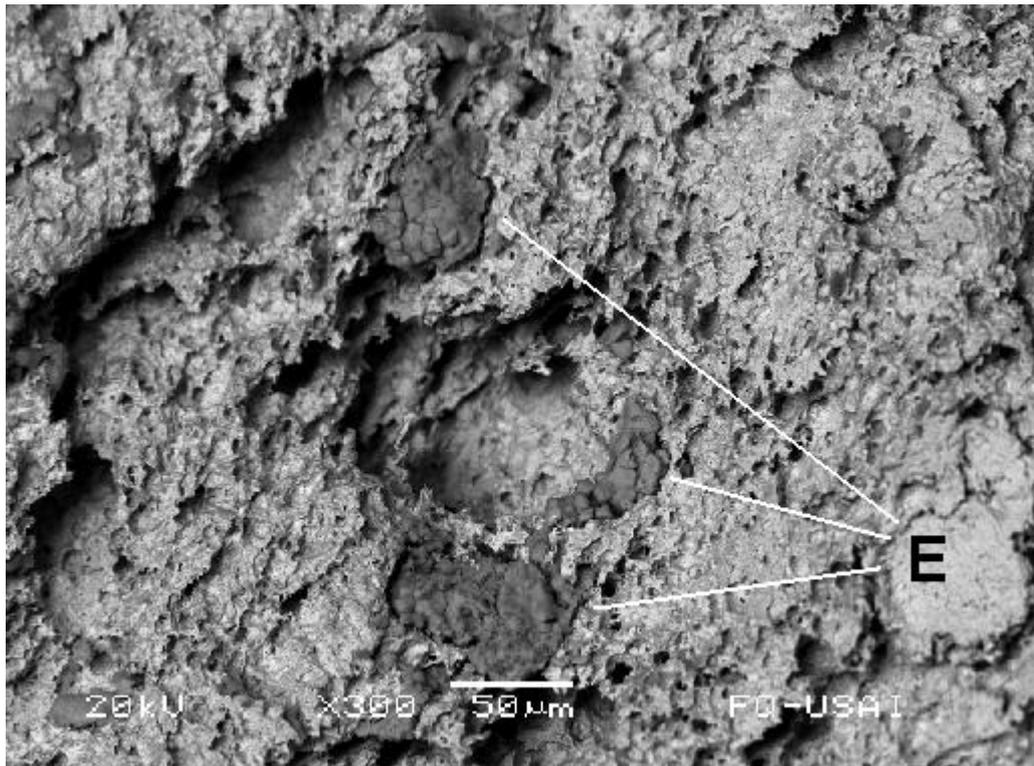


Fig. 4.7. Imágenes del SEM que muestran los patrones de propagación de la grieta. a) 75x. b) 170x. c) 200x y d) 220x.

En la superficie de la falla, se analizaron las grietas encontradas. Las imágenes se presentan en la figura 4.7. Aquí se observan los patrones de propagación de la grieta, además de óxidos en la superficie de la fractura, a pesar de que la pieza se limpió previamente a la observación en el SEM.

La figura 4.8 muestra dos imágenes en las que se observa la corrosión de la que fue objeto el material.

En la figura 4.8 a) se observa una imagen de SEM en donde se observan rastros de escoria atrapada entre la soldadura (E). Se muestra también cómo es que la corrosión se dio de manera selectiva, ya que primero se corroyeron las partes con mayor contenido de carbono. La corrosión va de manera intergranular, y se observa que la microestructura se ha corroído al punto de dejar capas con orillas afiladas.



4.8. a) Imagen de SEM que muestra inclusiones de escoria.

