

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



ANÁLISIS DE FALLA METALÚRGICO
CASOS DE APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA PERUANA

Trabajo de suficiencia profesional para obtener el título de

INGENIERO MECÁNICO

AUTOR

Francisco Aurelio Rumiche Zapata

ASESOR:

Paul Pedro Lean Sifuentes

Lima, agosto 2020

Resumen

En el presente informe se presentan tres casos de aplicación del análisis de falla metalúrgico para determinar la causa raíz de falla de componentes siniestrados pertenecientes a tres sectores de la industria peruana.

Este informe se presenta como medio de verificación de la experiencia profesional del autor, quien se desempeña como Analista de Fallas Senior en el Laboratorio de Materiales PUCP; habiendo desarrollado en los últimos diez años más de 70 proyectos de análisis de falla y caracterización de materiales con diversas industrias: minería, hidrocarburos, alimentos, pesquería, farmacéutica, manufactura, entre otras.

El informe inicia con la presentación de conceptos y definiciones asociadas al análisis de falla metalúrgico. Luego de ello, se presenta la metodología de análisis empleada en el Laboratorio de Materiales PUCP, la misma que ha sido utilizada para el desarrollo de los casos de aplicación. Posteriormente se desarrolla extensivamente cada uno de los casos, presentando los antecedentes, los ensayos realizados, los resultados obtenidos, y las conclusiones. El objetivo final en cada caso es determinar la causa de falla y emitir recomendaciones, factibles de implementar, para evitar que la falla vuelva a ocurrir. Los casos a presentar corresponden a una zapata de oruga de una pala de movimiento de tierras, perteneciente a la industria de maquinaria pesada; una placa soporte de un reactor de sulfato de cobre perteneciente a la industria química; y una viga principal de una zaranda vibratoria correspondiente a la industria minera.

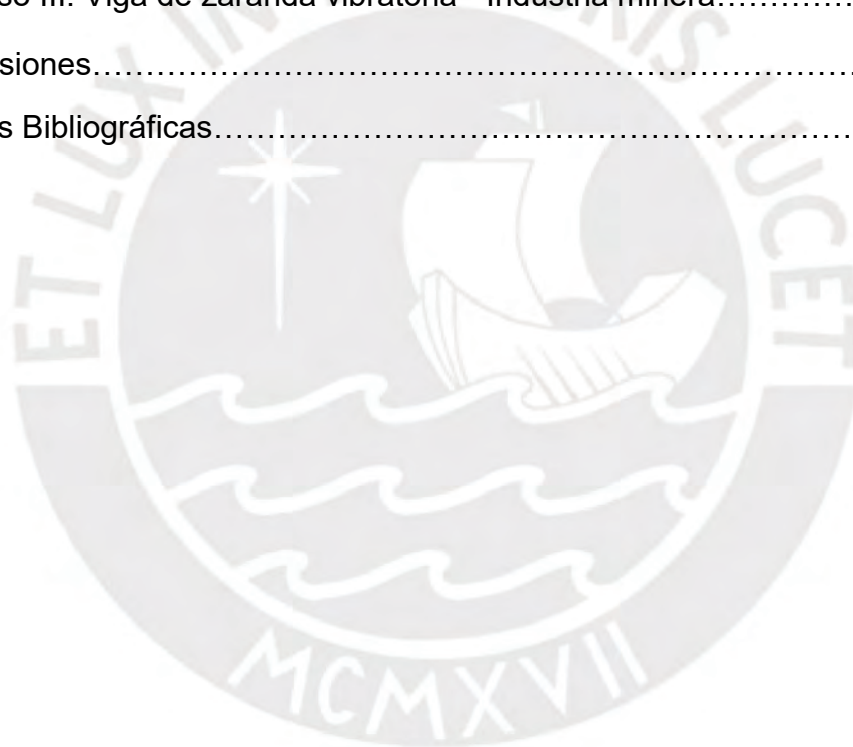
Finalmente, se presentan las conclusiones del informe profesional, haciendo énfasis en la importancia y eficacia del análisis de falla metalúrgico como una herramienta de la ingeniería para asistir en el desarrollo de la industria nacional.

Análisis de Falla Metalúrgico

Casos de Aplicación en la Industria Peruana

Contenido

1. Análisis de falla metalúrgico.....	4
2. Metodología del análisis de falla metalúrgico.....	12
3. Casos de estudio.....	19
a. Caso I: Zapata de oruga de pala - Industria de maquinaria pesada....	20
b. Caso II: Placa soporte de reactor - Industria química.....	35
c. Caso III: Viga de zaranda vibratoria - Industria minera.....	45
4. Conclusiones.....	55
Referencias Bibliográficas.....	56



Capítulo 1: Análisis de falla metalúrgico

El análisis de falla es una herramienta de la ingeniería empleada para determinar la causa raíz de problemas o situaciones que han derivado en el funcionamiento inapropiado de un sistema, máquina, equipo o componente.

Las consecuencias de estos problemas o situaciones pueden ser desastrosas, involucrando en el peor de los casos la pérdida de vidas humanas, y en el común de ellos, costos de diversa índole. Como ejemplo de la pérdida de vidas humanas se puede mencionar el caso de la deflagración de gas licuado de petróleo ocurrida en nuestro país, en el distrito de Villa el Salvador, en el mes de Enero del presente año [1]. En este accidente se perdieron 34 vidas [2] como resultado del impacto de la parte inferior de una cisterna de gas con un desnivel en la pista, y la alteración manual de la válvula interna del tanque para que permaneciera abierta en todo momento [3]. Por otro lado, en el caso de los costos económicos, un ejemplo representativo a nivel global es el relacionado a las fallas por corrosión. De acuerdo a un reciente estudio de NACE (National Association of Corrosion Engineers), el costo global asociado a problemas de corrosión ha sido estimado en US\$ 2.5 trillones [4]. En algunos casos, las consecuencias pueden involucrar tanto la pérdida de vidas humanas y costos, no solo a nivel económico, sino también a nivel social y ambiental. Como ejemplo de esta situación se puede mencionar la explosión de la plataforma petrolera Deepwater Horizon, y el consiguiente derrame de petróleo, en el Golfo de México (USA), ocurrido en Abril del 2010 [5]. Este derrame, considerado como el peor desastre ambiental producido por el hombre en los Estados Unidos, dejó como resultado 11 personas muertas, 17 heridos, y billones de dólares en pérdidas y demandas. Las investigaciones determinaron que la explosión y el derrame fueron causados por una serie de errores sistemáticos en el manejo de riesgos y falencias en la cultura de seguridad. La Figura 1 presenta fotografías de las consecuencias en el caso de la deflagración de gas licuado de petróleo en Villa el Salvador (a) y la explosión de la plataforma Deepwater Horizon en el Golfo de México (b).



(a)



(b)

Figura 1. Consecuencias de la deflagración de gas licuado de petróleo en Villa el Salvador [6] (a) y de la explosión de la plataforma petrolera Deepwater Horizon [7] (b).

En los dos casos mencionados líneas arriba se han producido una serie de eventos o incidentes que han dado lugar a una falla catastrófica. Estos eventos constituyen las causas de las fallas, y pueden tener su origen en factores físicos (mecanismos de degradación de materiales tales como corrosión, fatiga, o desgaste), en factores humanos (inspección deficiente, montaje inapropiado de equipos, fabricación inadecuada, etc.) o en factores subyacentes (entrenamiento inadecuado del personal, inapropiado proceso de verificación de las especificaciones, entre otros) [8]. El análisis de falla es un proceso que está justamente orientado a determinar estas causas. El proceso involucra una serie de etapas tales como la revisión de toda la información concerniente al elemento que ha fallado, entrevistas a los involucrados y testigos, ensayos de laboratorio, y diversos análisis de ingeniería tales como mecánica de la fractura, análisis de esfuerzos, simulación computacional, entre otros. El análisis de falla involucra además el trabajo con evidencia física, el dominio de fundamentos y principios de la ingeniería, y el empleo de herramientas analíticas. Dependiendo del caso el análisis de falla puede involucrar un trabajo interdisciplinario y se puede convertir en una actividad de alta complejidad, pero conducente siempre a mejorar la cultura de seguridad, a incrementar la confiabilidad y la eficiencia de los equipos de ingeniería, a disminuir costos, y a reducir impactos negativos en el ámbito social y/o ambiental.

Existen distintas aproximaciones para realizar un análisis de falla. En particular, el análisis de falla metalúrgico, que pertenece al campo de la metalurgia aplicada, es un proceso mediante el cual, empleando herramientas analíticas y experimentales de la ciencia de materiales y la metalurgia, se busca determinar la causa raíz física de falla de un componente, equipo, o sistema. Como resultado del proceso, además de conocer las causas de falla, se emiten recomendaciones, viables de implementar, tanto técnica como económicamente, para evitar que la falla vuelva a ocurrir. En este tipo de análisis, la evidencia física está constituida por el componente que ha fallado, el cual es sometido a una serie de pruebas y ensayos para generar resultados que contribuyan a determinar las causas de falla.

La Figura 2 presenta un ejemplo de aplicación del análisis de falla metalúrgico aplicado a un cable de acero fracturado, perteneciente a una grúa puente de una empresa manufacturera de nuestro país. En la figura se puede apreciar el cable fracturado, así como imágenes relacionadas a los diversos ensayos de materiales que han generado evidencia para determinar las causas de falla y sustentar las conclusiones. Tal como se puede visualizar en este ejemplo, el análisis de falla hace uso de herramientas de relativa simplicidad en su aplicación, como lo es una inspección visual a escala macroscópica; así como de herramientas analíticas más complejas, que permiten analizar el componente a escala microscópica, tal como lo es la espectroscopía de energía dispersiva (EDS) y la reconstrucción digital 3D de superficies; pasando por herramientas de común aplicación como lo son los ensayos de tracción y la microscopía electrónica de barrido. En este caso en particular, la causa raíz de falla fue la deficiente lubricación y protección del cable, la cual generó corrosión en el cable, reducción en la sección resistente, y consiguiente fractura.

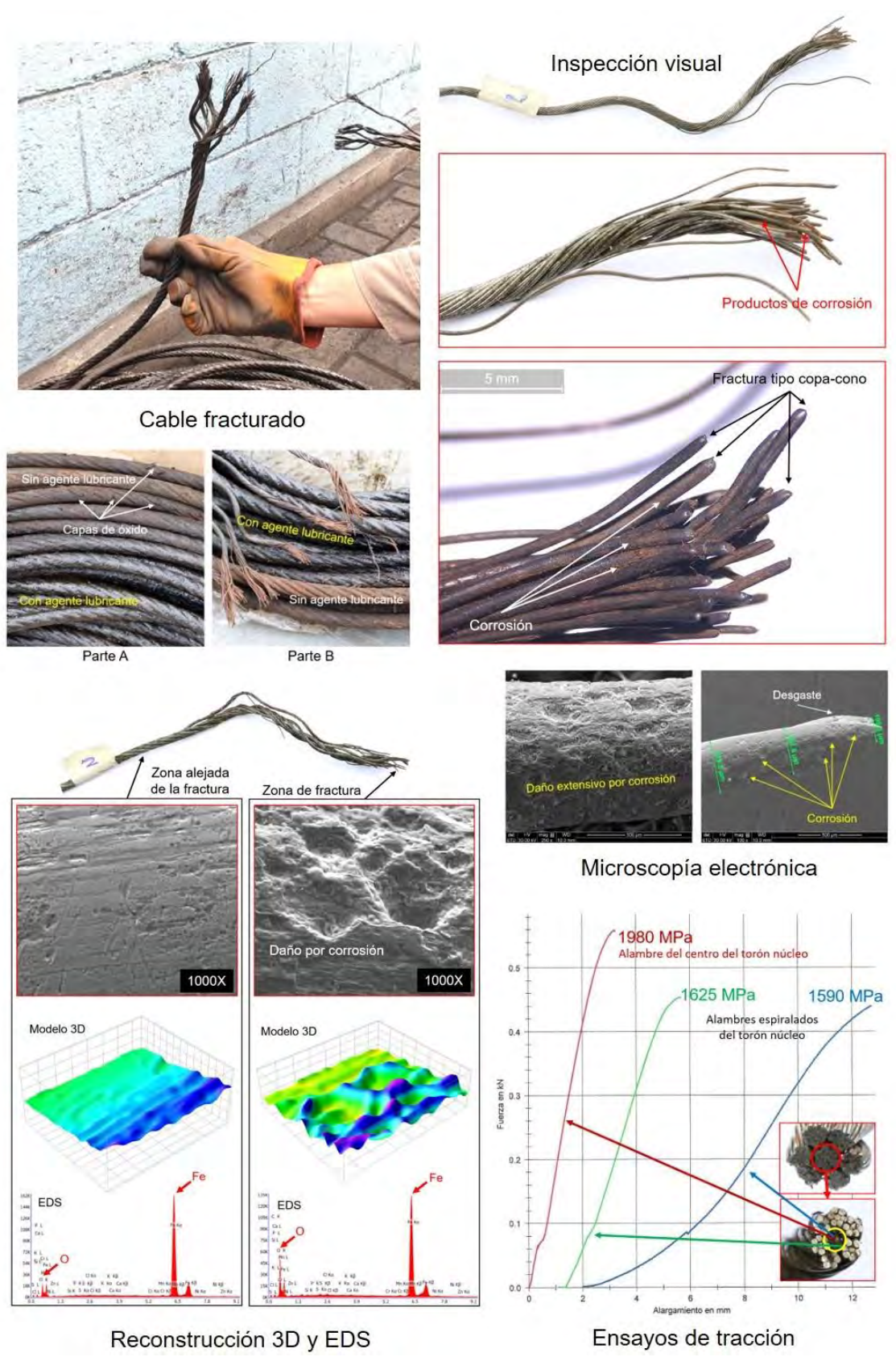


Figura 2. Imágenes correspondientes a un análisis de falla metalúrgico de un cable de acero fracturado. *Fuente propia.*

Las causas comunes de falla de un componente, que se pueden determinar mediante un análisis de falla metalúrgico, se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. **Diseño inapropiado:** Los componentes pueden fallar si se cometen errores en la etapa de diseño, por ejemplo, una subestimación de los esfuerzos de trabajo. Asimismo, el diseño de componentes con geometrías indeseables, que generan concentradores de tensiones, puede originar fallas durante el servicio. Una inadecuada selección de materiales en la etapa de diseño, un tratamiento térmico mal diseñado, o modificaciones inapropiadas a un diseño original, pueden producir también fallas.
2. **Errores durante la fabricación:** Existen diversas situaciones durante la fabricación de un componente que pueden derivar en la falla del mismo; como, por ejemplo, el empleo de materiales que no cumplen con las especificaciones, o procesos de manufactura aplicados de manera deficiente. Discontinuidades inherentes a ciertos procesos de fabricación, tales como fundición, soldadura, forja, y conformado, entre otros, pueden originar fallas en los componentes. Una de las causas más comunes de falla en componentes de aceros bonificados es la que corresponde a la deficiente aplicación del tratamiento térmico; la Figura 3 presenta fotografías de una rueda dentada que sufrió la fractura de un diente, y el deterioro masivo de la superficie de toda la rueda, como resultado de un inadecuado tratamiento térmico de bonificado.



Figura 3. Diente fracturado debido a un deficiente tratamiento de bonificado.

Fuente propia.

3. **Control de calidad e inspección deficiente:** Una inspección no realizada de acuerdo a estándares y códigos, o llevada a cabo con técnicas inadecuadas, puede derivar en la falla de un componente. Asimismo, el incumplir con los cronogramas de mantenimiento e inspección, o una inapropiada calibración de los correspondientes equipos o instrumentos, puede facilitar la ocurrencia de una falla.

4. **Condiciones de operación anormales:** Las vibraciones, el incremento súbito de temperatura, las sobrecargas, o la aplicación de esfuerzos para los cuales no está diseñado el componente, pueden generar la falla del mismo. Asimismo, el empleo de operadores no especializados o certificados para un determinado trabajo, e.g. conductores de equipos de maquinaria pesada, operadores de líneas de producción, etc. puede derivar en operaciones inadecuadas que conduzcan a la falla de un componente. La Figura 4 presenta imágenes de un vástago de un cilindro de inclinación de la cuchara de un tractor; el vástago se fracturó cuando el operador estaba moviendo una roca de dos toneladas de peso con el extremo de la cuchara, generando elevados esfuerzos de flexión en el vástago, el cual está diseñado para trabajar primariamente bajo cargas de tracción.



