

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**DETERMINACIÓN MEDIANTE LA REALIZACIÓN ANÁLISIS DE  
FALLA DE LAS CAUSAS MÁS COMUNES DE FALLA EN EJES DE  
EQUIPOS INDUSTRIALES**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:**

**JORGE LUIS DÍAZ CÁCERES**

**ASESOR: Ing. Daniel Merino Ponce**

**Lima, agosto del 2017**

## RESUMEN

Uno de los componentes más importantes en la mayoría de máquinas que existen en el mundo son los ejes. Una falla en estos componentes, involucra un elevado costo, no solo por el costo del componente en sí mismo, sino también, porque al fallar dicho componente, puede parar toda una línea de producción por varias horas e incluso días y en trabajos como operaciones mineras, dichas paradas no programadas simbolizan grandes pérdidas económicas.

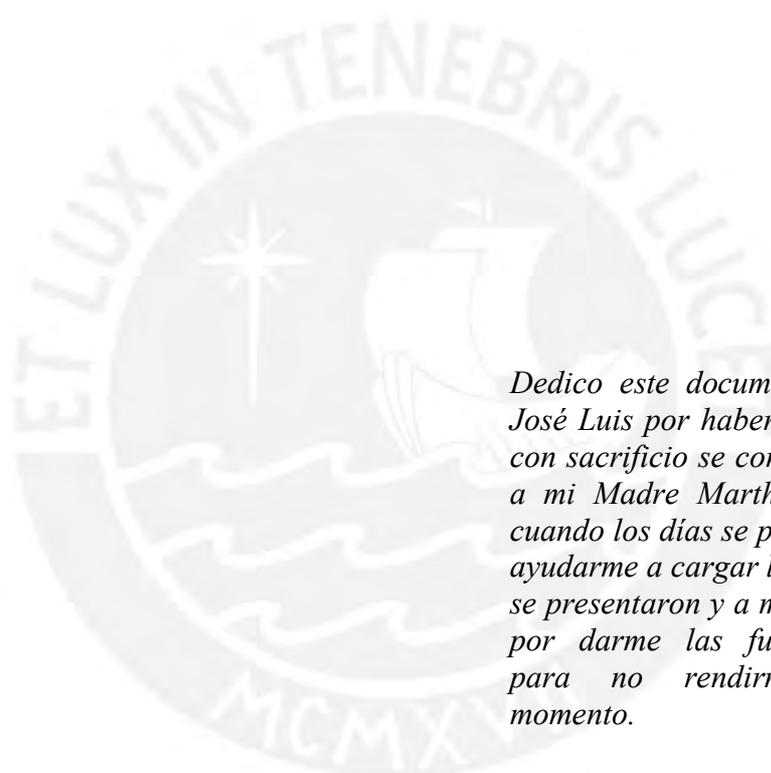
El presente documento tiene como objetivo determinar mediante la realización de dos análisis de falla y el estudio de data del laboratorio las causas de falla más comunes en ejes de equipos industriales. Los componentes a los que se realizarán los análisis de falla pertenecen a los casos externos que llegan comúnmente al Laboratorio de Materiales de la PUCP.

La secuencia del trabajo desarrollado fue recolectar información sobre la metodología que se sigue para realizar un análisis de falla, para que de esta manera se pueda llevar a cabo los análisis de falla a 2 ejes pertenecientes a una caja reductora de un molino de bolas. La secuencia que utiliza este documento sigue los alineamientos planteados por el Laboratorio de Materiales de la PUCP.

Una vez realizado los reportes de los casos mencionados, se procede al estudio y análisis de otros 7 reportes que se encuentran en la base de datos del laboratorio, para que de esta manera se pueda presentar resúmenes de cada uno de estos casos siguiendo una secuencia planteada.

Finalmente, se procede a analizar los resultados donde se encuentra que el problema más recurrente tiene que ver con deficiencias en el material empleado en la fabricación del componente. Con los resultados obtenidos se plantean recomendaciones y conclusiones.

## DEDICATORIA



*Dedico este documento a mi Padre José Luis por haberme enseñado que con sacrificio se consiguen las cosas, a mi Madre Martha por apoyarme cuando los días se pusieron difíciles y ayudarme a cargar los problemas que se presentaron y a mi hijita Valentina por darme las fuerzas necesarias para no rendirme en ningún momento.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mama Rodita, mi amigo Chato y a toda la familia Alarcón por adoptarme durante los primeros meses de estadía en una nueva ciudad, lejos de mis padres, familia y amigos. Su confianza y cariño fueron fundamentales para que pueda sopesar el trago amargo de la soledad durante ese periodo de nuevos cambios.

También quiero agradecer a mis padres, por nunca haber dudado de mí. Su confianza y su sacrificio fueron necesarios para que jamás me dé por vencido y siempre trate de salir adelante. Nunca olvidaré todo lo que hicieron por mí y espero poder retribuirles todo su esfuerzo algún día.

Así mismo, quisiera agradecer a todos los profesores que me enseñaron durante mi estadía en la especialidad de Ingeniería Mecánica. Al Prof. Girón, Prof. Muscari, Prof. Tamashiro, Prof. Acosta, Prof. Lazarte, Prof. Lean, Prof. Cuisano, Prof. Jorge Fernández, por haber confirmado que la decisión de estudiar Ingeniería Mecánica fue la mejor que pude tomar en mi vida. Así mismo, al Prof. Jorge Alencastre por ser además de un gran profesor un gran amigo y mostrar siempre su apoyo en cualquier situación. También, a todos los profesores del taller por compartir cada una de sus experiencias y tener toda la disposición de enseñarme cuando se lo necesite.

Finalmente, quisiera agradecer especialmente a mi asesor, el Prof. Daniel Merino, por guiarme en cada etapa de la elaboración de este documento, por enseñarme cada uno de los procedimientos necesarios para realizar un reporte de AFA y en especial por enseñarme el curso de END, curso que fue determinante para que decida enfocar mi futura especialización en el área de Materiales. Muchas gracias por todo.



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TÍTULO : DETERMINACIÓN MEDIANTE LA REALIZACIÓN ANÁLISIS DE FALLA DE LAS CAUSAS MÁS COMUNES DE FALLA EN EJES DE EQUIPOS INDUSTRIALES.

ÁREA : Materiales # 123

PROPUESTO POR : Ing. Daniel Merino Ponce

ASESOR : Ing. Daniel Merino Ponce

TESISTA : Jorge Luis Díaz Cáceres

CÓDIGO : 20102177

FECHA : 25.04.2016



**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

Uno de los componentes más importantes en la mayoría de máquinas que existen en el mundo son los ejes. Una falla en estos componentes, involucra un elevado costo, no solo por el costo del componente en sí mismo, sino también, porque al fallar dicho componente, puede parar toda una línea de producción por varias horas e incluso días y en trabajos como operaciones mineras, dichas paradas simbolizan grandes pérdidas de producción.

Es por esta razón que cuando ocurre una falla en estos componentes, los empresarios desean determinar qué fue lo que ocasionó dicha pérdida de dinero, no solo para poder determinar al culpable de la falla para pedir las compensaciones correspondientes, sino también, para poder evitar futuras fallas y tener así un control más estricto a la hora de adquirir y mantener dichos componentes.

El presente trabajo tiene por objetivo desarrollar el análisis de falla de dos componentes que a menudo llegan al Laboratorio de Materiales, de tal manera que se aprenda los pasos a seguir y la importancia de desarrollar un buen análisis de falla, de las conclusiones de estos estudios, sumados a los datos que el Laboratorio tiene de varios casos de análisis de falla de ejes de todo tipo de aplicaciones, poder sacar conclusiones generales que puedan servir para presentar a la industria y mejorar el desempeño de estos componentes de máquinas.

✓

Q



**DETERMINACIÓN MEDIANTE LA REALIZACIÓN ANÁLISIS DE  
FALLA DE LAS CAUSAS MÁS COMUNES DE FALLA EN EJES DE  
EQUIPOS INDUSTRIALES.**

Introducción

1. Fatiga en ejes.
2. Análisis de falla en ejes fracturados.
3. Casos analizados en el laboratorio de materiales de la PUCP.
4. Análisis y discusión de resultados.

Observaciones y Recomendaciones.