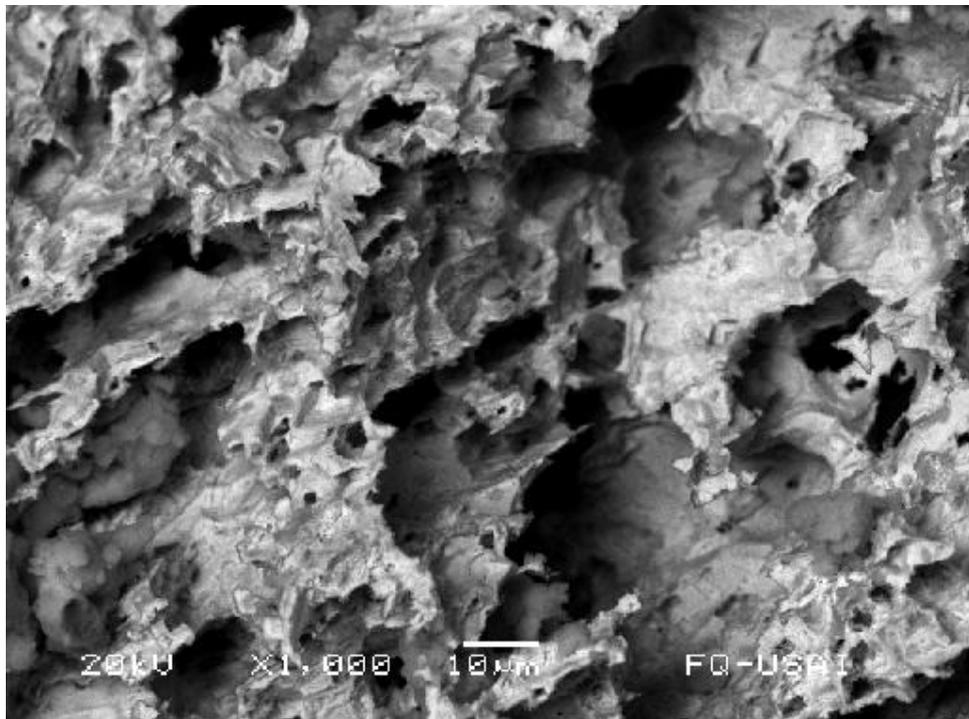


Fig. 4.8 b) Imagen de SEM que muestra corrosión selectiva.

En la figura 4.8 b) se observa mejor este fenómeno. Se encuentran capas de material entre las cuales existían otras que fueron corroídas por el medio

agresivo. Los productos de corrosión fueron retirados cuando se limpió la pieza, lo que permite ver la situación del material al momento de la falla: el material se había vuelto “poroso”, es decir, ya las pérdidas de material habían afectado su estructura, y por tanto sus propiedades mecánicas

## **4.2 ANÁLISIS DE LA SELECCIÓN DE LOS ACEROS UTILIZADOS.**

Los análisis químicos y las pruebas mecánicas se realizaron para evaluar la selección de los aceros que se emplearon en la construcción de la caldera. Los resultados se discuten a continuación.

Las aleaciones propuestas tienen un valor máximo en el porcentaje de carbono mucho más alto que el reportado en las aleaciones encontradas (mientras que en las aleaciones propuestas el valor máximo es 0.24%C, se encontraron valores de 0.0881% y 0.1142% de carbono para el cuerpo y la tapa, respectivamente). Las aleaciones de la caldera presentaban una peculiaridad: o el porcentaje de carbono era muy bajo para ciertas aleaciones, o el de manganeso era muy alto. Las aleaciones A 537 y A 662 cumplían con la mayoría de los elementos encontrados en los materiales de la caldera (en estas aleaciones no se menciona la presencia de titanio, sin embargo, los porcentajes encontrados en los materiales de la caldera son tan bajos que no alteran la composición), además de que cumplen con las especificaciones para recipientes a presión. Obviamente los bajos porcentajes de carbono influyeron en las propiedades mecánicas, y esto se hizo evidente cuando no se alcanzaron los valores de resistencia a la tensión.

Los materiales del cuerpo y tapa difieren muy poco en el porcentaje de los elementos aleantes principales. Sin embargo, esta diferencia les confiere propiedades mecánicas diferentes, como ya se ha visto.

En las dos aleaciones se puede apreciar la presencia del titanio (aunque en el material de la tapa puede considerarse traza, debido a su porcentaje tan bajo). Generalmente en las aleaciones para recipientes a presión, como las

estudiadas, se encuentran presentes el niobio, el vanadio y/o el titanio, como microaleantes. En este caso, sólo se encontró titanio, que ayuda a refinar el tamaño de grano, o a endurecer el material por precipitación. En las microestructuras de las aleaciones de la caldera se pueden observar las líneas de flujo debidas a la laminación. Los granos se presentan equiaxiados y no alargados, ya que el material se laminó en caliente.

