

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUIMICA E
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN METALURGIA Y
MATERIALES

“ANÁLISIS DE FALLA DEL PANEL DE ENFRIAMIENTO SECCIÓN C UTILIZADO EN
LA BOVEDA DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO
EN METALURGIA Y MATERIALES

PRESENTA:

Gustavo Flores Pérez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Diego Israel Rivas López



MÉXICO D.F

Diciembre 2015

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN..... | I |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | II |
| ÍNDICE DE TABLAS. | IV |
| INTRODUCCIÓN..... | V |
| <i>I Fundamentos teóricos</i> | 1 |
| 1.1 ¿Que es una falla? | 1 |
| 1.2. Proceso del análisis de falla..... | 1 |
| 1.3 Prevención de una falla | 2 |
| 1.4 Causas de una falla..... | 2 |
| 1.5. Cada falla es única | 3 |
| 1.6. Causas por las que ocurre una falla | 4 |
| 1.7 Servicio de operación..... | 4 |
| 1.2 Técnicas generales para un análisis de falla..... | 5 |
| 1.2.1 Efecto de falla y análisis de la falla | 5 |
| 1.2.2 Análisis de falla de árbol..... | 6 |
| 1.2.3 Análisis de causa-efecto..... | 7 |
| 1.2.4 Análisis de secuencia de evento..... | 7 |
| 1.3 Metodología de análisis. | 8 |
| 1.3.1 Formato del análisis de falla | 8 |
| 1.4 Daño o falla del equipo | 9 |
| 1.4.1. Forma de operación | 9 |
| 1.4.2. Recopilación de datos. | 10 |
| 1.4.3. Entrevistas | 10 |
| 1.5 Información que se debe de conocer | 10 |
| 1.5.1. Revisión del diseño | 11 |
| 1.6 Mecanismo de difusión | 11 |
| 1.6.1. Difusión | 11 |
| 1.7 Tipos de difusión..... | 12 |
| 1.7.1 Auto difusión..... | 12 |
| 1.7.2 Difusión por vacaciones..... | 12 |

| | |
|---|-----------|
| 1.7.3 Difusión intersticial..... | 13 |
| 1.7.4 Temperatura de difusión..... | 13 |
| 1.8 Recuperación y recristalización..... | 15 |
| 1.8.1 Recuperación..... | 15 |
| 1.8.2 Recristalización..... | 15 |
| 1.9 Microestructura y propiedades del acero..... | 16 |
| 1.9.1. Esferoidización del acero..... | 16 |
| 1.10 Mecanismos de fractura..... | 17 |
| 1.10.1 Oxidación a altas temperaturas..... | 17 |
| 1.10.2 Corrosión-fatiga..... | 18 |
| 1.10.2.1 Descripción general del mecanismo..... | 18 |
| 1.10.2.2 Factores críticos..... | 20 |
| 1.10.3 Identificación..... | 21 |
| 1.10.4 Eliminación..... | 21 |
| 1.10.5 Precauciones..... | 21 |
| 1.10.6 Efecto de la temperatura..... | 22 |
| 1.11 Termofluencia..... | 22 |
| 1.11.1 Aspectos macroscópicos por termofluencia..... | 23 |
| 1.12 Fatiga térmica..... | 24 |
| 1.12.1 Daño superficial..... | 26 |
| 1.12.3 Aspectos microscópicos de la fractura de fatiga térmica..... | 27 |
| 1.13 Mecanismos de deformación..... | 28 |
| 1.14 Criterio fuga antes de falla en sistemas de tuberías..... | 29 |
| 1.15 Aceros frente a la corrosión a alta temperatura..... | 31 |
| II Antecedentes del componente..... | 32 |
| 2.1 Características hornos de arco eléctrico..... | 33 |
| 2.2 Descripción de la pieza..... | 34 |
| 2.3 Historial del daño..... | 34 |
| 2.4 Descripción de las condiciones de la pieza..... | 35 |
| III. Desarrollo experimental..... | 36 |
| 3.1 Procedimiento experimental..... | 36 |
| | 36 |

| | |
|--|-----------|
| | 36 |
| 3.2 Examen visual | 37 |
| 3.2.1. Limpieza y extracción de la pieza..... | 37 |
| 3.2.2 Corte de la pieza..... | 38 |
| 3.2.3 Limpieza de la superficie de fractura..... | 38 |
| 3.2.4 Preservación de las superficies de fractura | 39 |
| 3.3 Caracterización del material..... | 40 |
| 3.3.1 Caracterización microestructural..... | 40 |
| 3.3.2 Análisis químico | 41 |
| 3.4 Caracterización mecánica | 41 |
| 3.4.1. Ensayo de tensión uniaxial | 41 |
| 3.4.2 Prueba de dureza | 42 |
| 3.4.3 Prueba de micro dureza Vickers | 42 |
| IV Resultados | 43 |
| 4.1 Caracterización del material..... | 43 |
| 4.1.1 Análisis químico | 43 |
| 4.1.2 Caracterización microestructural..... | 44 |
| 4.1.3. Caracterización Mecánica..... | 46 |
| 4.1.3.1 Ensayo de tensión uniaxial. | 46 |
| 4.1.3.2. Prueba de dureza Rockwell B y Microdureza Vickers. | 46 |
| V. Análisis de resultados..... | 47 |
| 5.1. Análisis microestructural..... | 47 |
| 5.1.1. Influencia de las inclusiones no metálicas..... | 47 |
| 5.1.2 Microestructura de zona afectada por calor | 47 |
| 5.2 Caracterización mecánica | 50 |
| 5.2.2 Prueba de dureza | 50 |
| 5.3 Análisis fractográfico de las superficies de fractura | 51 |
| 5.3.1 Examen macroscópico | 51 |
| 5.3.2 Examen microscópico..... | 51 |
| VI. Conclusiones..... | 53 |
| Referencias bibliográficas | 54 |
| Anexos..... | 56 |

RESUMEN

La presente trabajo se realizó el análisis y evaluación de falla de una sección tubular que forma parte del panel de enfriamiento de un horno de arco eléctrico (EAF), el cual fue extraído de servicio debido a las constantes fugas ocasionadas por el agrietamiento generado durante su operación.

Los resultados obtenidos mediante los análisis metalográfico, fractográfico y pruebas mecánicas realizadas a la sección tubular dañada, fueron realizados con el fin de determinar los principales factores involucrados y de esta forma determinar la principal causa de falla. La caracterización microestructural y fractográfica se realizó mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

El análisis fractográfico describe las características principales de las grietas presentes en la sección tubular dañada, describiendo que las grietas se presentan en la dirección transversal de la sección tubular, así como las características presentes en la superficie de fractura, dentro de las cuales se puede mencionar: la presencia de marcas de playa inducidas por el agrietamiento por fatiga, fractura transgranular, microhuecos y microgrietas características del mecanismo de fatiga térmica generada por los constantes eventos de calentamiento y enfriamiento durante la operación del componente.

Por otra parte, el análisis metalográfico y pruebas mecánicas realizadas, muestran el grado de afectación microestructural en la zona afectada del componente, presentando una degradación en la microestructura causada por la disolución y coalescencia de las laminillas de cementita presentes en la fase perlítica del material, seguido de la precipitación de dichas laminillas en los límites de grano, dando como resultado un menor porcentaje de la fase perlítica en la matriz y generando la pérdida de dureza en la zona dañada.

En base a los resultados obtenidos mediante el análisis y evaluación del material utilizado en la fabricación del panel de enfriamiento del EAF, se determina que a pesar de cumplir con las propiedades y características de acuerdo a su norma de fabricación (ASTM -A106) el material no es apto para su uso en las condiciones de trabajo del EAF (alta temperatura y presencia de atmosferas potencialmente reductoras). Por lo que se propone hacer uso de un acero fabricado de acuerdo a la norma ASTM -A213 debido que posee un mayor contenido de níquel, molibdeno y cromo mejorando propiedades en el material como son: ductilidad, tenacidad, resistencia a la fatiga, además de crear una capa pasivante en la superficie retardando el fenómeno de corrosión cuando el material es sometido a las condiciones mencionadas.

ÍNDICE DE FIGURAS.

| | |
|---|----|
| Fig 1. Factores empleados en la determinación de la causa raíz..... | 3 |
| Fig 2. Procedimiento de pasos en un análisis de falla..... | 5 |
| Fig 3. Pasos para la elaboración de un análisis de árbol | 6 |
| Fig 4. Diagrama de pescado..... | 7 |
| Fig 5. Mecanismo de auto difusión en una red, a) movimiento intersticial, b) sustitución de un átomo por otro de la misma red, c) movimiento de anillo. | 12 |
| Fig 6 . Movimiento de un átomo a un lugar libre (vacancia) | 13 |
| Fig 7. Movimiento de un átomo en los intersticios de una red..... | 13 |
| Fig 8. Variación de la energía de activación en la difusión..... | 14 |
| Fig 9. A) Formación de muescas en el óxido, B) propagación de grieta a través de la pared. | 19 |
| Fig 10. Presencia de grietas causadas por fluctuación interna..... | 19 |
| Fig 11. Crecimiento de grietas transversales por ciclos térmicos | 20 |
| Fig 12. Corrosión por picaduras a) picaduras superficiales, b) picaduras profundas..... | 20 |
| Fig 13 Superficie de fractura por termofluencia..... | 23 |
| Fig 14. Esquema de una carga en fase y fuera de fase. a) Sincronización de esfuerzo con temperatura mayor b) desincronización de esfuerzos con temperatura. | 25 |
| Fig 15. Patrón típico con aspecto de mosaico formado por grietas por fatiga térmica en un acero bajo carbono. | 26 |
| Fig 16. Morfología de grietas conocida como piel de cocodrilo con presencia de sulfuros, HCl y FeCl ₂ detectados por análisis microscópico. | 27 |
| Fig 17. A) Presencia de estrías en una fractura, B) Presencia de micro huecos en una fractura revelada mediante microscopia óptica. . Acero bajo carbono sometido a ciclos térmicos..... | 27 |
| Fig 18. Presencia de concentradores de esfuerzo. a) Concentradores en las intersecciones en los límites grano, b) concentradores a lo largo de los límites de grano.28 | |
| Fig 19. Nucleación y crecimiento de huecos en límite de grano..... | 28 |
| Fig 20. Detalles de la superficie de fractura acero bajo carbono. a) Superficie de fractura con superficie fibrosa 100X, b) superficie de fractura con agrietamiento tipo mosaico 1000X..... | 29 |
| Fig 21. Esquema general del EAF. a) Vista superior de la bóveda fuera de servicio, b) ubicación de la bóveda en el EAF..... | 32 |
| Fig 22. Plano de paneles de la bóveda. a) Sección de panel número 1, b) sección del panel número 2, c) sección de estudio del análisis de falla, localización de la campana de extracción de humos..... | 34 |
| Fig 23. Bóveda de enfriamiento. a) Aspecto general de los paneles de la bóveda, b) Aspecto de la pieza recibida | 35 |
| Fig 24. Diagrama de bloques de la metodología experimental..... | 36 |
| Fig 25. Sección de estudio. a) Vista macroscópica de la sección de panel, b) Mediciones exactas de la sección de estudio. | 37 |
| Fig 26. Corte de la sección del tubo a media caña..... | 38 |
| Fig 27. Sección del área dañada después de limpieza | 39 |

| | |
|--|----|
| Fig 28. Muestra donde se observa la superficie de fractura para su análisis en microscopia electrónica. | 39 |
| Fig 29. Probeta para análisis metalográfico. a) Equipo utilizado para pulido de probeta, b) Aspecto macroscópico de la probeta para MO..... | 40 |
| Fig 30. Análisis químico. a) equipo utilizado para realización de AQ. b) quemas realizadas en la superficie de la muestra. | 41 |
| Fig 31. Durómetro Rockwell utilizado para la prueba de dureza HRB. | 42 |
| Fig 32. Tipo y forma de las inclusiones no metálicas: a) dirección Transversal y b) dirección longitudinal. MO sin ataque químico 100X..... | 44 |
| Fig 33. Microestructura del acero obtenida por MO atacado químicamente Nital 3% 500X: a) dirección longitudinal, b) dirección transversal..... | 45 |
| Fig 34. Microestructura en la zona no afectada por calor. a) Vista macroscópica de una sección del tubo, b) inclusiones no metálicas MO sin ataque 100X y c) microestructura bandeada con ataque químico 100X..... | 47 |
| Fig 35. Microestructura en metal afectado por calor. a) Vista macroscópica de una sección del tubo, b) inclusiones no metálicas MO sin ataque 100X y c) microestructura bandeada con ataque químico 100X. | 48 |
| Fig 36. Esferoidización en zona afectada por calor.) Vista macroscópica de una sección del tubo, b) microestructura bandeada con ataque químico 100X y c) microestructura donde se observa la disolución de la fase perlítica con ataque químico 3000X..... | 49 |
| Fig 37. Análisis fractográfico de la zona afectada por calor: a) Presencia de microhuecos en el material y b) presencia de microgrietas. MEB 1000X..... | 52 |

ÍNDICE DE TABLAS.

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Energía de activación en distintos metales..... | 14 |
| Tabla 2. Principales características EAF “TENOVA” | 33 |
| Tabla 3. Composición química del material analizado. | 43 |
| Tabla 4. Características de las inclusiones presentes en el acero..... | 44 |
| Tabla 5. Análisis microestructural | 45 |
| Tabla 6. Propiedades mecánicas de material sano | 46 |
| Tabla 7. Valores de HRB en zona sin daño y zona afectada por calor | 46 |
| Tabla 8. Valores de microdureza Vickers en zona sin daño y zona afectada por calor..... | 46 |
| Tabla 9. Resultados análisis microestructural | 50 |

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el horno de arco eléctrico o EAF (Electric Arc Furnance) es la forma más común de generar acero a partir de chatarra. La fusión de la chatarra en el EAF se lleva a cabo con la ayuda de electrodos de grafito y corriente eléctrica. El horno de arco eléctrico nos permite utilizar material reciclado en lugar de elementos de acero nuevo y aleaciones valiosas, lo que es benéfico tanto desde un punto de vista económico como ambiental.

Los paneles de enfriamiento ubicados en la coraza y boveda del EAF actúan como pared y tapa durante el proceso de fusión con la finalidad de mantener aislado térmicamente la masa fundida que se procesa en el horno ya que este aislamiento ayuda a incrementar la eficiencia térmica del equipo evitando que el calor escape, además de brindar protección a los operadores contra la radiación térmica y eléctrica. Las temperaturas generadas dentro del equipo pueden llegar a ser superiores a los 1600° C.

Los paneles de enfriamiento utilizados poseen entradas por las cuales ingresa comúnmente agua a presión o líquidos refrigerantes. Cabe mencionar que estos paneles trabajan bajo atmósferas ricas en CO y CO₂ las cuales son conocidas como atmósferas reductoras, además de encontrarse en constante radiación térmica y eléctrica generada por los electrodos llegando a alcanzar temperaturas de 900° C

Los EAF constan de distintos elementos los cuales deben de funcionar de una forma sincronizada para asegurar el mayor desempeño del equipo; así como de mantener bajos los costos de producción.

A nivel industrial el horno de arco eléctrico presenta muchos problemas derivados de la presencia de grietas en los paneles de enfriamiento.

La presencia de grietas en los paneles de enfriamiento en el horno genera distintos problemas, tales como la disminución de la calidad del acero, paros de planta e inclusive situaciones críticas que afectan trabajadores y equipos.

La problemática anterior ha ocasionado el empleo de distintos materiales para solucionar dicho problema. Sin embargo, hoy en día la falla se sigue presentando en estos componentes.

Debido a lo mencionado anteriormente el presente trabajo tiene como objetivo identificar los factores que contribuyen a la generación de grietas las cuales están localizadas en los paneles de enfriamiento del EAF provocando fugas de líquido refrigerante y por lo tanto la baja en la eficiencia de la operación.

I Fundamentos teóricos

A fin de establecer las bases teóricas para la evaluación de la falla presentada en los tubos del sistema de enfriamiento del EAF, se realiza un énfasis en las principales teorías de falla y mecanismos de degradación que pudieron verse involucrados.

1.1 ¿Que es una falla?

Una falla se define como un evento no previsible que impide que se cumpla una función bajo ciertas condiciones establecidas. Los sistemas comienzan a fallar bien sea por la falta de mantenimiento o por hechos fortuitos, generados por uso excesivo u causas externas, por lo que en términos muy generales una falla se puede dividir en dos categorías. La primera categoría abarca el concepto más común de falla: un componente maquina o proceso falla y todo se detiene. La falla de un componente como un cigüeñal, o un soporte es bastante obvia debido a que la avería de uno de estos componentes puede ser generada por causas humanas o físicas, sin embargo dicha falla se puede dificultar de acuerdo a la complejidad del componente.[1]

En la segunda categoría la falla de un componente se genera debido a la falta de los criterios de desempeño tales como: tiempo de vida útil, límites operación y requisitos de la especificación normativa. Estos criterios de vida por lo general no están escritos pero deben de estar registrados para la correcta operación del componente, dentro de los cuales se deben de conocer propiedades mecánicas, espesor de recubrimiento (en caso de estar presente), peso y las propiedades ópticas. Las definiciones o límites específicos por lo general son creados por el cliente, con las pruebas necesarias para garantizar el cumplimiento. [1]

También se puede definir una falla desde puntos de vista y opiniones personales de acuerdo a criterios muy bien definidos basados en propiedades específicas del componente o proceso, las cuales a partir de estas se puede llegar a determinar el origen de la falla [2]

1.2. Proceso del análisis de falla

El análisis de falla es el proceso para determinar las causas y factores que dan lugar a una indeseable pérdida de funcionalidad, muchos de los análisis de falla principalmente están encaminados a la falla de componentes, piezas y estructuras, basándose en los conocimientos del entrenamiento del personal en la ingeniería de materiales. [3]

En las últimas décadas los ingenieros en materiales han ayudado en gran medida en el avance científico del análisis de falla por lo que muchas personas definen el análisis de falla de una forma binaria basándose en realizar dos preguntas: ¿era la pieza defectuosa?, ¿se abusó de la pieza?, obviamente existen muchos tipos de defectos incluyendo los debidos a la deficiencia del diseño, deficiencia del material, y defectos de manufactura. Si existen tales defectos en un determinado componente que presenta constantes fallas, estas pueden ser determinadas por personal con conocimiento en el área de materiales ya que algunos de los defectos presentes pueden ser identificados a simple vista. [3]

Muchos practicantes del análisis de falla que comienzan por tener proyectos definidos, al encontrar pequeños componentes que deben de evaluar deben de ser capaces de seguir los procedimientos establecidos para dicha evaluación. [1] Sin embargo, para un profesional que trabaja en un laboratorio independiente que debe de mirar una amplia variedad de componentes, muchas veces un conjunto de instrucciones puede resultar inadecuado ya que esta serie de instrucciones se llegan a formar en base a experiencia y metodología propia.