Conclusiones

Bibliografía

*Máximo : 100 pdginas*

Ing. Daniel Merino Ponce  
Asesor

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	i
INDICE DE TABLAS .....	iv
INDICE DE FIGURAS.....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
FATIGA EN EJES .....	3
1.1. Mecanismos de falla en ejes .....	3
1.1.1. Desgaste.....	3
1.1.2. Deformación Plástica.....	4
1.1.3. Corrosión.....	4
1.1.4. Fatiga por Contacto .....	4
1.1.5. Fractura.....	5
1.2. Qué es la fatiga .....	6
1.2.1. Fatiga en ejes .....	7
1.2.2. Tipos de fatigas que se presentan en los ejes .....	7
1.3. Principales factores que ocasionan fallas en los ejes.....	9
1.3.1. Problemas en el diseño .....	9
1.3.2. Problemas en la fabricación.....	9
1.3.3. Problemas en el material .....	10
CAPÍTULO 2 .....	11
ANÁLISIS DE FALLA EN EJES .....	11
2.1. Metodología .....	11
2.2. Inspección Visual .....	13
2.2.1. Análisis fractográfico .....	14
2.2.2. Ensayos no destructivos .....	17
2.3. Caracterización del material.....	18
2.3.1. Análisis químico.....	18
2.3.2. Metalografía .....	19
2.4. Ensayos mecánicos.....	21
2.4.1. Ensayo de tracción .....	21
2.4.2. Ensayos de dureza Rockwell.....	21
2.4.3. Ensayos de dureza Vickers.....	22
2.4.4. Ensayo de dureza Brinell .....	22
CAPÍTULO 3 .....	23

CASOS ANALIZADOS EN EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA PUCP.....	23
3.1. Caso 1: Eje 1 de Reductor FALK 465 A1.....	23
3.1.1. Descripción del componente y de la falla .....	23
3.1.2. Inspección Visual.....	25
3.1.3. Análisis químico.....	28
3.1.4. Ensayo de dureza.....	29
3.1.5. Metalografía .....	29
3.1.6. Diagnóstico .....	31
3.2. Caso 2: Eje 2 de Reductor FALK 465 A1.....	32
3.2.1 Descripción del componente y de la falla .....	32
3.2.2. Inspección visual.....	33
3.2.3. Análisis químico.....	35
3.2.4. Ensayo de dureza.....	36
3.2.5. Metalografía .....	36
3.2.6. Diagnóstico .....	38
3.3. Caso 3: Eje Reductor de Bomba .....	39
3.3.1. Descripción del componente y de la falla .....	39
3.3.2. Inspección Visual.....	40
3.3.3. Análisis Químico.....	42
3.3.4. Ensayo de Dureza.....	43
3.3.5. Metalografía .....	43
3.3.6. Diagnóstico .....	45
3.4. Caso N°4: Eje fracturado lado de altas de reductor SWE Type.....	47
3.4.1. Descripción del componente y de la falla .....	47
3.4.2. Inspección Visual.....	49
3.4.3. Análisis Químico.....	52
3.4.4. Ensayo de Dureza.....	52
3.4.5. Metalografía .....	53
3.4.6. Diagnóstico .....	54
3.5. Caso 5: Espiga de rotor de turbo-compresor.....	56
3.5.1. Descripción del componente y de la falla .....	56
3.5.2. Inspección Visual.....	57
3.5.3. Análisis Químico.....	59
3.5.4. Ensayo de Dureza.....	59
3.5.5. Metalografía .....	60
3.5.6. Diagnóstico .....	62

3.6. Caso 6: Eje reductor de faja transportadora .....	63
3.6.1. Descripción del componente y de la falla .....	63
3.6.2. Inspección Visual .....	64
3.6.3. Análisis Químico.....	67
3.6.4. Ensayo de Dureza.....	68
3.6.5. Metalografía .....	68
3.6.6. Diagnóstico .....	70
3.7. Caso 7: Eje de polea de Sistema de izaje de una mina.....	71
3.7.1. Descripción del componente y de la falla .....	71
3.7.2. Inspección Visual .....	72
3.7.3. Análisis Químico.....	74
3.7.4. Ensayo de Dureza.....	74
3.7.5. Metalografía .....	75
3.7.6. Diagnóstico .....	77
3.8. Caso 8: Eje principal de Trituradora .....	78
3.8.1. Descripción del componente y de la falla .....	78
3.8.2. Inspección Visual .....	79
3.8.3. Análisis Químico.....	80
3.8.4. Ensayo de Dureza.....	81
3.8.5. Metalografía .....	81
3.8.6. Diagnóstico .....	81
3.9. Caso 9: Eje Inoxidable fallado .....	83
3.9.1. Descripción del componente y de la falla .....	83
3.9.2. Inspección Visual .....	83
3.9.3. Análisis Químico.....	85
3.9.4. Ensayo de Dureza.....	85
3.9.5. Metalografía .....	85
3.9.6. Microscopía electrónica de barrido.....	85
3.9.7. Diagnóstico .....	86
CAPÍTULO 4 .....	87
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	87
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES .....	91
CONCLUSIONES .....	93
BIBLIOGRAFÍA.....	95

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 - Análisis Químico a Eje FALK N°1 .....	28
Tabla 3.2 -Resultados del ensayo de dureza del Eje FALK N°1 .....	29
Tabla 3.3 - Análisis químico a Eje FALK N°2 .....	35
Tabla 3.4 - Resultados del ensayo de dureza del Eje FALK N°2 .....	36
Tabla 3.5 - Análisis químico a Eje reductor alta equipo de bombeo .....	42
Tabla 3.6 - Resultados del ensayo de dureza del Eje reductor de bombeo .....	43
Tabla 3.7 - Análisis químico al Eje reductor alta caja reductora SWE.....	52
Tabla 3.8 - Resultados del ensayo de dureza del Eje reductor de bombeo .....	52
Tabla 3.9 - Análisis químico a la espiga de rotor de embarcación .....	59
Tabla 3.10 - Resultados del ensayo de dureza de la espiga del rotor de la embarcación .....	59
Tabla 3.11 - Análisis químico al eje de la faja transportadora de la planta de chancado.....	67
Tabla 3.12 - Resultados del ensayo de dureza eje de la faja transportadora de la planta de chancado .....	68
Tabla 3.13 - Análisis químico al eje de polea de sistema de izaje de mina de socavón .....	74
Tabla 3.14 - Resultados del ensayo de dureza eje de la faja transportadora de la planta de chancado .....	74
Tabla 3.15 - Análisis químico al eje principal de trituradora.....	80
Tabla 3.16 - Resultados del ensayo de dureza del eje principal de trituradora .....	81
Tabla 3.17 - Resultados del ensayo de dureza del eje inoxidable .....	85
Tabla 4.1 - Resumen de causas de falla encontrados en los casos analizados .....	89

## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Variación de esfuerzos de un punto en el tiempo.....	7
Fig. 1.2 - Esquema de comportamiento de esfuerzos en fallas por fatiga.....	8
Fig. 2.1 - Metodología de un análisis de falla en el laboratorio de materiales de la PUCP.....	12
Fig. 2.2 - Superficies de fractura a nivel micro.....	15
Fig. 2.3 - Esquema de morfología de falla por fatiga.....	16
Fig. 2.4 - Esquema de morfología de falla por fatiga flexorotativa y Torsión.....	16
Fig. 2.5 - Fisura encontrada usando partículas magnéticas en el redondeo de cambio de sección de eje reductor.....	18
Fig. 2.6 - Espectrómetro de emisión óptica o de chispa.....	19
Fig. 2.7 - Máquina de moldeo.....	20
Fig. 2.8 - Platos de diamante.....	20
Fig. 2.9 - Microscopio Leica.....	20
Fig. 3.1 - Molino de bolas Dominion.....	24
Fig. 3.2 - Eje de reductor FALK N°1.....	25
Fig. 3.3 - Fisura de Eje Falk N°1.....	26
Fig. 3.4 - Corte realizado para Inspección visual en eje FALK N°1.....	26
Fig. 3.5 - Superficie de Fractura.....	27
Fig. 3.6 - Propagación de la fisura en la sección transversal del componente.....	27
Fig. 3.7 - Radio de curvatura de la base del canal chavetero.....	28
Fig. 3.8 - Micrografía de la zona afectada, sin ataque a 100x.....	30
Fig. 3.9 - Micrografía de la zona afectada, con ataque a 1000x.....	30
Fig. 3.10 - Tipo de falla por fatiga del eje FALK N°1.....	31
Fig. 3.11 - Eje de reductor FALK N°2.....	32
Fig. 3.12 - Fisura del Eje Falk N°2.....	33
Fig. 3.13 - Corte realizado para inspección visual en Eje FALK N°2.....	34
Fig. 3.14 - Superficie de Fractura en el eje FALK N°2.....	34
Fig. 3.15 - Radio de curvatura de la base del canal chavetero del eje FALK N°2.....	35
Fig. 3.16 - Micrografía de la zona afectada, sin ataque a 100x.....	37
Fig. 3.17 - Micrografía de la zona afectada, con ataque a 100x.....	37
Fig. 3.18 - Tipo de falla por fatiga del eje FALK N°2.....	38
Fig. 3.19 - Eje de caja reductora de bomba.....	39
Fig. 3.20 - Superficie de fractura eje de caja reductora de bomba.....	40
Fig. 3.21 - Zona de fractura final de eje de reductor de bomba.....	41
Fig. 3.22 - Acabado superficial de un extremo del eje con huellas del mecanizado.....	41
Fig. 3.23 - Presencia de corrosión en el fondo del canal además de un pésimo acabado superficial.....	42
Fig. 3.24 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 500x.....	44
Fig. 3.25 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 200x.....	44
Fig. 3.26 - Micrografía de la zona afectada con ataque a 500x.....	45
Fig. 3.27 - Mecanismo de falla por fatiga del eje del reductor del equipo de bombeo.....	46
Fig. 3.28 - Eje de caja reductora de equipo de bombeo.....	47
Fig. 3.29 - Parte “C” atrapada entre los dos extremos del eje.....	48