Figura 4. Vástago fracturado debido a la generación de elevados esfuerzos de flexión por una operación inapropiada. *Fuente propia.*

5. **Efectos del ambiente:** Un ambiente de trabajo muy agresivo puede generar la degradación, ya sea progresiva o rápida, y consiguiente falla de un componente. Mecanismos de corrosión química, corrosión asistida por esfuerzos, fluencia lenta (creep), y diversos tipos de desgaste: erosivo, abrasivo, adhesivo, etc., también pueden originar la falla de componentes. Un caso que impactó de manera

decisiva en los procesos de mantenimiento de la industria aeronáutica fue el del vuelo 243 de Aloha Airlines, ocurrido en Hawai en 1988 [9]. En este caso de falla se desprendieron más de 5 metros del fuselaje del avión, en pleno vuelo, debido a un proceso de corrosión fatiga. La Figura 5 presenta una fotografía del avión luego del aterrizaje.



Figura 5. Estado del avión del vuelo 243 de Aloha Airlines cuyo fuselaje falló por un mecanismo de corrosión fatiga [10].

6. **Mantenimiento inadecuado:** El incumplimiento en los cronogramas de mantenimiento, la ejecución deficiente del mismo, o un monitoreo inadecuado de la vida en servicio, puede generar fallas en componentes, equipos y sistemas. Asimismo, la reconstrucción o la reparación de un componente, realizada con las herramientas inapropiadas o sin tomar en cuenta especificaciones y prácticas recomendadas, puede derivar en la falla del mismo.
7. **Combinación:** Las fallas se pueden generar también por la combinación de dos o más de las causas mencionadas líneas arriba, ocurriendo de manera secuencial o simultánea.

Para poder determinar con certeza la causa de una falla, el análisis de falla debe ser realizado por profesionales que conozcan el funcionamiento de distintos componentes, las propiedades de diversos metales y aleaciones, los métodos de

fabricación, los tratamientos térmicos aplicables a los materiales, así como los distintos ambientes de trabajo y el efecto que pueden generar en los materiales. Estos profesionales, denominados analistas de fallas, deben tener un conocimiento sólido de los fundamentos de la ingeniería de materiales y metalurgia, de los mecanismos de falla, así como de las diversas herramientas analíticas empleadas en el desarrollo de un caso. Dada la diversidad de componentes, materiales, y condiciones de trabajo que se pueden encontrar en los sectores industriales, un analista de fallas desarrolla una amplia y variada experiencia a lo largo de su trayectoria profesional.



Capítulo 2: Metodología del análisis de falla metalúrgico

Llevar a cabo un análisis de falla metalúrgico involucra desarrollar una investigación enfocada en determinar la causa raíz física de la falla de un elemento, componente, equipo o sistema. Esta investigación debe sustentarse con evidencia y debe estar basada en principios de ingeniería y en el resultado de ensayos de laboratorio y diversas herramientas analíticas. En particular, la metodología de análisis empleada en los casos que se presentarán en el siguiente informe es la que se aplica en el Laboratorio de Materiales PUCP. En este laboratorio, desde hace más de 40 años, se realizan servicios a la industria, entre los cuales el análisis de falla metalúrgico es uno de los más demandados. Los sectores con los que se trabaja en este servicio incluyen el minero, hidrocarburos, alimentario, construcción, naval, aeronáutico, ambiental, energía y automotriz.

Comúnmente se trabaja con un equipo conformado por un analista senior, un analista junior y un ayudante. El analista senior dirige y coordina el servicio, define las herramientas analíticas a emplear, identifica las muestras a analizar, establece los parámetros para los ensayos, sintetiza e interpreta los resultados y elabora el informe técnico del análisis. El analista junior trabaja de manera operativa en la realización de los ensayos y el ayudante se encarga de las operaciones de desmontaje, corte, maquinado, entre otras. Adicionalmente, y para los servicios que lo requieran, se pueden formar equipos de trabajo mayores, dependiendo de la experticia particular de cada analista y la disponibilidad para realizar el servicio. Los ensayos se realizan en el propio laboratorio, el cual cuenta con una gran variedad de equipos para realizar ensayos de caracterización de materiales y de evaluación de diversas propiedades. Para la determinación de la composición química y el estudio de la microestructura de los materiales se cuenta con equipos de espectrometría de emisión y diversos microscopios, respectivamente. Para evaluar las propiedades mecánicas se cuenta con durómetros para los diversos métodos de dureza (Brinell, Rockwell, Vickers, entre otros), máquinas de tracción de diversa capacidad y péndulos de impacto. El laboratorio cuenta además con una serie de equipos para realizar ensayos no destructivos, tales como tintes penetrantes, partículas magnéticas, radiografía industrial y ultrasonido, orientados a determinar la presencia de discontinuidades superficiales o volumétricas en los materiales. Asimismo, se cuenta con equipos para desarrollar ensayos más especializados cuando así se requiera, tales como vibroforo

para ensayos de fatiga, máquina para ensayos de desgaste, equipo electroquímico para ensayos de corrosión, equipos de exposición UV, entre otros. Asimismo, se hace uso del equipamiento del Centro de Caracterización de Materiales PUCP, particularmente del microscopio electrónico de barrido y del difractómetro de rayos X. La Figura 6 muestra un conjunto de fotografías en donde se puede apreciar parte del equipamiento con el que se cuenta, tanto en el Laboratorio de Materiales, como en el Centro de Caracterización de Materiales PUCP.



Figura 6. Parte del equipamiento del Laboratorio de Materiales y el Centro de Caracterización de Materiales PUCP. *Fuente propia.*

La primera etapa en un servicio de análisis de falla metalúrgico involucra la inspección visual in-situ y la selección de las piezas que serán enviadas al laboratorio. Esta etapa la puede desarrollar propiamente el solicitante del servicio, o puede ser llevada a cabo por el analista senior, dependiendo del solicitante. Luego de ello, la metodología empleada en el Laboratorio PUCP involucra las siguientes etapas:

1. **Recopilación de información:** Esta etapa está enfocada en recopilar la información relacionada con el componente que ha fallado, tal como la especificación del componente, el historial de fabricación, las condiciones de servicio, el historial de mantenimiento y/o reparaciones, y las condiciones en las que se produjo o se evidenció la falla. Esta información se adquiere mediante un requerimiento al solicitante y la búsqueda de literatura técnica relacionada.
2. **Inspección visual:** En esta etapa se realiza una inspección detallada del componente tanto en las condiciones en las que arribó al laboratorio (normalmente con suciedad y oxidación) como luego de una adecuada limpieza. La inspección se puede realizar a ojo desnudo o empleando lentes de aumento con una magnificación de hasta 40X. Es indispensable generar un registro fotográfico de la inspección realizada al componente. La inspección visual nos permite evaluar la apariencia del daño en escala macroscópica y la condición general del componente, de esta manera se pueden advertir ciertas condiciones que puedan haber intervenido en la falla, tales como concentradores de tensiones geométricos, daño superficial, corrosión, desgaste, etc. En caso de que se advierta la presencia de productos o sustancias ajenas al componente será necesario recolectar una muestra y preservarla apropiadamente para un posterior análisis.
3. **Fractografía:** La fractografía involucra la observación y el análisis de las superficies de fractura de un componente que ha presentado rotura. La fractografía puede realizarse a escala macroscópica, de la misma manera que la inspección visual, o a escala microscópica, empleando para ello un microscopio electrónico de barrido. Normalmente se utiliza la fractografía en

escala macroscópica, sin embargo, cuando se requiere analizar la superficie en mayor detalle o cuando el estado de la misma no revela mayor información, entonces se recurre a la fractografía en escala microscópica. Esta etapa involucra el reconocimiento de marcas típicas de ciertos tipos de fractura (dúctil, frágil, fatiga) que conducen a la determinación del punto de origen y del sentido de propagación de la fractura. Asimismo, es posible establecer una relación con el tipo de esfuerzos aplicados al componente y la magnitud nominal de los mismos. Se debe ser muy cuidadoso en la interpretación de las marcas en la superficie de fractura, pues algunas de ellas podrían generarse como resultado de un evento post-fractura. Esta etapa es fundamental en la realización de un análisis de falla metalúrgico, pues una vez identificado el origen de la fractura, se deben realizar en esa zona todos los ensayos que permitan determinar por qué la falla se inició en ese punto. La fractografía demanda registrar imágenes, de alta calidad y resolución, de las superficies de fractura analizadas.

4. **Ensayos de laboratorio:** Esta etapa está enfocada en la realización de todos los ensayos de materiales que han sido seleccionados por el analista senior con la finalidad de generar evidencia para sustentar el análisis. Estos ensayos se pueden seleccionar a partir de la experiencia del analista o en base a la especificación del componente (previamente recolectada en la etapa 1), en donde se indica, por ejemplo, la composición química del material, el valor de dureza, la resistencia a la tracción, entre otras propiedades. Luego de ello se procede a obtener muestras, normalmente por corte mecánico, cuya forma y tamaño dependerá de la propiedad que se busca evaluar. Se obtienen muestras tanto de la zona de fractura (en particular del origen) como de zonas alejadas de la región de fractura, con la finalidad de comparar resultados; a partir de las muestras se preparan probetas. Todos estos ensayos se realizan de acuerdo a normas de calidad y estándares de ingeniería, y con equipos debidamente calibrados, lo que asegura la confiabilidad de los resultados. Cabe indicar además que el Laboratorio de Materiales se encuentra acreditado ante el Instituto Nacional de la Calidad bajo la norma ISO17025. Entre los ensayos comúnmente empleados podemos mencionar el análisis químico, ensayos de dureza, ensayos de tracción, el análisis microestructural mediante

metalografía y microscopía electrónica de barrido, ensayos de impacto, difracción de rayos X, análisis macrográfico, entre otros. La etapa de ensayos involucra el registro de los valores numéricos obtenidos (dureza, energía absorbida en el impacto, porcentaje de elongación, resistencia a la fluencia, etc.) así como de evidencia gráfica (curvas de tracción, imágenes metalográficas, difractogramas, imágenes de microscopía electrónica, espectros de composición química, etc.)

5. **Análisis de resultados:** En esta etapa se analizan los resultados de todos los ensayos realizados. Se verifica que la composición química y valores de propiedades del material sean consistentes con la aplicación, o se comparan con los establecidos en la especificación del componente. Asimismo, se interpretan las imágenes de la microestructura y se verifica su pertinencia con los procesos de fabricación involucrados y lo demandado por la aplicación. Como parte de esta etapa se realiza también una búsqueda de información que puede incluir literatura técnica (manuales, especificaciones de producto, catálogos de componentes, etc.) así como publicaciones en revistas indexadas dedicadas al análisis falla [11,12], en donde se han reportado fallas en componentes similares al del caso en estudio. Como resultado del análisis se establece una relación con las etapas previas, se elucidan los mecanismos de falla y se proponen las hipótesis acerca de las causas de falla.
6. **Elaboración del reporte:** En esta etapa final se redacta el informe técnico del caso. El informe incluye una sección de *Antecedentes*, en donde se presenta la recopilación de información del caso (Etapa 1), una sección de *Procedimiento Experimental*, en donde se describen las técnicas y ensayos empleados para el análisis, una sección de *Discusión*, en donde se presenta el trabajo de análisis de los resultados (Etapa 5), y finalmente una sección de *Conclusiones y Recomendaciones*, en donde se indica la causas o causas de la falla y se proponen medidas a implementar para evitar que la falla vuelva a ocurrir. Todos los resultados de los ensayos deben ser presentados de manera adecuada, empleando tablas y figuras con insertos de texto y leyendas que permitan comprender claramente lo expuesto. Asimismo, el informe debe ser redactado de tal manera que pueda ser accesible para la lectura de una

audiencia diversa; los casos de fallas de componentes no solo involucran personal técnico (ingenieros mecánicos, metalurgistas, civiles, ambientales, entre otros) sino también profesionales de distintos campos: abogados, ajustadores, peritos, representantes legales, etc. Finalmente, se procede con la emisión del informe al solicitante.

La Figura 7 presenta, empleando el caso de la falla de una banda de freno de un winche, las distintas etapas de un análisis de falla metalúrgico. En la primera etapa se recopilan las especificaciones del winche y la banda, la información sobre las condiciones en las que ocurrió la falla, el tiempo de vida y condiciones de servicio, el historial de mantenimiento, entre otras. La segunda etapa contempla la inspección visual de la banda fracturada; esta inspección permite evidenciar que la zona de fractura coincide con los cordones de soldadura que unen la banda a unas barras del mecanismo de accionamiento. La etapa 3 involucra el análisis de la zona de fractura, lo cual lleva a establecer que la fractura ha involucrado un mecanismo de fatiga mecánica y se ha originado en el pie de las soldaduras. La etapa 4 comprende la realización de los ensayos de laboratorio en el punto de origen y en una región alejada de la zona de fractura. En particular la imagen muestra las indentaciones de un ensayo de dureza Vickers realizado en una probeta obtenida de la zona de fractura que comprende el material de la banda, la barra de accionamiento y la correspondiente unión soldada; de acuerdo al tamaño de la indentación se puede evidenciar que el pie de la soldadura es la zona más dura, y en consecuencia la más frágil. Luego de ello se procede con la quinta etapa: el análisis de los resultados de los ensayos, y finalmente se procede con la elaboración del reporte. En este caso la causa raíz física de falla fue la generación de estructuras duras y frágiles en el pie de las soldaduras, como resultado de un proceso inadecuado de unión; estas zonas se convirtieron en concentradores de tensiones a partir de los cuales se generaron fisuras que se propagaron por un mecanismo de fatiga mecánica, reduciendo progresivamente la sección del componente hasta generar su rotura catastrófica. Las recomendaciones en este caso fueron inspeccionar otros winches en la planta que hayan sido sometidos a operaciones similares de soldadura, como prevención; y para futuras operaciones, seguir el procedimiento de soldadura e inspeccionar las uniones apropiadamente.



Figura 7. Representación de las etapas de un análisis de falla metalúrgico empleando el caso de la falla de una banda de freno de un winche. *Fuente propia.*

Capítulo 3. Casos de estudio

En este capítulo se presentan tres casos desarrollados por el autor del presente informe, como muestra de su trayectoria como Analista de Fallas Senior en el Laboratorio de Materiales PUCP, labor que es desempeñada desde el año 2011. Cada caso proviene de un sector industrial diferente; por razones de confidencialidad no se expone la razón social del solicitante. Cada caso es presentado siguiendo el mismo esquema que el reporte emitido al solicitante, es decir, está organizado en cuatro secciones: Antecedentes, Procedimiento Experimental, Discusión, y Conclusiones y Recomendaciones. La sección Antecedentes incluye un cuestionario que se envía al solicitante con la finalidad de recopilar información y respuestas a las siguientes preguntas:

- a) Descripción de la muestra
- b) Causa o motivo del servicio solicitado
- c) Equipo al que pertenece la muestra
- d) Tiempo aproximado de servicio
- e) Condiciones de operación
- f) ¿La muestra ha sufrido algún tipo de reparación o cambio previo a la falla?
- g) Situación en que se produjo la falla y descripción de la misma
- h) Datos disponibles sobre el material de la muestra

En la sección Procedimiento Experimental se describen los ensayos realizados, el equipamiento empleado, así como los estándares y normas aplicables. La sección de Discusión presenta los resultados de los ensayos y la propuesta del mecanismo de falla y la discusión de la causa o causas que originaron la falla. Finalmente, en la sección de Conclusiones y Recomendaciones se resume lo encontrado en el análisis, se enuncia la causa de falla, y se emiten recomendaciones para el solicitante con la finalidad de evitar que la falla vuelva a ocurrir.

Caso I: Zapata de oruga de pala – Industria de maquinaria pesada

Antecedentes

Se suministró al Laboratorio de Materiales PUCP una zapata de oruga fracturada perteneciente a una pala excavadora (ver Figura 8), para realizar un análisis de falla del componente.



Figura 8. Fotografía de una pala excavadora en operación (arriba) [13], contraparte de zapata de oruga fracturada (abajo izquierda) y muestra enviada al laboratorio para el análisis (abajo derecha).

A partir de un cuestionario enviado a la empresa solicitante, ésta proporcionó la siguiente información en relación al componente fracturado:

- a) Descripción de la muestra: La muestra enviada corresponde a una zapata de oruga fracturada perteneciente a una pala excavadora.
- b) Causa o motivo del servicio solicitado: El motivo por el cual se solicita el servicio es para realizar un análisis de falla de la zapata.

- c) Equipo al que pertenece: Pala excavadora.
- d) Tiempo aproximado de servicio del componente: 2000 horas.
- e) Condiciones de operación: El equipo opera en movimiento de tierras.
- f) ¿La muestra ha sufrido algún tipo de reparación previa a la falla?: La zapata no ha sufrido ninguna reparación previa a la falla.
- g) Situación en que se produjo la falla y descripción de la misma: La falla se produjo cuando la pala se encontraba dando marcha atrás en condiciones normales de operación.
- h) Datos disponibles sobre el material de la muestra: El material corresponde a un acero fundido templado y revenido, con una especificación de dureza entre 375 y 444 HB, y energía absorbida en el impacto de mínimo 15 J a -40°C .