Las razones de falla detrás de un componente pueden ser variables ya que estas fallas deben de ser vistas como un evento único, debido a que muchos de los daños generados pueden ser provocados por calor, corrosión o alguna explosión, sin embargo estos eventos poseen distintas variables y características que los hacen únicos. [4]

1.3 Prevención de una falla

El análisis de falla de un objeto físico es por lo general parte de una investigación destinada para prevenir la recurrencia a una falla. [3]

Es evidente que muchas personas involucradas con el análisis de falla utilizan incorrectamente el término “causa raíz” cuando a lo que realmente se refiere es a la causa física simple. Si la realización de un análisis de falla se lleva a cabo adecuadamente, entonces el analista en última instancia debe ser capaz de enumerar las causas que se encuentran en el análisis y demostrar con todas las evidencias posible que el fallo habría sucedido de la manera en que lo asevera además de demostrar las demás posibles causas en caso de ser algo diferente. [4]

1.4 Causas de una falla

Los expertos en el análisis siempre se cuestionan la típica pregunta ¿Qué causo esta falla?, si la falla se presenta en un componente metálico mediante una evaluación metalúrgica se pueden evaluar si la causa de una falla fue generada por mecanismos de fatiga, corrosión o algún factor crítico, aunque muchas veces

estos mecanismos no son la causa que provocaron la falla, por tal motivo a continuación se agrupan los factores que se deben de tomar en cuenta para la determinación de una falla. [3]

- Causa Raíz: La verdadera causa de la falla.
- Factores físicos: Los mecanismos de falla que pudieron estar involucrados (fatiga, corrosión, sobrecarga, etc.).
- Factores humanos: El factor humano puede llegar a permitir una causa física.
- Latente: Las formas de organización que pudieran ser causadas por un factor humano.

Estos factores son considerados como niveles, los cuales deben de utilizarse para evitar realizar aseveraciones erróneas, ya que muchas veces se puede tener una perspectiva incorrecta acerca de la falla, dichos factores se muestran en la Figura 1. [3]

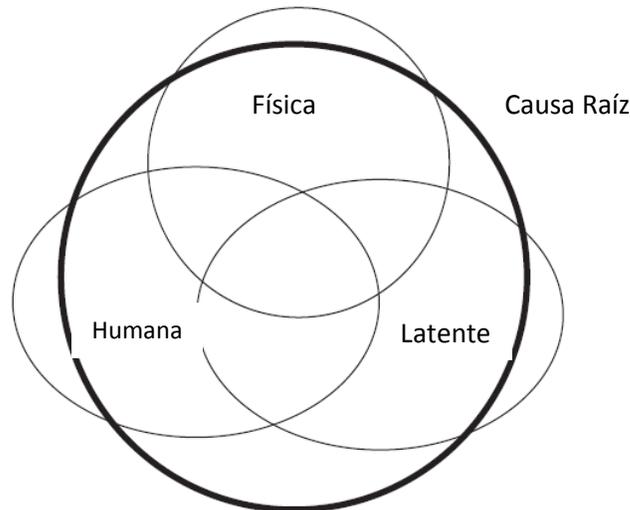


Figura 1. Factores empleados en la determinación de la causa raíz.

1.5. Cada falla es única

Este es un factor que es muy difícil de recordar especialmente cuando una falla luce muy parecida a otra con la que se había trabajado anteriormente, ya que en muchos casos se puede atribuir la misma causa que ocasiono la falla por lo que se darán las mismas recomendaciones llegando a generar problemas ya que no se conoce las características del material, ambientes de trabajo y otros factores que pudieran estar involucrados en este caso. [4]

1.6. Causas por las que ocurre una falla

Esta pregunta se la han hecho muchas veces los practicantes de los análisis de falla. Durante los últimos 50 años las razones de falla así como su orden de prioridad han cambiado. La edición de 1948 del manual de ASM enumero las tres categorías por la cual puede ocurrir una falla: [1]

1. Factores de diseño.
2. Procesamiento.
3. Entorno de servicio.

En los años de 1961 y 1975 la Republic Steel Corporation especialistas en el análisis de falla, designaron 6 categorías por las cuales podría ocurrir una falla:

1. Diseño.
2. Selección del acero.
3. Tratamiento térmico.
4. Calidad del material.
5. Método de fabricación.
6. Ensamblado.

Obviamente la Republic Steel estaba orientada hacia los análisis de falla de productos de acero, por lo tanto, es interesante observar la primera lista la cual contempla el entorno de operación de los componentes: [3]

1. Servicio u operación (uso y abuso).
2. Un mantenimiento inadecuado (intencional y no intencional).
3. Pruebas incorrectas.
4. Errores de ensamble.
5. Errores de fabricación.
6. Errores de diseño (diseño, esfuerzos, selección de materiales, etc.).

1.7 Servicio de operación

Hoy en día el servicio o la operación es el primer factor sospechoso cuando se produce una falla. La mayoría de los componentes, maquinas e incluso los procesos tienen cierta esperanza de vida. En condiciones de operación normales la mayoría de los componentes deberán de tener un plazo de vida aceptable.

Una falla se produce cuando un elemento se desgasta antes de lo que el usuario espera. En este punto sin embargo es importante distinguir entre el uso normal y el uso indebido. [5]

El segundo factor es un mantenimiento inadecuado ya que todos los componentes o artículos deberían de tener un mantenimiento adecuado debido a que el resultado de un mantenimiento inadecuado es la reducción de vida o la ruptura total de un componente. En algunas ocasiones este factor puede ser de manera intencional y no intencional. La manera intencional es cuando a un componente no se le realizan las revisiones rutinarias si no que en ocasiones estas revisiones se extiende con el fin de exprimir un poco más de semanas de uso. La manera no intencional se presenta cuando se desconoce el componente ya que no se tiene el conocimiento de cómo realizar el mantenimiento. [5]

1.2 Técnicas generales para un análisis de falla

Un gran número de técnicas son utilizadas para la resolución de un análisis, aunque a veces es muy común utilizar metodologías asociadas a ciertas técnicas las cuales poseen ciertas diferencias. Dentro de estas técnicas las más comunes se mencionan a continuación [4]

1. Análisis de falla de árbol.
2. Análisis de causa-efecto.
3. Análisis secuencial de eventos.

1.2.1 Efecto de falla y análisis de la falla

El análisis de falla y los efectos son un procedimiento de diseño-evaluación utilizado para identificar los modos de fallo potenciales y así poder determinar el efecto de cada uno en el rendimiento del sistema. El procedimiento de un análisis es una secuencia de pasos lógicos, comenzando por el análisis del sistema del componente como se muestra en la Figura 2 [1,4]

El análisis de falla asume que el objetivo de su realización es la visualización e identificación de posibles mecanismos de falla. Cada modo de falla y el efecto de su resultado son asignados a un criterio basado en la probabilidad de ocurrencia. Para poder tener un análisis más fiable es necesario documentar todos los datos en los cuales se fundamentó cada paso del análisis. [1,4]

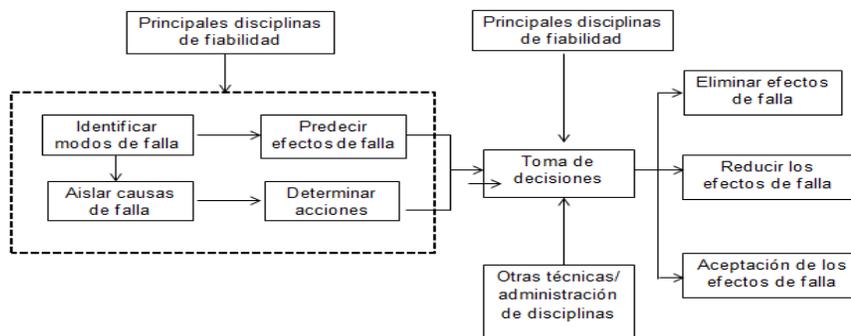


Figura 2. Procedimiento de pasos en un análisis de falla

1.2.2 Análisis de falla de árbol

Este es un método de análisis de fiabilidad y seguridad de un sistema o componente. Proporciona una base objetiva para analizar el diseño del sistema, justificando posibles cambios anteriores del sistema, realizando estudios de compensación como el de los análisis de falla comunes y demostrando el cumplimiento de los requisitos de seguridad y medio ambiente. Este tipo de análisis de falla de árbol es diferente a los demás, ya que es un modo de análisis de los efectos que solamente se limitan a la identificación de los elementos del sistema que conducen a un evento no deseado en particular. La serie de pasos necesaria para la elaboración de este tipo de análisis de falla se muestra en la figura 3[1,4]

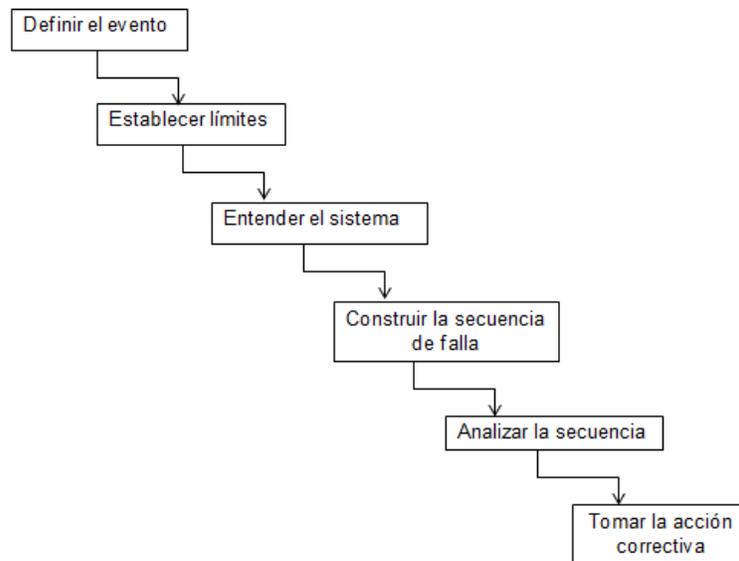


Figura 3. Pasos para la elaboración de un análisis de árbol

En muchos de los análisis de falla que se realizan la principal preocupación es la garantía del hardware o del equipo que se utiliza en cuanto al cumplimiento de sus funciones previstas. El análisis de falla de árbol es un análisis detallado ya que por lo general requiere considerable información sobre el sistema.

Este tipo de análisis proporciona opciones para realizar el análisis de confiabilidad cualitativa y cuantitativa además de ayudar a que el analista comprenda los fallos del sistema señalando los aspectos del sistema que son importantes con respecto a la falla de interés proporcionando información sobre el comportamiento del componente. Este modelo presenta las combinaciones de los posibles factores que pueden ocurrir en la falla de un componente. [4]

1.2.3 Análisis de causa-efecto

El análisis de causa y efecto es un enfoque gráfico para el análisis de falla. Este tipo de análisis también es conocido como de esqueleto de pescado, que es un nombre derivado del patrón en forma de pez utilizado para trazar la relación existente entre varios factores que contribuyen a un evento específico. Por lo general en esta estructura se trazan cuatro principales clasificaciones de las causas posibles los cuales pueden incluir factores tipo: Humano, maquina, material y método, pero pueden incluir también cualquier combinación de eventos. [4]

Como en la mayoría de los métodos de análisis de falla, este se basa en una evaluación lógica de acciones o cambios que conducen a un evento específico, como la falla de un componente. La única diferencia que existe entre los otras estructuras y esta es el uso de la estructura en forma de pez y los métodos de relación de causa efecto como se muestra en la figura 4.

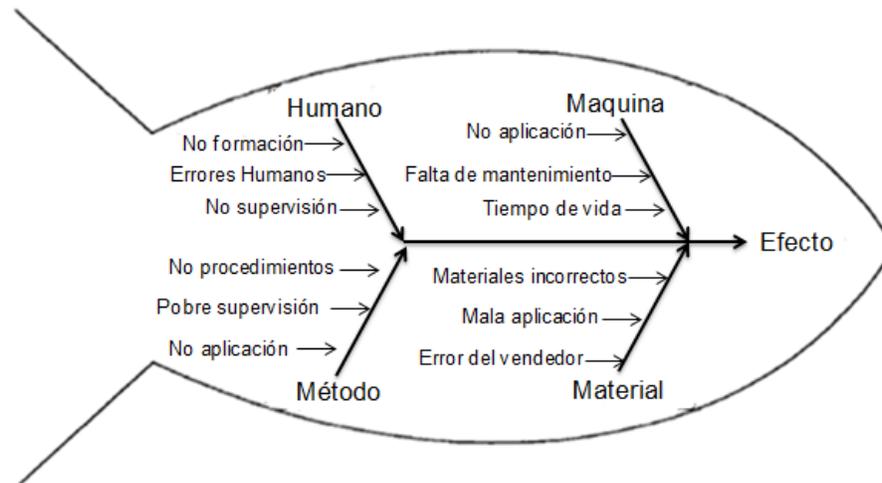


Figura 4. Diagrama de pescado

A pesar de lo mencionado anteriormente este enfoque tiene una limitante. El gráfico de pescado no ofrece una secuencia clara de los acontecimientos que conducen a la falla del componente, si no que muestra todas las posibles causas que pudieron haber contribuido a la falla. [4]

1.2.4 Análisis de secuencia de evento.

Este tipo de análisis puede ser usado para generar una secuencia de eventos desde el inicio de la investigación, ayudando a organizar de una manera ordenada la información recolectada para poder identificar la información faltante y mejorar la comprensión entre la relación que existe entre los acontecimientos y el incidente destacando posibles causas del incidente. Este tipo de diagramas pueden ser un tipo de documento dinámico ya que se puede seguir reportando y modificando

información poco después de haber sido generado, esto hasta que el análisis está completamente resuelto. Este tipo de análisis comprende ciertos aspectos que deben ser considerados para su elaboración y se describen a continuación. [1, 3,4]

- **Orden lógico:** Mostrar el evento en un orden lógico desde el principio hasta el final. Inicialmente el análisis debe de incluir todos los acontecimientos pertinentes incluyendo las que no se pueden confirmar. A medida en que avanza la investigación esta información debe de ser refinada mostrando eventos que confirmen ser relevantes para el incidente.
- **Descripción activa:** Se deben de describir las acciones realizadas por los operadores o personal antes del incidente de una manera clara y lo más precisa posible.
- **Ser preciso:** Describir de una forma concisa y adecuada cada evento reportado, si esto no es posible se debe proporcionar anotaciones generadas sobre el evento de la manera más clara posible, ya que cada hipótesis sin confirmación deben ser confirmadas a medida que la investigación avanza.
- **Definir los eventos:** Proporcionar todos los datos necesarios para definir con precisión cada evento como incluir fechas, horas, etc. Cuando los datos no confirman los eventos, las hipótesis generadas pueden ser usadas para definir factores no confirmados. Sin embargo debe de hacerse todo lo posible durante la investigación para confirmar cada evento.

1.3 Metodología de análisis.

El análisis de falla es una secuencia de pasos que conduce a los investigadores a través del proceso de descarte de los hechos que rodean una falla. Una vez que el problema ha sido totalmente definido, el análisis determina un comportamiento sistemático. [1]

El primer paso para el proceso de un análisis es la obtención de una definición clara del problema o evento, notificando acerca de que es la falla, por lo general este informe es una breve nota escrita describiendo las características observadas y percibidas por la persona que registra el problema. [1]

Definir las características reales que permitan establecer los límites de la falla. En este paso esta actividad puede llevarse a cabo mediante una entrevista con el personal. [1]

1.3.1 Formato del análisis de falla

Un factor que limita gravemente la eficacia de un análisis es la ausencia de un formato que informe un evento formalmente. El uso de un formato puede limitar la

completa descripción del problema o evento ya que en un formato muchas veces no se puede reportar toda la información requerida para un análisis.

1.4 Daño o falla del equipo

La principal justificación de la realización de un análisis de falla son eventos asociados con la falla de un equipo crítico de producción, maquinaria o sistema. Estas fallas pueden tener un grave impacto negativo en el rendimiento de una planta.

Las fallas que resultan en un daño físico a los equipos son los más fáciles de clasificar. La inspección visual del equipo por lo general proporciona una clara evidencia de su modo de fallo cabe mencionar que esta inspección no resolverá la razón de la falla. Los eventos que deben cumplir aspectos ya sea de seguridad, impacto financiero, etc. deben de ser investigados de forma obligatoria para determinar el impacto real o potencial en el rendimiento de la planta incluyendo la confiabilidad del equipo. [4]

1.4.1. Forma de operación

Las desviaciones en las formas de operación en un equipo pueden ocurrir sin la necesidad de que exista una falla. Las desviaciones crónicas pueden ser justificadas por el uso de los análisis de falla como una forma para resolver el problema.

Algunos aspectos que se deben de tomar en cuenta en las desviaciones de los productos para poder realizar el análisis de falla son:

- **Calidad del producto:** este aspecto es uno de los principales candidatos analizados en un análisis de falla. Sin embargo hay que mencionar que los análisis de falla no siempre son usados para determinar los problemas de calidad que puedan presentar los componentes.
- **Restricciones del equipo:** muchos de los problemas o eventos que afectan a un producto es el no controlar la capacidad a la cual está diseñada el producto. Este es un aspecto muy importante al momento de realizar un análisis ya que nos puede determinar si el origen de la falla fue por aspectos humanos o del mismo equipo.

El realizar un análisis de falla tiene un alcance más largo que solamente conocer por qué falla un equipo o material. Un análisis de falla nos permite abarcar distintos problemas que se pueden generar durante la operación de ciertos equipos. Unos de estos aspectos es la seguridad ya que todo evento puede causar un riesgo potencial tanto al personal como a las instalaciones de trabajo.

Por tal motivo es necesario investigar acerca del equipo lo más pronto posible para poder resolver algún problema. [3,4]

1.4.2. Recopilación de datos.

La recopilación de datos es un paso que nos permite aclarar el evento o problema. Esta es la fase de la evaluación en donde están incluidas las entrevistas con el personal apropiado colectando evidencia física la cual nos permita aclarar el evento o problema. [4]

1.4.3. Entrevistas

El proceso de entrevistas es el primer método usado para establecer los límites de las condiciones actuales del evento además de ser una parte clave para cualquier investigación.

Para eventos significativos todo el personal debe de ser entrevistado para tener una imagen completa del evento. Adicionalmente hacer un énfasis a quienes están directamente relacionados con el evento o problema, ya que ellos podrían tener algún conocimiento de lo ocurrido lo cual nos permitiría aclarar el evento. Estas entrevistas deben de ser realizadas a: [1]

- Todo personal directamente relacionado con el evento.
- Supervisores y gerentes.
- Personal que no está directamente relacionado con el evento pero que han tenido alguna experiencia con el equipo o material fallado.
- Técnicos, vendedores o fabricantes del equipo o material fallado esto para tener un mejor conocimiento del equipo o material.

1.5 Información que se debe de conocer

Para poder realizar estas entrevistas nos tenemos que plantear una serie de preguntas que nos permitan conocer acerca del evento, estas preguntas pueden ser de la siguiente forma: [1,4]

- ¿Qué paso? : Es una pregunta esencial en un análisis de falla ya que esta nos aclara que paso actualmente con el equipo o material.
- ¿Dónde paso?: es necesario tener una descripción clara de la locación exacta donde ocurrió el evento ya que esta nos puede determinar si la locación influyó en la falla.
- ¿Existió algún cambio?: es muy importante saber si durante la operación del equipo o material existió algún cambio o modificación tanto en el equipo como en las condiciones de operación.

1.5.1. Revisión del diseño

La revisión del diseño es una parte esencial en un análisis de falla ya que esta nos aclara los parámetros y especificaciones que están asociados al equipo.