Fig. 3.30 - Esquema de la caja reductora del equipo de bombeo.....	48
Fig. 3.31 - Frentes de propagación de fisura del eje .....	49
Fig. 3.32 - Inicio de fisura de Frente de propagación 1 .....	49
Fig. 3.33 - Inicio de fisura de frete de propagación 2 .....	50
Fig. 3.34 - Superficie de fractura. Zona de rotura final.....	50
Fig. 3.35 - Acabado superficial de fondo de canal chavetero .....	51
Fig. 3.36 - Radio de Curvatura de base de canal chavetero .....	51
Fig. 3.37 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 200x.....	53
Fig. 3.38 - Micrografía de la zona afectada con ataque a 500x .....	54
Fig. 3.39 - Mecanismo de falla por fatiga del eje reductor de equipo de bombeo .....	55
Fig. 3.40 - Partes de la Espiga del rotor del turbo compresor .....	56
Fig. 3.41 - Superficie de fractura zona cilíndrica.....	57
Fig. 3.42 - Superficie de fractura zona roscada. Propagación a 45° respecto al eje axial.....	58
Fig. 3.43 - Superficie de fractura de la zona roscada. Zona de rotura final .....	58
Fig. 3.44 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 50x.....	60
Fig. 3.45 - Micrografía de la zona afectada con ataque a 1000x .....	61
Fig. 3.46 - Micrografía a 500x .....	61
Fig. 3.47 - Mecanismo de falla por fatiga de las dos superficies de fractura.....	62
Fig. 3.48 - Componentes para analizar de la faja de la planta de chancado.....	63
Fig. 3.49 - Dimensión del eje de la faja de la planta de chancado .....	64
Fig. 3.50 - Diferentes puntos de inicio de fractura. Zona final de rotura.....	65
Fig. 3.51 - Superficie de Fractura de eje de faja de chancado. Zona de rotura final..	65
Fig. 3.52 - Radio de curvatura de base de canal chavetero .....	66
Fig. 3.53 - Dirección de propagación de fisura dentro de canal chavetero. Transversal al eje .....	66
Fig. 3.54 - Dirección de propagación de fisura dentro de canal chavetero. Longitudinal al eje.....	67
Fig. 3.55 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 50x.....	69
Fig. 3.56 - Micrografía de la zona afectada a 1000x.....	69
Fig. 3.57 - Mecanismo de falla por fatiga del eje de faja de chancado .....	70
Fig. 3.58 - Componentes para análisis de sistema de izaje .....	71
Fig. 3.59 - Superficies de fractura de ambas partes del eje del sistema de izaje.....	72
Fig. 3.60 - Superficie de Fractura sin deformación plástica. Rotura final .....	73
Fig. 3.61 - Inicio de fractura en eje de sistema de izaje .....	73
Fig. 3.62 - Micrografía de zona afectada sin ataca a 50x.....	75
Fig. 3.63 - Micrografía de zona afectada sin ataque a 100x .....	76
Fig. 3.64 - Micrografía de zona afectada con ataque a 200x .....	76
Fig. 3.65 - Mecanismo de falla por fatiga de eje de sistema de izaje.....	77
Fig. 3.66 - Eje Principal de trituradora.....	78
Fig. 3.67 - Superficie de fractura de eje principal de trituradora .....	79
Fig. 3.68 - Zonas de inicia de fractura. Pliegues formados por los diferentes frentes de ataque.....	80
Fig. 3.69 - Mecanismo de falla por fatiga del eje principal de trituradora.....	82
Fig. 3.70 - Eje inoxidable fallado.....	83
Fig. 3.71 - Superficie de ataque a eje inoxidable .....	84
Fig. 3.72 - Canal chavetero de eje inoxidable .....	84

## INTRODUCCIÓN

Los ejes son elementos de máquina que tiene como principal característica realizar un movimiento giratorio sobre su propio eje. Estos, normalmente, son de forma circular, aunque en algunos casos pueden tener forma poligonal. Son portadores de ruedas, ruedas dentadas, poleas, cojinetes, rodamientos, etc. Finalmente, dependiendo si transmiten o no potencia, pueden clasificarse en ejes o árboles (ejes de transmisión).

Los ejes de transmisión están presentes en todos los equipos que se alimentan a través de motores eléctricos o motores de combustión, es por esto que se puede afirmar que están presentes en todos los equipos industriales de una línea de producción, incluyendo los equipos de mayor envergadura. Es por esta razón que es de vital importancia mantener la disponibilidad del equipo lo más alto posible y tratar de erradicar las paradas no programadas, ya que estas paradas involucran elevados costos por producción.

Los ejes de transmisión son componentes mecánicos sometidos a cargas cíclicas de flexión y torsión. Además, los árboles presentan discontinuidades geométricas, cambios de sección o canales chaveteros, que actúan como concentradores de tensiones.

Los esfuerzos cíclicos y los concentradores de tensiones son dos componentes fundamentales para que ocurra una falla de fractura por fatiga, mecanismo de falla con mayor número de ocurrencias.

En este contexto, el presente trabajo de tesis comprende la realización de dos análisis de falla a dos ejes de una caja reductora que pertenece a molino de bolas Dominion.

Así mismo, el presente trabajo plantea realizar el estudio de siete análisis de falla realizados en el laboratorio de materiales de la PUCP.

Finalmente, el trabajo desarrollado plantea evaluar los resultados de los 9 casos estudiados para que de esta manera se pueda plantear conclusiones sobre cuáles fueron los mecanismos de falla más comunes, las causas de falla más recurrentes y plantear recomendaciones para poder reducir este tipo de problemas.

### **OBJETIVO GENERAL**

El objetivo principal del presente tema de tesis es determinar mediante la realización de análisis de falla las causas más comunes de falla en los ejes de equipos industriales.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar literatura sobre análisis de falla en componentes mecánicos. Esto involucra el estudio de fractografía, ensayos mecánicos, ensayos no destructivos y ensayos de caracterización de materiales.
- Investigar sobre los mecanismos de falla más comunes en los ejes.
- Estudiar las causas de falla que existen y que pudieron ocasionar las fallas en los ejes.
- Realizar la caracterización del material de los ejes en el laboratorio.
- Realizar los informes de cada eje por separado.
- Estudiar los otros 7 casos de análisis de falla.
- Encontrar semejanzas en las causas de falla entre los casos estudiados.
- Evaluar los resultados y plantear recomendaciones y conclusiones.

## **CAPÍTULO 1**

### **FATIGA EN EJES**

#### **1.1. Mecanismos de falla en ejes**

Según el manual de análisis de falla de la Sociedad Americana de Materiales publicado en el 2002 se considera que un componente ha fallado cuando ya no puede operar a las condiciones de servicio para el que fue diseñado.