Como parte de la recopilación de información se realizó una búsqueda de la literatura técnica disponible relacionada con el estado de esfuerzos a los que está sometida una zapata de oruga en servicio. Frimpong y Thiruvengadam han realizado varios estudios sobre las fuerzas que se generan en las zapatas de una oruga debido a su interacción con el terreno sobre el que se traslada y por el mecanismo de unión entre ellas (unión con pines); estas fuerzas pueden generar concentradores de esfuerzos, nucleación de fisuras, y fallas por fatiga en las zapatas [14-15]. En particular, Frimpong y Thiruvengadam realizaron un trabajo de modelamiento y simulación de fuerzas en las zapatas de una oruga de una pala de similares características a la del caso en estudio [14]. En la Figura 9 se muestra el diagrama de equilibrio dinámico de una zapata de la oruga de una pala P&H 4100C BOSS; modelada como perteneciente a un sistema de múltiples cuerpos rígidos interconectados (63 zapatas); la figura muestra también una imagen de una oruga típica y la disposición de las zapatas, así como el modelo general de la oruga de una pala P&H 4100C BOSS. Las fuerzas que actúan sobre una zapata son la fuerza de gravedad ($m'g$), la fuerza distribuida del peso de la pala (w'), las fuerzas de contacto con el terreno F_c y T_c , y las fuerzas en las zonas de unión con otra zapata a través de los pines de conexión F_s , T_s , F_p y T_p . Los resultados de esta investigación revelan que, durante el movimiento de traslación recta los valores máximos de las fuerzas de contacto a lo largo de las direcciones vertical, longitudinal y lateral son 5.9×10^5 N, 5.5×10^5 N y 1.7×10^5 N, respectivamente. Los valores en las direcciones vertical y lateral se incrementan en 1.15 y 1.42 veces, correspondientemente, cuando la pala se encuentra realizando un giro.

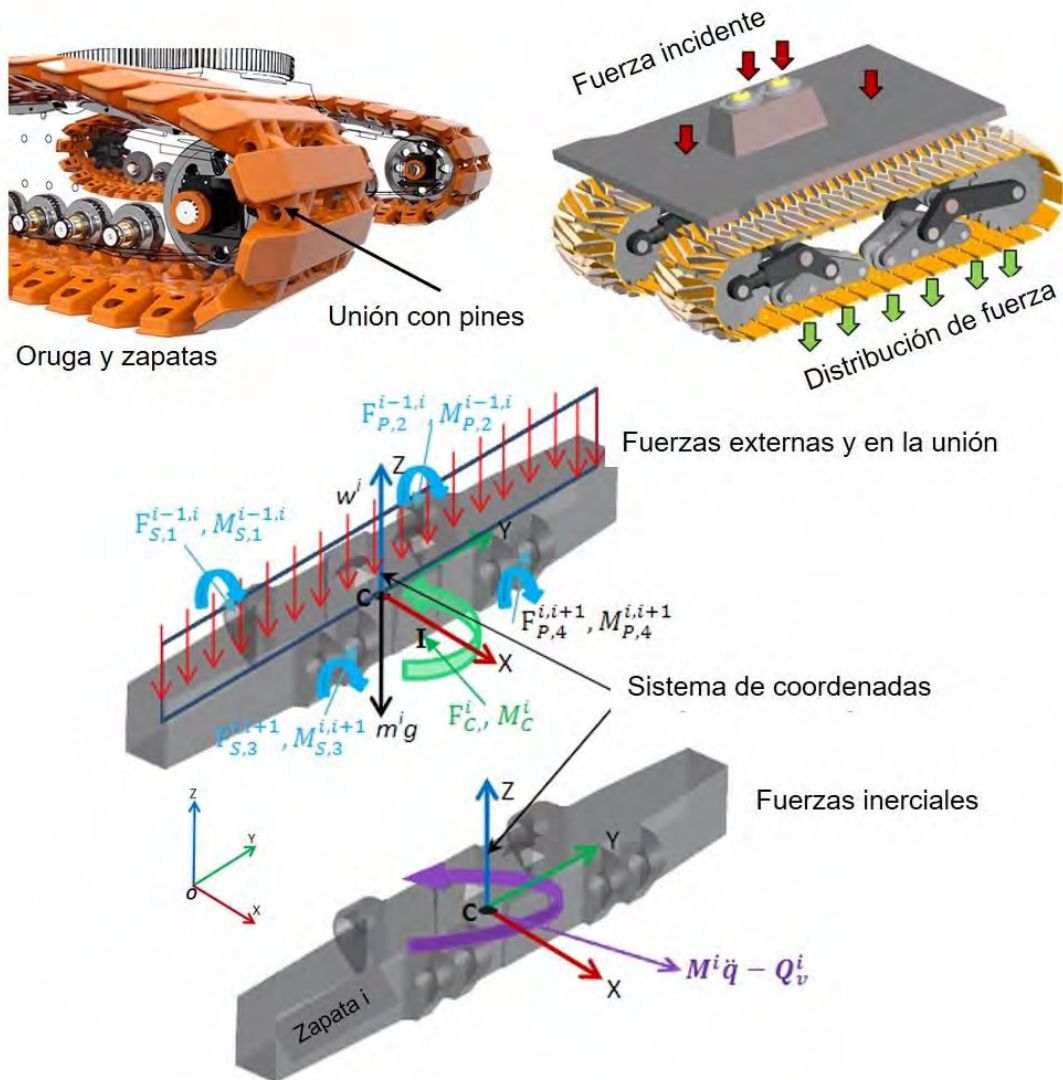


Figura 9. Imagen de una oruga y disposición de zapatas, modelo general de la oruga de una pala P&H 4100C BOSS y diagrama de equilibrio dinámico de una de las zapatas. *Adaptado de [14].*

Procedimiento experimental:

Para realizar el análisis de falla al componente suministrado se emplearon las siguientes pruebas y ensayos:

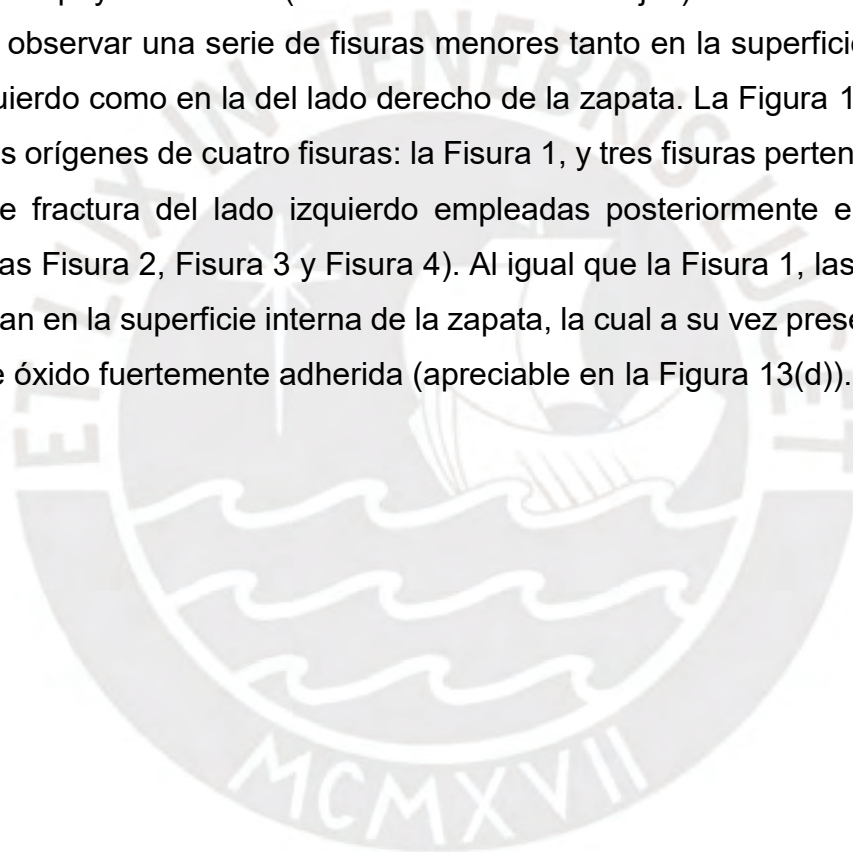
- a) Inspección visual y macrofractografía
- b) Análisis químico del material
- c) Análisis metalográfico
- d) Ensayos de dureza
- e) Ensayos de impacto

La inspección visual y la macrofractografía se realizaron a ojo desnudo. El análisis químico del material de la zapata se realizó mediante espectrometría de emisión atómica en una muestra de material sano (alejado de la zona de fractura) tomado de la zapata, el análisis se realizó de acuerdo al estándar ASTM E415-08 [16]. Se realizó un análisis metalográfico según las normas ASTM E3-11 [17] y ASTM E407-07 [18] para la evaluación de la microestructura del material de la zapata tanto en la zona de fractura como en una zona alejada de ella. Las muestras fueron montadas en resina epóxica y sometidas a un proceso de desbaste empleando papel abrasivo de carburo de silicio de varias granulometrías (hasta 1200) y un pulido con pasta de diamante (6, 3 y 1 μm) y alúmina en suspensión (0.03 μm). La microestructura fue revelada luego de un ataque químico con una solución de Nital al 2%. Las muestras fueron observadas en un microscopio óptico Leica modelo DMI 5000M equipado con una cámara digital Leica DFC 320. Las imágenes fueron adquiridas a distintas magnificaciones (50x-500x), antes y después de atacar las muestras químicamente. Se realizaron ensayos de dureza en la superficie del apoyo del rodillo, en una sección transversal de una parte de la zapata, y en la región cercana a la superficie de fractura; de acuerdo a los estándares ASTM E18-08 [19] y ASTM E10-10 [20]. La tenacidad del material de la zapata en la zona de la fractura se evaluó mediante ensayos de impacto Charpy (CVN) según ASTM E23-07 [21]. Se obtuvieron 3 probetas de una sección ubicada a la mitad del espesor en las zonas de fractura. La temperatura de ensayo fue de -40°C .

Discusión

La Figura 10 muestra las superficies de fractura del lado izquierdo y lado derecho de la zapata. Se observa un patrón de fractura frágil con marcas de Chevron indicando el sentido de propagación de una fisura (ver flechas blancas) que se origina en la parte inferior de la zona correspondiente al apoyo del rodillo. Para verificar la extensión de esta fisura (a la que llamaremos Fisura 1) se realizó un ensayo conjunto de partículas magnéticas y tintes penetrantes. La Figura 11 muestra que esta fisura se extiende de manera superficial hasta aproximadamente 1/3 del ancho del apoyo del rodillo desde el lado izquierdo. Asimismo, se observan pequeñas fisuras en la superficie del apoyo, orientadas en la misma dirección que la Fisura 1. Con la finalidad de determinar el origen de la Fisura 1 se procedió con la apertura de la misma empleando medios mecánicos. La Figura 12 muestra las correspondientes superficies

de fractura. Se puede observar que la fisura original abarca aproximadamente el 75% del área de la sección transversal del apoyo del rodillo. El patrón de fractura es frágil. Las marcas tipo Chevron en la superficie permiten ubicar el origen de la fisura en el lado inferior izquierdo de la sección transversal del apoyo del rodillo. El punto de origen corresponde a una zona del componente, sometida a esfuerzos de tracción asociados con la flexión producida en el apoyo al contacto con el rodillo que produce el movimiento. Asimismo, se puede observar que la superficie interna de la zapata en la zona de origen de la fisura presenta una capa de óxido fuertemente adherida. Se pueden observar también fisuras más pequeñas que se han iniciado en los extremos superiores del apoyo del rodillo (indicadas con flechas rojas). Además de la Fisura 1 se pudieron observar una serie de fisuras menores tanto en la superficie de fractura del lado izquierdo como en la del lado derecho de la zapata. La Figura 13 muestra el detalle de los orígenes de cuatro fisuras: la Fisura 1, y tres fisuras pertenecientes a la superficie de fractura del lado izquierdo empleadas posteriormente en el análisis (denominadas Fisura 2, Fisura 3 y Fisura 4). Al igual que la Fisura 1, las Fisuras 2, 3 y 4 se originan en la superficie interna de la zapata, la cual a su vez presenta también una capa de óxido fuertemente adherida (apreciable en la Figura 13(d)).



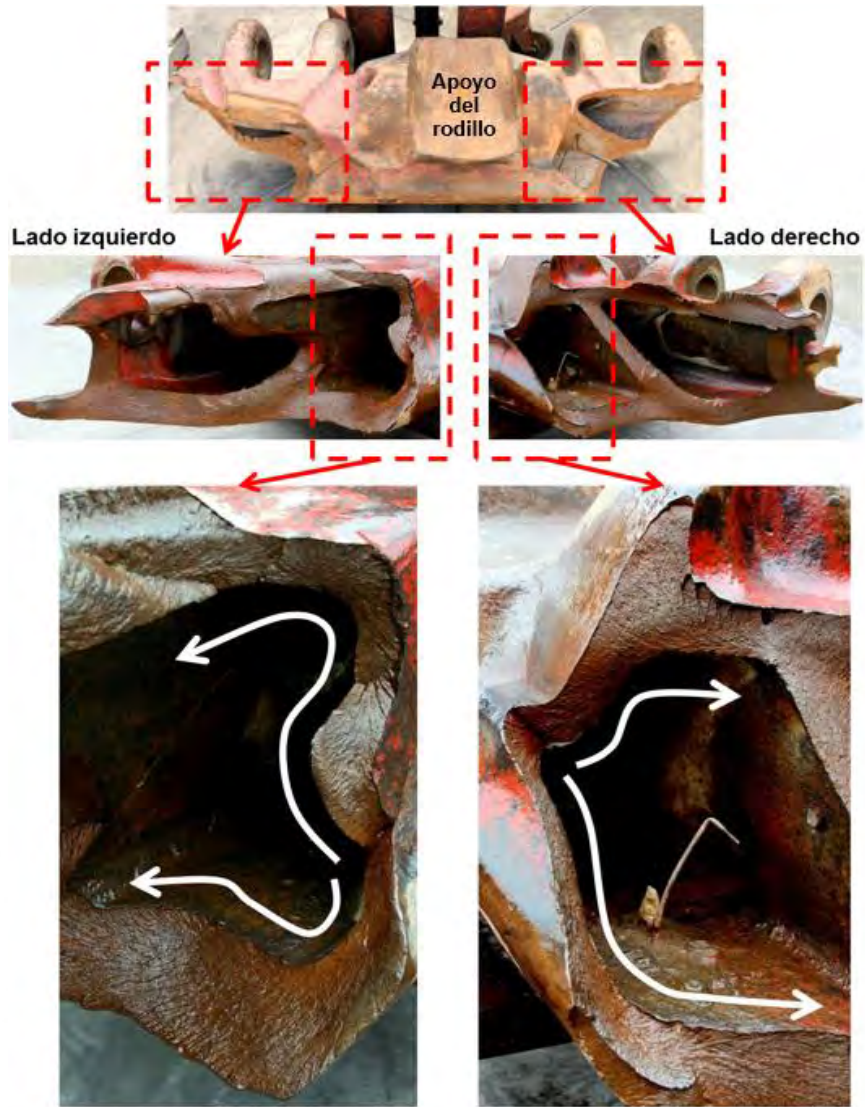


Figura 10. Superficies de fractura de la zapata.

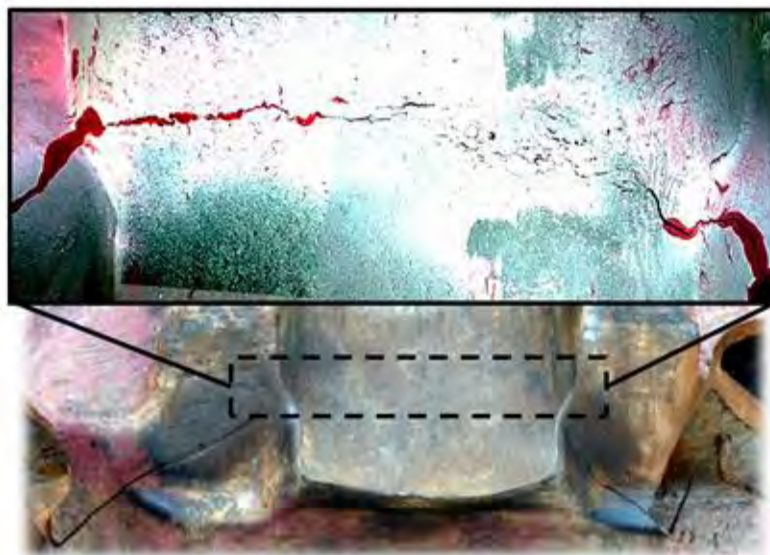


Figura 11. Extensión de la Fisura 1 en el apoyo del rodillo.



Figura 12. Superficies de fractura de Fisura 1.