El objetivo de la revisión del diseño es conocer las especificaciones y características de operación y verificar en base a las entrevistas si estas se cumplían. La evaluación de estos datos permite especificar las principales funciones del equipo o material, haciendo revisión de los rangos y ambientes de operación así como la existencia de posibles variaciones en tamaños y medida.

La revisión del diseño también permitirá conocer la instalación que debería de tener el equipo o material; cada equipo, sistema o material posee un criterio de instalación específico. Este aspecto también está muy relacionado con la causa raíz de la falla de un equipo. [4]

1.6 Mecanismo de difusión

1.6.1. Difusión

La difusión puede ser definida como el mecanismo por el cual la materia es transportada por la material. Los átomos de gases, líquidos y sólidos están en constante movimiento y se desplazan en el espacio tras un periodo de tiempo. En los gases, el movimiento de los átomos es relativamente veloz, tal efecto se puede apreciar por el rápido avance de los olores desprendidos al cocinar o el de las partículas de humo. En los líquidos, los átomos poseen un movimiento más lento, esto se pone en evidencia en el movimiento de las tintas que se disuelven en el agua. El transporte de masa en líquidos y sólidos se origina generalmente debido a una combinación de convección y difusión. En los sólidos, estos movimientos atómicos quedan restringidos debido a los enlaces que mantienen los átomos en las posiciones de equilibrio, por lo cual el único mecanismo de transporte de masa es la difusión. Sin embargo, las vibraciones térmicas que tienen un lugar en sólidos permiten que algunos átomos se muevan. La difusión de estos en metales y aleaciones es particularmente importante si consideramos el hecho de que la mayor parte de las reacciones en estado sólido llevan consigo movimientos atómicos; como por ejemplo se pueden mencionar la formación de núcleos y crecimiento de nuevos granos en el proceso de recristalización de un metal trabajado en frío y la precipitación de una segunda fase a partir de una solución sólida. [6]

1.7 Tipos de difusión

La razón por la cual los átomos pueden difundir es la capacidad de los átomos y de las imperfecciones en el material, la cual aumenta conforme se aumenta la temperatura o el incremento de energía. [7]

1.7.1 Auto difusión

El mecanismo de auto difusión de un material ocurre en los materiales sólidos, donde los átomos se mueven de una posición a otra dentro de la misma red, esta difusión puede ser: 1) sus propios átomos pueden difundir en su propia red como átomos intersticiales como se muestra en la Figura 5a, 2) Sus átomos simplemente cambia de lugar uno con otro como se muestra en la Figura 5b, 3) se presenta un movimiento tipo anillo con átomos vecinos como se muestra en la Figura 5c.[7]

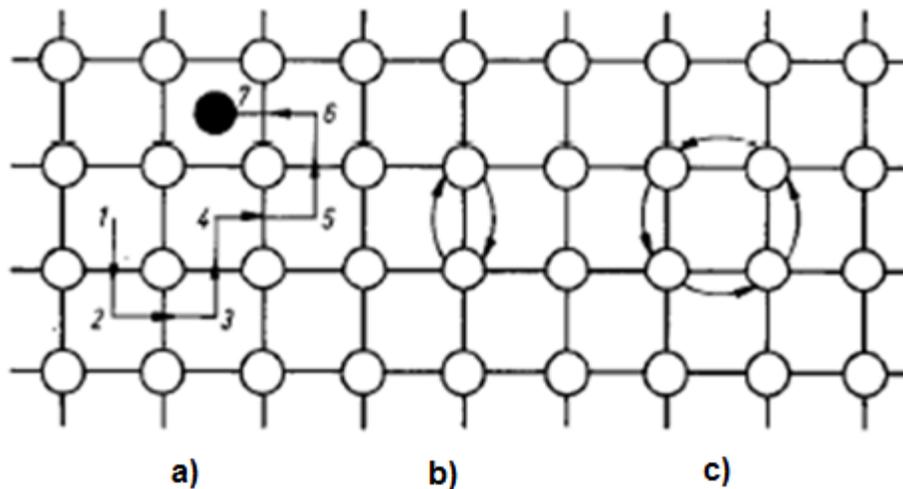


Figura 5. Mecanismo de auto difusión en una red, a) movimiento intersticial, b) sustitución de un átomo por otro de la misma red, c) movimiento de anillo.

1.7.2 Difusión por vacancias

La difusión por vacancias ocurre cuando un átomo abandona su sitio de red para llenar una vacancia más cercana existente dentro de la red; conforme continua la difusión se tiene un flujo de vacancias y átomos en sentidos opuestos por lo que el número de vacancia incrementara al aumentar la temperatura como se muestra en la Figura 6. [7]

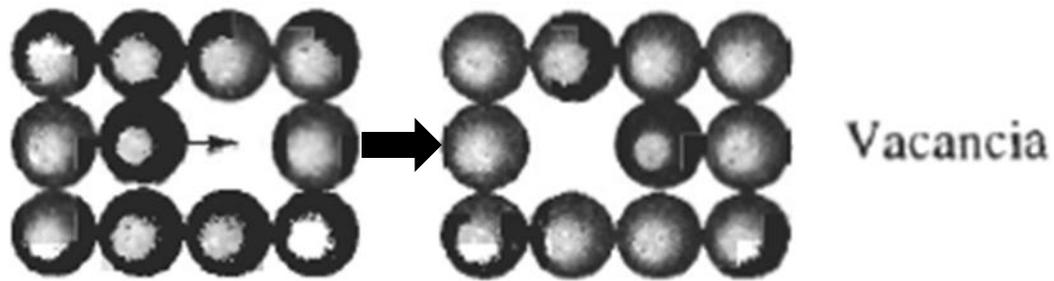


Figura 6 . Movimiento de un átomo a un lugar libre (vacancia)

1.7.3 Difusión intersticial

La difusión intersticial ocurre cuando en la estructura cristalina existe un átomo intersticial es decir un átomo de menor diámetro con respecto a los átomos de la red, el cual se podrá desplazar de un sitio a otro, por lo que para este mecanismo no es necesario que exista la presencia de vacancias, debido a que el número de sitios intersticiales es mayor que el de vacancias por lo que este será más rápido. Figura 7. [7]

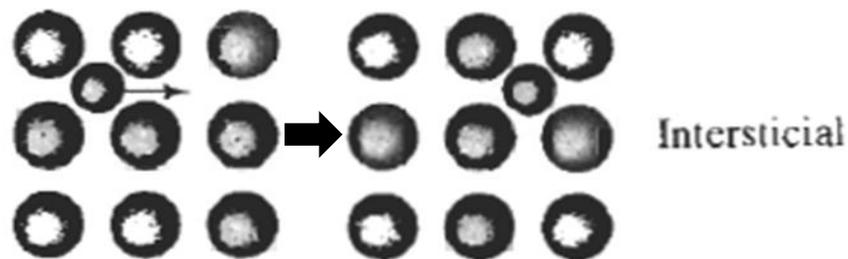


Figura 7. Movimiento de un átomo en los intersticios de una red

1.7.4 Temperatura de difusión

Para que el mecanismo de difusión ocurra se debe proporcionar energía para que los átomos lleguen a su nueva posición. La energía necesaria se puede ver en la Figura 8.

La temperatura es un factor muy importante, ya que si esta aumenta el sistema de difusividad también se ve incrementado. La estructura cristalina cubica centrada en el cuerpo (BCC) que posee un factor de empaquetamiento de 0.68 el cual se define como la fracción de volumen por unidad de celda, ayuda a que la difusividad sea mayor que una red cubica centrada en las caras (FCC) que posee un factor de empaquetamiento de 0.74, de esta manera los átomos de carbono se pueden difundir más fácilmente en una red de hierro BCC que un red de FCC.

La mayoría de las estructuras abiertas permiten una difusión más rápida de los átomos, ya que la difusión tiene lugar más rápidamente a lo largo de los límites de grano que en la matriz del mismo. La presencia de vacancias en exceso incrementaran las velocidades de difusión en metales y aleaciones. [7]

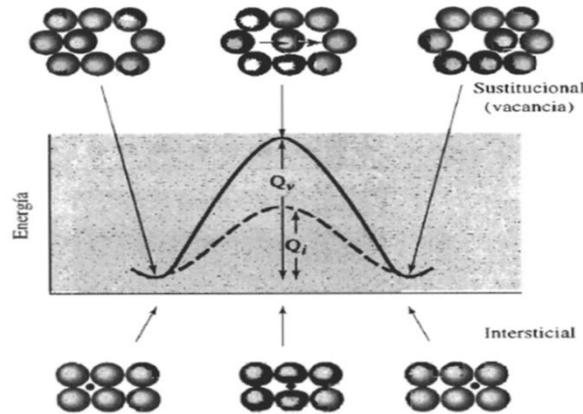


Figura 8. Variación de la energía de activación en la difusión

En la Tabla 1 presentan los valores de algunas energías de activación para el mecanismo de auto difusión en metales puros. [8]

Tabla 1 Energía de activación en distintos metales

| Metal | Punto de fusión, (°C) | Rango de temperatura estudiado (°C) | Estructura Cristalina | Energía de Activación, KJ/mol |
|-----------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Aluminio | 660 | 400-610 | FCC | 165 |
| Cobre | 1083 | 700-990 | FCC | 196 |
| Niquel | 1452 | 900-1200 | FCC | 293 |
| Hierro α | 1530 | 808-884 | BCC | 240 |
| Molibdeno | 2600 | 2155-2540 | BCC | 460 |

Existen distintos mecanismos de difusión de los cuales los principales son los siguientes: [7]

- Difusión volumétrica: los átomos se mueven a través del cristal de un sitio de red o de un intersticial a otro, debido a la presencia de los átomos adyacentes. La energía de activación en este mecanismo es grande y la velocidad de difusión lenta
- Difusión en los límites de grano: debido a que la compactación atómica no es buena, los átomos pueden pasar con una mayor facilidad a través de los bordes. La energía de activación es baja y la velocidad es regular.
- Difusión en la superficie: tiene lugar cuando las moléculas que se han absorbido son transportadas a lo largo de la superficie como resultado de

un gradiente de concentración. La energía de activación es baja y de velocidad alta

1.8 Recuperación y recristalización

El propósito del estudio de la recuperación y recristalización es el de relacionar los cambios microestructurales que ocurren durante y después del trabajo en caliente y frío, así como la influencia de los cambios en las propiedades mecánicas del material trabajado mecánicamente.

Debido a que la energía interna de los metales deformados en frío es mayor que la que se encuentra en los metales sin deformar, los metales endurecidos por deformación tienden a volver al estado libre de deformaciones.

Al aumentar la temperatura, el estado de deformación en frío se hace cada vez más inestable. Finalmente, el material se ablanda y su microestructura vuelve a un estado libre de deformación [6]

1.8.1 Recuperación

La recuperación se define como la restauración de las propiedades de los metales deformados en frío sin que se observen cambios en la microestructura, disminuyendo apreciablemente la deformación reticular. Las propiedades más afectadas por la recuperación son: La conductividad eléctrica, resistividad, susceptibilidad eléctrica, etc.

Las propiedades relativas a la resistencia mecánica no son afectadas a la temperatura de recuperación. Debido a que el proceso se lleva a cabo a escala dimensional de estructura cristalina donde no se detectan cambios macroscópicos. [6,7].

1.8.2 Recristalización

Es la sustitución de la estructura formada en frío por nuevos granos sin deformación. La recristalización se detecta fácilmente por métodos metalográficos y se comprueba por un descenso en la dureza o resistencia mecánica y un aumento en la ductilidad

La densidad de dislocaciones disminuye considerablemente con la recristalización y casi todos los defectos por deformación se eliminan. La energía impulsora para que la recuperación y recristalización se lleve a cabo, es la que se almacena como resultado de la deformación en frío.

Si los nuevos granos libres de deformación se calientan a una temperatura mayor que la requerida para producir recristalización, habrá un aumento progresivo del

tamaño de grano (recristalización secundaria) y la fuerza impulsora para que el grano crezca es la disminución de energía libre resultante de la disminución de los límites de grano a causa de un aumento en el tamaño de grano.

Las variables que influyen sobre el comportamiento en la recristalización son:

1. Grado de deformación
2. Temperatura
3. Tiempo
4. Tamaño de grano inicial
5. Composición química

1.9 Microestructura y propiedades del acero

El hierro sufre transformaciones alotrópicas durante el calentamiento o el enfriamiento. Inmediatamente después de la solidificación, el hierro forma una estructura cubica centrada en el cuerpo (BCC) nombrada ferrita (δ). A un enfriamiento mayor, el hierro se transforma en una estructura cubica centrada en las caras (FCC) denominada austenita (γ). Finalmente el hierro retorna a transformarse en una estructura (BCC) nombrada ferrita α . [6, 9]

En el diagrama hierro carbono se observa una reacción eutéctica, en la cual se forma un compuesto estequiométrico denominado intermetálico y está constituido por dos elementos formando una fase con composición, estructura y propiedades únicas. En algunos casos se forman dos fases simultáneas; estas estructuras definen de manera distinta la mezcla íntima de las fases denominadas microconstituyente un ejemplo de esto es la perlita. La perlita se conforma por laminillas o placas delgadas de ferrita y cementita. [6, 9]

1.9.1. Esferoidización del acero

La esferoidización del acero es un tratamiento térmico que consiste en un calentamiento a una temperatura por debajo del punto eutéctico, en la zona del hierro (α). Si la microestructura inicial contiene perlita, los tiempos de esferoidización ordinariamente oscilarán en un intervalo de 15 y 25 horas. Durante el recocido hay una coalescencia de la cementita para formar las partículas esferoidales en la matriz. Esta transformación se ha producido por difusión de carbono adicional sin cambio en las composiciones o cantidades relativas de fases de ferrita y cementita. La cinética de la esferoidización no está incluida en los diagramas de transformación isotérmica.

La tasa de esferoidización depende de la microestructura inicial. La esferoidización se asocia principalmente con microestructuras perlíticas, especialmente aquellos

con gruesos espaciados interlaminares. La esferoidización es más rápida si los carburos son inicialmente en forma de partículas discretas, como en la bainita e incluso más rápida si la estructura inicial es martensita. [9].

1.10 Mecanismos de fractura

1.10.1 Oxidación a altas temperaturas

Los materiales que se exponen a alta temperatura deben cumplir ciertos requerimientos para desempeñarse adecuadamente bajo condiciones extremas de corrosión y oxidación. Cuando un material va a ser sometido a altas temperaturas se deben tener en cuenta aspectos importantes como:

- Su resistencia química
- El medio agresivo al que se encuentra expuesto
- Los esfuerzos a los que estará sometido
- Propiedades físicas

La oxidación a alta temperatura es un problema que se encuentra en diversos procedimientos industriales cuya temperatura de trabajo se sitúa entre los 500° C y los 1000° C. Adicionalmente involucra el contacto con sustancias agresivas de las cuales son propias de un proceso, como por ejemplo: 1) en la generación de energía, 2) en la industria aeronáutica, 3) durante el tratamiento térmico de materiales, 4) procesos metalúrgicos, 5) procesos químicos, 6) industria automotriz. [10]

La velocidad con la que se oxida un material no es constante sino que depende de factores como la temperatura y la presión del oxígeno en la atmosfera de trabajo. A mayor temperatura, la oxidación se produce más rápidamente ya que la difusión tanto de los iones metálicos como del oxígeno se ve favorecida a elevadas temperaturas. Similarmente, mientras mayor sea la presión de oxígeno, mayor será la velocidad a la que se lleve a cabo la oxidación. Puesto que en este caso la difusión de los iones O_2 se realiza con mayor facilidad. [11]

En la mayoría de los casos, la actividad química del oxígeno es lo suficientemente alta para que la oxidación esté involucrada en los procesos de corrosión. Un ambiente fuertemente oxidante involucra altas presiones parciales de oxígeno, mientras que un ambiente reductor involucra una baja presión del mismo, la cual se encuentra en función de la proporción de CO/CO_2 [11]

1.10.2 Corrosión-fatiga

El mecanismo de corrosión-fatiga puede ocurrir en cualquier locación donde existen los suficientes esfuerzos cíclicos generados en la operación. Las fallas por el mecanismo de corrosión-fatiga ocurren frecuentemente en equipos de calentamiento que son usados en un servicio discontinuo o una forma de operación cíclica. El calentamiento y enfriamiento rápido incrementa el mecanismo de corrosión-fatiga. Algunos problemas generados por el mecanismo de corrosión-fatiga fueron eliminados en base a la modificación de la cantidad de calentamientos y enfriamientos.

Comúnmente la localización de las grietas generadas por el mecanismo de corrosión-fatiga incluye el espesor de tubos de calentamiento y enfriamiento. Las grietas generadas por este mecanismo comúnmente son observadas a lo largo de la superficie de tuberías de calentamiento que son enfriadas por algún líquido refrigerante. [5]

1.10.2.1 Descripción general del mecanismo

El mecanismo de corrosión fatiga es una forma de deterioro que puede ocurrir sin la alta concentración de una sustancia corrosiva. El término se refiere a la propagación de la grieta a través del metal como el resultado de los esfuerzo de tracción cíclicos que ocurren en un entorno corrosivo para el metal. El término y la definición anterior son algo engañosos en el caso de las calderas, ya que la oxidación normal del metal para la magnetita es suficiente para inducir la fatiga por corrosión en presencia de suficientes ciclos de tensión.

Las grietas de este mecanismo se desarrollan de acuerdo a la siguiente secuencia:

1. Durante la primera fase de la tensión cíclica, la pared del tubo se somete a expansión dado que la capa de óxido es frágil con respecto a la pared del tubo, la capa de óxido puede fracturarse y generar la apertura de grietas microscópicas a través del óxido de la superficie metálica.
2. La superficie expuesta a la capa de óxido forma una muesca microscópica en la superficie del metal como se muestra en la Figura 9a.

Durante el próximo ciclo de expansión, el óxido tendera a romperse a lo largo de esta muesca haciendo que la grieta profundice. A medida que continua este proceso cíclico, una grieta en forma de cuña se propaga a través de la pared del tubo hasta que se produce la ruptura o la pared del tubo es penetrado, ver Figura 9b. [5]

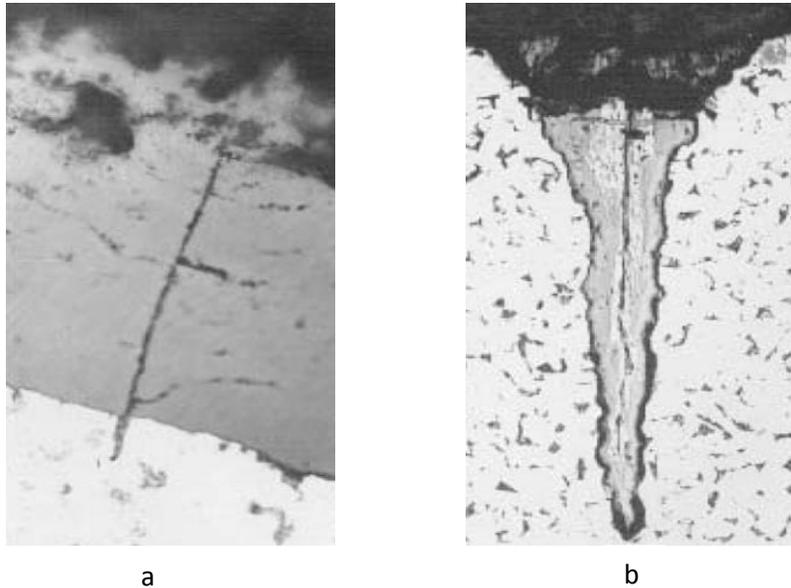


Figura 9. A) Formación de muescas en el óxido, B) propagación de grieta a través de la pared.