Los ejes y ejes de transmisión son componentes mecánicos sometidos a cargas de tracción, compresión, flexión, torsión y combinación de estas. Así mismo, puede estar sometido a vibraciones, estar expuestos a ambientes agresivos y a movimientos relativos con otros componentes mecánicos. Por lo tanto, son susceptibles a fallar por los siguientes mecanismos de falla:

1. Desgaste
2. Deformación Plástica
3. Corrosión
4. Fatiga por contacto
5. Fractura

##### **1.1.1. Desgaste**

Se dice que hay desgaste cuando existe pérdida de material sin que se involucren reacciones químicas. Esta indeseable pérdida del material puede afectar las dimensiones, la forma o alterar la superficie de los ejes.

Existen dos tipos de desgaste que afectan a los ejes y ejes de transmisión, desgaste abrasivo y desgaste adhesivo. El desgaste abrasivo se produce por presencia de partículas extrañas como arena, partículas endurecidas, limalla, etc. El desgaste adhesivo se produce por el movimiento relativo que existe entre el eje y los cojinetes, bocinas, etc.

### **1.1.2. Deformación Plástica**

La deformación plástica que podrían sufrir los ejes podría evitar que estos se desempeñen de manera correcta en la función para la que fueron diseñados. Puede existir deformación plástica permanente por flexión, torsión y pandeo. Esta deformación se da cuando los esfuerzos a los que está sometido el eje superan el esfuerzo de fluencia del material.

Cuando el material operará en condiciones de elevada temperatura se debe tener cuidado del fenómeno de fluencia lenta (Creep).

### **1.1.3. Corrosión**

Se dice que un eje ha fallado por corrosión cuando existe remoción del material de manera uniforme o puntual debido a ataque químico. El ataque por corrosión a ejes puede clasificarse en corrosión uniforme, corrosión por picadura y corrosión-esfuerzo. El menos severo de estos tres fenómenos es la corrosión uniforme. Los otros dos tipos de corrosión pueden llevar al material a la fractura por otros mecanismos de falla como la fatiga.

### **1.1.4. Fatiga por Contacto**

La fatiga por contacto es un mecanismo de falla que se da por la rodadura o deslizamiento que existe entre el eje con otros componentes, como por ejemplo los dientes entre un piñón y una rueda dentada. El ciclo de cargas de presión que se ejercen sobre estos dientes ejercerán un esfuerzo cortante subsuperficial, generalmente debajo de la superficie endurecida por tratamientos térmicos. Este esfuerzo cortante desprenderá parte del componente que se encuentra en contacto.

### **1.1.5. Fractura**

Se dice que un componente ha sufrido una falla por fractura, cuando este ha sido seccionado y dividido en 2 o más partes. El mecanismo de falla por fractura se divide en: fractura dúctil, fractura frágil y fractura por fatiga.

#### **a) Fractura dúctil**

Este mecanismo de falla es poco común debido a que involucra una apreciable deformación plástica y requiere de tiempos prolongados para que las fisuras se propaguen hasta la fractura.

La superficie de fractura tiene una apariencia fibrosa y grisácea, opaca, y puede presentarse en una dirección plana o inclinada respecto a la dirección de los máximos esfuerzos.

#### **b) Fractura frágil**

Este mecanismo de falla se da de manera espontánea sin una apreciable deformación plástica. La superficie de fractura es granular y brillante, perpendicular a la dirección de los máximos esfuerzos.

Puede darse por sobrecargas espontáneas o por impacto. Las fracturas se dan en los concentradores de tensiones como cambios de tensión, entalles o canales chaveteros.

#### **c) Fractura por fatiga**

Es el mecanismo de falla más frecuente en los ejes y ejes de transmisión ya que estos componentes cumplen con los dos requisitos principales para que se de esta falla, cargas cíclicas y concentradores de tensiones mecánicos o metalúrgicos.

El mecanismo de falla de fractura por fatiga se detallará en el siguiente punto.

## 1.2. Qué es la fatiga

Según la investigación realizada por Canales en el 2008, la fatiga se puede definir como la medida de la disminución de la resistencia a tensiones repetitivas. En otras palabras, cuando un componente es sometido a cargas cíclicas, este podría fallar a un esfuerzo considerablemente menor que el esfuerzo de fluencia.

Para que pueda ocurrir una falla por fatiga deben existir tres condiciones:

- a) Primero, que el esfuerzo al que está sometido el eje sea lo suficientemente alto para que se pueda iniciar una fisura.
- b) Segundo, la variación del esfuerzo debe ser lo suficientemente grande para que permita la propagación de la fisura.
- c) Finalmente, el número de repeticiones debe ser lo suficientemente alto para que la fisura se propague.

Además de las condiciones mencionadas anteriormente, otra de las condiciones necesarias para que ocurra una falla por fatiga, es la presencia de discontinuidades, ya sea está de manera macroscópica como un entalle en el componente mecánico o microscópica como una inclusión en el material usado en la fabricación del componente.

Se puede establecer cuatro etapas en la falla por fatiga de un componente, estas son las siguientes:

- a) Micro-deformación plástica.
- b) Deslizamiento de bandas, inicio y crecimiento de fisura, llamado también etapa I del crecimiento de fisura.
- c) Crecimiento estable de fisura en la dirección normal a los esfuerzos de tracción máximos. Esta etapa es normalmente llamada etapa II del crecimiento de fisura.
- d) Crecimiento inestable de fisura, hasta la falla final por sobrecarga. Esta etapa es normalmente llamada etapa III del crecimiento de fisura.

### 1.2.1. Fatiga en ejes

Los ejes y ejes de transmisión son componentes mecánicos que giran sobre su propio eje, algunos de ellos transmiten grandes potencias por periodos de trabajo bastante largos. En la Fig. 1.1 se puede observar como un punto infinitesimal “A” sobre la superficie de un eje que está sometido a cargas de flexión puede pasar de estar sometido a compresión en un tiempo “ $t_1$ ” a estar sometido a tracción en un tiempo “ $t_2$ ”. De esta manera se demuestra que la misma naturaleza de trabajo al que están sometidos los ejes cumple con los requisitos 2 y 3 para que se produzca una falla por fatiga.

Por lo tanto, basta que los esfuerzos a los que están sometidos los ejes sean lo suficientemente alto para que se inicie una fisura para que el eje termine de fallar por fatiga.

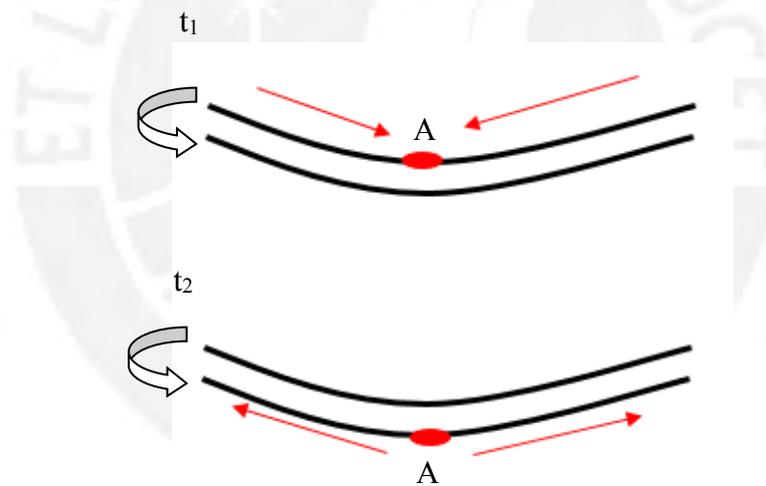


Fig. 1.1 - Variación de esfuerzos de un punto en el tiempo

### 1.2.2. Tipos de fatigas que se presentan en los ejes

Según el manual de “Fractografía” de la Sociedad Americana de Materiales publicado en el 1992 se puede clasificar el tipo de fatiga según los esfuerzos a los que están sometidos los componentes. En la Fig. 1.2 se puede observar un esquema del comportamiento de las cargas que pueden ocasionar fallas por fatiga, siendo los principales:

- Fatiga en componentes sometidos a flexión rotativa
- Fatiga en componentes sometidos a torsión rotativa