En la aleación del cuerpo de la caldera, se pueden observar impurezas que siguen las líneas de flujo; estas impurezas, que son sulfuros de manganeso, se presentan como “hojuelas”, aunque con puntas redondeadas. Aunque su presencia es visible en la microestructura, no son un factor que afecte de manera sustancial el comportamiento mecánico de la aleación.

Se observó cierta porosidad en el material, que pudo haberse causado durante el proceso de laminado; estos poros, al igual que las impurezas, son concentradores de esfuerzos, y muy probablemente si se observaran con instrumentos más potentes, como un microscopio electrónico de barrido, podrían encontrarse microgrietas. Sin embargo, con el microscopio óptico, no se observaron grietas que pusieran en riesgo el comportamiento de la aleación.

Con respecto al material de la tapa, desde un aumento de 100x podían observarse impurezas, principalmente partículas de sulfuro de manganeso alargadas, debido también al proceso de laminado, y siempre junto a los granos de perlita. Se observaron poros en todo el material, así como nitruros de titanio, que se identificaron como pequeñas partículas brillantes de color dorado y bordes angulados. Estas partículas son demasiado pequeñas y no se consideraron altos concentradores de esfuerzos, ya que en ningún momento se observaron grietas o microgrietas en estas zonas. El material, aún cuando contaba con esas impurezas, se encontró sano, libre de microgrietas que indicaran un esfuerzo superior al esfuerzo para el que fue diseñado. El titanio sirve como refinador de grano, al precipitar de manera nanométrica como TiN y/o TiC, y también para evitar al nitrógeno como elemento intersticial para mejorar la deformación plástica. También se observaron poros, pero en éstos tampoco se observaron grietas.

En la figura 4.9 se observan las curvas esfuerzo-deformación del cuerpo y la tapa de la caldera. Puede apreciarse un fenómeno conocido como *Efecto Piobert*. Existe una etapa de transición de la deformación elástica a plástica, principalmente en los aceros bajo carbón [9].

El porcentaje de deformación de ambos aceros es prácticamente el mismo, pero las propiedades tensiles (resistencia a la tensión, a la fluencia, etc.) y la dureza del material de la tapa es mayor que la del cuerpo. Con estos datos es posible explicar la selección de espesores de cuerpo y tapa. El material de la tapa, al tener mejores propiedades mecánicas, puede tener un grosor menor, ya que la presión que resiste por unidad de área es mayor.

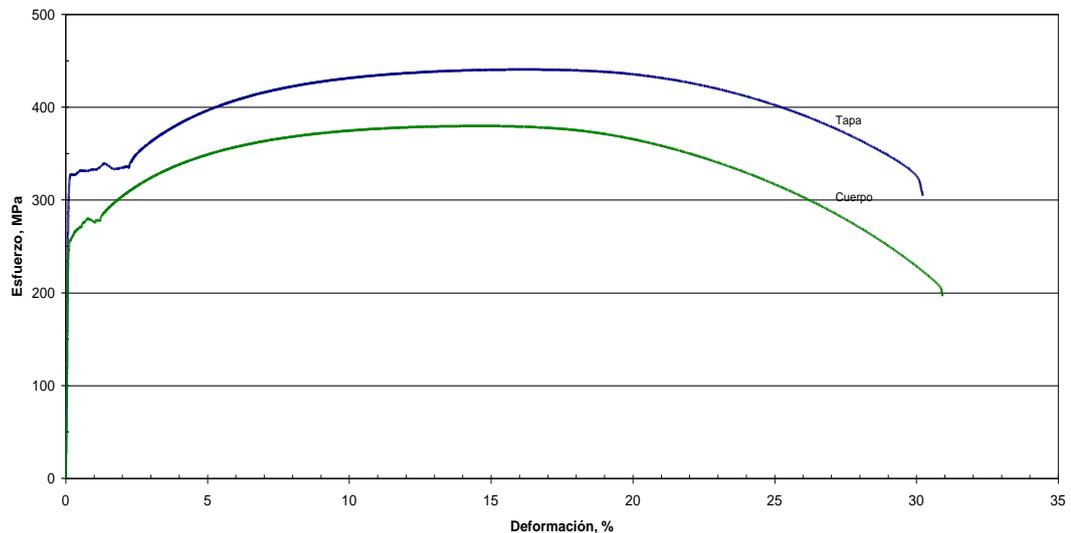


Fig. 4.9. Curvas esfuerzo-deformación de la tapa y cuerpo de la caldera.