Las grietas se propagan siempre en una dirección perpendicular a la dirección de la tensión principal. Por lo tanto, si la tensión cíclica principal se produce por fluctuación en la presión interna, se producen grietas longitudinales como se observa en la Figura 10. [4]

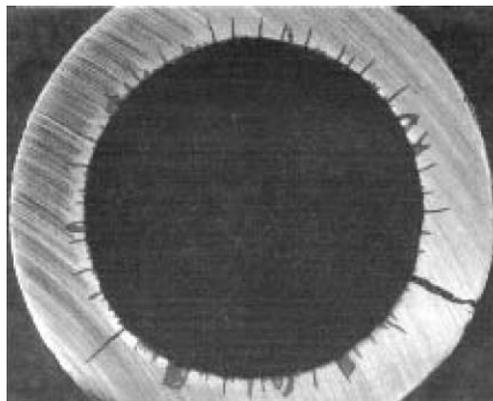


Figura 10. Presencia de grietas causadas por fluctuación interna

Si la tensión cíclica principal es un esfuerzo de flexión producido por la expansión y contracción térmica del tubo las grietas crecerán en una dirección transversal. El agrietamiento por corrosión-fatiga comúnmente ocurre adyacente a restricción física como se muestra en la Figura 11. [5]



Figura 11. Crecimiento de grietas transversales por ciclos térmicos

Las grietas se pueden originar en la superficie externa, la superficie interna o ambas simultáneamente, las grietas que se originan en las superficies internas se asocian a menudo con cavidades ya que estas cavidades funcionan como un concentrador de esfuerzos por lo que es un sitio preferido para la iniciación de grietas por el mecanismo de corrosión-fatiga. [5]

1.10.2.2 Factores críticos.

Los esfuerzos de tensión cíclicos y el ambiente causaran la espontaneidad de la oxidación en la superficie del metal, los cuales estos son los dos factores que predominan en el mecanismo de corrosión fatiga. Los factores comunes que pueden asociarse a este mecanismo pueden ser la fluctuación cíclica por presión interna, la contracción y expansión por ciclos térmicos.

Adicionalmente el ambiente causa oxidación espontanea en la superficie, otro factor son los niveles de pH y la disolución del oxígeno contenido. La operación con bajos niveles de pH o excesivos niveles de oxígeno disuelto pueden producir un mecanismo de oxidación conocido como "PITTING". Los puntos o cavitaciones generadas por este mecanismo pueden ser considerados como superficiales o profundos, como se muestra en la Figura 12a y Figura 12b respectivamente. Dichas cavitaciones actúan como concentradores de esfuerzos en el mecanismo de corrosión-fatiga. [5,12]

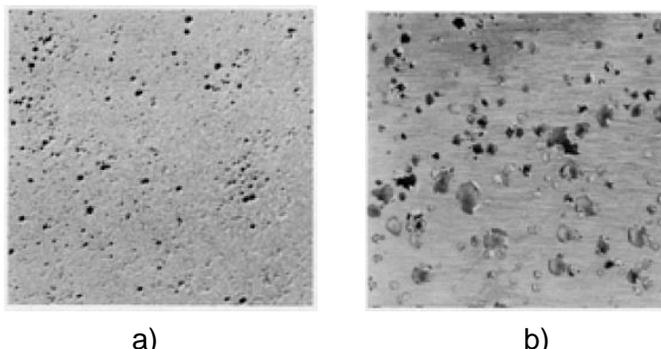


Figura 12. Corrosión por picaduras a) picaduras superficiales, b) picaduras profundas

1.10.3 Identificación

Las grietas generadas por el mecanismo de corrosión fatiga son típicamente rectas y no ramificadas generando una propagación perpendicular a la superficie del metal. Comúnmente estas grietas son generadas en familias paralelas. Dichas grietas no avanzan grandes distancias a lo largo de la superficie del tubo.

Para la identificación de estas grietas se utilizan métodos de ensayos no destructivos como ultrasonido, radiografía, partículas magnéticas y líquidos penetrantes. [5]

1.10.4 Eliminación

La eliminación o reducción del agrietamiento por el mecanismo de corrosión-fatiga consiste en controlar los ciclos de esfuerzos presentados en el componente además de controlar los factores ambientales. Reducir o eliminar la operación cíclica en componentes térmicos como extender los tiempos de inicio y final pueden ayudar a reducir el agrietamiento del mecanismo de corrosión-fatiga.

La eliminación de proceso de oxidación puede ser un paso muy factible pero muy complicado ya que la oxidación ocurre de una forma espontánea a niveles muy bajos de oxígeno disuelto. A pesar de que la eliminación de la oxidación es un paso muy complicado se pueden controlar los niveles de pH y los excesivos niveles de oxígeno disuelto los cuales pueden utilizarse para eliminar la corrosión por el mecanismo de "PITTING". [5,12]

1.10.5 Precauciones

El resultado de la fracturas por el mecanismo de corrosión-fatiga son fracturas típicamente localizadas en el espesor de pared mostrándose en forma pequeña y sin presentar ductilidad alguna. Este tipo de fracturas pueden ser confundidas con otros tipos de fallas que usualmente producen fracturas en el espesor de pared como puede ser ruptura por esfuerzo, agrietamiento inducido por hidrogeno, esfuerzo-corrosión y otros tipos muy similares.

Las grietas causadas por corrosión-fatiga frecuentemente son difíciles de ver ya que por lo general estas se encuentran cubiertas por una densa capa de óxido.

Otros métodos de control para este tipo de corrosión es hacer uso de la combinación de metales, el control del ambiente o el uso de recubrimientos. [12]

1.10.6 Efecto de la temperatura

Al aumentar la temperatura de un metal o aleación disminuyen tanto su resistencia, como su vida en fatiga. Existen dos mecanismos de falla relacionados con la temperatura:

1. Termofluencia.
2. Fatiga térmica.

Si la carga es constante se producirá una deformación dúctil en el material y terminara fallando por “termofluencia” por otra parte, los cambios cíclicos de temperatura favorecen la falla por fatiga térmica, cuando el material se calienta a manera no uniforme, algunas partes de la estructura se dilataran más que las otras. Esta expansión no uniforme introduce esfuerzos en un material y cuando la estructura se enfría por lo que esta se contrae y se introducen esfuerzos opuestos y como consecuencia de los esfuerzos y deformaciones inducidos térmicamente el material fallara por fatiga térmica. [1,13]

1.11 Termofluencia

Un metal o aleación a temperatura ambiente no sufre deformación plástica si un esfuerzo aplicado es menor que su punto de cedencia. Sin embargo, si la temperatura de estos materiales es aumentada, es posible que comiencen a deformarse plásticamente, aun cuando los esfuerzos aplicados sean pequeños provocando una falla. Entonces, se dice que el material fallo por termofluencia, la deformación plástica que sufre el material depende de la temperatura y del tiempo que la fuerza esta aplicada. [1,13]

Se pueden encontrar distintas definiciones de termofluencia dentro de las cuales una de ellas denomina que la termofluencia es la relación entre la deformación plástica permanente y el tiempo que sufren los materiales durante su servicio a temperaturas elevadas.

Las temperaturas de termofluencia son aquellas mayores de $0.5T_M$ donde T_M es la temperatura de fusión tal es el caso de los materiales con una estructura BCC(tungsteno, molibdeno, y súper aleaciones base níquel) los cuales a temperaturas cercanas a los 1000°C pueden presentar fallas por termofluencia.

Cuando se aumenta la temperatura de un material, tanto el límite de fluencia como el de ruptura descienden. El material se hace mucho más dúctil. En el caso de los aceros, la termofluencia aparece a 600°C . Este fenómeno tiende inevitablemente a la rotura debido a la reducción de sección transversal que siempre se acompaña por una elongación. La fractura puede tener lugar de diversos modos: [1]

1. A mayores temperaturas o tiempos largos, los metales dúctiles comienzan a perder su capacidad para endurecerse por deformación: tiene lugar el comportamiento como “acción térmica”. Si la deformación es grande, la rotura sigue siendo dúctil.
2. A altas temperaturas o largos periodos de carga, los metales pueden fracturarse con muy poca deformación plástica. El movimiento relativo entre los granos ocasiona rupturas que se unen para formar una más grande creciendo lentamente a través de la pieza hasta que fractura tiene lugar. A tensiones bajas que actúan durante mucho tiempo la deformación es a veces casi insignificante y la fractura tiende a ser de carácter frágil.

La mayoría de la falla por termofluencia se encuentra en plantas térmicas, operando bajo tensiones y altas temperaturas. [1]

1.11.1 Aspectos macroscópicos por termofluencia

Dependiendo de la aleación la fractura por termofluencia macroscópicamente puede ser dúctil o frágil. La fractura frágil es intergranular y ocurre con muy poca deformación este tipo de fracturas generalmente son fáciles de identificar ya que se pueden reconocer por ductilidad local y una gran cantidad de grietas como se muestra en la Figura 13[1].

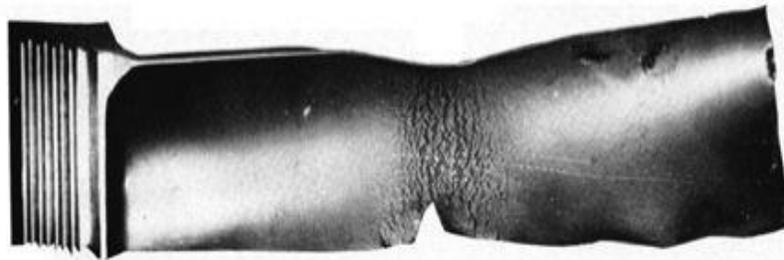


Figura 13 Superficie de fractura por termofluencia

1.12 Fatiga térmica

La fatiga térmica es el resultado de variaciones de temperatura y es lo contrario de fatiga a temperaturas elevadas que es causada por ciclos de deformaciones. Cuando menos una de las siguientes condiciones son necesarias para que ocurra la fatiga térmica estas son:

1. La existencia de una forma de contracción mecánica
2. Cambios de temperatura

Los cambios de temperaturas inducen una expansión térmica en el material. Si la expansión es obstaculizada, se producen esfuerzos térmicos cuya magnitud es tal que es como si se aplicara un esfuerzo externo. Los esfuerzos térmicos pueden producirse por restricciones internas o externas, las internas son causadas por una distribución no uniforme de la temperatura o propiedades no homogéneas del material. Si la carga es causada por restricciones internas se habla de esfuerzo térmico puro o esfuerzo térmico. Si los esfuerzos son causados por restricciones externas se habla de esfuerzos termomecánicos, por tal manera la expansión térmica se puede representar por la siguiente ecuación. [1, 5,14]

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad \dots\dots 1$$

Dónde:

ΔT = cambio de temperatura que causa la expansión térmica (K)

α = Coeficiente de expansión lineal (K^{-1})

ε_T = expansión térmica (mm/mm)

La teoría de esfuerzos térmicos es bien conocida de tal manera existen soluciones analíticas para una gran diversidad de fórmulas por lo cual se presenta la siguiente:

$$\sigma_{max} = 0.705(\alpha E \Delta T) - 43.80 \quad \dots\dots 2$$

Dónde:

σ_{max} = esfuerzo térmico máximo durante el ensayo de temple (GPa)

E = módulo de Young (GPa)

ΔT = diferencia de temperatura (K)

α = coeficiente lineal de expansión térmica (K^{-1})

Cuando se trata de un material de dos fases, como el caso del acero en el cual las fases tienen distinta expansión térmica, el cambio de temperatura produce un desajuste en la deformación y en los esfuerzos térmicos residuales afectan la aparente expansión térmica y o pueden causar una alteración en el relieve de la superficie. El esfuerzo total de una fase, entonces es la suma de los esfuerzos macro y micro representado por la siguiente fórmula.

$$\sigma_{fase} = \sigma_M + \sigma_\mu \quad \dots \dots 3$$

Dónde:

σ_{fase} = esfuerzo total promedio

σ_M = esfuerzo macroscópico

σ_μ = esfuerzo microscópico promedio en una fase

En una microestructura orientada al azar los esfuerzos microscópicos de las fases constituyentes están relacionados con la condición de equilibrio.

Las cargas térmicas cíclicas causan daño y crecimiento de grietas. Si la carga de fatiga se origina solamente por cargas térmicas cíclicas y el esfuerzo mayor coincide con la temperatura mayor se dice que la carga está en fase y en caso de que la temperatura más elevada coincida con el esfuerzo menor se considerara fuera de fase, como se muestra en la Figura 14.

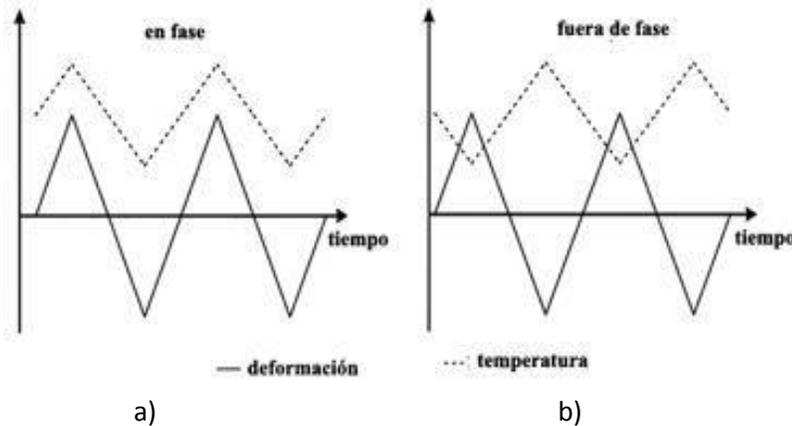


Figura 14. Esquema de una carga en fase y fuera de fase. a) Sincronización de esfuerzo con temperatura mayor b) desincronización de esfuerzos con temperatura.

1.12.1 Daño superficial

Las deformaciones elevadas en la superficie dan lugar a una rápida propagación de grieta en una multitud de sitios de iniciación. Debido a esto las grietas se indican y crecen igualmente en todas las direcciones formando una red semejante a un mosaico, las grietas relajan los esfuerzos perpendiculares al plano de ellas, de tal manera que las nuevas grietas se encuentran con las ya generadas en un ángulo de 90° . Un patrón típico de la fatiga térmica se muestra en la Figura 15[1,15].

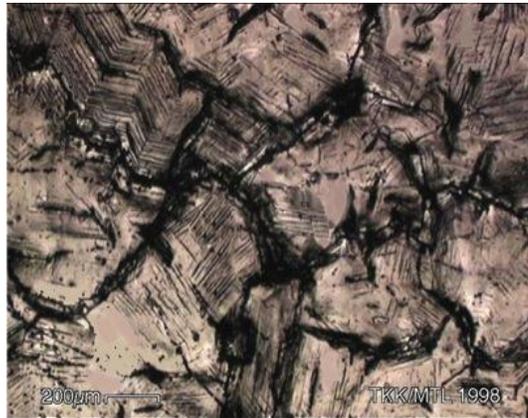


Figura 15. Patrón típico con aspecto de mosaico formado por grietas por fatiga térmica en un acero bajo carbono.

Estudios sobre fatiga térmica en aceros ha demostrado que el daño comienza con la formación de bandas persistentes de deslizamiento. A medida que la fatiga continúa aumenta el número de bandas formado microgrietas en todas las direcciones.

Bajo ciertas circunstancias la fatiga térmica y la ruptura por esfuerzos se confunden. Fatiga térmica es el mecanismo básico en fallas que ocurren por números ciclos de calentamiento y enfriamiento cortos.

Como características macroscópicas la superficie de fractura es áspera cerca de los lugares de iniciación y más fibrosa con labios de desgarramiento a 45° en el área de fractura final.

En la Figura 16 se muestra la morfología de una grietas en una sección de una tubería que sufrió la acción combinada de corrosión y agrietamiento por fatiga térmica, estando en contacto con azufre cloro y una atmosfera que consiste en CO , CO_2 , O_2 y SO_2 , donde se observa que la corrosión es aproximadamente de un 30% de las paredes laterales la cual se produjo debido a grietas generadas por fatiga térmica en combinación con productos de la corrosión en la punta.

En aceros de baja aleación, las escalas formadas en ambientes reductores consisten principalmente de capas porosas de magnetita con inclusiones de sulfuros presentando grietas, lo cual las hace poco resistentes a la corrosión. [1, 12,13].

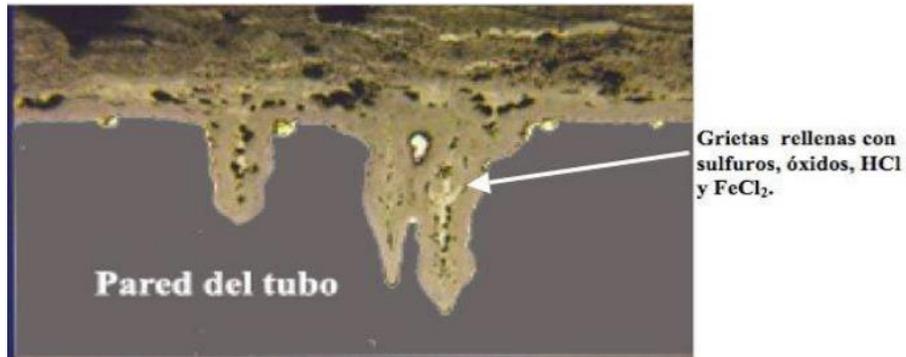


Figura 16. Morfología de grietas conocida como piel de cocodrilo con presencia de sulfuros, HCl y FeCl₂ detectados por análisis microscópico.

1.12.3 Aspectos microscópicos de la fractura de fatiga térmica

Las fracturas de fatiga térmica generalmente presentan extensas formaciones de estrías, sobre todo en los aceros austeníticos. En materiales bifásicos las microestructuras de las dos fases afectan el crecimiento de las grietas. Las superficies de fractura muestran huellas de diferentes mecanismos de crecimiento de grietas, por mencionar algunas se pueden presentar estriaciones dúctiles y frágiles como se muestra en la Figura 17a, en otras ocasiones se puede encontrar un crecimiento en diferentes planos de fractura, además de poder identificarse mediante la ayuda de un microscopio óptico, debido a que generalmente hay una gran cantidad de micro huecos adyacentes a la fractura principal como se muestra en la Figura 17b. [2,13].