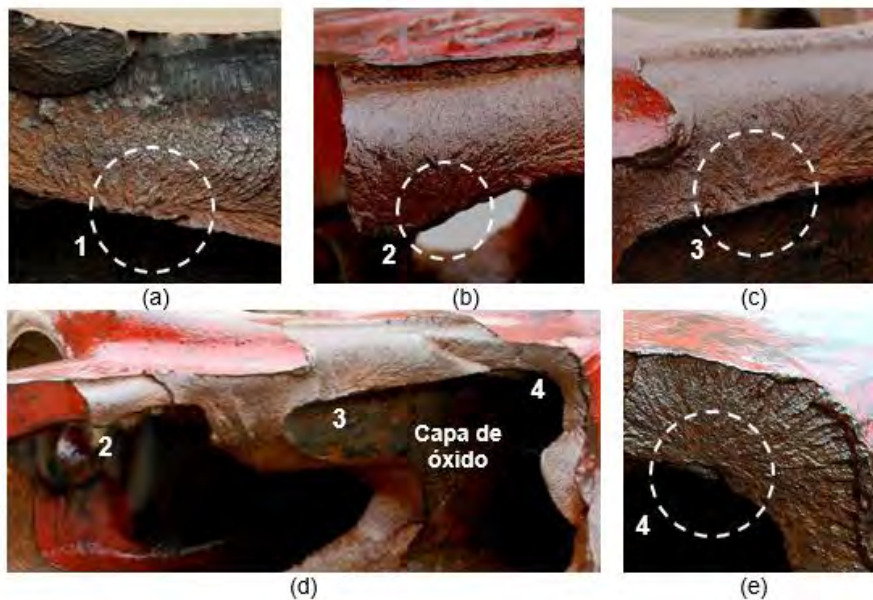


Figura 13. Detalle de origen de Fisura 1 (a), Fisura 2 (b), Fisura 3 (c) y Fisura 4 (e); y ubicación de fisuras en superficie de fractura del lado izquierdo (d).

La composición química obtenida para el material (ver Tabla 1) corresponde a aquella para un acero de bajo carbono y de baja aleación al Ni-Cr-Mo [22]. Este material cumple con los requerimientos de la especificación del material (C=0.30 máx., P=0.025 máx., S=0.020 máx., Al=0.06 máx. y Mn, Si y elementos de aleación según se requiera [23].

Tabla 1. Composición química del material de la zapata.

Elemento	% (Zapata)
C	0.21
Mn	0.85
P	0.013
S	0.017
Si	0.43
Ni	1.96
Cr	0.95
Mo	0.46
Cu	0.11

Las Figuras 14 y 15 presentan la microestructura del material de la zapata en una muestra alejada de la zona de fractura. Se puede observar que la microestructura está constituida principalmente por martensita revenida. Esta microestructura es típica de un acero de baja aleación al Ni-Cr-Mo sometido a un tratamiento térmico de templado y revenido [24]. Asimismo, se puede observar algunas inclusiones en la microestructura.

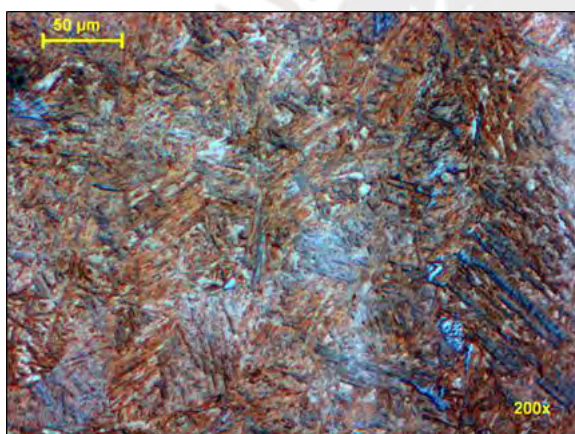


Figura 14. Microestructura del material de la zapata (200X).

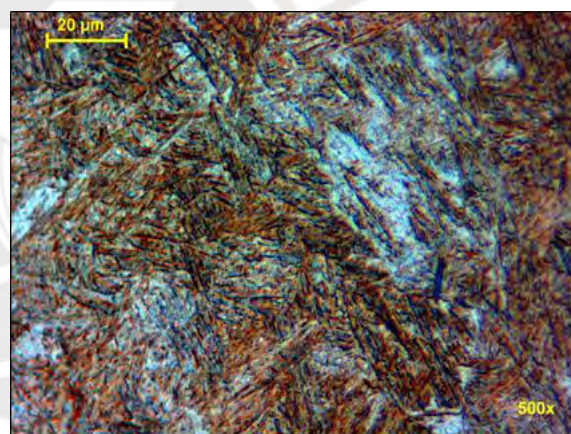


Figura 15. Microestructura del material de la zapata (500X).

El análisis de la zona de fractura abarcó la observación de la microestructura en el origen de las Fisuras 1, 2, 3 y 4 (ver Figura 13). Las muestras analizadas corresponden a un corte transversal en el punto de origen de la fisura, y contienen parte de la superficie de fractura y parte de la superficie interna de la zapata a partir de la cual se origina la fractura. La Figura 16 presenta una superposición de micrografías de la muestra del origen de la Fisura 1 antes de ser atacada químicamente. La figura muestra la superficie de fractura y una capa de óxido adyacente a ella. La capa de óxido está fuertemente adherida a la superficie del material. De manera general se puede observar el daño en el material asociado con

la presencia de la capa de óxido. El inserto en la figura muestra el detalle de una fisura que se origina a partir de la capa de óxido y se propaga hacia el interior del material (indicada con una flecha roja). Este tipo de fisuras genera concentradores de tensiones y puede propagarse al interior del material en presencia de una microestructura frágil y debido a los esfuerzos de tracción asociados con la flexión producida en el apoyo al contacto con el rodillo.

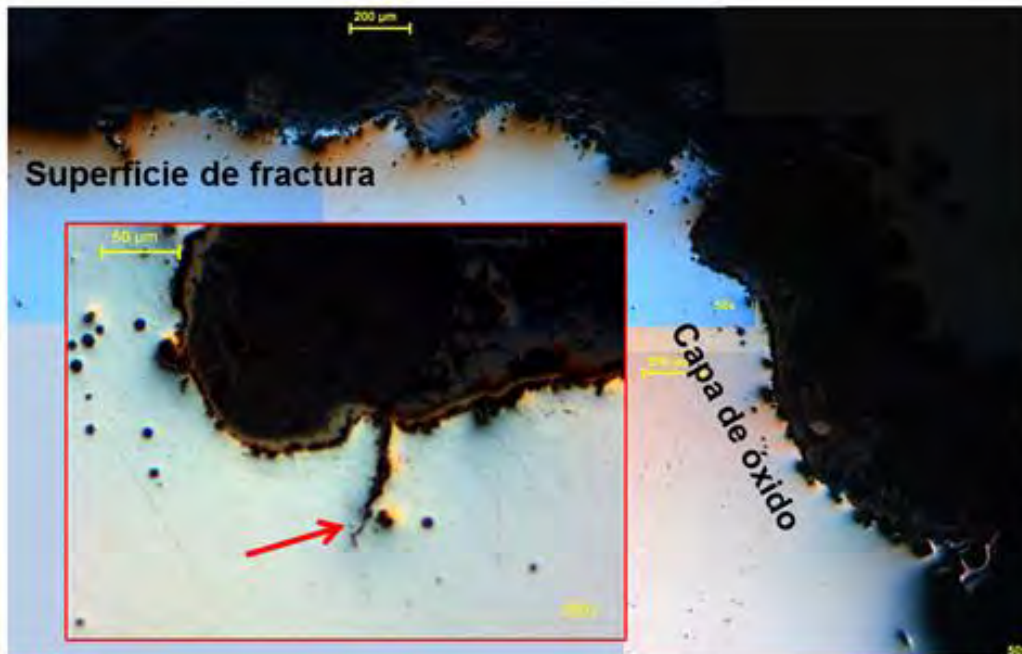


Figura 16. Micrográficas de la muestra del origen de la Fisura 1.

La Figura 17 presenta micrográficas de la muestra del origen de la Fisura 1 luego de ser atacada químicamente. En la Figura 17(a) se puede observar la capa de óxido fuertemente adherida a la superficie y el daño asociada a ella. Particularmente, en la parte inferior izquierda de la figura se puede observar desprendimiento de material. La microestructura del material es martensítica y similar a la observada en las Figuras 14 y 15. La micrografía en la Figura 17(b) evidencia la penetración de óxido y consecuente daño a través de los límites de grano del material. La fragilización intercrystalina en aceros fundidos ocurre ocasionalmente y está asociada principalmente con la precipitación de AlN, pero también con la presencia en la microestructura de ferrita, cementita, y diversas inclusiones no metálicas [25]. La Figura 18 muestra una micrografía en la cual se puede observar una serie de inclusiones no metálicas (ver flechas amarillas en la figura) ubicadas en la zona de

fractura. Las Figuras 19 y 20 presentan una superposición de micrografías correspondientes a las muestras del origen de la Fisura 2 y la Fisura 4, antes de ser atacadas químicamente. El inserto en la Figura 19 muestra el daño en el material a través de los límites de grano (ver flechas rojas). La Figura 20 revela la presencia de óxidos masivos en el interior del material. Asimismo, el inserto de la Figura 20 muestra una fisura que se origina en la capa de óxido y se propaga hacia el interior del material (indicada con una flecha roja). La Figura 21 presenta micrografías de las muestras correspondientes al origen de la Fisura 2 (21 (a) y (b)), Fisura 3 (21 (c) y (d)) y Fisura 4 (21 (e) y (f)), luego de ser atacadas químicamente. La microestructura del material es martensítica. Se puede observar el carácter intergranular de daño en el material (b), la penetración de óxidos masivos al interior del material (d) y la cantidad de inclusiones existentes en el material cerca de la zona de fractura ((e) y (f)).

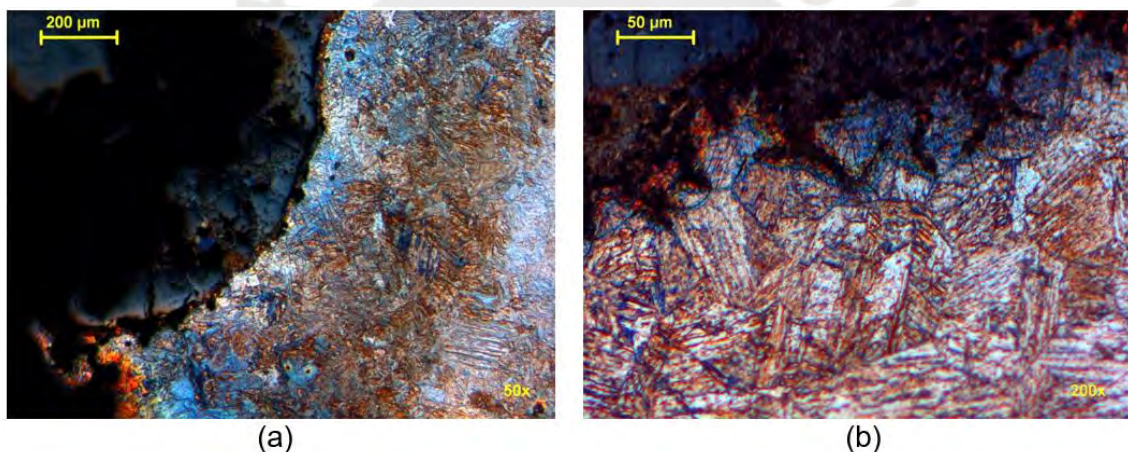


Figura 17. Micrografías correspondientes al origen de la Fisura 1(muestra atacada con Nital al 2%).

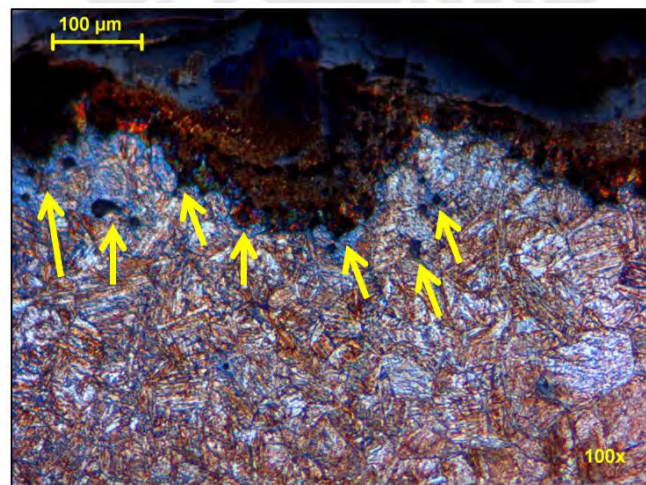


Figura 18. Inclusiones en la estructura de la muestra del origen de la Fisura 1.

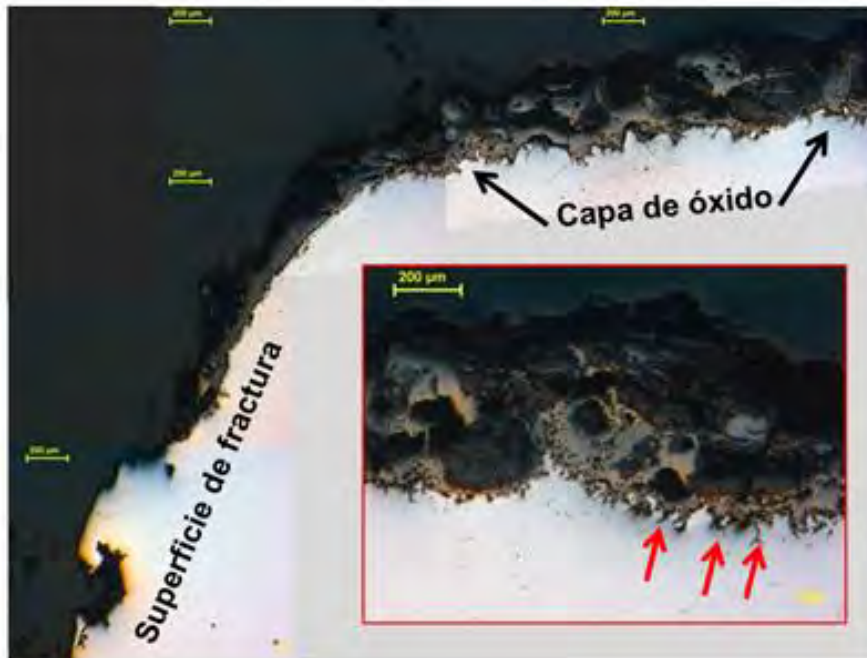


Figura 19. Micrografías de la muestra del origen de la Fisura 2.

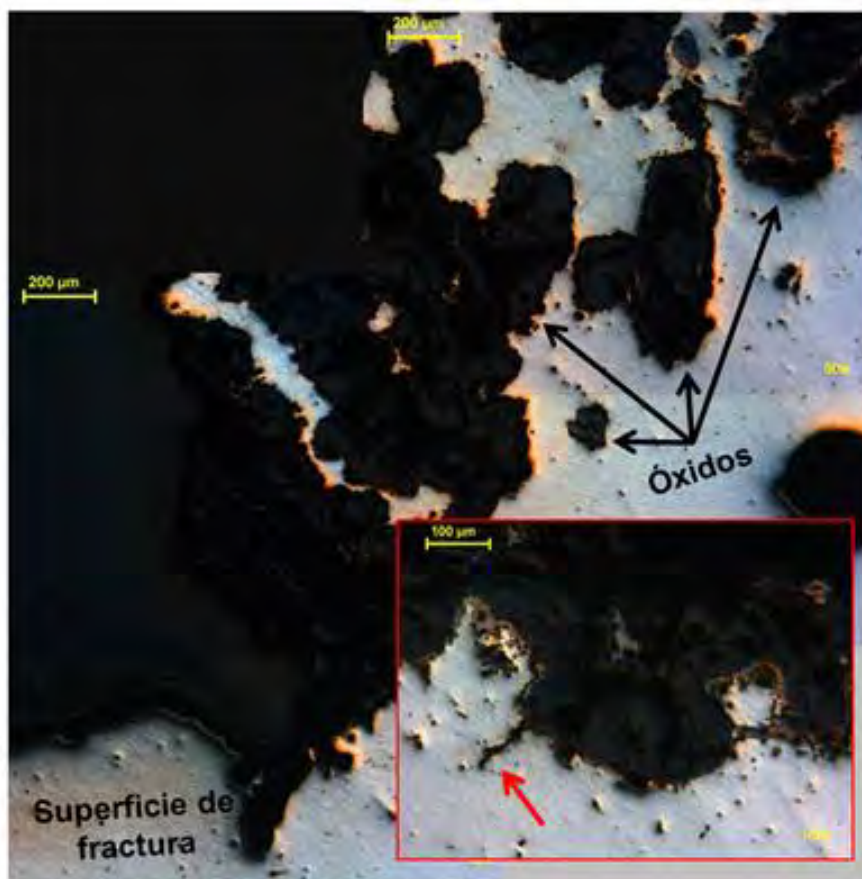


Figura 20. Micrografías de la muestra del origen de la Fisura 4.