Una vez que se realizó el ensayo de tensión, se observaron las probetas. En los dos materiales (Fig. 4.10), y durante el punto superior de fluencia, aparecen bandas de metal deformado, donde se encuentra la concentración de esfuerzos, aproximadamente a  $45^\circ$  del eje de tracción. La curva esfuerzo-deformación registra la aparición de estas bandas, y es por eso que se tiene una zona irregular en la transición de deformación elástica-plástica. La curva esfuerzo-deformación del material de la tapa presenta una zona menor de irregularidad, y esto puede verse en las fotografías a) y b). Las bandas se presentan, pero no son tan marcadas como en las fotografías c) y

d), que son las correspondientes a la probeta de la tapa. En ambas probetas se observa que la fractura fue dúctil, y se observa también la reducción de área.

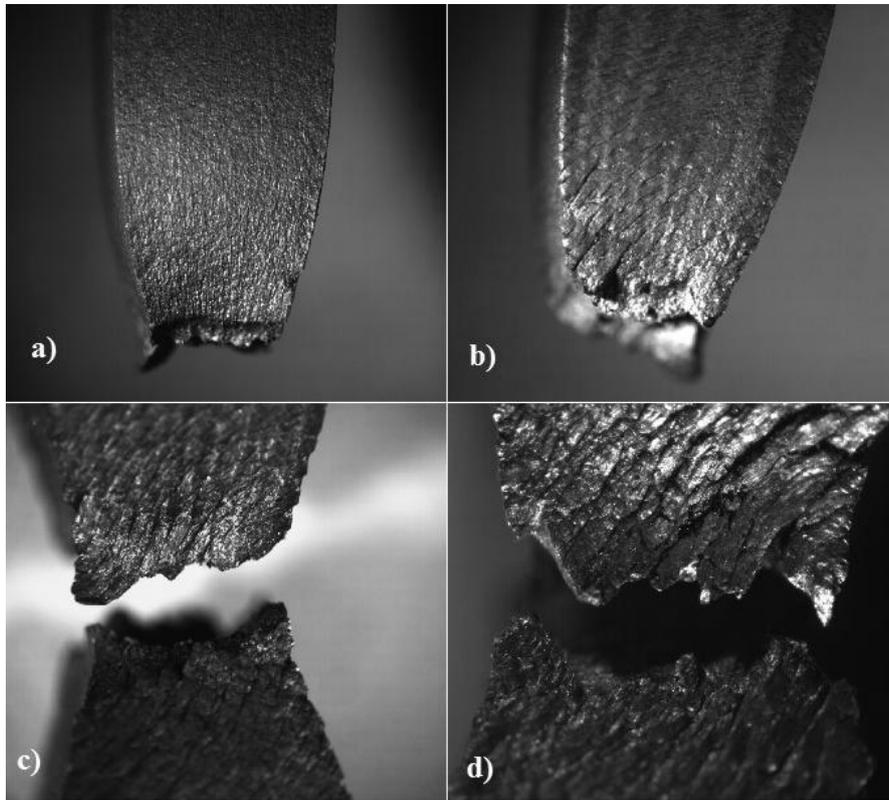


Fig. 4.10. Probetas de tensión del cuerpo de la caldera. a) y b) corresponden al material del cuerpo, mientras que c) y d) pertenecen al material de la tapa.

## CONCLUSIONES.

Las principales causas que llevaron a la falla en la caldera estudiada fueron:

- La gran cantidad de defectos en la soldadura. Se encontró falta de fusión, atrapamiento de escoria, porosidad, e incluso la ausencia del cordón de soldadura en algunos tramos de la parte interna de la caldera.
- La mala soldadura provocó cambios en las propiedades mecánicas de la caldera, lo que afectó su vida útil. Debido a esto el material presentó signos de fatiga.