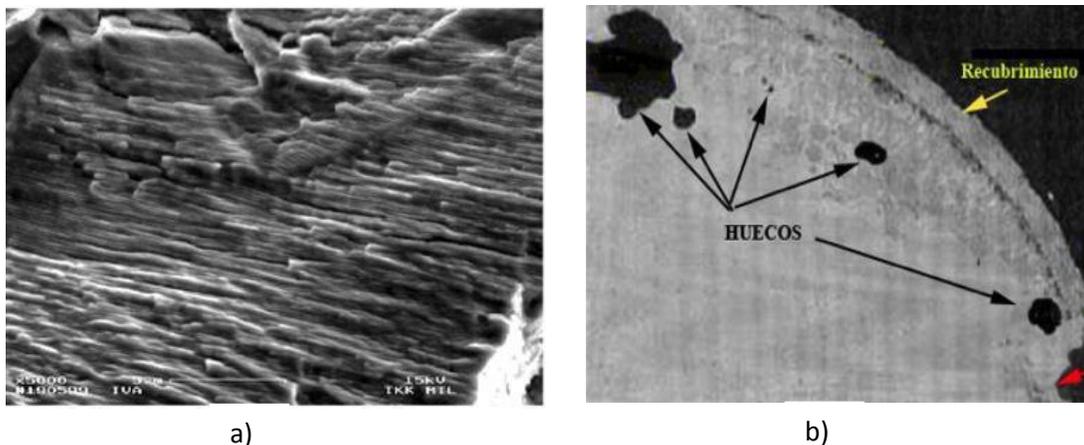


Figura 17. A) Presencia de estrías en una fractura, B) Presencia de micro huecos en una fractura revelada mediante microscopia óptica. . Acero bajo carbono sometido a ciclos térmicos

1.13 Mecanismos de deformación

La fractura intergranular en un material que fue expuesto a temperaturas elevadas en un periodo tiempo dado, puede tener aspectos bastantes diferentes, dependiendo del material y de las condiciones.

Es posible obtener una fractura intergranular por la formación de huecos en los bordes de grano. Los huecos crecen y se coalescen formando una grieta intercristalina. Este tipo de fractura es la predominante cuando la tensión es baja y la rotura se produce después de un tiempo transcurrido.

Un mecanismo propuesto para este tipo de iniciación de la fractura consiste en la formación de huecos por condensación de vacancias, estos huecos crecen por difusión de las vacancias hacia ellos, es decir, los huecos actúan como un concentrador de dichos defectos reticulares como se muestra en la Figura 18. [1]

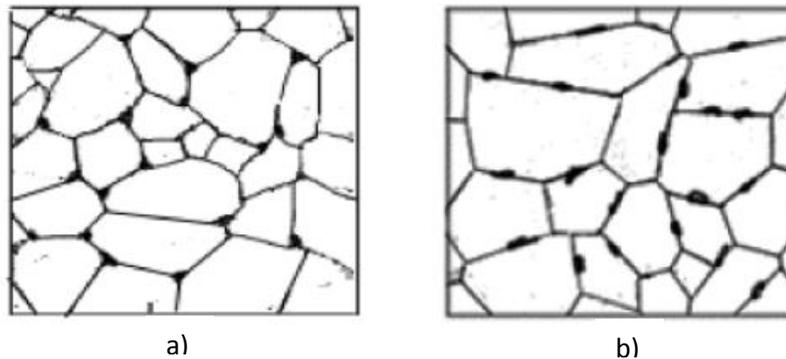


Figura 18. Presencia de concentradores de esfuerzo. a) Concentradores en las intersecciones en los límites de grano, b) concentradores a lo largo de los límites de grano.

En la Figura 19 se muestra esquemáticamente el mecanismo de fractura por nucleación y crecimiento de huecos en los límites de grano. Mientras que a bajas temperaturas, se empiezan a formar cavidades en los bordes de grano, especialmente si hay segregación de impurezas lo que conduce a un debilitamiento de estas regiones.

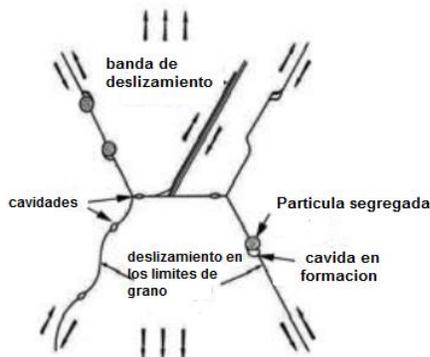


Figura 19. Nucleación y crecimiento de huecos en límite de grano

Es muy común encontrar este tipo de mecanismos en distintos componentes presentando en la zona de fractura la presencia de grietas tipos cuña (Wedge Type Cracks) que tienden a desarrollarse en los puntos triples de intersección de los bordes de grano que comúnmente se generan en los puntos donde existe una gran concentración de esfuerzos. Como se muestra en la Figura 20. [1,13]

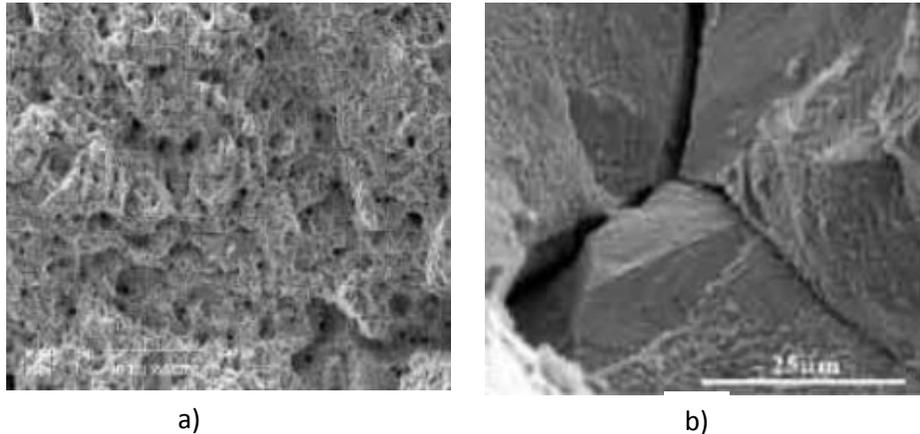


Figura 20. Detalles de la superficie de fractura acero bajo carbono. a) Superficie de fractura con superficie fibrosa 100X, b) superficie de fractura con agrietamiento tipo mosaico 1000X.

1.14 Criterio fuga antes de falla en sistemas de tuberías

Desde 1973, el criterio de diseño en sistemas de tubería en las plantas nucleares se basó en la ocurrencia de un doble guillotamiento súbito en los extremos de un tubo, mediante la propagación de una grieta en su dirección circunferencial. Para proteger la planta de los posibles impactos de los tubos guillotados de esta forma, se requiere de una gran cantidad de gruesos soportes anti látigo, barreras anti impacto, etc. Estas instalaciones tienen efectos adversos en la seguridad de las plantas nucleares por restringir la expansión térmica de los tubos y reducir la accesibilidad de la instalación para servicios de inspección y mantenimiento, lo que implica además un mayor tiempo de exposición a la radiación para el personal que los realiza. La experiencia de la mecánica de la fractura han demostrado que la probabilidad de falla de un tubo por doble guillotamiento es mínima y que para los materiales de alta tenacidad en las tuberías, las presiones y temperaturas de servicio, cualquier grieta primero traspasara el espesor y causaría una fuga detectable que permitiría el paro oportuno de la planta, evitando una falla catastrófica. Esto, en esencia, es el criterio fuga antes de falla en sistemas de tuberías de plantas nucleares.

La metodología general para establecer la factibilidad de la aplicación de la tecnología de un análisis de falla en sistemas de tuberías ha sido ya bien establecida. Las ventajas de la adopción de este sistema son en primer lugar un ahorro por la eliminación de soporteria y protecciones en los sistemas de tubos e

instalaciones cercanas y una mayor seguridad de operación. El procedimiento aceptado por los organismos reguladores internacionales de las plantas nucleares es como sigue: [2]

1. **Evaluación:** cada sistema candidato a un análisis de falla debe de ser cuidadosamente evaluado para asegurar la ausencia de condiciones que impidan la evaluación precisa de las cargas y grietas en los tubos. Estas condiciones: a) cargas altas súbitas, b) crecimiento continuo y rápido de grietas (por fatiga, corrosión-esfuerzo o termofluencia) y c) eventos inesperados (impactos, fuego, etc.)
2. **Recolección de datos:** los datos de entrada para los sistemas de tuberías que aprueban la evaluación son los necesarios para realizar un análisis por mecánica de fractura. Estos son a) cargas y presiones en los tubos, b) diámetro, espesor, temperatura de operación y condiciones de flujo de los tubos c) las propiedades mecánicas de los materiales. Las propiedades mecánicas obviamente incluyen tanto propiedades en tensión como resistencia a la fractura, llegando inclusive a requerir de curvas J-R, debido a la predominancia de la fractura dúctil. También debe de contarse con la información sobre la capacidad de detección de fugas en la planta. Bajo condiciones normales de operación. Esto último es de hecho, el punto fundamental del análisis de falla, esto es que la fuga sea detectada antes que la grieta alcance su tamaño crítico. Una sensibilidad de detección de fuga de un galón por minuto es aceptable en la mayoría de los casos.
3. **Margen de seguridad:** una condición indispensable y necesaria en la recolección de datos es que estos sean completamente conservadores, para asegurar un margen de seguridad en cada etapa del análisis.
4. **Calculo del tamaño postulado de grieta fugante:** El tamaño postulado de grieta fugante es aquel que, en un tubo con las mínimas propiedades mecánicas y las máximas cargas y presiones en condiciones normales de operación, produzca una fuga igual a la capacidad mínima de detección multiplicada por un factor de seguridad, que usualmente es 10. El cálculo de la rapidez de fuga en función del tamaño de grieta depende de las condiciones específicas de presión, material y flujo.
5. **Demostración de la estabilidad de la grieta fugante:** la estabilidad de la grieta bajo condiciones normales más las cargas por paro sísmico, debe de ser establecida con un margen de seguridad de al menos 2 entre el tamaño de grieta fugante y el tamaño crítico de grieta. Eso es si el tamaño de la grieta fugante es menor que la mitad del tamaño crítico de grieta, la grieta fugante es estable.

1.15 Aceros frente a la corrosión a alta temperatura

El acero inoxidable es uno de los aceros más comúnmente empleado; tiene una alta variedad de composiciones, lo cual es el resultado de largos procesos de investigación destinados a mejorar el comportamiento del acero frente a la corrosión y que llevo a las formulaciones, donde la presencia de cromo (aceros martensíticos) y de níquel (aceros austeníticos) fueron el fundamento de los aceros inoxidables actuales. El principio fundamental de las investigaciones fue la obtención de un acero que, facilitando la formación en su superficie de una capa pasivante, tuvieran un buen comportamiento en ambientes agresivos y además que esta capa pasivante, salvo que fuese rota, tuviera la propiedad de autogenerarse, lo que no ocurre por ejemplo con el acero galvanizado que requiere de un trabajo de restauración de la zona dañada. [16]

Así bien los materiales que vayan a ser empleados en cualquier proceso industrial que operar a alta temperatura deben seguir los siguientes requerimientos:

- Facilidad de fabricación y buena soldabilidad
- Alto límite de ruptura por fluencia en caliente hasta temperaturas de 600° a 800° C
- Resistencia a la fatiga térmica
- Alta tenacidad y resistencia a la fragilización a elevada temperatura durante largos periodos de tiempo
- Resistencia a la oxidación en vapor.

Los aceros al carbono y de baja aleación son muy utilizados en las centrales de generación de energía, plantas de procesos químicos y empresas petroquímicas. Los aceros al carbono son usados a temperaturas superiores a 570° C. Para que un acero pueda ser utilizado en altas temperaturas tienen que abstenerse un alto rendimiento del equipo, una temperatura de servicio elevada y un coste de fabricación mínimo. Por lo tanto los aceros al carbono o los ferríticos de baja aleación son utilizados en un gran número de aplicaciones que impliquen estas condiciones de servicio. El interés por los aceros ferríticos se ha incrementado recientemente debido a su bajo coeficiente de expansión y su alta conductividad térmica, que hace que estos sean más atractivos que los aceros austeníticos en aplicaciones en que el material es sometido en ciclos térmicos.

Los aceros ferríticos - martensíticos cumplen la mayoría de los requerimientos exigidos para ser utilizados en plantas de generación de energía, con el principal objetivo de maximizar el límite de rotura por la fluencia en caliente, se ha considerado su uso en la industria química, petroquímica y metalúrgica. [17]

II Antecedentes del componente

El horno de arco eléctrico (EAF) marca “TENOVA” que se encarga de la producción de acero líquido en el área de acería de la empresa de Tenaris-Tamsa, presentó una serie de fallas durante el año 2014. De acuerdo con información proporcionada por el personal de la planta, el EAF operaba normalmente en una jornada cotidiana de trabajo cuando durante el vaciado del horno se detectó la presencia de fugas en los paneles de enfriamiento localizados en la bóveda, los cuales estaban enfriados por agua. Al revisar el origen de estas fugas se detectó que los tubos del panel #3 sección C, que conforma la bóveda presentaba una serie de grietas en un área muy cercana a la ubicación de la campana de extracción de humos localizada en ese mismo panel conociendo esta información se construyó el diagrama causa y efecto mostrado en el anexo 1.

En la Figura 21a se muestra la vista superior de la bóveda del EAF retirada de servicio. En la Figura 21b se muestra un esquema general del EAF instalado en el área de acería utilizado actualmente.

Por el momento, no se proporcionó información sobre el historial de mantenimiento debido a políticas de privacidad del departamento de mantenimiento interno al área de acería.

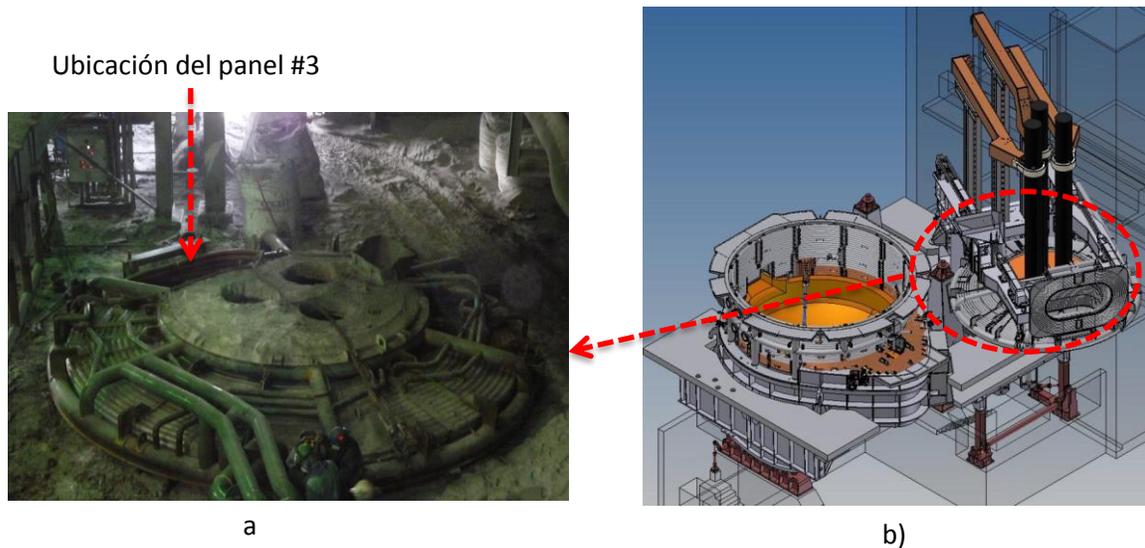


Figura 21. Esquema general del EAF. a) Vista superior de la bóveda fuera de servicio, b) ubicación de la bóveda en el EAF

Una parte importante de un análisis de falla es la recopilación de los planos, especificaciones y dibujos del diseño original, así como conocer las dimensiones del componente para poder observar las desviaciones del diseño original en caso de que estas existan. Por ello en este capítulo se presentan las principales características de panel de enfriamiento y del horno de arco eléctrico en el cual se encuentra instalado.

La pieza de objeto de estudio en esta tesis, se recibió en donación por parte del supervisor del área de hornos, en donde se detectó el problema referido en este trabajo. Para alcanzar los objetivos del presente estudio se realizaron las siguientes actividades:

1. Recopilación y revisión de información técnica consistente en la descripción de falla.
2. Inspección no destructiva para establecer el tamaño, forma y tipo de defecto presente en la parte afectada
3. Maquinado de probetas para la obtención de propiedades mecánicas como, dureza, análisis metalográfico, microscopía de alta resolución.

2.1 Características hornos de arco eléctrico

Tabla 2. Principales características EAF “TENOVA”

| | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Fabricante | Tenova |
| Tipo | Horno de Arco Eléctrico Trifásico |
| Modelo | TENOVA 2012 |
| Fecha de inicio de servicio | Agosto 2013 |
| Potencia Max | 108 MW |
| Power on | 45 Minutos |
| Power off | 15 Minutos |
| Tap To Tap | 60 Minutos |
| Carga max | 200 Toneladas |
| Diámetro de electrodos | 0.71 Metros |
| Longitud de electrodos | 8.5 Metros |
| Presión de agua en paneles | 6.5 Bar |
| Temperatura del agua a la entrada | 33 ^o Centígrados |
| Temperatura del agua a la salida | 39 ^o Centígrados |

2.2 Descripción de la pieza

La pieza de estudio es uno de los paneles de enfriamiento que conforman la bóveda del EAF, el plano de la pieza es mostrado en la Figura 22a), b) y c) respectivamente, en donde se muestran las 3 secciones que conforman la bóveda. La sección de estudio fue la sección a) como se muestra en la Figura 22c).

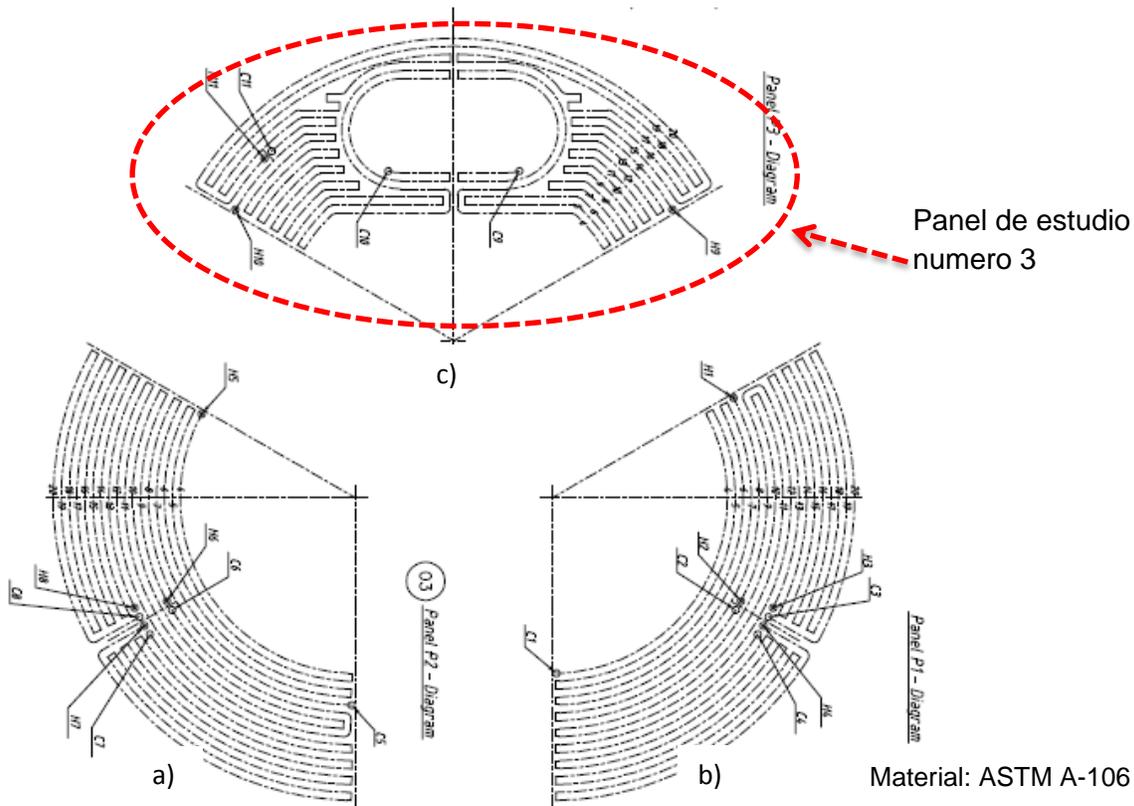


Figura 22. Plano de paneles de la bóveda. a) Sección de panel número 1, b) sección del panel número 2, c) sección de estudio del análisis de falla, localización de la campana de extracción de humos.