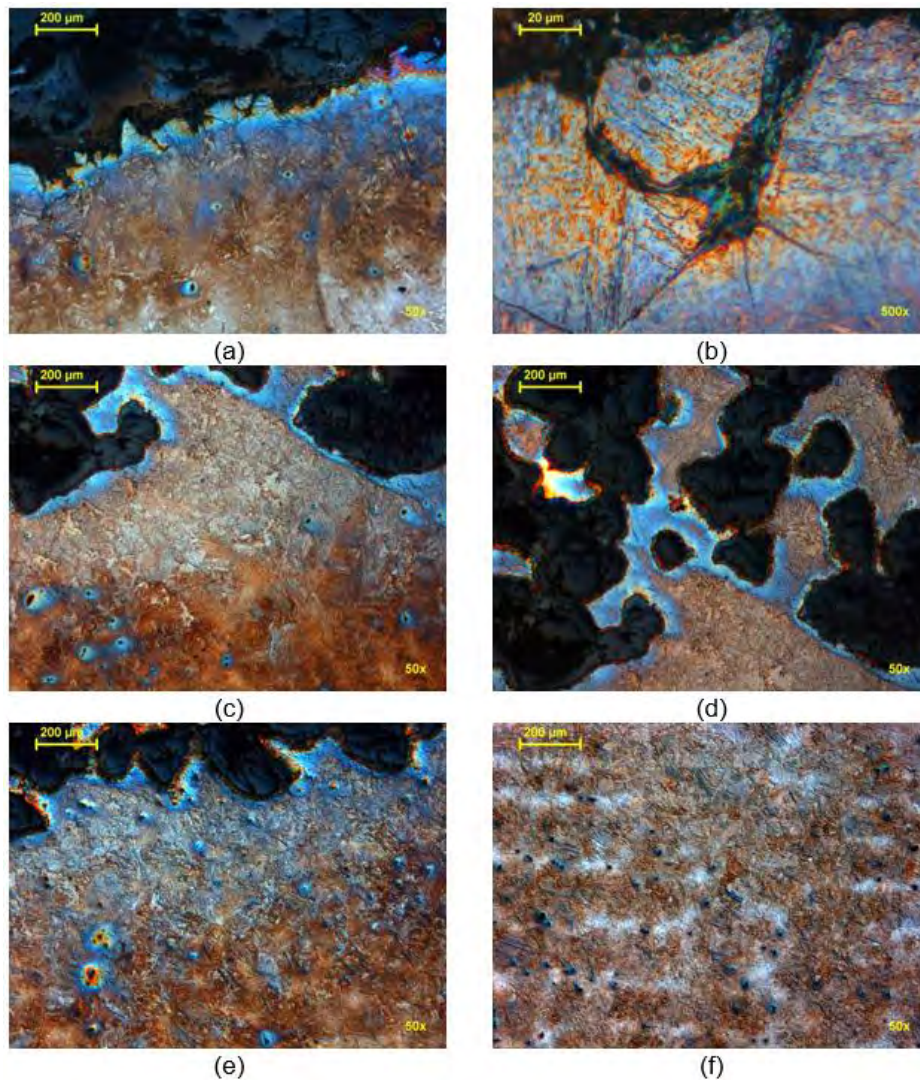


Figura 21. Micrografías correspondientes al origen de la Fisura 2 ((a) y (b)), Fisura 3 ((c) y (d)) y Fisura 4 ((e) y (f)) (muestras atacadas con Nital al 2%).

La Figura 22 muestra los resultados de los ensayos de dureza en la superficie del apoyo del rodillo. Se realizaron barridos de dureza en tres líneas sobre la superficie (línea 1, línea 2 y en una línea adyacente a la fisura) empleando un durómetro Equotip 2 en escala HRC. Los valores promedio de dureza fueron de 45 HRC para la línea 1, 42 HRC para la línea adyacente a la fisura, y 45 HRC para la línea 2. Estos valores equivalen a 390 HB (42 HRC) y 421 HB (45 HRC), indicando que la dureza en la superficie del rodillo cumple con lo requerido por la especificación (dureza requerida luego del templado y revenido: 375-444 HB). La Figura 23 corresponde a la muestra obtenida de la zapata para realizar los ensayos de dureza en la sección de la zapata y en la zona de fractura de la Fisura 1. La Tabla 2 muestra los valores de dureza en la sección en 9 puntos, donde el punto 1 es el más cercano a la superficie del apoyo

del rodillo, y los puntos 8 y 9 corresponden a la zona ablandada producto del corte térmico realizado para la apertura de la Fisura 1 (por esta razón no son considerados en el análisis). Los valores de dureza obtenidos son consistentes con la microestructura del material constituida por martensita revenida (ver Figuras 14 y 15). El punto 5, el cual corresponde a la mitad de la sección, presenta un valor de dureza de 483 HB, el cual excede el rango de valores permisible según la especificación (375-444 HB). Otros puntos de la sección alcanzan también valores que exceden el rango permisible (464 HB en el punto 1, 452 HB en el punto 4 y 456 HB en el punto 6). El promedio de dureza de los puntos 1 a 7 es de 450 HB, el cual también excede ligeramente el límite establecido por la especificación. La Tabla 3 muestra los valores de dureza obtenidos en 5 puntos cercanos a la superficie de fractura. El valor promedio de dureza en esta zona es de 43 HRC, cuyo equivalente en HB (400) se encuentra dentro del rango permisible según especificación.

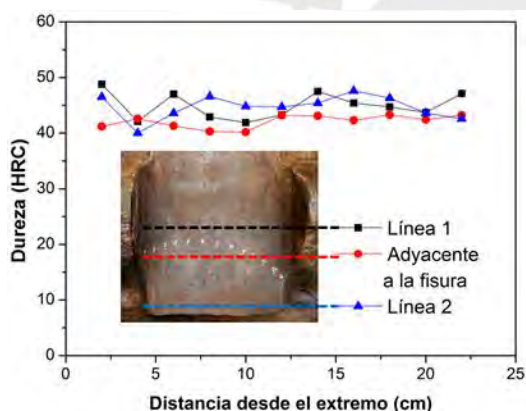


Figura 22. Dureza en la superficie del apoyo del rodillo.



Figura 23. Muestra para los ensayos de dureza en la sección y en la zona de fractura.

Tabla 2. Dureza en la sección de la zapata.

Punto	Dureza (HB)
1	464
2	423
3	431
4	452
5	483
6	456
7	443
8	420
9	419

Tabla 3. Dureza en la zona de fractura.

Punto	Dureza (HRC)
1	44
2	43.7
3	43.7
4	42
5	42.6

La Tabla 4 muestra los valores de energía de impacto absorbida en J y ft/lb para las 3 probetas correspondientes a la zona de la Fisura 1, así como las correspondientes superficies de fractura. El valor promedio de energía absorbida es de 9 J. La Tabla 5 muestra los valores de energía de impacto absorbida en J y ft/lb para las 3 probetas correspondientes a la zona de la Fisura 2, así como las correspondientes superficies de fractura. El valor promedio de energía absorbida es de 8.3 J. Todas las probetas presentaron una superficie de fractura de patrón frágil. El valor de energía de impacto absorbida promedio para todas las probetas es 8.7 J, el cual es menor que 15 J, que es el valor mínimo requerido de energía absorbida a una temperatura de -40°C para el material según la especificación suministrada por el solicitante. Este valor bajo de tenacidad podría estar asociado con un tratamiento térmico de revenido deficiente.

Tabla 4. Energía absorbida y superficie de fractura de probetas en la zona de la Fisura 1.

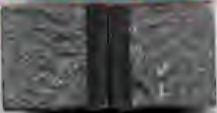
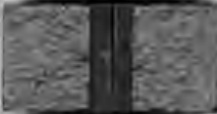




Probeta	Energía (J)	Energía (ft/lb)	Superficie de fractura
1	7	5.2	
2	7	5.2	
3	13	9.6	

Tabla 5. Energía absorbida y superficie de fractura de probetas en la zona de la Fisura 2.

Probeta	Energía (J)	Energía (ft/lb)	Superficie de fractura
1	8	5.9	
2	8	5.9	
3	9	6.6	

Conclusiones y Recomendaciones

La zapata ha sido fabricada de un acero de baja aleación al Ni-Cr-Mo, y sometida a un tratamiento térmico de templado y revenido. La microestructura del acero de la zapata está constituida por martensita revenida. La dureza superficial alcanza valores de hasta 45 HRC (421 HB). La dureza en la sección alcanza valores de hasta 483 HB, superando el límite permisible según especificación (375-444 HB). La tenacidad del material de la zapata no cumple con el requerimiento de tenacidad mínima según la especificación (8.7 J en promedio contra 15 J requerido por la especificación). La fractura de la zapata es de naturaleza frágil, presentando una fisura principal de gran extensión (Fisura 1) y diversas fisuras secundarias más pequeñas. Los puntos de inicio de las fisuras coinciden con zonas que contienen óxidos masivos y/o una capa de óxido, a partir de las cuales se han generado pequeñas fisuras que se extienden hacia el interior del material. Las pequeñas fisuras actúan como concentradores de tensiones, y se propagan de manera frágil al interior del material debido a los esfuerzos de tracción asociados con la flexión en el apoyo cuando entra en contacto con el rodillo (Fisura 1) y la microestructura frágil de muy baja tenacidad (Fisuras 1, 2, 3 y 4).

Se recomienda verificar que las operaciones de fabricación (fundición y tratamiento térmico) se realizan de manera adecuada para evitar la presencia de óxidos perjudiciales en la superficie y tratamientos térmicos deficientes.

Caso II: Placa troquelada de reactor - Sector Químico

Antecedentes

Se suministró al Laboratorio de Materiales PUCP una muestra de una placa troquelada de un reactor de sulfato de cobre que colapsó, para realizar un análisis de falla de la misma. La placa operaba como soporte para chatarra de cobre, la cual es empleada en el proceso de fabricación de sulfato de cobre. La Figura 24 presenta una fotografía de un reactor comercialmente disponible y la muestra de la placa suministrada para el análisis.

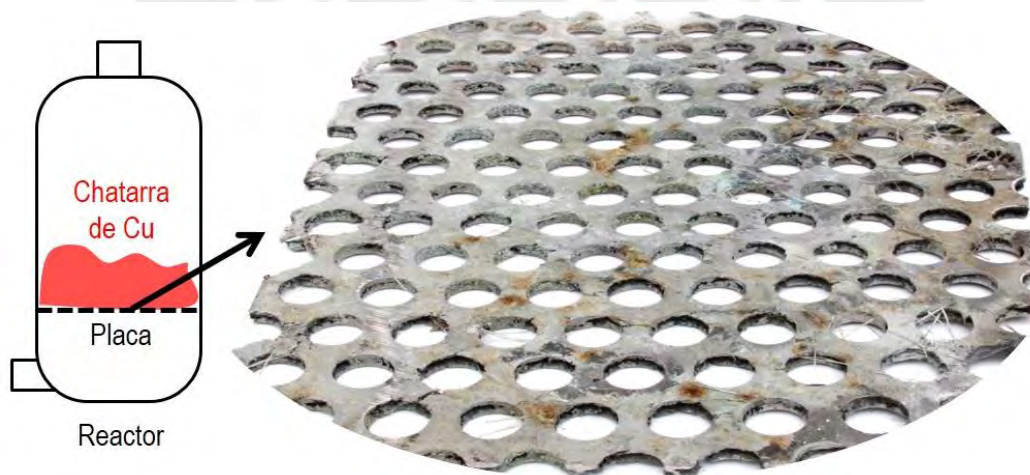


Figura 24. Fotografía de un reactor de sulfato de cobre comercialmente disponible (arriba) [26] y muestra de la placa troquelada suministrada para el análisis y representación de su ubicación en el reactor (abajo).

A partir de un cuestionario enviado a la empresa solicitante, ésta proporcionó la siguiente información en relación a la placa:

a) Descripción de la muestra: Muestra de una placa troquelada de un reactor de sulfato de cobre.

b) Causa o motivo del servicio solicitado: El motivo por el cual se solicita el servicio es para realizar un análisis de falla de la placa.

c) Equipo al que pertenece la muestra: La placa pertenece a un reactor para producir sulfato de cobre.

d) Tiempo aproximado de servicio: Aproximadamente 1 año y 3 meses en servicio.

e) Condiciones de operación: La placa sirve como soporte para una cama de chatarra de cobre (7 toneladas aproximadamente) la cual entra en contacto con ácido sulfúrico concentrado (150 g/l aproximadamente) y aguas madre en presencia de aire y vapor. La temperatura de trabajo es 95°C y el tiempo de reacción fluctúa entre 10 a 14 horas, con lo cual se consigue la lixiviación de la chatarra para finalmente obtener una solución de sulfato de cobre concentrada, saturada y caliente (aproximadamente 180 g/l Cu+2 y acidez libre 10-20 g/l con pH≤1).

f) ¿La muestra ha sufrido algún tipo de reparación o cambio previo a la falla?: No se ha realizado ningún tipo de reparación en la placa antes de la falla.

g) Situación en que se produjo la falla y descripción de la misma: Luego de un año de servicio, y posterior a un cambio del proveedor de aguas madre, se empezaron a evidenciar picaduras y derrames en el reactor (picaduras en las paredes, particularmente cerca de las uniones soldadas y en la placa troquelada) hasta quedar completamente inoperativo.

h) Datos disponibles sobre el material de la muestra: El reactor (estructura y accesorios) y la placa han sido fabricados en acero inoxidable AISI 316L. El fabricante manifestó a la compañía solicitante que la fabricación de la placa troquelada siguió la siguiente secuencia:

1. Corte de la plancha de acero inoxidable AISI 316L (espesor: 6.3mm)
2. Troquelado de los agujeros (diámetro de agujeros: 19 mm)
3. Decapado y pasivado de las superficies de la placa

i) Información adicional en relación a la muestra: La empresa solicitante proporcionó datos de los análisis de las aguas madre, incluyendo la concentración de cloruros en la solución: hasta 1214 mg/l.

Procedimiento Experimental:

Para realizar el análisis de falla de la placa troquelada se emplearon los siguientes ensayos:

- a) Inspección visual
- b) Microscopía electrónica de barrido
- c) Análisis metalográfico
- d) Ensayos de dureza
- e) Análisis químico

La inspección visual de la placa se realizó a ojo desnudo con la finalidad de determinar los puntos de inicio de daño y el modo de propagación del mismo. Se empleó microscopía electrónica de barrido (MEB) con la finalidad de analizar en mayor detalle la corrosión localizada y de caracterizar los productos de corrosión observados. Para ello se utilizó un equipo FEI Quanta 200 operando a 30 kV equipado con un sistema de espectroscopia de energía dispersiva (EDS). Se analizó la microestructura del material de la placa tanto en una región no corroída como en una región corroída. Las muestras metalográficas fueron preparadas en conformidad con las normas ASTM E3-11 [17] y ASTM E407-07 [18], y fueron atacadas químicamente con una solución de ácido oxálico y una solución Beraha [27] para revelar la microestructura. Las muestras fueron observadas en un microscopio óptico Leica modelo DMI 5000M equipado con una cámara digital Leica DFC 320, obteniéndose imágenes a distintas magnificaciones. Los ensayos de dureza se realizaron de acuerdo al estándar ASTM E384-11e1 [28], empleando una carga de 500 g. La dureza fue evaluada en dos muestras de material no corroído. Se realizaron 4 indentaciones por muestra. La selección del ensayo de dureza (Vickers) estuvo limitada por el tamaño de material no corroído disponible para realizar las indentaciones. El análisis químico del material de la placa se realizó mediante espectrometría de emisión atómica en una muestra de material no corroído, de acuerdo con el estándar ASTM E415-08 [16].

Discusión:

La Figura 25 presenta fotografías representativas de la placa. Más allá de la presencia de óxidos y productos de corrosión, no se aprecia un daño considerable en la superficie de la placa. Sin embargo, si se puede apreciar un daño extensivo en las

paredes de los agujeros. Se observan también restos de fibras en la superficie procedentes del revestimiento interior del reactor. La Figura 26 presenta fotografías de detalle del daño en las paredes de los agujeros de la placa. Se puede apreciar que el daño se genera como consecuencia de una corrosión localizada (picaduras indicadas en la figura). Las picaduras se inician en la pared del agujero, en una zona ubicada aproximadamente a la mitad del espesor de la plancha. Estas picaduras coalescen y se extienden hacia el interior generando un daño extensivo en el material, el cual puede incluso llegar a alcanzar la superficie (ver indicación con círculo rojo en la figura). Algunas de las zonas dañadas presentan acumulación de productos de corrosión. A partir de lo observado se puede establecer la secuencia de falla de la placa tomando como referencia lo que ocurre con un agujero, tal como se muestra en el esquema de la Figura 27. Inicialmente la pared del agujero no presenta daño alguno (etapa 1). Como consecuencia de la acción del medio corrosivo y de manera localizada se generan picaduras en la pared del agujero (etapa 2). Las picaduras coalescen y crecen hacia el interior del material (etapa 3) produciendo un daño considerable el cual puede o no alcanzar la superficie de la placa (etapa 4). Este mecanismo se repite en cada uno de los agujeros, lo cual genera una pérdida de resistencia mecánica masiva en la placa y posterior fractura de la misma.