Los principales mecanismos que estuvieron involucrados en la falla fueron:

- La ausencia del cordón de soldadura en algunas secciones internas de la caldera, provocó que el medio agresivo entrara hacia la cavidad que se formó entre los cordones de soldadura que unían al cuerpo con la tapa. Esto provocó corrosión por crevice, que poco a poco disminuyó el grosor de la pared de la caldera, provocando el desgarre final.
- Ya que se estableció el medio agresivo en la cavidad, los ciclos de presión a los que la caldera estaba expuesta provocaron una situación de corrosión-fatiga.
- Las fallas de la soldadura como el atrapamiento de escoria, aunadas a la presencia del medio agresivo, originaron corrosión intergranular que afectó el comportamiento del material.
- La soldadura presentó segregación, y la diferencia de composición química generó corrosión selectiva, que afectó su comportamiento y por tanto su tiempo de vida útil.

## Bibliografía.

1. Ahmad, Zaki. "Principles Of Corrosion Engineering And Corrosion Control" 1a. edición 2006, IChem editions, Butterworth-Heinemann, property of Elsevier, GB.
2. American Society for Metals, "Metal's Handbook", vol. 1, 6, 8, 11 y 13. Electronic Edition, 1998. United States.
3. Bajiv Asthana, Ashor kumar and Narendra Dahotre," Materials Science in Manufacturing", Academic Press, 2006. Elsevier, UK.
4. Bily, Matej, edición. "Cyclic Deformation and Fatigue of Metals". Elsevier.
5. O'Brian, Robert. "Welding Encyclopedia", 18<sup>th</sup> edition. 1997, American Welding Society. United States.
6. Brubaker and Phipps. "Corrosion Chemistry", 1979 ACS Symposium Series. American Chemical Society, United States.
7. Chawla, Gupta, "Materials Selection For Corrosion Control". ASM International, 1997.
8. Colangelo, Heiser, "Analysis Of Metallurgical Failures", John Wiley & Sons, 1974, A Wiley- Interscience publication.
9. Dieter, George E., "Mechanical Metallurgy" McGraw-Hill, 1986.
10. Evans. "Corrosiones Metálicas". Edición española, Dr. Jose Company, Editorial Reverté, 1987.
11. Fontana, "Corrosion Engineering", McGraw-Hill series in materials science and engineering, McGraw-Hill, 1978.
12. French, D. "Metallurgical Failures In Fossil Fired Boilers", 1983, John Wiley & Sons.
13. Hibbeler, "Mechanics Of Materials", Prentice Hall International Editions, 1997.
14. Honeycombs & Bhadeshia, "Steels: Microstructure and Properties", 1981. 2nd edition 1995. Butterworth Heinemann.

15. Keyser, "Ciencia De Materiales Para Ingeniería", 3a reimpresión 1982, México. Editorial Limusa.
16. Lancaster, "Metallurgy Of Welding", 1965. 5th edition, 1993. Chapman & Hall.
17. Messler. "Principles Of Welding", 1999. Wiley-VCH. Die Deutsche Bibliothek.
18. Nelly. "Metalurgia Y Materiales Industriales", Traducción de Osvaldo Sliva Luna, 1999. Editorial Limusa.
19. Port, Herro. "The Nalco Guide To Boiler Failure Analysis" McGraw-Hill 1991.
20. Schweitzer, Philip, editor. "Corrosion and Corrosion Protector Handbook", Second edition 1989. Marcel Dekker, Inc. United States.
21. Shield, Carl. "Calderas, Tipos, Características Y Sus Funciones". Compañía editorial continental, edición autorizada por McGraw-Hill Book Company, Inc. Primera edición en español, 1965.
22. Suresh, S. "Fatigue of materials", Cambridge solid state science series, 1991. Cambridge University Press, 1992. Great Britain.
23. Van Droffelaar, Atkinson, "Corrosion and its control" 2nd edition, an introduction to the subject. NACE International.
24. Woodruff, L. "Steam Plant Operation", 5th edition, 1985. McGraw-Hill.
25. Zamanzadeh, Larkin, Bayer, Linhart. "Failure Analysis & Investigation Methods for Boiler Tubes", Publicación técnica.