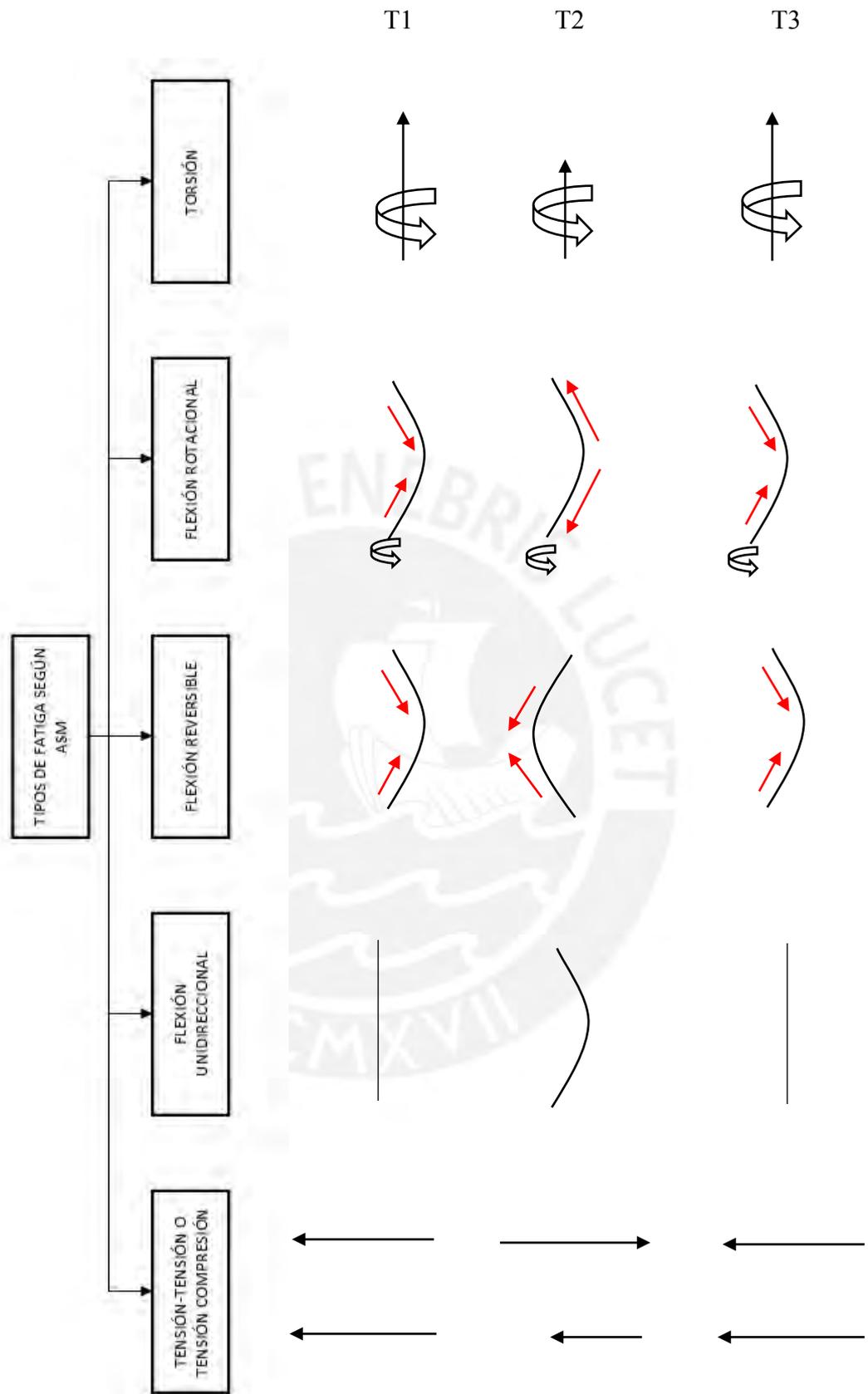


Fig. 1.2 - Esquema de comportamiento de esfuerzos en fallas por fatiga

Los ejes al ser componentes mecánicos que están en rotación pueden fallar por fatiga por flexión rotativa o por torsión.

### **1.3. Principales factores que ocasionan fallas en los ejes**

Las causas más comunes de falla en ejes de transmisión de potencia son las siguientes:

- Problemas en el diseño
- Problemas en la fabricación
- Problemas en el material

#### **1.3.1. Problemas en el diseño**

Los problemas de diseño más comunes que están presentes en los ejes de transmisión son los siguientes:

- Subestimación de esfuerzos en servicio. Este tipo de problema puede desencadenar en un mecanismo de falla dúctil o en caso de fatiga una falla catastrófica, ya que no da tiempo para poder encontrar la falla antes de que falle por sobrecarga.
- Geometría indeseable: Este tipo de problema es muy frecuente en los ejes, ya que este tipo de componentes llevan canales chaveteros y cambios de sección, y ambos suelen ser grandes concentradores de tensiones si no se tiene especial cuidado al designar el radio de redondeo para aliviar tensiones.
- Selección inadecuada de materiales.
- Selección inapropiada del tratamiento térmico.

#### **1.3.2. Problemas en la fabricación**

Los problemas en la fabricación de ejes más comunes son los siguientes:

- Pobre acabado superficial: Huellas de mecanizado sobre la superficie que pueden ser concentradores de esfuerzos y originar la fisura.

- Quemaduras de maquinado: Aumenta la dureza del eje en la zona quemada tornándolo frágil
- Mala ejecución del tratamiento térmico: Pueden ocasionar fisuras en el temple, sobrecalentamientos, un sobre revenido afectando directamente a las propiedades para las que fue diseñado el eje.
- Inadecuado tratamiento superficial.

### **1.3.3. Problemas en el material**

Los problemas más frecuentes que pueden presentar los materiales en la fabricación de ejes de transmisión, son los siguientes:

- Pobre calidad del material.
- La composición química del material no cumplen con las especificaciones de los códigos o normas.
- Fases indeseables e inclusiones no metálicas, éstas pueden ser redondeadas o alargadas; agrupadas, alargadas o puntuales. Este punto es muy importante, ya que las inclusiones actúan como concentradores de tensiones reduciendo notablemente la resistencia a la fatiga de los materiales.

## CAPÍTULO 2

### ANÁLISIS DE FALLA EN EJES

El objetivo principal de un análisis de falla es determinar cuál fue el causante que originó que dicha falla ocurriera, para que de esta manera se pueda evitar que esta vuelva a ocurrir. Este tipo de análisis recibe de nombre análisis de causa raíz, donde la falla normalmente se sitúa como un origen de sistema. Sin embargo, el análisis que se realiza en los laboratorios se limita en determinar la causa raíz física, en otras palabras, cuál fue el causante, el material, diseño o proceso de fabricación que originó que dicho componente falle. Este tipo de análisis recibe de nombre “Análisis de causa raíz de origen físico”.

Para realizar dicho análisis el presente documento se basará en el manual ASM volumen 11 “*Failure Analysis and Prevention*” y el uso de las instalaciones del laboratorio de Materiales de la sección de Ingeniería Mecánica de la PUCP.

#### 2.1. Metodología

La metodología que se sigue en este documento se muestra en la Fig. 2.1, en ella se puede observar que el proceso se inicia con la llegada del componente fallado y concluye con la entrega de un reporte final, donde se incluirán los resultados de todos los ensayos realizados al componente más un diagnóstico final.

Una de las características más importantes de todo análisis de falla es que se debe tener un registro de todas las etapas por las que pasará el componente.

Es importante resaltar que cada conclusión que se muestre en un reporte debe estar bien sustentada, ya que muchos de los reportes entregados servirán como sustento para determinar el culpable de la falla y por lo tanto quién asumirá los gastos originados por esta.