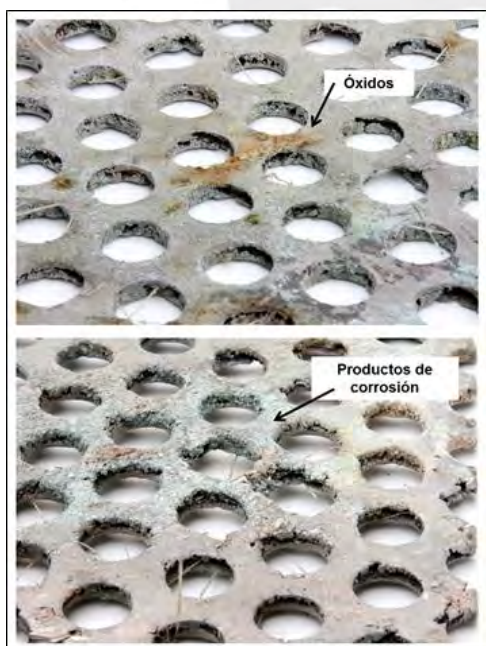


Figura 25. Fotografías de la placa troquelada.

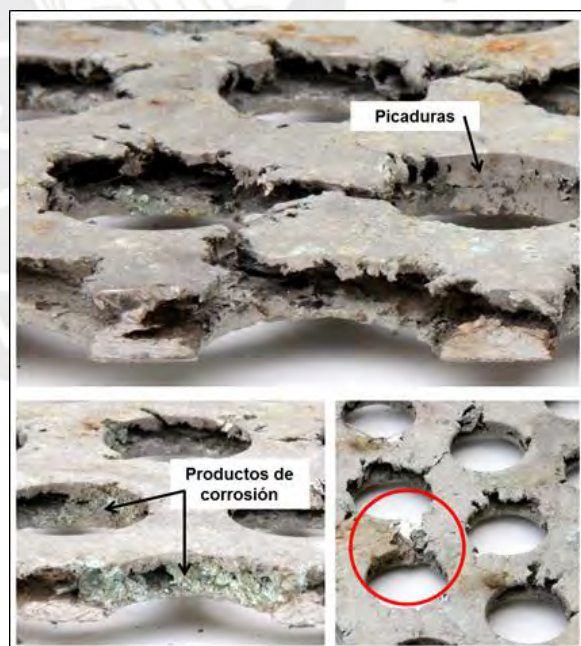


Figura 26. Detalle del daño en las paredes de los agujeros de la placa.

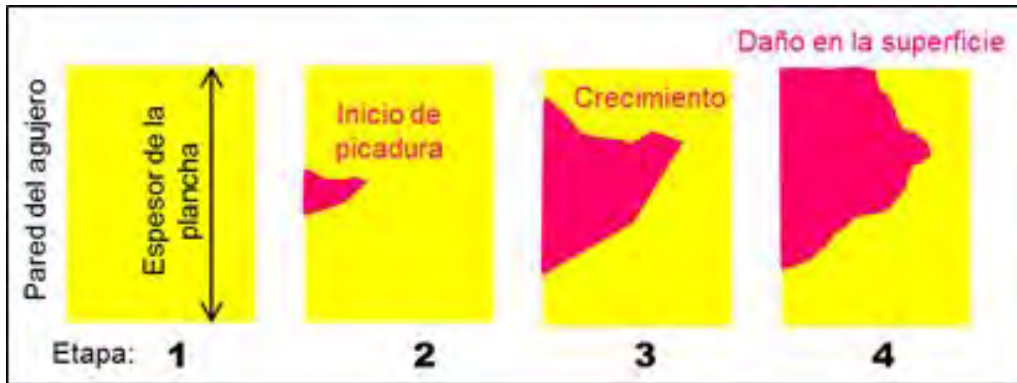


Figura 27. Esquema de secuencia de falla en la rejilla a partir de picaduras en la pared de un agujero.

La Figura 28 muestra una vista representativa de la zona de intersección entre la superficie de la placa y la pared del agujero corroída, y su correspondiente imagen MEB. Se puede apreciar que tanto la superficie como la pared corroída contienen productos de corrosión. La pared se encuentra prácticamente cubierta por los productos de corrosión mientras que en la superficie se alcanza a observar porciones de metal expuesto. La Figura 29 muestra una micrografía MEB y el espectro EDS de la zona de metal expuesto. El punto rojo en el inserto (misma imagen de la Figura 28) indica la zona de visualización y análisis. La imagen MEB permite observar los granos de material expuesto. Se puede apreciar una descohesión de los granos de la superficie asociada con un mecanismo de corrosión selectiva. El espectro EDS de esta zona revela un alto contenido de hierro, cromo, y níquel, así como la presencia de manganeso, molibdeno y silicio, elementos típicos en la composición química de un acero inoxidable. La Figura 30 presenta la micrografía MEB y el espectro EDS correspondiente a los productos de corrosión en la superficie de la placa. El punto rojo indica la zona de visualización y análisis. Se observa que los productos de corrosión presentan una estructura cuasi-compacta y una composición (a partir del espectro EDS) rica en oxígeno, azufre, silicio, hierro, cobre y zinc. El espectro revela también la presencia de cloruros en los productos de corrosión. La Figura 31 muestra la micrografía MEB y el espectro EDS de los productos de corrosión en la pared corroída del agujero. El punto rojo indica la zona de visualización y análisis. Se puede observar que los productos de corrosión tienen una estructura menos compacta en comparación con los observados en la superficie. Se pueden identificar también estructuras típicas de óxidos de hierro (partículas esféricas). El espectro EDS indica

que la composición de los productos de corrosión es rica en oxígeno, azufre, calcio, cobre y hierro. Asimismo, el espectro indica la presencia de cloruros en los productos de corrosión.

En base a lo observado y a la información suministrada por la empresa solicitante se puede deducir que la placa troquelada se ha deteriorado mediante un mecanismo de corrosión selectiva en la microestructura, iniciado en la pared de los agujeros. La corrosión se ha visto favorecida por la agresividad del medio ($\text{pH} \leq 1$, hasta 1214 mg/l de cloruros en las aguas madre, aire y vapor) y la temperatura del proceso (95°C). La mayoría de aceros inoxidables tienden a corroerse por picaduras cuando son expuestos a ambientes con un elevado contenido de cloruros y altas temperaturas [29]. Particularmente un acero AISI 316L presenta buena resistencia a la corrosión por picaduras en agua con una concentración de cloruros de hasta 1000 ppm a temperatura ambiente. Sin embargo, a 95°C el límite permisible de cloruros se reduce a menos de 200 ppm (aprox. 200 mg/l) [30-32].



Figura 28. Intersección superficie/pared de agujero de la placa y correspondiente imagen MEB.

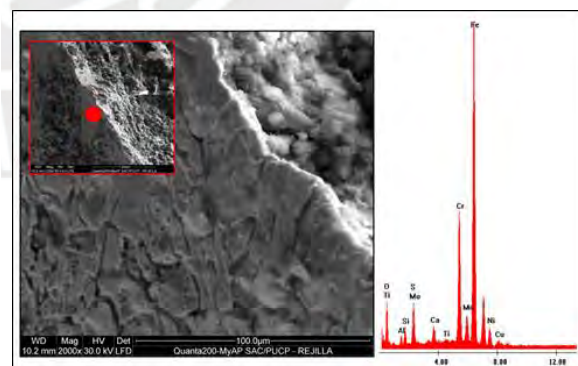


Figura 29. Imagen MEB de la zona de metal expuesto y correspondiente espectro EDS.

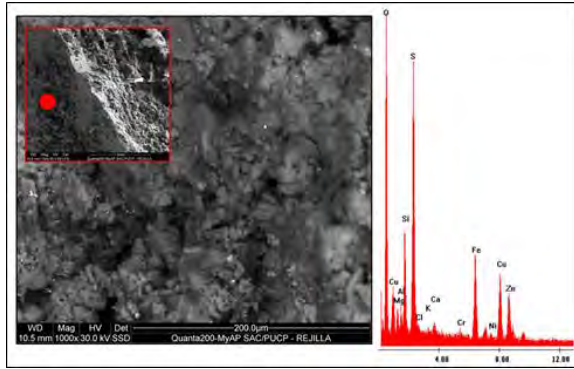


Figura 30. Imagen MEB de los productos de corrosión en la superficie de la rejilla y correspondiente espectro EDS.

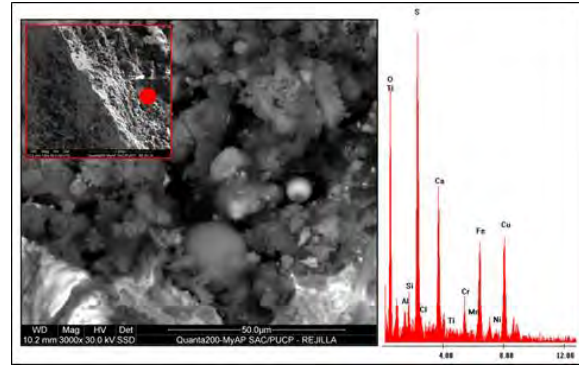


Figura 31. Imagen MEB de los productos de corrosión en la pared corroída y correspondiente espectro EDS.

La Figura 32 presenta micrografías representativas de la microestructura del material de la placa troquelada en la región no corroída. La microestructura está constituida por una matriz de austenita e inclusiones de ferrita delta. Asimismo, la microestructura presenta una textura asociada con la dirección de laminación (deformación) de la plancha. La microestructura observada es típica de un acero inoxidable austenítico, sin embargo, se puede apreciar un considerable contenido de ferrita delta. Un elevado contenido de ferrita delta en la microestructura de un acero inoxidable puede generar una disminución considerable tanto de la tenacidad como de la resistencia a la corrosión del material [33]. En medios corrosivos ácidos y en presencia de cloruros la ferrita delta de la microestructura se disuelve de manera preferencial, dando lugar a la nucleación de picaduras y posterior propagación de las mismas hacia el interior del material. La Figura 33 presenta una composición de micrografías correspondientes a una región corroída (pared de un agujero, ver esquema y vista según A-A). La figura muestra también una micrografía característica de esta región y su correspondiente magnificación (imágenes al lado izquierdo de la figura). Se puede apreciar una considerable deformación en la microestructura de la pared asociada con el proceso de troquelado del agujero. Este proceso de deformación en frío promueve la formación de superficies de alta energía, ocasionando que la pared del agujero se convierta en una zona susceptible no solo de corroerse, sino también de fracturarse. Asimismo, se puede observar claramente que la ferrita delta se disuelve de manera preferencial en la microestructura como producto de la exposición al medio corrosivo, originando picaduras. Este fenómeno es observado en toda la microestructura de la

pared del agujero, tal como se muestra en las micrografías de la Figura 34. Las picaduras crecen, coalescen, y se propagan desde la pared del agujero hacia el interior del material, ocasionando un deterioro masivo del mismo. En base a lo observado se puede concluir que el daño en la placa ha sido ocasionado por la nucleación y posterior crecimiento de picaduras generadas por la corrosión selectiva de la ferrita delta en la microestructura del material, particularmente en las paredes de los agujeros (superficies de alta energía susceptibles de corroerse). La corrosión selectiva en las paredes de los agujeros puede haberse visto también favorecida por un proceso deficiente de decapado y pasivado, el cual se centra principalmente en las superficies de la rejilla de acuerdo con la información suministrada por la empresa solicitante.

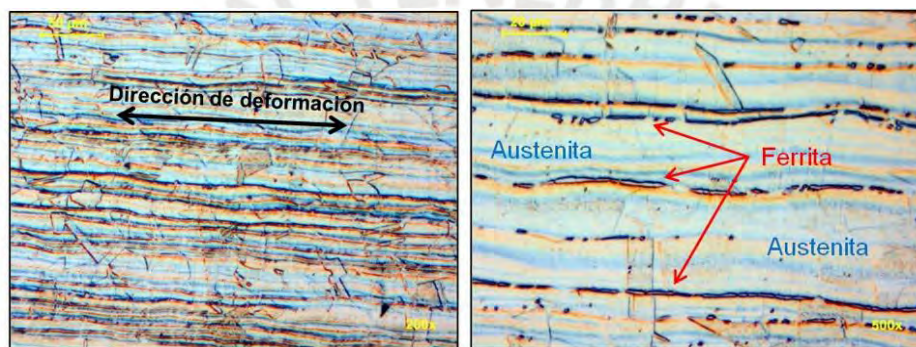


Figura 32. Microestructura del material de la rejilla en una región no corroída.

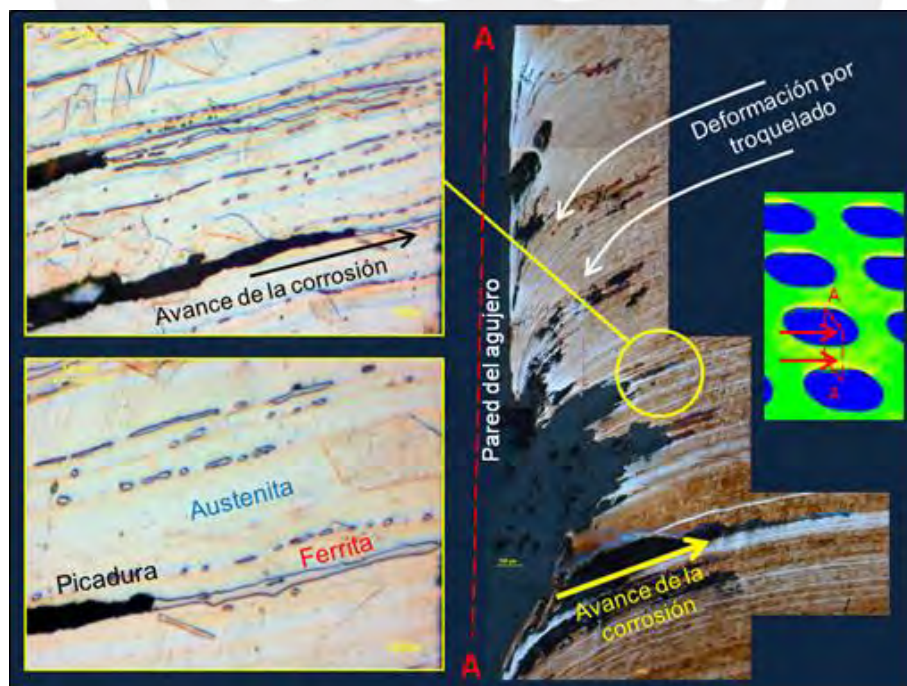


Figura 33. Microestructura del material de la placa en la región corroída.

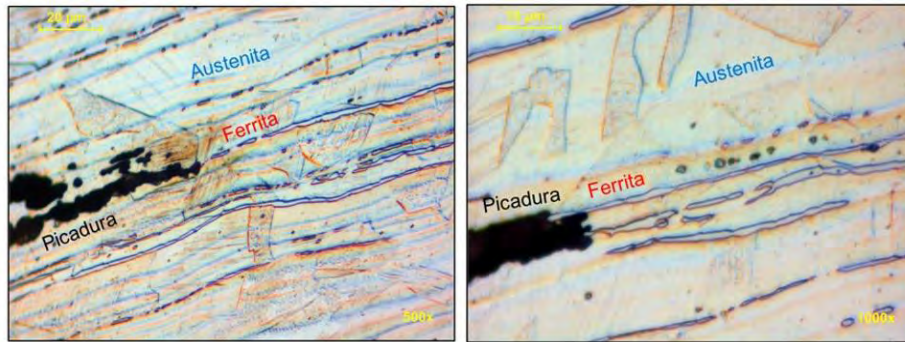


Figura 34. Corrosión selectiva de la ferrita delta y formación y crecimiento de picaduras en la microestructura.

La Tabla 6 presenta los resultados de los ensayos de dureza y una fotografía de una huella típica producto de la indentación en el material. La dureza promedio de la muestra 1 y la muestra 2 es de 178 y 180 HV, respectivamente. Estos valores de dureza son compatibles con los valores de dureza para un acero inoxidable austenítico. Los resultados del análisis químico se presentan en la Tabla 7. La composición química del material de la placa corresponde a la de un acero inoxidable austenítico de designación AISI 316L.