2.3 Historial del daño

Se presenta la generación de constantes grietas durante la producción de acero, generando que exista la presencia de líquido refrigerante (agua) dentro del proceso de producción, el cual genera un gran peligro debido a posibles explosiones generadas por reacción ocurridas dentro del horno. El problema expuesto en esta tesis se presentó en una de las secciones de la bóveda del EAF la cual es la que presenta un mayor número de casos de agrietamiento dicho problema de agrietamiento se ubica en toda la superficie del tubo del panel.

2.4 Descripción de las condiciones de la pieza

Las secciones del panel de enfriamiento del horno de arco eléctrico marca “Tenova” se recibieron en donación del jefe de departamento de hornos y del personal de mantenimiento del área de acería de la empresa Tenaris-Tamsa. Cabe mencionar que estos paneles son fabricados por la empresa Fahersa.

La sección de panel se obtuvo de un tramo del panel C de la bóveda como se observa en la Figura 23, que fue retirada de servicio. La sección del panel proporcionada por el departamento de mantenimiento fue cortada mediante la técnica de corte oxiacetilénica, por lo que esta sección del panel contenía ciertas zonas afectadas por calor el cual pudo haber modificado la estructura del material, por lo que los extremos de la sección fueron removidos.



a)



b)

Figura 23. Bóveda de enfriamiento. a) Aspecto general de los paneles de la bóveda, b) Aspecto de la pieza recibida

III. Desarrollo experimental

3.1 Procedimiento experimental

El objetivo principal de la metodología experimental es determinar la causa de falla de la sección C del panel de enfriamiento de la bóveda del EAF. La metodología experimental seguida se muestra en la Figura 24.

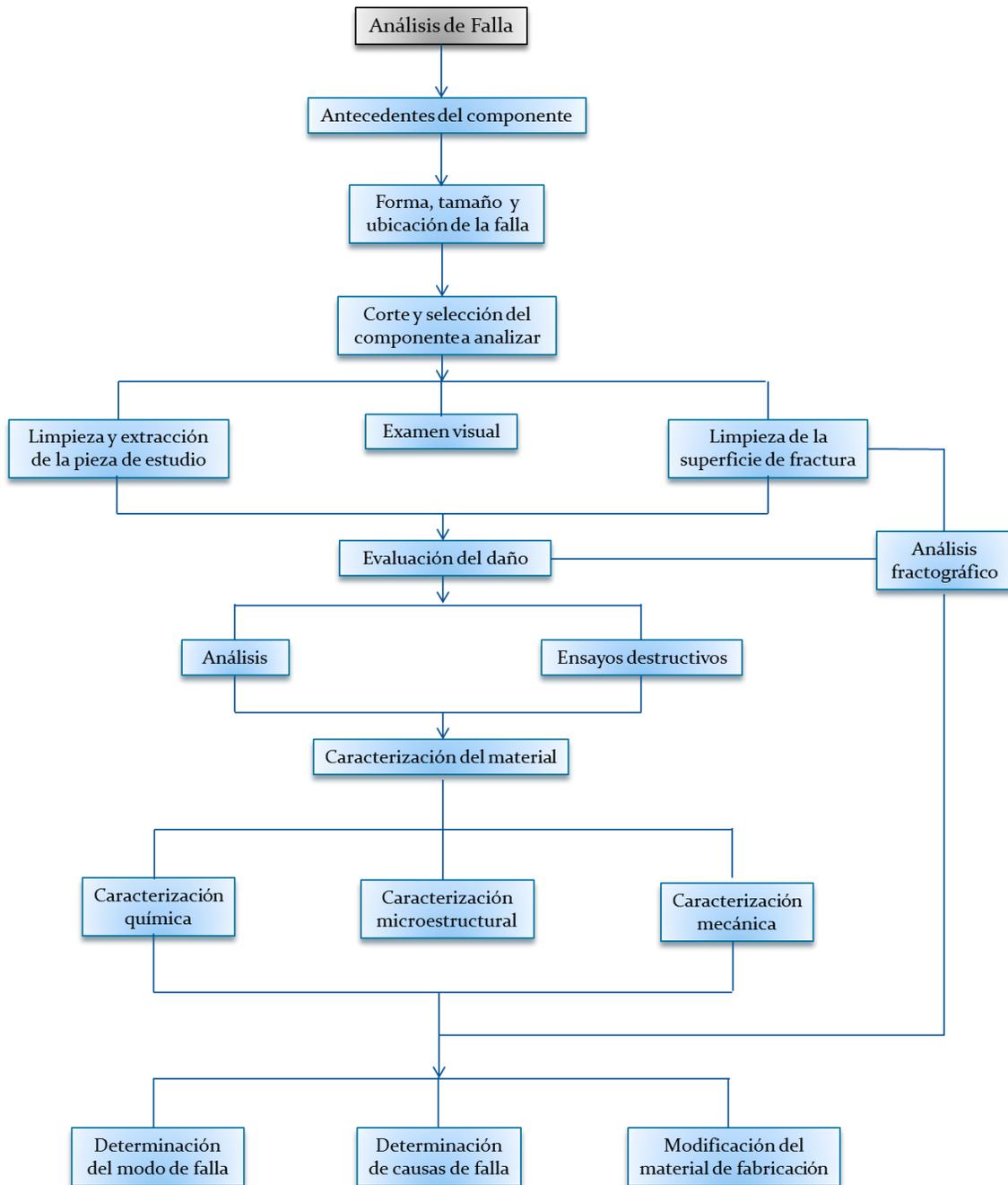


Figura 24. Diagrama de bloques de la metodología experimental

3.2 Examen visual

La falla presentada en los paneles de enfriamiento se localizó en la sección correspondiente al panel C la cual presentaba una densa capa de óxido y una serie de grietas en la dirección transversal localizadas en la superficie del tubo. De acuerdo con el diseño del EAF, en el panel de enfriamiento sección C se encuentra localizada la campana de extracción de humos, la cual funciona como un concentrador de calor debido a la extracción de todos los gases y vapores generados durante el proceso de fusión.

3.2.1. Limpieza y extracción de la pieza.

Una vez obtenida la muestra se procedió a remover la mayor cantidad de óxido que se pudiera sin afectar el área de interés esto utilizando aire comprimido, un cepillo de cerdas de plástico y una brocha de 25 mm. Una vez limpia la pieza se obtuvo las medidas de diámetro (interno y externo), espesor y longitud. En la Figura 25a se muestra una vista macroscópica del tubo, en la Figura 25b se muestran las medidas exactas representadas con un isométrico. [18].

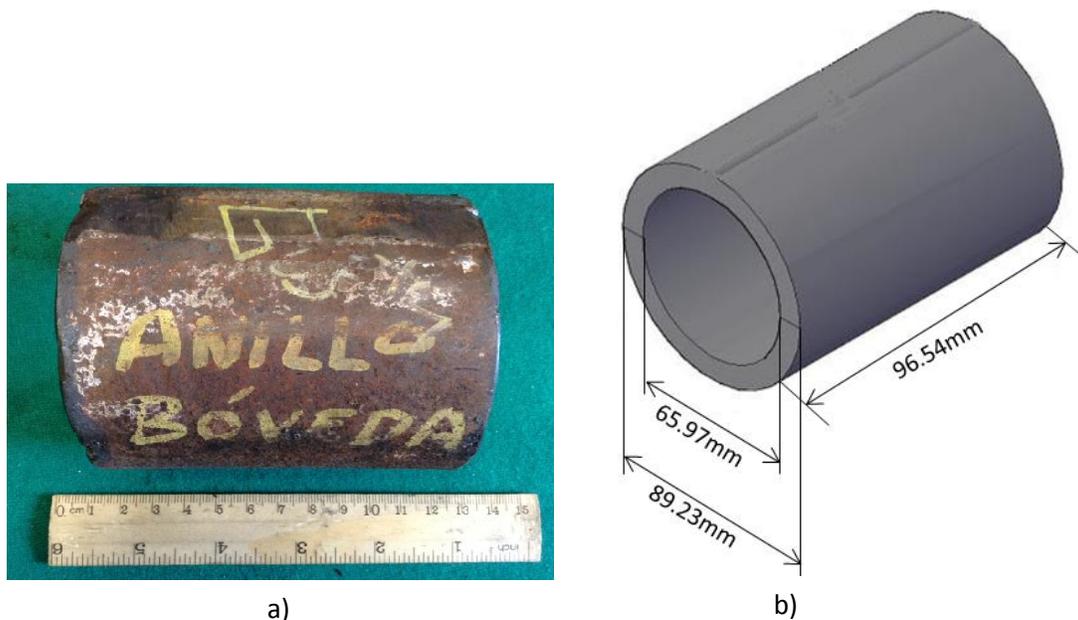


Figura 25. Sección de estudio. a) Vista macroscópica de la sección de panel, b) Mediciones exactas de la sección de estudio.

3.2.2 Corte de la pieza

Para poder observar con más detalle la trayectoria de las grietas se procedió a cortar en dirección longitudinal del tubo (media caña) para de esta forma poder identificar cual era la zona más dañada y así poder enfocar el estudio en esa área. Como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Corte de la sección del tubo a media caña

3.2.3 Limpieza de la superficie de fractura

La superficie de fractura se encontraba con una ligera capa de restos de escoria en la superficie, además de la presencia de una ligera capa de corrosión, por lo que para su examen macroscópico se limpiaron ambas partes de la muestra extraída tanto de la superficie externa como interna. El procedimiento de limpieza de las superficies es el siguiente. [18]

1. Soplado con aire seco
2. Limpieza en baño ultrasónico sumergiendo por completo la superficie de fractura en una solución desengrasante. La pieza se colocó en un vaso de precipitados para evitar formar un par galvánico. Lo anterior se realizó durante un tiempo de 15 minutos
3. Limpieza de un baño ultrasónico por inmersión en alcohol etílico, igualmente las superficies de fractura se sumergieron por completo en el alcohol durante un tiempo de 10 minutos.
4. Secado de las superficies por unos 15 minutos en una secadora de aire a temperatura ambiente.

Al final de los 4 pasos de limpieza mencionados anteriormente, la pieza se presenta en las condiciones que muestra la Figura 27.



Figura 27. Sección del área dañada después de limpieza

3.2.4 Preservación de las superficies de fractura

Las superficies de fractura fueron utilizadas para el examen macroscópico y microscópico, esto para poder identificar marcas en la superficie de fractura que nos permitan conocer el mecanismo operante, además haciendo uso del microscopio electrónico de barrido (MEB) JEOL 6300, para este análisis se cortaron las muestras donde se preservaron las superficies de fractura, estas piezas fueron de aproximadamente 4 mm de espesor y 4 cm de largo, dichas dimensiones son necesarias para poder ser introducidas al mismo como se puede observar en la Figura 28.

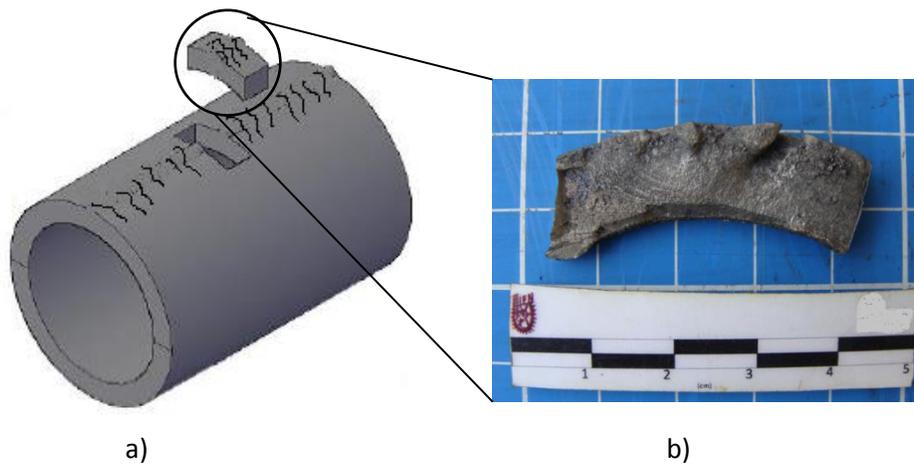


Figura 28. superficie de fractura: a) Isométrico representando el área de donde se obtuvo la superficie de fractura y b) superficie de fractura para su análisis en microscopia electrónica.

3.3 Caracterización del material.

Para la caracterización mecánica del material se tomaron muestras correspondientes a cada una de las zonas de estudio, como son la sección afectada por calor y la sección de material sin afectación por calor, donde se analizó las direcciones longitudinal, transversal y superficial, el muestreo se realizó a partir de un tubo retirado de servicio de un panel de enfriamiento del EAF.

Con el fin de poder determinar las especificaciones del material se realizaron las correspondientes pruebas de laboratorio, evaluando propiedades mecánicas mediante pruebas de dureza, y tensión así como un análisis metalográfico y químico para determinar los componentes del material, finalizando con un estudio en microscopia electrónica de barrido.

3.3.1 Caracterización microestructural

Se realizó la caracterización microestructural en la zona afectada por calor y la zona sin daño con el propósito de conocer la distribución de fases en la microestructura, dicha caracterización se realizó en las tres direcciones: longitudinal, superficial y transversal. La caracterización se realizó en base a la norma ASTM E-3 [19], basándonos en dicha norma las muestras se cortaron mediante disco abrasivo haciendo uso de un refrigerante con el fin de evitar modificar la microestructura.

Posteriormente las muestras se montaron en baquelita fenólica para tener una mejor manipulación de la muestra para así desbastarlas haciendo uso de lijas de agua de grados 100, 220, 320, 400, 600, 1000, 1500 y 2000 para después ser pulidas con alúmina de 1.0, 0.3 y 0.05 μm mediante un disco rotatorio hasta obtener una superficie acabado espejo como se muestra en la Figura 29. [19, 20, 22].

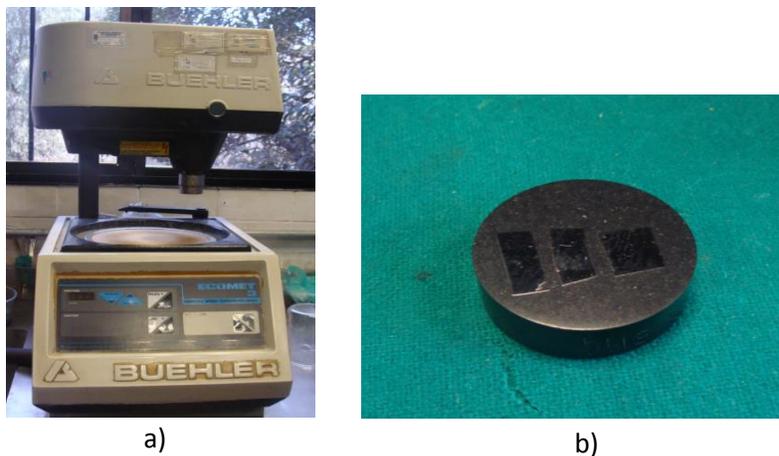


Figura 29. Probeta para análisis metalográfico. a) Equipo utilizado para pulido de probeta, b) Aspecto macroscópico de la probeta para MO.

Finalmente las probetas fueron atacadas con Nital 2% durante 5 segundos para observar la microestructura. [21]

3.3.2 Análisis químico

EL análisis químico (AQ) se realizó mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica conocida comúnmente como análisis por chispa, en donde se obtuvieron los porcentajes en peso de los elementos constituyentes del material para realizar esta prueba se utilizaron 3 quemas como se muestra en la Figura 30.[22].

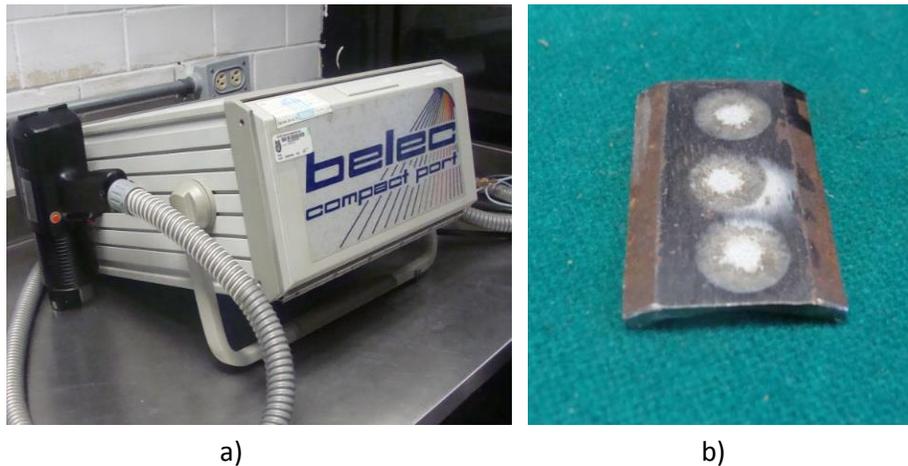


Figura 30. Análisis químico. a) equipo utilizado para realización de AQ. b) quemas realizadas en la superficie de la muestra.

3.4 Caracterización mecánica

3.4.1. Ensayo de tensión uniaxial

Se realizó la caracterización mecánica del material mediante ensayos de tensión con la finalidad de obtener el esfuerzo de cedencia (σ_0), la resistencia máxima (UTS). Estas probetas se maquinaron de acuerdo a la norma ASTM E8. Las pruebas de tensión uniaxial se llevaron a cabo dentro de la empresa de Tenaris-Tamsa en el laboratorio de calidad mediante una maquina universal a temperatura ambiente y aire de laboratorio [23]

3.4.2 Prueba de dureza

Para la prueba de dureza se realizaron 5 mediciones utilizando un probador de dureza de banco tipo Rockwell (HRB). Las mediciones se tomaron con un indentador de 1/16" de pulgada de carburo de tungsteno, evaluando la dureza Rockwell B utilizando un durómetro de banco Hardness Test Albert Gnehm con capacidad de carga de 100 KgF, como el que se muestra en la figura 31 [24].



Figura 31. Durómetro Rockwell utilizado para la prueba de dureza HRB.

3.4.3 Prueba de micro dureza Vickers

Para la prueba de micro dureza se realizaron 3 mediciones utilizando un probador de micro durezas de banco, microhardness Tester, realizando las pruebas a temperatura ambiente y aire de laboratorio. Esta prueba se realizó de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM E-384 [25].