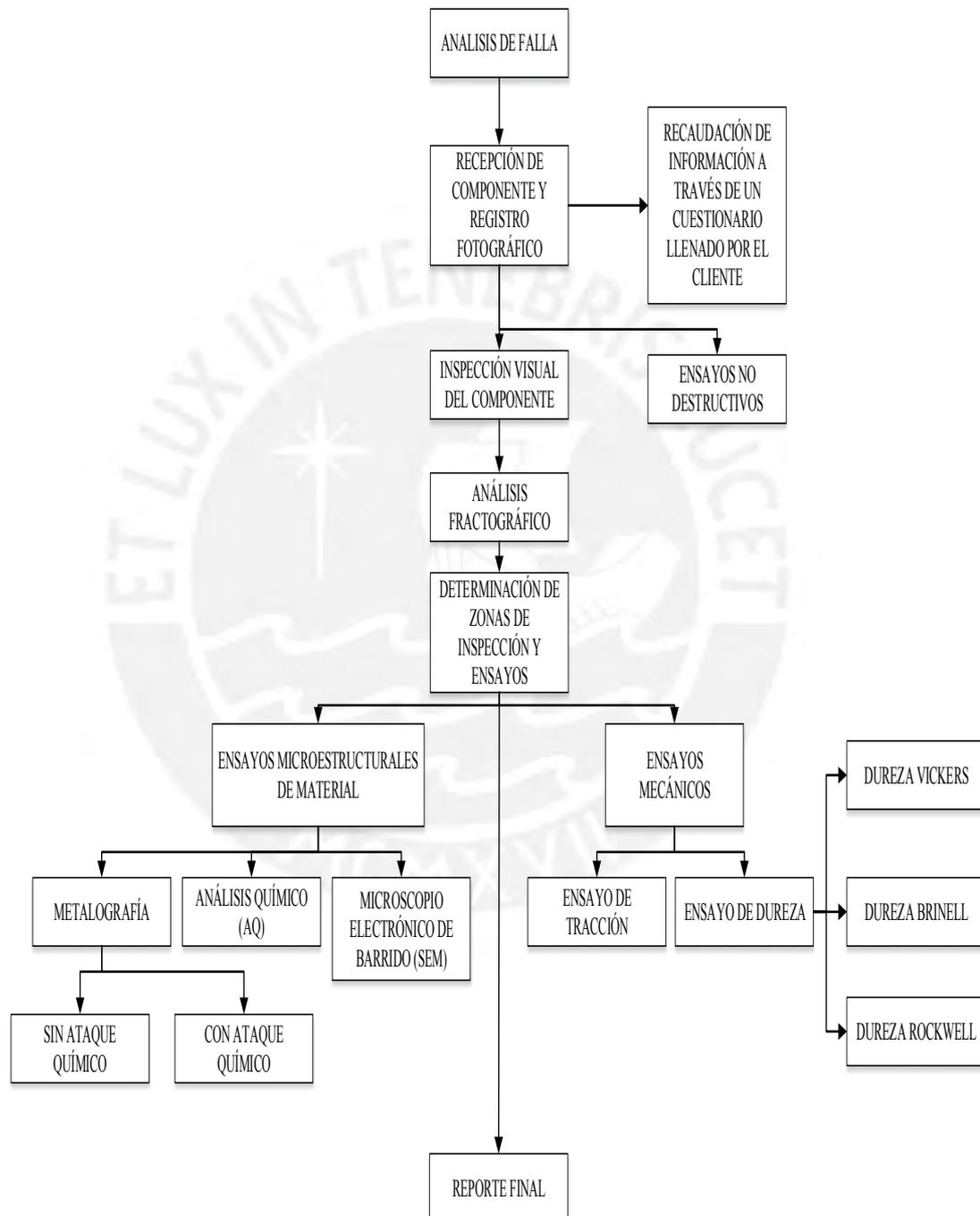


Fig. 2.1 - Metodología de un análisis de falla en el laboratorio de materiales de la PUCP

## 2.2. Inspección Visual

Según la metodología presentada en la Fig. 2.1, el primer paso a seguir después de haber reunido la mayor cantidad de información del componente fallado, es realizar una inspección visual, la cual consiste en la observación detallada del componente a ojo desnudo o con ayuda instrumental auxiliar que permita el alcance y percepción del sentido de la vista.

El objetivo principal de la inspección visual en un análisis de falla es determinar cuáles serán las zonas de extracción de muestras para ejecutar los ensayos de laboratorio. Para realizar esto es importante observar lo siguiente:

- Superficie de fractura (Análisis fractográfico)
- Estado superficial del componente, en búsqueda de huellas de maquinado, presencia de rayaduras o desgaste superficial, corrosión, etc.
- Fisuras (Ensayos no destructivos)
- Color adecuado
- Formas y dimensiones como, por ejemplo, ángulo en los cambios de sección o en los canales chaveteros de los ejes.

Después de realizar lo anterior y formular un diagnóstico preliminar se determina las zonas a partir de las cuales se extraerán las probetas para realizar cada uno de los ensayos a los que será sometido el componente. Por ejemplo:

- Ensayo de dureza: La probeta debe sacarse de una zona cercana al origen de falla.
- Metalografía: La probeta debe sacarse de una zona cercana al origen de falla.
- Análisis químico: La probeta puede prepararse de cualquier parte del componente.
- Ensayo de tracción: La probeta puede prepararse de cualquier parte del componente.
- Microscopio electrónico de barrido: La probeta se debe preparar de una zona que involucre a la superficie de fractura, preferentemente el posible inicio de falla.

### 2.2.1. Análisis fractográfico

La fractografía es la ciencia que tiene como objetivo principal analizar las características de fractura e intentar relacionar la morfología de la superficie de fractura con las causas y/o mecanismos de falla.

La fractografía puede dividirse en 2: Macro-Fractografía y Micro-Fractografía. El análisis del primero se realiza a ojo desnudo o con ayuda de un estereoscopio, el cual permite observar una superficie con un aumento de 50x; mientras que el análisis del segundo se realiza a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM).

El análisis fractográfico se debe realizar a aquellos componentes que hayan fallado por algún mecanismo de fractura, es decir, falla dúctil, falla frágil, o falla por fatiga.

La superficie de fractura a nivel macro de un componente que falló por un mecanismo de falla dúctil tiene una apariencia fibrosa, grisácea con aparente deformación plástica. Si se realiza un análisis fractográfico a nivel micro, se podrá observar unas micro cavidades formadas por la descohesión de micro discontinuidades de la fase matriz, estas micro cavidades reciben el nombre de Dimples.

La superficie de fractura a nivel macro de un componente que falló por un mecanismo de falla frágil tiene una apariencia granular, brillante sin aparente deformación plástica. Se puede observar también, marcas características como una las crestas radiales, las líneas de Chevron y los picos de rotura de corte. A nivel micro se puede observar las marcas de río, así mismo la superficie tiene una apariencia semejante a la “huella de un pato” o a una “lechuga”.

La superficie de fractura a nivel macro de un componente que falló por un mecanismo de falla por fatiga presenta 2 zonas bien marcadas:

- Una región lisa, debido a la fricción de las superficies abiertas durante la propagación de la fisura. En esta zona se encontrarán las marcas de playa que

dará información muy importante como el grado de concentradores de tensiones a los que fue sometido el componente.

- Una zona de rotura final frágil, de apariencia rugosa, la cual sucede cuando el área resistente se reduce hasta el punto de no poder soportar la carga para la que el eje fue diseñado. Esta superficie indicará el grado de esfuerzos a los que fue sometido el componente.

A nivel micro se puede apreciar una superficie estriada, con una apariencia semejante a una escalera, donde cada escalón representa un ciclo de carga. En la figura 2.2 se puede apreciar una comparación de las 3 superficies de fractura a nivel micro observados con un SEM.

Uno de los fenómenos más comunes en una falla por fatiga de un eje de transmisión, es que estos suelen tener varios orígenes de falla, por lo que las marcas de playa, dependiendo de la intensidad de los concentradores de tensión serán más o menos concéntricos al origen de falla.

En la Fig. 2.3 se puede observar un esquema del manual ASM volumen 12 “*Fractography*” [5] donde se muestra la morfología de las superficies de fractura de componentes que fallaron por fatiga. Esta, dependiendo el porcentaje de zona de falla final, determina si el eje estuvo operando a bajas o altas cargas, además dependiendo de la forma de las marcas de playa se determina si los concentradores de tensiones fueron bajos, medios o altos. Finalmente, usando la combinación de ambos, se puede determinar el tipo de carga a la que el componente estaba operando. Este documento utilizará dicho esquema en cada uno de los casos analizados para determinar el mecanismo de falla del mismo.

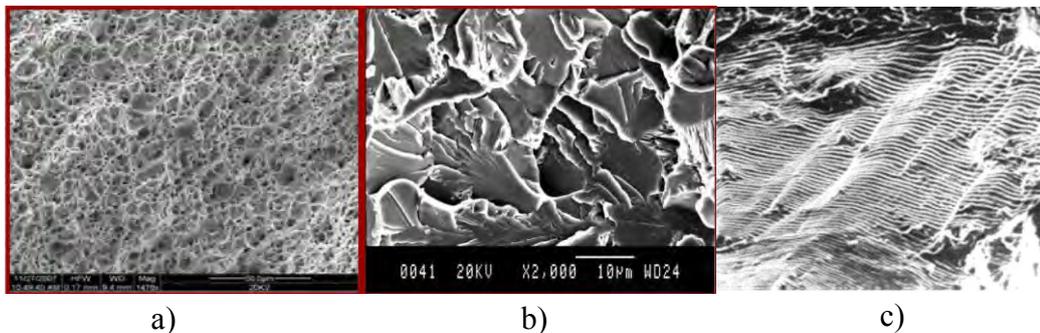


Fig. 2.2 – Superficies de fractura a nivel micro a) Falla Dúctil b) Falla Frágil c) Falla por Fatiga [40]

Concentrador de tensiones	Altas tensiones			Bajas tensiones		
	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo
Tracción-tracción o tracción-compresión						
Doblado Tensión-relajación						
Doblado bidireccional						
Rotación						
Torsión						

Zona rugosa     Zona de avance de grieta por fatiga

Fig. 2.3 - Esquema de morfología de falla por fatiga [5]

En la Fig. 2.4 se muestra un acercamiento de la morfología de falla por fatiga flexo-rotativa y por torsión, principales esfuerzos a los que están sometidos los ejes.