Tabla 6. Dureza del material de la rejilla.

Indentación	Dureza (HV)	
	Muestra 1	Muestra 2
1	177	180
2	181	180
3	169	171
4	185	187
Promedio	178	180



Tabla 7. Composición química del material de la rejilla y de un acero inoxidable AISI 316L

Elemento	Rejilla (%)	AISI 316 L (max. %)
C	0.022	0.03
Mn	1.40	2.00
Si	0.44	1.00
Cr	17.0	16.0-18.0
Ni	9.32	10.0-14.0
P	0.028	0.045
S	0.005	0.03
Mo	2.02	2.0-3.0

Conclusiones y Recomendaciones

La placa ha sido fabricada de un acero inoxidable austenítico del tipo AISI 316L. La microestructura del material presenta una considerable cantidad de ferrita delta. El proceso de troquelado de los agujeros generó una deformación de la microestructura en la pared de los mismos, creando superficies de alta energía con alta susceptibilidad a corroerse. Las condiciones agresivas del medio de trabajo, la alta energía superficial en las paredes, y un proceso inadecuado de pasivado, promovieron la corrosión localizada de las paredes de los agujeros de la placa. A nivel microestructural la corrosión localizada generó una disolución selectiva de la ferrita, nucleación de picaduras, coalescencia, y crecimiento de las mismas. El proceso ocurre masivamente en toda la placa generando una pérdida de resistencia mecánica y posterior fractura de la misma.

Dado que la empresa solicitante indica que las fallas en el reactor coincidieron con la variación en la composición de las materias primas para el proceso, se recomienda controlar el nivel de agresividad de las mismas. Dependiendo de la composición del medio se recomienda conservadoramente no sobrepasar un contenido de cloruros de más de 200 ppm. Dado que la corrosión ocurre de manera localizada en la pared de los agujeros se recomienda controlar el proceso de troquelado, para evitar introducir una considerable deformación en la microestructura, así como realizar un adecuado proceso de pasivado que asegure la protección de las paredes. Se recomienda evaluar la posibilidad de usar otro tipo de acero inoxidable en la construcción de los reactores, de mayor resistencia a la corrosión para las condiciones del medio con el que se trabaja. En particular se recomienda el uso del acero inoxidable dúplex 2205, el cual posee una elevada resistencia a la corrosión por cloruros (hasta 2000 ppm a una temperatura de 104°C).

Caso III: Viga de zaranda vibratoria- Sector Minería

Antecedentes

Se suministró al Laboratorio de Materiales PUCP la viga principal de una zaranda (ver Figura 35), para realizar un análisis de falla de la misma. La figura muestra también un esquema de una zaranda vibratoria comercial y sus partes. A partir de un cuestionario enviado a la empresa solicitante, ésta proporcionó la siguiente información en relación a la viga:

- a) Descripción de la muestra: Viga principal de zaranda vibratoria.
- b) Causa o motivo del servicio solicitado: Fractura presentada en funcionamiento de la zaranda antes del final del periodo de su vida útil.
- c) Equipo al que pertenece: Zaranda de Molino SAG.
- d) Tiempo aproximado de servicio del componente: 60 días
- e) Condiciones de operación: 4000 Ton/h en el molino SAG, 0 a 1800 Ton/H en la zaranda.
- f) ¿La muestra ha sufrido algún tipo de reparación previa a la falla?: La viga no ha sufrido ningún tipo de reparación previa a la falla.
- g) Situación en que se produjo la falla y descripción de la misma: Falló súbitamente durante la operación.
- h) Datos disponibles sobre el material de la muestra: No se dispone de información acerca del material.



Figura 35. Esquema de zaranda vibratoria comercial (izquierda) y viga principal de zaranda suministrada para el análisis (derecha).

Como parte del caso, Noriega realizó un análisis del estado de esfuerzos en la viga mediante simulación por elementos finitos [34]. Considerando una frecuencia de operación de 15 Hz y que las cargas en la zaranda se pueden aproximar como puramente sinusoidales y de amplitud constante [35], se obtuvieron como valores máximos de esfuerzo en el centro de la viga, 3 MPa y 35 MPa, para los casos de carga de trabajo mínima y máxima, respectivamente. Estos valores se muestran en las imágenes de distribución de esfuerzos en la Figura 36. Los valores obtenidos son comparables con aquellos reportados en la literatura (17-23 MPa) para vigas principales de zarandas de geometría similar operando a 14 y 15 Hz [35,36].

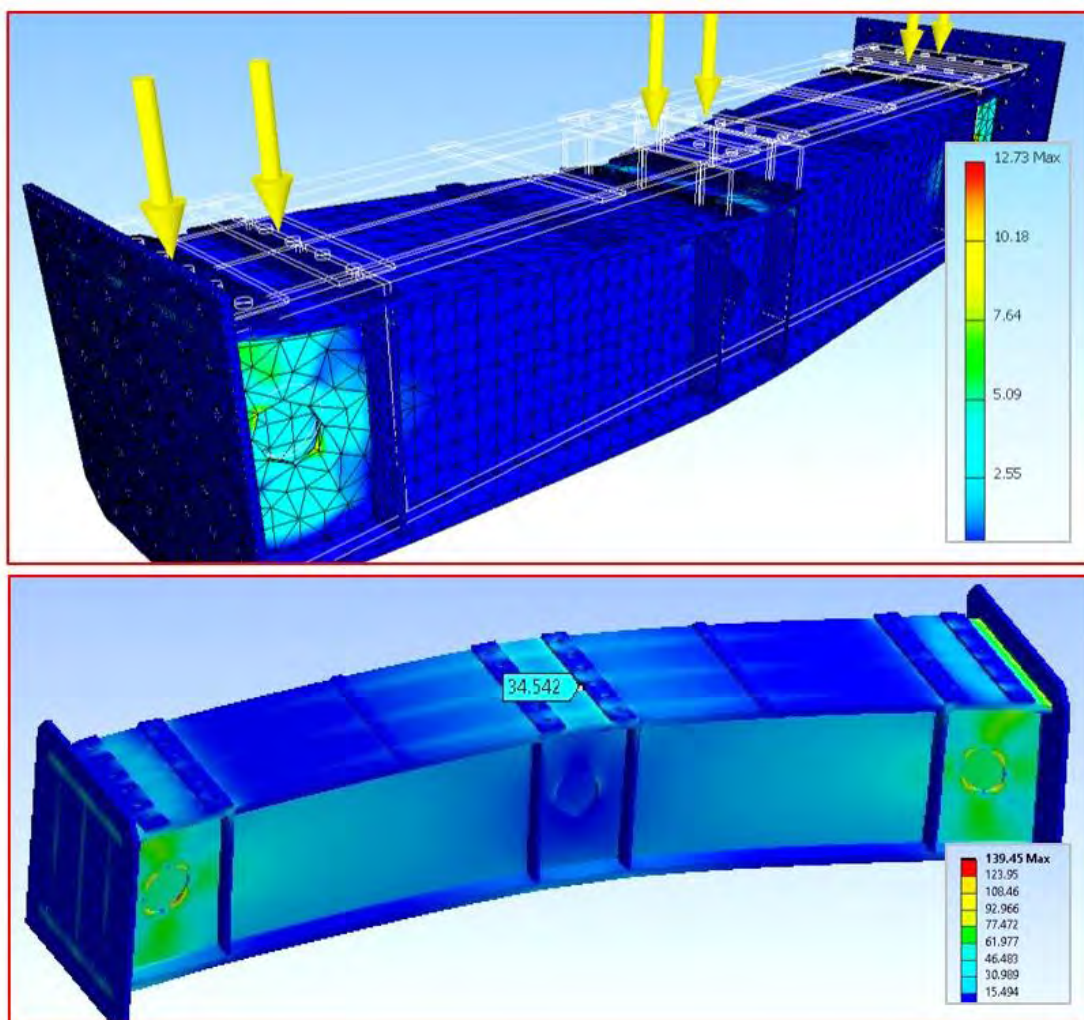


Figura 36. Distribución de esfuerzos obtenida por simulación por elementos finitos en la viga principal bajo condiciones de carga de trabajo mínima (arriba) y máxima (abajo). Las flechas de color amarillo indican la posición de los excitadores.

Adaptada de [34].

Procedimiento Experimental:

Para realizar el análisis de falla al componente suministrado se emplearon los siguientes ensayos:

- a) Inspección visual y macrofractografía
- b) Análisis químico del material
- c) Análisis macrográfico y metalográfico
- d) Ensayos de dureza

La inspección visual y macrofractografía se realizaron a ojo desnudo. El análisis químico del material se realizó mediante espectrometría de emisión atómica en muestras obtenidas de una zona alejada de la fractura, de acuerdo al estándar ASTM A415-08 [16]. Las muestras para análisis macrográfico fueron preparadas de acuerdo al estándar ASTM E340-00 [37] y atacadas químicamente con una solución de Nital al 10% para revelar la macroestructura. Las muestras metalográficas fueron preparadas en conformidad con las normas ASTM E3-11 [17] y ASTM E407-07 [18], y fueron atacadas químicamente con una solución de Nital al 5% para revelar la microestructura. Las muestras fueron observadas en un microscopio óptico Leica modelo DMI 5000M equipado con una cámara digital Leica DFC 320. Las imágenes fueron adquiridas a distintas magnificaciones. Los ensayos de dureza se realizaron de acuerdo al estándar ASTM E384-11 [28], empleando una carga de 10 Kg. La dureza fue evaluada en una muestra metalográfica obtenida a su vez de la muestra macrográfico. En particular se analizó la dureza en la zona de origen de la fisura con la finalidad de descartar la presencia de zonas duras asociadas a la nucleación de fisuras.

Discusión:

Tal como se observa en la Figura 37, la viga presenta una fisura perpendicular al eje de la misma, en la parte central. La fisura coincide con el cordón de soldadura de filete que une una de las placas de asiento para un excitador con la viga. La fisura se propaga mayormente a través del cordón de soldadura y posteriormente se extiende hacia el metal de la viga (siguiendo la dirección de derecha a izquierda en la fotografía inferior de la Figura 37). La fisura se extiende por más de un 75% de la sección total de la viga, hacia las paredes laterales de la misma, tal como se aprecia en la Figura 38. La Figura 39 presenta imágenes de detalle de la fisura luego de realizar una

limpieza de la zona de fractura. Se puede apreciar que, en la soldadura, la fisura se propaga tanto a lo largo de la línea de unión con la placa de asiento, como en el pie de la misma, en una zona que coincide con un cordón de soldadura longitudinal. El cordón de soldadura no fisurado en la placa de asiento y los cordones de la placa adyacente fueron inspeccionados mediante partículas magnéticas (ver imágenes representativas en Figura 40); no se detectaron fisuras o discontinuidades superficiales.



Figura 37. Imágenes de la fisura transversal en la viga.



Figura 38. Imágenes de la fisura en las paredes laterales de la viga.

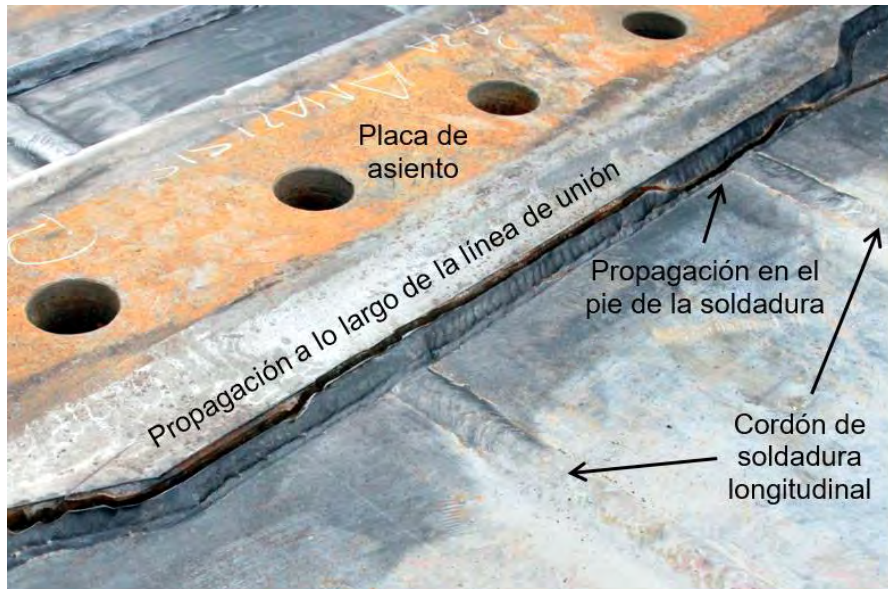


Figura 39. Imágenes de detalle de la fisura.

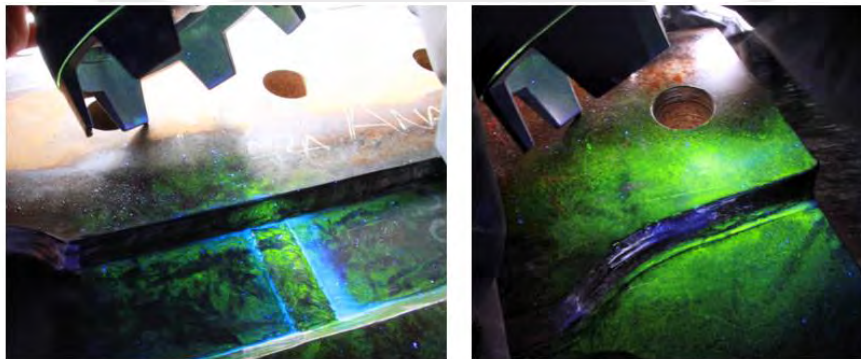


Figura 40. Imágenes representativas de la inspección por partículas magnéticas de los cordones de soldadura no fisurados.

La Figura 41 presenta imágenes de detalle del cordón de soldadura fisurado, en donde se puede evidenciar la presencia de dos cordones que se traslapan, (los cordones han sido denominados cordón A y cordón B). Se puede advertir que la presencia de los dos cordones genera una discontinuidad geométrica en la soldadura, en la interfase entre ellos. Asimismo, en la figura del lado derecho se puede apreciar que la fisura no se propaga propiamente en el pie de la soldadura, sino más bien en la interfase entre los dos cordones. Tal como se muestra en la Figura 42, se realizó un corte en la sección central de la viga con la finalidad de exponer por completo la superficie de fractura. El corte permite evidenciar que la viga está compuesta por tres perfiles I (denominados I1, I2 e I3); los perfiles han sido unidos entre sí mediante cordones longitudinales de soldadura a tope. Se puede observar que la superficie de

fractura correspondiente a la región que aloja el cordón de soldadura longitudinal entre los perfiles I2 e I3 presenta una morfología diferente a la del resto de la superficie de fractura (ver indicación con líneas rojas discontinuas). El análisis detallado de esta región permite advertir la presencia de marcas de playa (ver Figura 43), típicas de un mecanismo de fatiga mecánica. El área fatigada representa aproximadamente sólo un 7% del área sólida transversal de la viga; el remanente exhibe un patrón de fractura frágil, lo cual indica que el nivel de esfuerzos de trabajo nominal ha sido significativamente alto. La región a partir de donde se extienden las marcas de playa indica el origen de la fisura por fatiga, tal como se indica en la Figura 44. Se puede apreciar que el origen coincide con la interfase entre los cordones de soldadura A y B. El cordón de soldadura B no se aprecia por encontrarse en la superficie de fractura complementaria, la cual se muestra en la Figura 45, en donde se puede advertir además que el origen de la fisura por fatiga coincide también con el cordón de soldadura longitudinal entre los perfiles I2 e I3. En base a lo observado se puede inferir que la viga se ha fracturado mediante un mecanismo de fatiga mecánica, generada por la carga cíclica de operación, con un valor de esfuerzos nominales de trabajo significativamente alto. El origen de la fisura coincide con la intersección entre el cordón de soldadura de la placa de asiento del excitador y el cordón de soldadura longitudinal de la viga (cordón de unión entre los perfiles I2 e I3). El origen de la fisura coincide también con la interfase entre los cordones A y B que conforman la soldadura de filete de la placa de asiento. La interfase y la intersección de cordones de soldadura han generado un concentrador de tensiones geométrico, el cual ha actuado como punto de nucleación para una fisura que se ha propagado inicialmente por fatiga y posteriormente de manera frágil y catastrófica.