IV Resultados

4.1 Caracterización del material

Dichos ensayos mencionados con anterioridad fueron realizados en ambas zonas (zona sana y zona afectada por calor); a excepción de la prueba de tensión debido a requerimientos de material.

4.1.1 Análisis químico

El análisis químico del material de fabricación del panel de enfriamiento dio como resultado los valores que se muestran en la tabla 3 en conjunto con los valores del análisis químico realizado en la empresa. Este análisis se muestra en el anexo 2. Realizando la comparación de los valores obtenidos por el análisis a los de la norma de fabricación ASTM A-106. [26]

Tabla 3. Composición química del material analizado.

| Elemento | Composición de material analizado (%). | Composición de material de acuerdo a la norma ASTM A-106 (% max). |
|----------|--|---|
| C, max | 0.19 | 0.30 |
| Mn | 0.80 | 0.29-1.06 |
| Si, min | 0.31 | 0.10 |
| P, max | 0.006 | 0.035 |
| S, max | 0.0018 | 0.035 |
| Mo, max | 0.010 | 0.15 |
| Cr, max | 0.08 | 0.40 |
| V, max | 0.000 | 0.08 |
| Nb | 0.00 | -- |
| Ni, max | 0.03 | 0.40 |
| Cu, max | 0.070 | 0.40 |
| Sn | 0.008 | -- |
| Al | 0.027 | -- |
| Ti | 0.000 | -- |
| B | 0.00 | -- |
| As | 0.002 | -- |
| Ca | 0.0016 | -- |

4.1.2 Caracterización microestructural.

En la Figura 32 a) y b) se muestra el aspecto de las inclusiones no metálicas para la sección transversal y longitudinal respectivamente, dichas inclusiones fueron identificadas como óxidos globulares tipo D de serie delgada de acuerdo a la norma: NOM-B-308-1986. En la tabla 4 se muestran las características de las inclusiones en el acero en la dirección transversal y longitudinal.

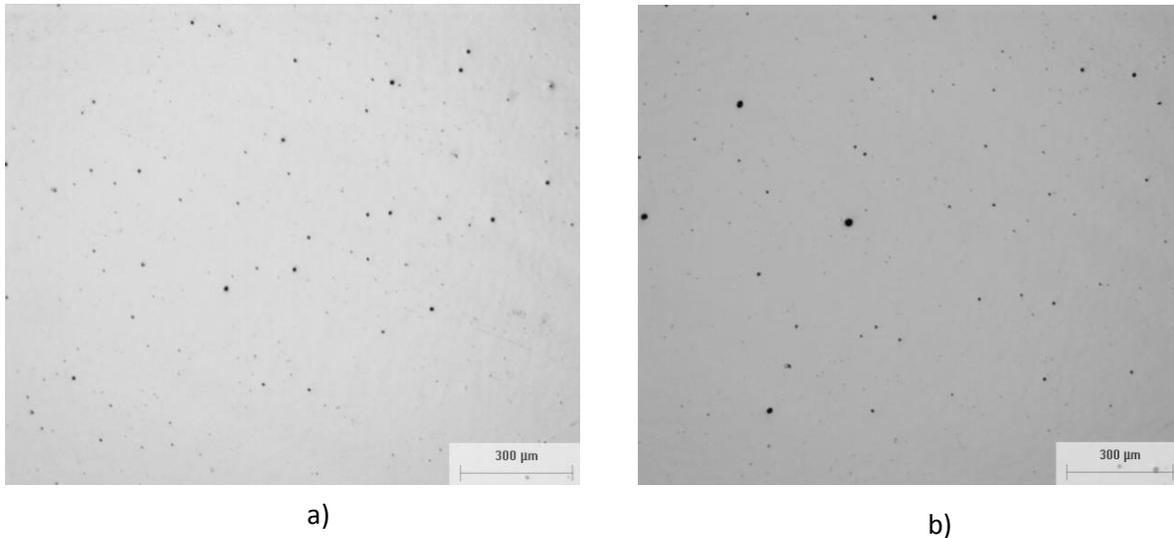


Figura 32. Tipo y forma de las inclusiones no metálicas: a) dirección Transversal y b) dirección longitudinal. MO sin ataque químico 100X.

Tabla 4. Características de las inclusiones presentes en el acero

| Dirección de prueba | Tipo | Serie | Diámetro (µm) | % inclusión |
|---------------------|------|---------|---------------|-------------|
| Longitudinal | D | Delgada | 4.09 | 0.18 |
| Transversal | D | Delgada | 5.38 | 0.19 |

En la Figura 33 a) y b) se muestra la microestructura del acero en la dirección longitudinal y transversal, respectivamente, donde se muestra que la microestructura en la dirección longitudinal muestra la presencia de grano equiaxial y zonas de ferrita, mostrando una distribución uniforme en cuanto a las zonas de ferrita, mientras que en la dirección transversal se observan granos de ferrita (zonas blancas) y colonias de perlita (zonas oscuras), presentando una estructura bandeada, como resultado del proceso de conformado en caliente del material.

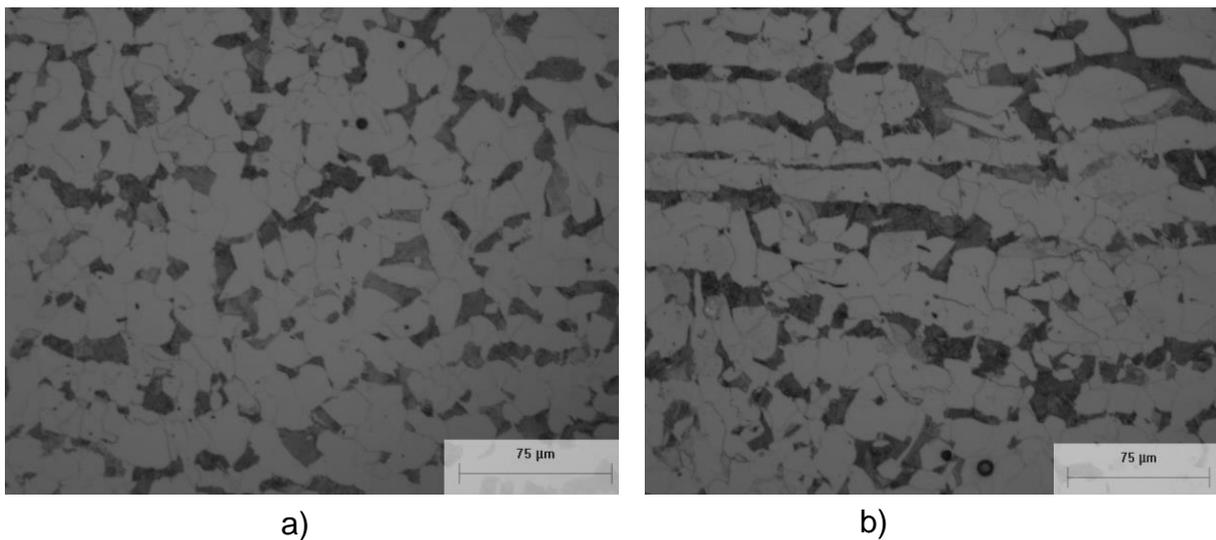


Figura 33. Microestructura del acero obtenida por MO atacado químicamente Nital 3% 500X: a) dirección longitudinal, b) dirección transversal.

En la tabla 5 se muestra el análisis microestructural en donde se reporta el tamaño de grano y % de fases presente en la material sujeto a estudio.

Tabla 5. Análisis microestructural

| Análisis microestructural | |
|-------------------------------|-------|
| Tamaño de grano(ASTM) | 9.5 |
| Tamaño de grano μm | 13.5 |
| %Ferrita longitudinal | 78.60 |
| %Perlita longitudinal | 21.39 |
| %Ferrita transversal | 75.81 |
| %Perlita transversal | 24.18 |

4.1.3. Caracterización Mecánica.

4.1.3.1 Ensayo de tensión uniaxial.

En las tablas 6 y 7 se muestran los resultados de los ensayos de tensión uniaxial realizados al material en la zona sana realizada en el laboratorio de calidad de Tenaris-Tamsa, así como los requerimientos del material de acuerdo a su norma de fabricación ASTM A-106.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de material sano

| Dirección de ensayo | Cedencia σ_0 (MPa) | Cedencia σ_0 (MPa) ASTM A-106 | UTS (MPa) | UTS (MPa) ASTM A-106 | Elongación (%) | Elongación (%)ASTM A-106 |
|---------------------|---------------------------|--------------------------------------|-----------|----------------------|----------------|--------------------------|
| Longitudinal | 235 | 230 | 437 | 400 | 39 | 31 |
| Transversal | 221 | 215 | 424 | 410 | 20 | 16 |

En la tabla 6 se muestran los resultados del ensayo de tensión del material con el que fue fabricado el panel de enfriamiento, comparando los valores requeridos para su fabricación de acuerdo a la norma ASTM A-106, mostrando que el material cumple con cada uno de los valores de fabricación.

4.1.3.2. Prueba de dureza Rockwell B y Microdureza Vickers.

En las tablas 8 y 9 se presentan los resultados de las pruebas de dureza Rockwell B y microdureza Vickers respectivamente realizadas al material en la zona sana y la zona afectada por calor.

Tabla 7. Valores de HRB en zona sin daño y zona afectada por calor

| Zona | Dureza HRB | | | | | Promedio (HRB) |
|----------|------------|----|----|----|----|----------------|
| Sin daño | 85 | 83 | 84 | 86 | 82 | 84 |
| Afectada | 78 | 77 | 79 | 80 | 78 | 78 |

Tabla 8. Valores de microdureza Vickers en zona sin daño y zona afectada por calor

| Zona | Dureza Vickers | | | | | Promedio (Vickers) |
|----------|----------------|-----|-----|-----|-----|--------------------|
| Sin daño | 185 | 188 | 192 | 193 | 190 | 187 |
| Afectada | 146 | 152 | 149 | 155 | 142 | 149 |

Los resultados obtenidos mediante los ensayos de dureza muestran que existe una disminución en la zona afectada por calor con respecto a la zona de material sano.

V. Análisis de resultados

5.1. Análisis microestructural

5.1.1. Influencia de las inclusiones no metálicas

Las inclusiones son compuestos no metálicos que pueden ser óxidos, nitruros o sulfuros, la tenacidad de dichas partículas es muy pequeña por lo que pueden llegar a deformarse o fracturar bajo la acción de cargas con relativa facilidad, dando origen a la aparición de microgrietas que pueden alcanzar tamaños entre 1 y 10 μm . las inclusiones más favorables para la iniciación de una fractura son aquellas que por su naturaleza poseen una unión muy fuerte con la matriz, esta característica depende de su coeficiente de expansión térmica, en aquellos casos en los que el coeficiente más pequeño es el de la inclusión, esta quedará totalmente embebida por la matriz durante el enfriamiento; en cambio, cuando el coeficiente de expansión térmica es mayor en la inclusión, la mayor contracción de dicha inclusión al enfriar provocará la tendencia a una descohesión partícula-matriz, dando pie al inicio de microgrietas.

5.1.2 Microestructura de zona afectada por calor

La microestructura que presenta el metal en la sección transversal en la zona no afectada por calor se muestra en la Figura 34 a), b) y c), en la cual se puede observar granos de ferrita (zonas blancas) y colonias de perlita (zonas oscuras) presentado una estructura bandeada, como resultado del proceso de conformado.

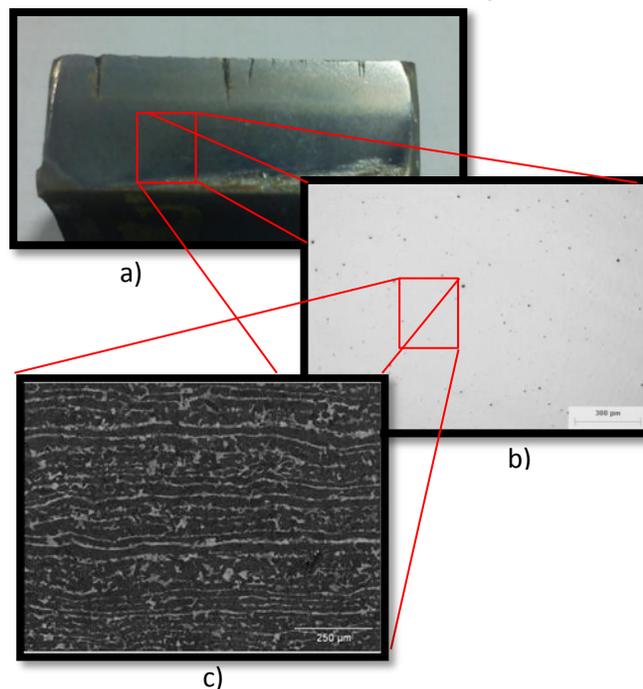


Figura 34. Microestructura en la zona no afectada por calor. a) Vista macroscópica de una sección del tubo, b) inclusiones no metálicas MO sin ataque 100X y c) microestructura bandeada con ataque químico 100X.

En la Figura 35 se presenta la microestructura del metal dañado (afectado por calor en servicio) donde se pueden observar características microestructurales típicas de esferoidización, es decir se nota una gran disminución de las colonias de perlita.

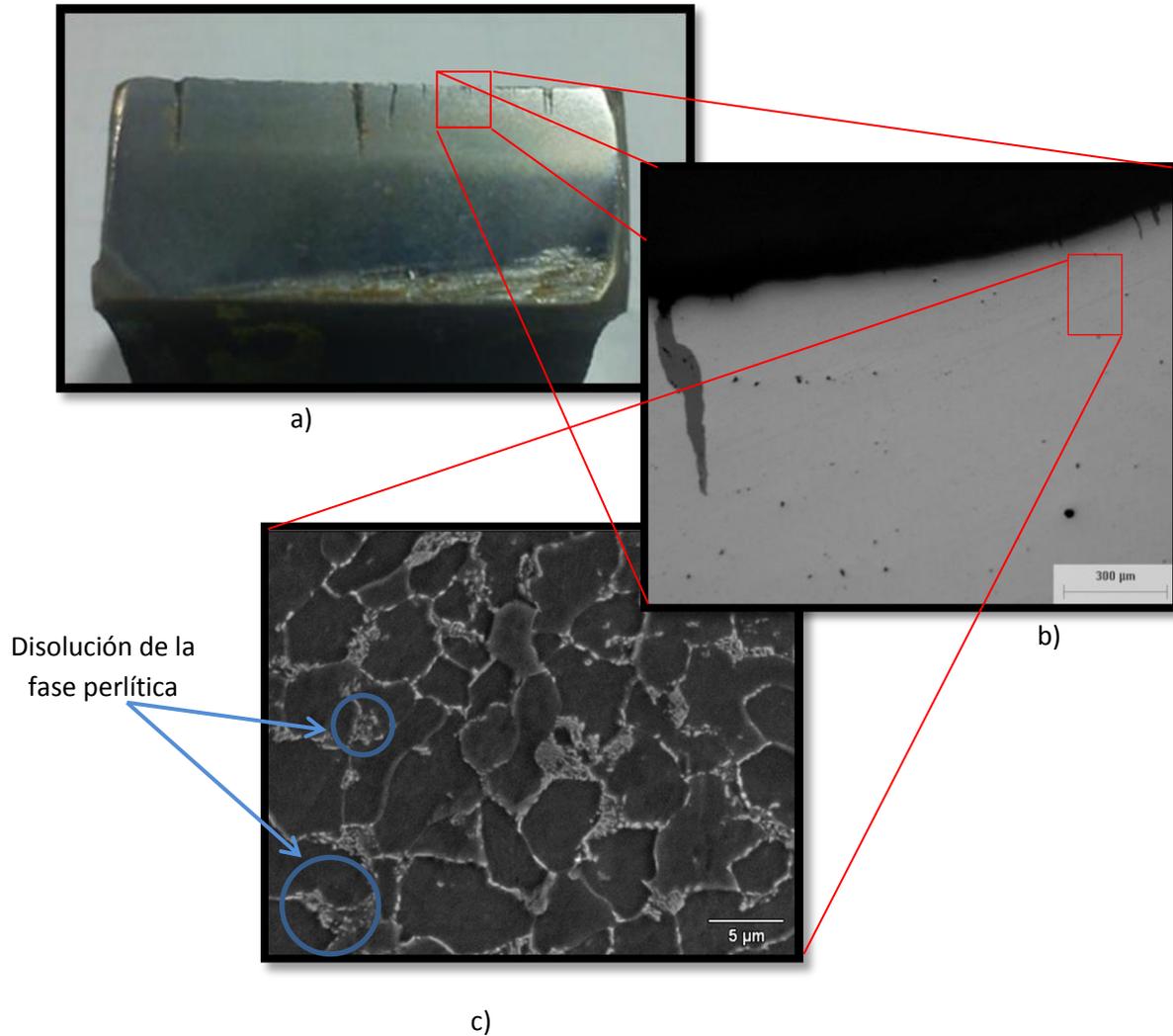


Figura 35. Microestructura en metal afectado por calor. a) Vista macroscópica de una sección del tubo, b) inclusiones no metálicas MO sin ataque 100X y c) microestructura bandeada con ataque químico 100X.

En la Figura 35 se muestra la microestructura de la zona que se encuentra a afectada térmicamente, en donde se puede observar que:

1.- La zona que se encuentra afectada térmicamente (generación de ciclos térmicos) da como resultado una significativa refinación de grano Tabla 9, dicha refinación de grano ocurre por la nucleación de nuevos granos una vez que las líneas de temperatura A_1 y A_3 son atravesadas, debido a que la energía interna de los metales deformados en frío es mayor.

2.- Se presenta esferoidización en la perlita causada por el calentamiento de la superficie, ya que este supera las temperaturas de transformaciones (A_3 y A_{CM}) de acuerdo al diagrama hierro carbono. Los tiempos de esferoidización de la perlita oscilaran en un intervalo de 15 a 25 horas. La tasa de esferoidización se ve afectada de acuerdo a la microestructura inicial, las partículas de cementita laminar presentes en la perlita, tienen un gran área interfacial por unidad de volumen de partícula. Con el fin de reducir la energía interfacial, las láminas o placas de cementita se rompen en pequeñas partículas que eventualmente asumen forma esférica, dando como resultado la disminución de dureza. Como se muestra en la Figura 36.