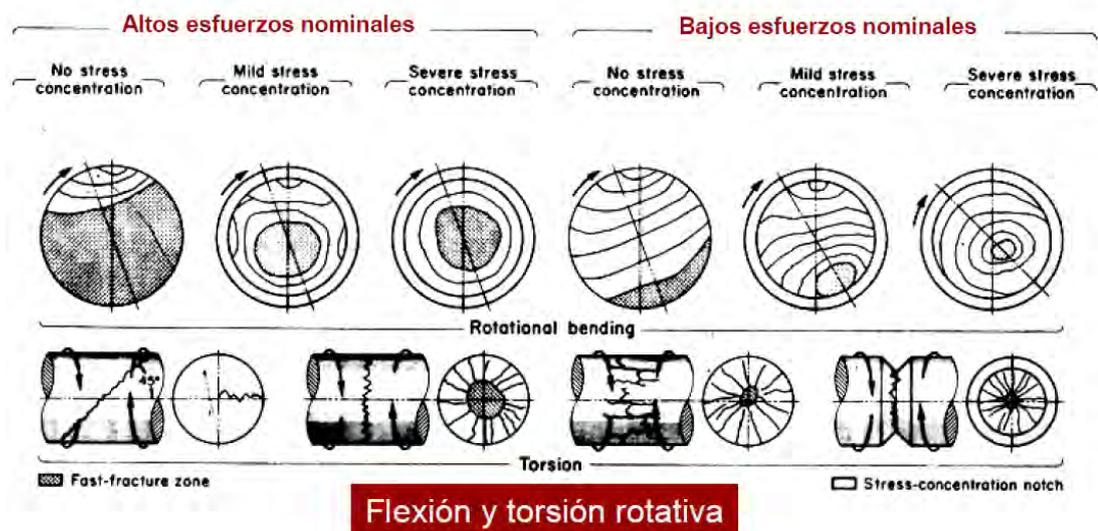


Fig. 2.4 - Esquema de morfología de falla por fatiga flexorotativa y Torsión [40]

### 2.2.2. Ensayos no destructivos

Las superficies de fractura posterior a la falla, normalmente se encuentran expuestas al medio ambiente y tienden a corroerse, esto se debe al tiempo de exposición de la superficie de fractura y al poco cuidado que se toma en conservar dicha superficie; como consecuencia, la información que podría brindar las superficies de fractura se ven afectadas.

El objetivo de realizar ensayos no destructivos es encontrar fisuras nuevas, y con esto, encontrar superficies de fractura que no hayan estado expuestas a ambientes corrosivos y puedan brindar la mayor cantidad de información posible.

La secuencia de trabajo es:

- Primero observar el estado de la superficie de fractura causante de la falla, limpiarla y determinar si está en óptimas condiciones.
- Posteriormente, se realiza ensayos no destructivos sobre el componente fallado en busca de fisuras.
- De encontrarse nuevas fisuras, se procede a terminar de romper el componente por dicha fisura y de esta manera obtener superficies vírgenes.
- Finalmente, se realiza la inspección fractográfica sobre la superficie hallada.

Ya que el objetivo principal de estos ensayos es solo encontrar discontinuidades superficiales, solo se utilizarán ensayos no destructivos superficiales. Dependiendo del material con el que fue fabricado el componente se utilizará.

- Partículas magnéticas: Materiales ferromagnéticos. Según la norma ASTM E709-15.
- Líquidos penetrantes: Materiales no ferromagnéticos, como por ejemplo el acero inoxidable austenítico. Según la norma ASTM E1417M – 13.

Como ejemplo se muestra en la Fig. 2.5 una fisura encontrada después de realizar un ensayo por partículas magnéticas.

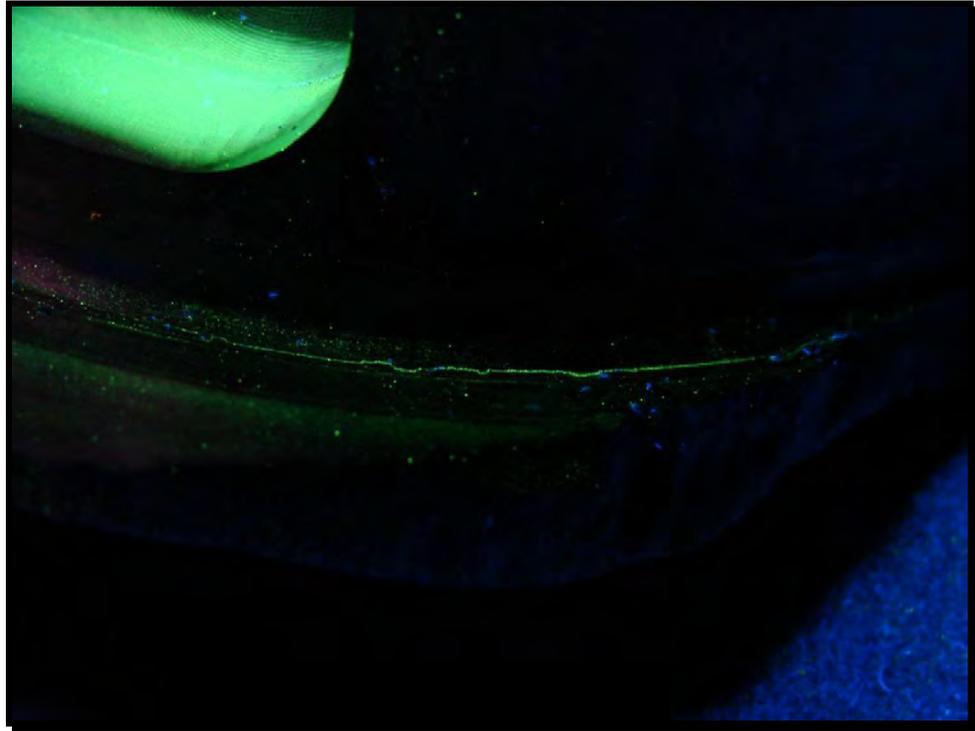


Fig. 2.5 - Fisura encontrada usando partículas magnéticas en el redondeo de cambio de sección de eje reductor [34]

### 2.3. Caracterización del material

Los primeros ensayos que se deben realizar al componente, independientemente de que el cliente haya dado información o no sobre el material con el que se fabricó el componente, son los ensayos de caracterización de material. El objetivo principal de estos ensayos es conocer la composición química y las propiedades mecánicas del componente fabricado. Para esto se realizan los siguientes ensayos:

- Análisis Químico
- Metalografía
- Ensayos mecánicos: Ensayo de tracción, dureza, impacto, etc.

#### 2.3.1. Análisis químico

El objetivo de este ensayo es determinar en porcentaje de peso la composición química de la muestra. Para realizar dicho ensayo se hace uso de un espectrómetro de emisión óptica o de chispa, la cual se muestra en al Fig. 2.6.

La realización de este ensayo sigue los alineamientos de la norma ASTM E415 [8], la cual indica que:

- La muestra debe tener un espesor entre 10 – 38 mm
- La muestra debe tener dos caras paralelas, estas deben ser extraídas con un disco de corte y realizar el proceso en seco o húmedo.
- La superficie que será analizada debe ser pulida con papel lija #120.



Fig. 2.6 - Espectrómetro de emisión óptica o de chispa

### 2.3.2. Metalografía

El objetivo principal de este ensayo es determinar la microestructura de la muestra analizada y además si hay presencia de inclusiones no metálicas en la muestra y de haberlo cuál es la distribución de estas. Es por eso que se ve la necesidad de registrar el ensayo en 2 etapas: antes del ataque químico con el objetivo de buscar inclusiones no metálicas; y después de realizar el ataque químico, con la finalidad de observar cuál es la microestructura del material.