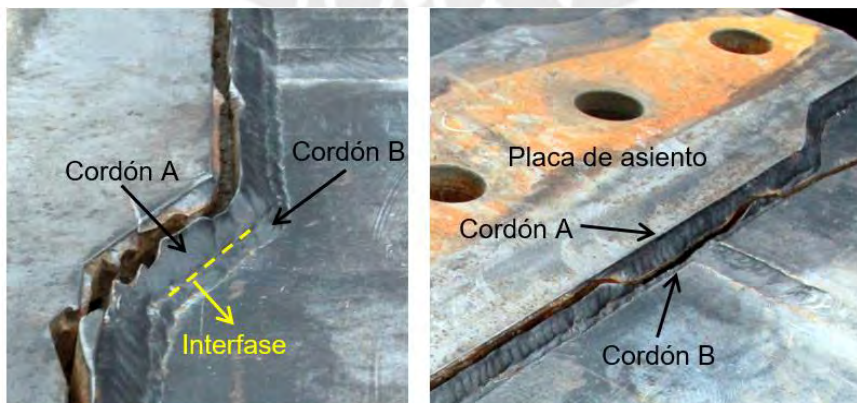


Figura 41. Imágenes de detalle del cordón de soldadura fisurado.

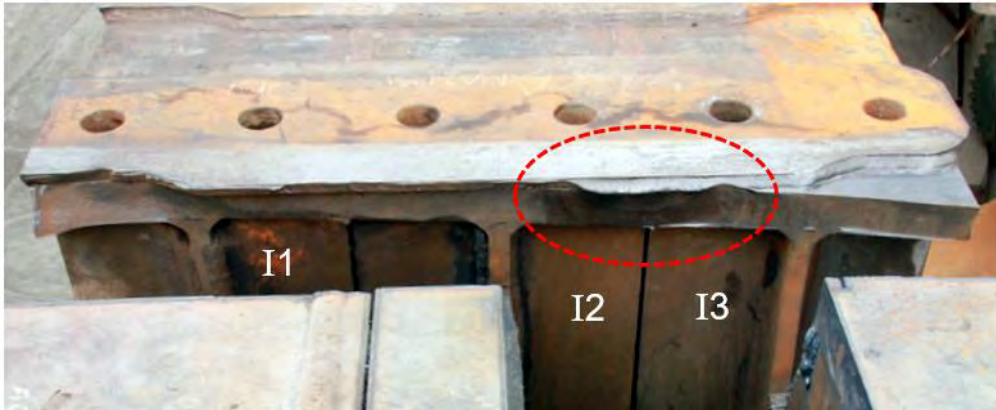


Figura 42. Corte en la sección de fractura de la viga.



Figura 43. Detalle de la zona fatigada en la región entre los perfiles I2 e I3.



Figura 44. Origen de la fisura por fatiga.



Figura 45. Superficie de fractura complementaria a la mostrada en la Figura 44.

La composición química obtenida para los materiales (ver Tabla 8) es compatible con la correspondiente a aceros estructurales de bajo carbono; en particular el acero de los perfiles puede ser considerado como un acero HSLA (High Strength Low Alloy) debido al contenido de Cr de 0.35%, mientras que el acero de la placa de asiento corresponde a un acero ASTM A-36 [38].

Tabla 8. Composición química de los materiales de los perfiles I2 e I3 y de la placa de asiento.

Elemento	Perfil I2	Perfil I3	Placa
C	0.14	0.18	0.20
Si	0.25	0.25	0.14
Mn	1.19	1.20	0.81
P	0.014	0.013	0.022
S	0.005	0.006	0.013
Cr	0.35	0.35	-

La Figura 46 y la Figura 47 muestran micrografías del acero del perfil y de la placa, respectivamente. Se puede apreciar que ambos aceros presentan una microestructura constituida por ferrita (región clara) y perlita (región oscura), típica de aceros estructurales. En el caso de la placa los granos de la microestructura se encuentran deformados de acuerdo a la dirección de laminación de la plancha. En ninguna de las microestructuras se observan fases de naturaleza frágil o discontinuidades que puedan estar asociadas a la nucleación de fisuras.

La Figura 48 presenta la macrografía de la muestra en el origen de la fisura, y las micrografías correspondientes a las distintas regiones: el metal de soldadura del cordón A, la correspondiente zona afectada por el calor, el cordón de soldadura longitudinal (de unión entre perfiles para formar la viga) y el metal base de la placa de asiento. En particular, los cordones de soldadura presentan una microestructura típica constituida por ferrita acicular. Esta microestructura también es observada en la zona afectada por el calor del cordón A, la cual básicamente coincide con el cordón de soldadura longitudinal. En base a lo observado se puede concluir que el origen de la fisura coincide con la confluencia de los cordones de soldadura A y longitudinal. Más allá de la discontinuidad geométrica que esto pueda generar, a nivel microestructural no se observan discontinuidades que puedan estar asociadas a la nucleación de fisuras.



Figura 46. Microestructura del acero del perfil.

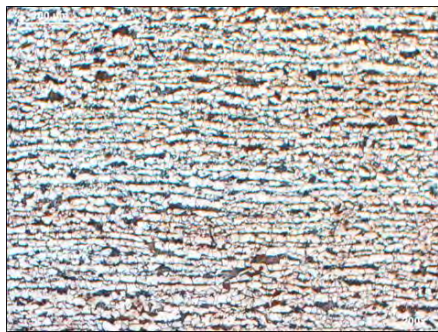


Figura 47. Microestructura del acero de la placa.

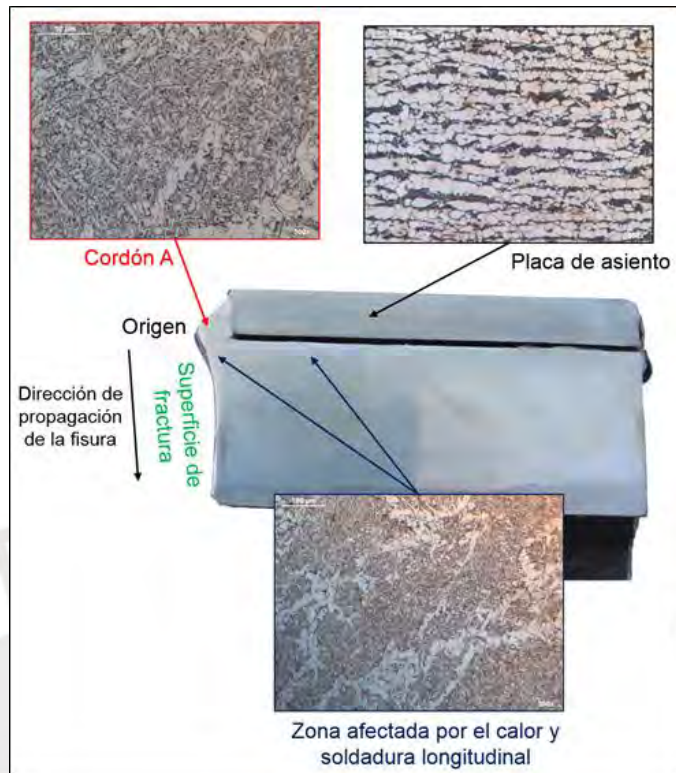


Figura 48. Macrografía de la zona de origen de la fisura y correspondientes micrografías.

La Figura 49 presenta un esquema de la muestra analizada y los puntos en los cuales se evaluó la dureza. La tabla en la figura presenta los correspondientes valores de dureza. Se puede apreciar que la dureza en el origen (punto 1: 199 HV y punto 2: 198 HV) no presenta valores elevados, que podrían estar asociados a microestructuras frágiles, que a su vez estarían asociadas a puntos de nucleación de fisuras. La dureza en una línea paralela a la dirección de propagación de la fisura (puntos 3 a 8) corresponde a la dureza de la zona afectada por el calor (ZAC) y la dureza de la soldadura longitudinal, y tampoco presenta valores elevados asociados a microestructuras frágiles (dureza entre 191 y 203 HV). El valor de dureza promedio en el cordón de soldadura A es de 194 HV. El máximo valor de dureza registrado es de 298 HV, en la zona afectada por el calor en la placa de asiento; sin embargo, esta zona no está relacionada con el origen de la fisura. En base a lo observado se puede inferir que ni la zona de origen de la fisura, ni el conjunto en general presenta valores elevados de dureza asociados a microestructuras frágiles susceptibles de generar fisuras. Los valores obtenidos son adecuados para una aplicación estructural.

Punto	Dureza (HV10)	Zona
1	198	Origen
2	199	
3	196	
4	191	ZAC y soldadura longitudinal
5	201	
6	203	
7	202	
8	192	
9	185	Cordón A
10	202	ZAC
11	298	
12	248	Placa
13	162	

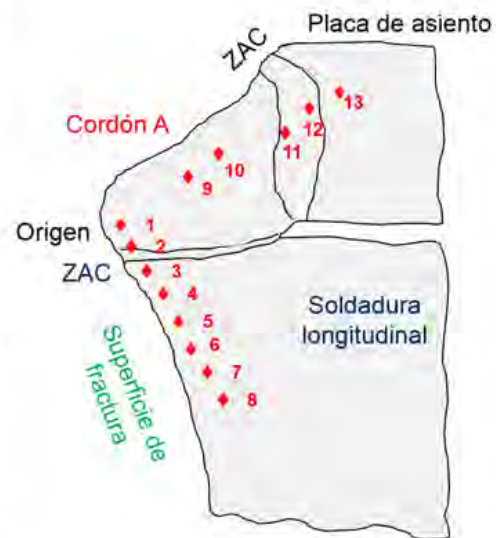


Figura 49. Resultados de evaluación de dureza en la zona de fractura de la viga.

Conclusiones y Recomendaciones

La viga ha sido fabricada a partir de 3 perfiles I de acero HSLA, unidos mediante soldaduras a tope. La placa de asiento del excitador involucrada en la zona de fractura es de acero ASTM A-36, y está unida a la viga mediante cordones de soldadura de filete. Las características de los aceros son apropiadas para la correspondiente aplicación. El origen de la fractura coincide con la intersección entre la soldadura de filete que une la placa de asiento con la viga y la soldadura longitudinal que une los perfiles I que conforman la viga. Asimismo, la zona de origen coincide con la interface entre los dos cordones que conforman la soldadura de filete que une la placa de asiento con la viga. La confluencia de los cordones de soldadura ha generado un concentrador de tensiones geométrico a partir del cual se ha generado una fisura, la cual se ha propagado inicialmente mediante un mecanismo de fatiga mecánica y posteriormente de manera frágil catastrófica, generando la rotura de la viga.

Se recomienda revisar el diseño de la viga con la finalidad de evitar la confluencia de cordones de soldadura que puedan originar concentradores de tensiones. Se recomienda supervisar las operaciones de soldadura para asegurar la uniformidad y transición adecuada de los cordones de soldadura que unen la placa de asiento con la viga. Se recomienda revisar el dimensionamiento de la viga y la carga aplicada dado que el patrón de fractura sugiere que los niveles de esfuerzo de trabajo son significativamente elevados.

Capítulo 4: Conclusiones

- Como medio de verificación de la experiencia profesional del autor del informe profesional se han presentado tres casos de análisis de falla metalúrgico, correspondientes a tres industrias locales: maquinaria pesada, química, y minería.
- Cada caso presentado involucra la recopilación de información del componente, el desarrollo de un conjunto de ensayos de laboratorio, la interpretación de resultados, la determinación de la causa o causas de falla, y la presentación del reporte técnico a la empresa solicitante.
- Las causas de falla en los presentes casos están relacionadas con aspectos de deficiencias en operación, defectos en el material empleado, y errores en la fabricación. Estas fallas se presentan de manera recurrente en la industria nacional, independientemente de la procedencia de los equipos o componentes analizados.
- En todos los casos se demuestra la eficacia del Análisis de Falla como herramienta de la ingeniería para determinar la causa raíz física de falla de los componentes en estudio. Además de establecer la causa, como resultado del análisis se emiten recomendaciones para evitar que la falla vuelva a ocurrir.
- El resultado de los análisis realizados ha permitido a las empresas solicitantes establecer responsabilidades, sustentar reclamos, atender aspectos legales, resolver aspectos económicos y en general ejecutar las medidas correctivas para mejorar sus aspectos de calidad y seguridad.

Referencias Bibliográficas

- [1] Asociación de grifos y estaciones de servicios del Perú, acceso: 01 de agosto de 2020
<http://agesp.org.pe/noticias/cronologia-de-la-tragedia-en-villa-el-salvador-que-deja-23-muertos-y-ningun-responsable/>
- [2] Diario Expreso, acceso: 01 de agosto de 2020
<https://www.expreso.com.pe/actualidad/villa-el-salvador-se-eleva-a-34-los-muertos-por-deflagracion-de-cisterna-de-gas/>
- [3] Osinergmin: Informe sobre evento ocurrido el 23 de enero de 2020 en Villa el Salvador, Informe 108-2020-OS/OR LIMA SUR, 2020
- [4] NACE: International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study, NACE International, 2016
- [5] National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, Report to the President, Deepwater: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling, 2011
- [6] Panamericana Noticias, acceso: 01 de agosto de 2020
<https://panamericana.pe/locales/288719-tragedia-ves-nino-5-anos-convierte-victima-34-deflagracion>
- [7] El Diario Noticias, acceso: 01 de agosto de 2020
<https://eldiariony.com/2014/09/04/negligencia-provoco-derrame-de-crudo-en-el-golfo-de-mexico-dice-juez/>
- [8] ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, 2002
- [9] National Transportation Safety Board Bureau of Accident Investigation Washington: Aircraft Accident Report--Aloha Airlines, Flight 243, Boeing 737-200, N73711, 1989
- [10] Aviation Accidents, acceso: 01 de agosto de 2020
<https://www.aviation-accidents.net/aloha-airlines-boeing-b737-200-n-73711-flight-no-aq243/>
- [11] Engineering Failure Analysis, acceso: 01 de agosto de 2020
<https://www.journals.elsevier.com/engineering-failure-analysis>
- [12] Journal of Failure Analysis and Prevention, acceso: 01 de agosto de 2020
<https://www.springer.com/journal/11668>
- [13] N. Simon, J. Ryde y W. Eleonora: Comparison of Scanning Laser Range-Finders and Millimeter-Wave Radar for Creating a Digital Terrain Map, Machine Vision and Mechatronics in Practice, 2014

- [14] S. Frimpong y M. Thiruvengadam: Multi -Body Dynamic Modeling and Simulation of Crawler-Formation Interactions in Surface Mining Operations – Crawler Kinematics, Global Journal of Research in Engineering: F Electrical and Electronics Engineering 15, 5, 2015
- [15] S. Frimpong y M. Thiruvengadam: Contact and Joint Forces Modeling and Simulation of Crawler-formation Interactions, Journal of Powder Metallurgy and Mining, 4, 2, 2015
- [16] ASTM E415-08, Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel, Pennsylvania, 2008
- [17] ASTM E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, Pennsylvania, 2011
- [18] ASTM E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, Pennsylvania, 2007
- [19] ASTM E18-08 Standard Test Method for Rockwell Hardness of Metallic Materials, ASTM International, Pennsylvania, 2008
- [20] ASTM E10-10 Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, ASTM International, Pennsylvania, 2010
- [21] ASTM E23-7 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM International, Pennsylvania, 2007
- [22] ASM Metals Handbook Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, ASM International, Ohio, 1990
- [23] Documento confidencial: Especificación Steel Casting Crawler Links, suministrada por la empresa solicitante, 2012
- [24] ASM Handbook Volume 7: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, ASM International, 1990
- [25] C. Li y Z. Guangying: Intergranular Fracture of Low-Alloy Cast Steel, Materials Characterization 36:65-72, 1996
- [26] Abhishek Engineering and Chemicals, acceso: 01 de agosto de 2020
<https://aeclindia.com/copper-sulphate-plants/>
- [27] G. Vander Voort: Metallography: Principles and Practices, ASM International, 1999
- [28] ASTM E384-11e1, Standard Test Methods for Knoop and Vickers Hardness of Materials, ASTM International, Pennsylvania, 2011
- [29] ASM Specialty Handbook: Stainless Steels, ASM International, 1994

- [30] S. Mameng y R. Pettersson: Localized corrosion of stainless steels depending on chlorine dosage in chlorinated water. ACOM 3, pp. 2-13, 2011
- [31] Outokumpu: Corrosion Handbook, 10th Edition, 2009
- [32] T. Roberts: Permitted chloride levels for stainless steel in water, Enmax Ltd. 2011
- [33] J. Tverberg: The role of alloying elements on the fabricability of austenitic stainless steel, Society of Manufacturing Engineers, 2003
- [34] A. Noriega: "Análisis de falla de viga de zaranda vibratoria de molino," Tesis de Maestría en Ingeniería de Soldadura, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016
- [35] J. Steyn: Fatigue failure of deck support beams on a vibrating screen, Int. J. Press. Vessel. Pip., vol. 61, pp. 315–327, 1995
- [36] W. F. He y A. M. Xian: Statics and modal analysis for large vibrating screen, Appl. Mech. Mater., vol. 380–384, pp. 136–139, 2013
- [37] ASTM E340-00: Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys, ASTM International, Pennsylvania, 2006
- [38] ASTM A-36/A 36M-08: Standard Specification for Carbon Structural Steel, ASTM International, Pennsylvania, 2008