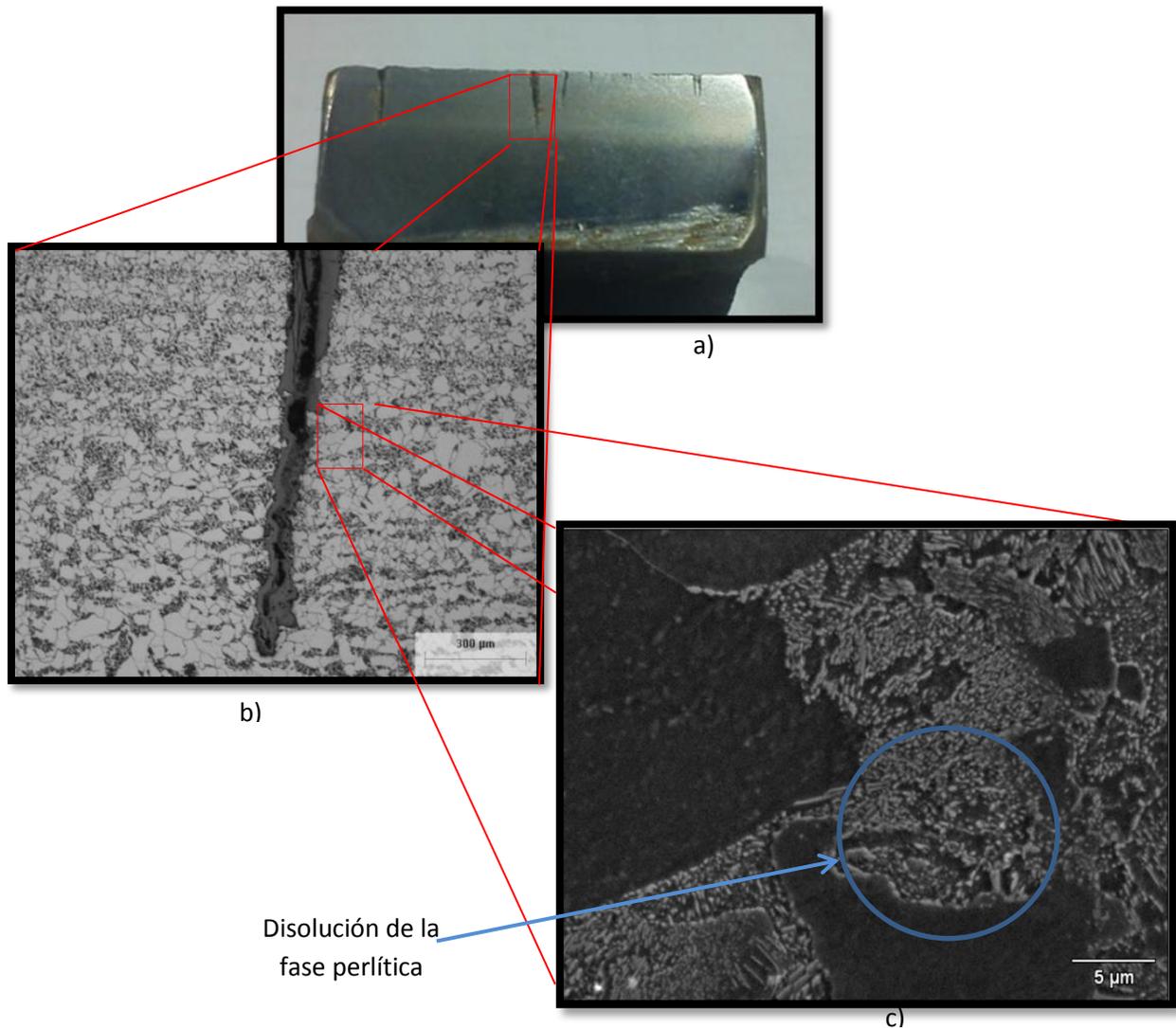


Figura 36. Esferoidización en zona afectada por calor. a) Vista macroscópica de una sección del tubo, b) microestructura bandeada con ataque químico 100X y c) microestructura donde se observa la disolución de la fase perlítica con ataque químico 3000X.

3.- El análisis de las micrografías de la microestructura nos permitió obtener el tamaño de grano y el porcentaje de fases presentes en el material como se muestra en la Tabla 9. La reducción de la fase perlítica en la matriz de la zona afectada por calor, se disminuyó en un 71% en la dirección longitudinal y un 69% en la dirección transversal con respecto al porcentaje inicial en la zona sana. Esta disminución de la fase perlítica en la matriz fue causada por la disolución de las laminillas de cementita, seguido de su esferoidización. Dichas partículas generadas por la disolución de la perlita se dispersan en la matriz ferrítica llegando a migrar hacia los límites de grano.

Tabla 9. Resultados análisis microestructural

| | Sección sana | Sección afectada por calor |
|-------------------------------|--------------|----------------------------|
| Tamaño de grano(ASTM) | 9.5 | 11.5 |
| Tamaño de grano μm | 13.5 | 6.7 |
| %Ferrita longitudinal | 78.60 | 84.98 |
| %Perlita longitudinal | 21.39 | 15.01 |
| %Ferrita transversal | 75.81 | 83.16 |
| %Perlita transversal | 24.18 | 16.83 |

5.2 Caracterización mecánica

5.2.1 Ensayo de tensión uniaxial.

Como se muestra en la Tabla 6 el material cumple con todos los requerimientos establecidos por su norma de fabricación (ASTM-A106), sin embargo dicho material no pudo ser caracterizado en la zona afecta por calor debido a los requerimientos de dimensiones para la fabricación de probetas de ensayo de tensión.

5.2.2 Prueba de dureza

Se realizó la prueba de dureza HRB en la zona afectada por calor y la zona sana mostrando los resultados en la Tabla 7. Además se realizó las pruebas de micro dureza en ambas zonas como se muestra en la Tabla 8.

Debido a que la variación de la dureza HRB no fue muy significativa se realizó la medición de micro dureza como se muestra en la Tabla 8, en donde se puede notar una disminución significativa de dureza, dicha disminución fue causada por la esferoidización de la perlita.

5.3 Análisis fractográfico de las superficies de fractura

5.3.1 Examen macroscópico

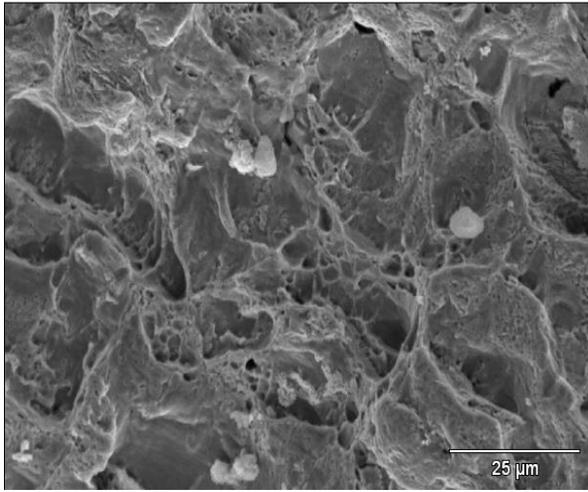
1.- En la Figura 27 se observa una sección del tubo analizado, en donde se pueden observar grietas en la superficie del cuerpo del tubo, tomando en cuenta que la conductividad térmica del acero es pobre a temperaturas bajas, durante el calentamiento se originan tensiones térmicas que dan lugar a deformaciones y agrietamientos en especial en aquellos materiales que han sido deformado en frío.

2. En la Figura 28 se puede observar que la superficie de fractura posee un aspecto brillante ya que en la fatiga las superficies generadas tienden a frotarse bajo la acción del esfuerzo, además la presencia de “marcas de playa” típicas de fatiga, hay que tomar en cuenta que este frotamiento puede borrar algunas marcas de playa. Además se observa que no existe una cantidad de deformación considerable en la fractura.

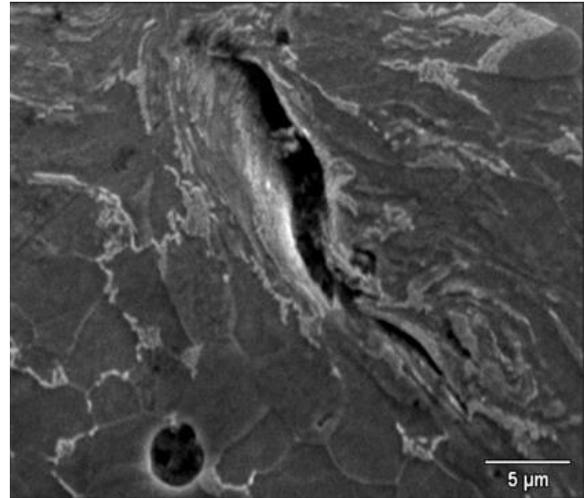
5.3.2 Examen microscópico

La observación fractográfica a nivel microscópico se realizó mediante la técnica de microscopia electrónica de barrido (MEB JEOL 6300) con señal de electrones secundarios (SE), mostrando las superficies correspondientes a las dos zonas de estudio, zona sana y zona afectada por calor. Se observaron características fractográfica muy específicas para la zona de estudio (afectada por calor) como: influencia de la microestructura sobre la propagación de grietas, mecanismos de fractura operante, defectos en el material debido a las condiciones de empleo.

En general se encontraron características típicas de la fractura inducida por fatiga térmica como son: fractura transgranular, microhuecos y micro grietas generadas por la formación de microhuecos actuando como concentrador de defectos reticulares como se puede observar en la Figura 37 a) y b).



a)



b)

Figura 37. Análisis fractográfico de la zona afectada por calor: a) Presencia de microhuecos en el material y b) presencia de microgrietas. MEB 1000X.

VI. Conclusiones.

El análisis de falla realizado a una sección del panel del EAF sometido a exposición térmica intermitente (ciclos térmicos) nos permitió generar las siguientes conclusiones basándonos en el diagrama causa y efecto mostrado en el anexo 1:

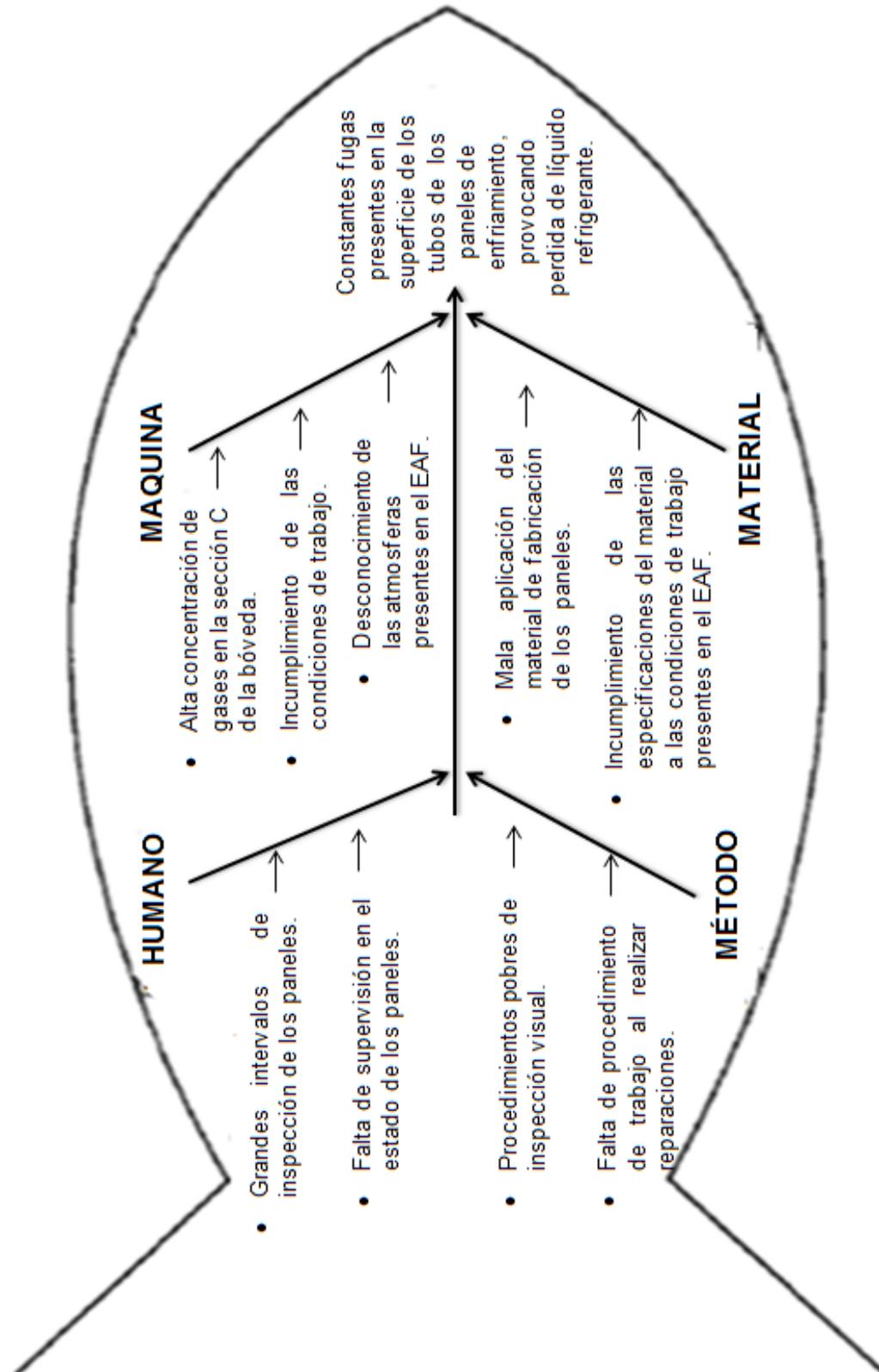
1. Las propiedades del material de fabricación usado en el panel de enfriamiento del EAF (microestructura, composición química y propiedades mecánicas) fueron evaluadas experimentalmente, con el fin de comparar dichas propiedades nominales con las especificadas en los estándares de fabricación. Por lo que se descarta la posibilidad de que la falla ocurriese debido a algún problema de incumplimiento de propiedades del material.
2. La microestructura del material de fabricación (ASTM A-106) sometido a altas temperaturas, muestra la disolución y coalescencia de las laminillas de cementita presentes en la fase perlítica del material, seguido de la precipitación de dichas laminillas en los límites de grano, dando como resultado un menor porcentaje de la fase perlítica en la matriz y generando la pérdida de dureza en la zona dañada.
3. Reducción del porcentaje de fase perlítica en un 70% ocasionado por la ruptura o segmentación progresiva de las laminillas de carburo de hierro (cementita) y precipitación de esta en los límites de grano.
4. De los resultados obtenidos en el análisis fractográfico, se determina que la causada de falla fue inducida por fatiga térmica afectada por corrosión, debido a las características presentadas en el material, además de la degradación microestructural causada por la elevada temperatura de trabajo llegando a producir ciclos de calentamiento y enfriamiento en presencia de una atmosfera agresiva rica en CO y CO₂.
5. Debido a las conclusiones ya mencionadas y a las condiciones de trabajo de los paneles, se propone hacer uso de un panel de enfriamiento fabricado de tubería basada en la norma ASTM-A213 "Tubos Ferríticos y austeníticos sin Costura para Intercambiadores de calor, Calderas y Calentadores" debido a que su composición química (mayor contenido de cromo, molibdeno y níquel) poseen buenas propiedades en las condiciones de trabajo ya mencionadas. Como son mayor resistencia a la fatiga térmica y buena resistencia a elevadas temperaturas. Los elementos aleantes de importancia del material propuesto se encuentran mostrados en la tabla del anexo 3 haciendo la comparación con el material analizado.

Referencias bibliográficas

- [1] ASM Metals handbook volume 11 “Failure analysis and prevention”. ASM International Handbook Committee. Materials Park, Ohio 1999
- [2] Gonzales Velázquez Jorge Luis “Mecánica de fractura” 2A ED. Editorial Limusa 2012. 188 p.
- [3] Daniel P. Dennies. ASM International “How to organize and run a failure investigation” Editor Materials Park Ohio. ISBN: 44073-0002. 2005. 225 p.
- [4] R. Keith Mobley “Root cause failure analysis”. Editor Butterworth-Heinemann. ISBN: 10987-6543. 1999. 324P.
- [5] Robert D. Port, Harvey M. Herro “The Nalco guide to boiler failure analysis”.second edition by Nalco Company Abstrac. 1999. 315 p.
- [6] Askenland Donald R., “Ciencia e ingeniería de las materiales”, Tercera edición, International Thomson Editores, México 1998. 780 p, ISBN 0-534-93423-4,
- [7] Landolt-Bornstein “Diffusion in solid metals and alloy” Vol.26. editorial Springer 1990. 743 p.
- [8] Bernal A. José Ernesto “Endurecimiento superficial del acero por difusión del carbón en hierro gamma” Tesis maestría en ciencias. UANL.
- [9] Callister William D. Jr, “Materials Science and Engineering”, Quinta edición, editorial John Wiley & Sons. Inc, Estados Unidos De América 2000, ISBM 0-471-3213-7.
- [10] Francisco Javier Piñeiro cruz “corrosión a altas temperaturas” apuntes de docencia. UANL. 2010.
- [11] Moore JJ. Chemical Metallurgy. Second Edition. Editor Butter Worth-Heinemann. ISBN: 978-0-408-05369-3
- [12] ASM Metals Handbook Vol.13 “Corrosion”. ASM International Handbook Committee. Materials Park, Ohio. ISBN: 44073-0002. 1992. 3455 p.
- [13] ASM V.Ramachandran, A.C. Raghuram “Failure Analysis of Engeering Structures”. Materials Park, Ohio. 1997. 466 p.

-
- [14] Manuel Weldg “Fatiga térmica-efecto de la temperatura” University College of Engeneering 2003.
- [15] ASM Metal Handbook Vol. 12 “Fractography”. ASM International Handbook Committee Materials Park, 1887 Ohio. 856 p.
- [16] Laura Sánchez García “Efecto de elementos reactivos en recubrimientos base aluminuro de hierro mediante “CVD-FBR” para aplicaciones en turbinas supercríticas (2008).
- [17] P. Calvillo, G. Atxaga, A.M. Irisarri “Estudio del comportamiento a la fluencia de un acero tipo P91” (2001).
- [18] Gonzales Velázquez Jorge Luis Op. Cit. Pag.51.
- [19] ASTM E-3-01, 2001 “Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens” ASMT International.
- [20] ASTM E-1382-97, 2010 “Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis” ASTM International.
- [21] ASTM E-407-07 “Standard Practice for Microetching Metals and Alloy” ASTM International. 2012
- [22] ASTM Standart E-3-93, “Standard Test Methods for Chemical Analysis of Tool Steels and Other Similar Medium and High Allow Steels” ASTM International. 2006.
- [23] ASTM Standard ASTM E 8 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallicfigura Materials”,2001
- [24] ASTM Standard ASTM E 10, “Standar Test Methos for Brinell Hardness of Materials”, Vol. 03.01, ASTM international, West Conshohocken, PA. 2001
- [25] ASTM E 384-11, “Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials” ASTM International. 2010.
- [26] ASTM A106/A 106M “Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service”. ASTM International.2006.

Anexos
Anexo 1





LABORATORIO QUIMICO
REPORTE DE ANALISIS QUIMICO

| |
|----------|
| 15/06/14 |
| e-mail |
| Aceria |

24 6 2014

DIA MES AÑO

Fecha de solicitud/Mail

No. Solicitud

Solicitante

Descripción de la muestra

Analysis quimico de muestra de Pared del EAF

| CLAVE ACERO PROCED. | NUMERO COLADA IDENTIF. | # | + | C | Mn | Si | + | P | S | # | + | Mo | Cr | + | V | + | Nb | Ni | + | Cu | + | Sn | Al | + | Ti | + | B | As | + | Ca | ppm | | | | FORMULAS | | | |
|---------------------------|------------------------------|------|------|------|-------|--------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|---|----|---|----|----|---|----|---|---|----|---|----|-----|---|---|---|----------|---|----|----|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | & | N | O | H | | & | CE | FR |
| | HORNO | 0.19 | 0.80 | 0.31 | 0.006 | 0.0018 | 0.10 | 0.08 | 0.000 | 0.00 | 0.03 | 0.070 | 0.008 | 0.027 | 0.000 | 0.0000 | 0.002 | 0.0016 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