La realización de este ensayo sigue los alineamientos de las normas ASTM E3 [9] y ASTM E407 – 07[10]. Los procedimientos a seguir para la realización de este ensayo son los siguientes:

- Extracción de la muestra del componente.
- Preparación de una briqueta, para esto se utilizó una máquina para moldear en polvo, la cual se puede observar en la figura 2.7.
- Posteriormente, la briqueta pasa por un proceso de pulido. Primero, este se realiza a través de lijas de carburo de silicio de 240, 320, 400 y 600 y después con la ayuda de unos platos giratorios de diamante de 1 y de 0,3 micras. En la Fig. 2.8 se pueden observar a los platos.
- Finalmente, se utiliza un microscopio óptico marca Leica, el cual puede realizar aumentos discretos desde 50x hasta 1000x. Las fotografías se realizan directamente desde un ordenador con la ayuda de un software. En la Fig. 2.9 se puede apreciar el microscopio Leica.

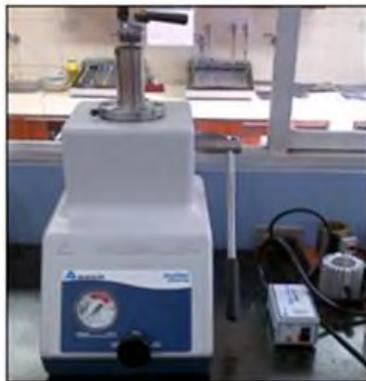


Fig. 2.7 – Máquina de moldeo



Fig. 2.8 – Platos de diamante

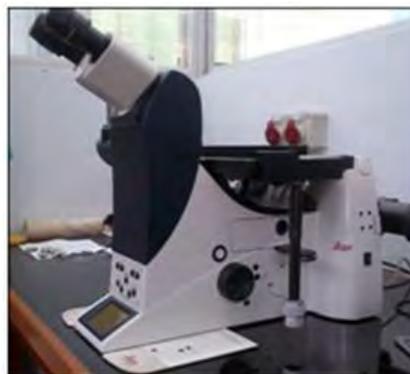


Fig. 2.9 – Microscopio Leica

## **2.4. Ensayos mecánicos**

El objetivo principal de los ensayos mecánicos es determinar las propiedades mecánicas del material. Para poder obtener estos resultados se necesita realizar los siguientes ensayos:

- Ensayo de tracción: Ductilidad, Esfuerzo de fluencia, Esfuerzo de tracción máxima.
- Ensayo de dureza: Determinar la dureza del material.
- Ensayo de Impacto: Sirve para evaluar la tenacidad de un material y obtener la temperatura de transición dúctil frágil. Opcional en caso el componente trabaje a bajas temperaturas.
- Ensayo de Doblado: Sirve para evaluar la sanidad de las juntas realizadas en el componente. Opcional en caso de soldadura.
- Ensayo de Abrasión: Para determinar la resistencia a la abrasión de agregados. Opcional en caso el componente trabaje en contacto a con agregados.
- Ensayo de corrosión. Para determinar la resistencia del material a ser corroído. Opcional en caso el material se desempeñe en ambientes corrosivos.

### **2.4.1. Ensayo de tracción**

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia del material, esfuerzo de fluencia y esfuerzo de tracción máximo, y su ductilidad. Este ensayo sigue los alineamientos de la norma ASTM A370 [15].

### **2.4.2. Ensayos de dureza Rockwell**

El objetivo de este ensayo es determinar la dureza del material en función de la profundidad de penetración de su elemento de indentación: Una billa de carburo de tungsteno para la escala B y un cono de diamante para la escala C, siendo esta última

escala usada para los materiales más duros. Este ensayo sigue los alineamientos de la norma ASTM E18 [12].

Es el ensayo mecánico más utilizado en el laboratorio de la PUCP.

### **2.4.3. Ensayos de dureza Vickers**

El objetivo de este ensayo es determinar la dureza del material en función de la fuerza que se aplica y la superficie de la huella dejada por el indentador. Se utiliza un penetrador de diamante en forma de pirámide cuadrangular. Este ensayo sigue los alineamientos de la norma ASTM E384[13].

### **2.4.4. Ensayo de dureza Brinell**

Al igual que la dureza Vickers el objetivo de este ensayo es determinar la dureza del material en función de la fuerza que se aplica y la superficie de la huella dejada por el indentador. Sin embargo, en este caso la forma del indentador es un casquete esférico de carburo de tungsteno. Este ensayo sigue los alineamientos de la norma ASTM E10 [14].

## **CAPÍTULO 3**

### **CASOS ANALIZADOS EN EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA PUCP**

En el presente capítulo se expondrá brevemente nueve casos analizados en el laboratorio de materiales de la PUCP desde el año 2007 hasta el año 2015, los casos 1 y 2 se desarrollaron por el tesista, los demás casos fueron realizados por el Laboratorio de Materiales – Analista 06. Todos los casos presentados fueron casos reales que culminaron con un informe entregado al cliente que solicitó el servicio. Para cada uno de los casos analizados se procederá a describir el componente y cómo sucedió la falla, inspección visual del componente, la caracterización del material del componente y el diagnóstico de cada caso para determinar el tipo de falla que sufrió y cuál fue el causante de la nucleación y propagación de la falla.

#### **3.1. Caso 1: Eje 1 de Reductor FALK 465 A1**

##### **3.1.1. Descripción del componente y de la falla**

El mes de noviembre del año 2015 llega al laboratorio dos ejes fallados pertenecientes al eje de salida, velocidad baja, de una caja reductora que acciona un molino de bolas Dominion 12' x 16' (3657mm x 4877mm), similar al que se muestra en la Fig. 3.1, a través de un embrague neumático.. Dichos ejes serán analizados por

separado, sin embargo, ambos pertenecen al mismo equipo y son sometidos a las mismas cargas. La potencia que transmite este eje es de 1400 HP (1044.4 kW) y la velocidad de salida es de 15.5 RPM. El eje tiene orificios pasantes para ingreso de aire a 115psi, el cual sirve para accionar el embrague neumático que acciona el molino.

No se entregan datos del material del componente, sin embargo, se conoce el tiempo que estuvo en operación dicho eje, el cual asciende a 92 días, aproximadamente 2208 horas, y que nunca tuvo una reparación previa a la falla.

El eje, mostrado en la Fig. 3.2, no llega a tener una falla catastrófica, sin embargo, tuvo dos reportes previos a la falla final en el cual pasa de una nucleación a una fisura de 20mm en 2 meses y de 20mm a 200mm en 4 días, según lo que se expone a continuación:

- 9 de septiembre: El molino reporta fuga de aire, se aplica líquidos penetrantes y se encuentra fisura (nucleación).
- 2 de noviembre: Se Inspecciona el eje para determinar si la fisura creció, se aplica líquidos penetrantes y se determina que dicha fisura se propago hasta los 20mm.
- 6 de noviembre: El molino para intempestivamente por pérdida de presión en el sistema. Se controla la fisura con líquidos penetrantes y se determina que esta creció hasta los 200mm.



Fig. 3.1 - Molino de bolas Dominion



Fig. 3.2 - Eje de reductor FALK N°1

### 3.1.2. Inspección Visual

En un extremo del eje, se puede observar la presencia de un canal chavetero y un agujero que se utiliza para accionar el sistema embrague neumático. En la mitad del canal chavetero se puede observar una fisura con una dirección de  $45^\circ$  respecto al eje de simetría del componente estudiado como se puede apreciar en la Fig. 3.3.

Por el tamaño del eje y debido a que el molino paró por pérdida de presión, el eje no llegó a ser seccionado, debido a esto fue necesario realizar un corte como se muestra en la Fig. 3.4 para realizar una inspección a la superficie de fractura.

En la Fig. 3.5 se puede observar la superficie de fractura del eje. En él, se puede apreciar el inicio de fractura, localizado en el borde del canal chavetero. Además, se puede apreciar la propagación de la fisura a través de las marcas de playa en dicha superficie, cuya morfología es compatible con una falla mecánica de fractura por fatiga.

En la Fig. 3.6 se puede apreciar un corte transversal al eje, en dicho corte se puede apreciar claramente que la fisura ya había recorrido toda la sección (tiene 2 salidas a la circunferencia del eje), sin embargo, este no se seccionó debido a que la

propagación de la fisura no recorre transversalmente al eje, sino a una dirección de 45° respecto del eje.

Finalmente, una muestra es analizada en el estereoscopio para determinar el radio de curvatura del canal chavetero, como se puede apreciar en la Fig. 3.7 este supera levemente las 150 micras.

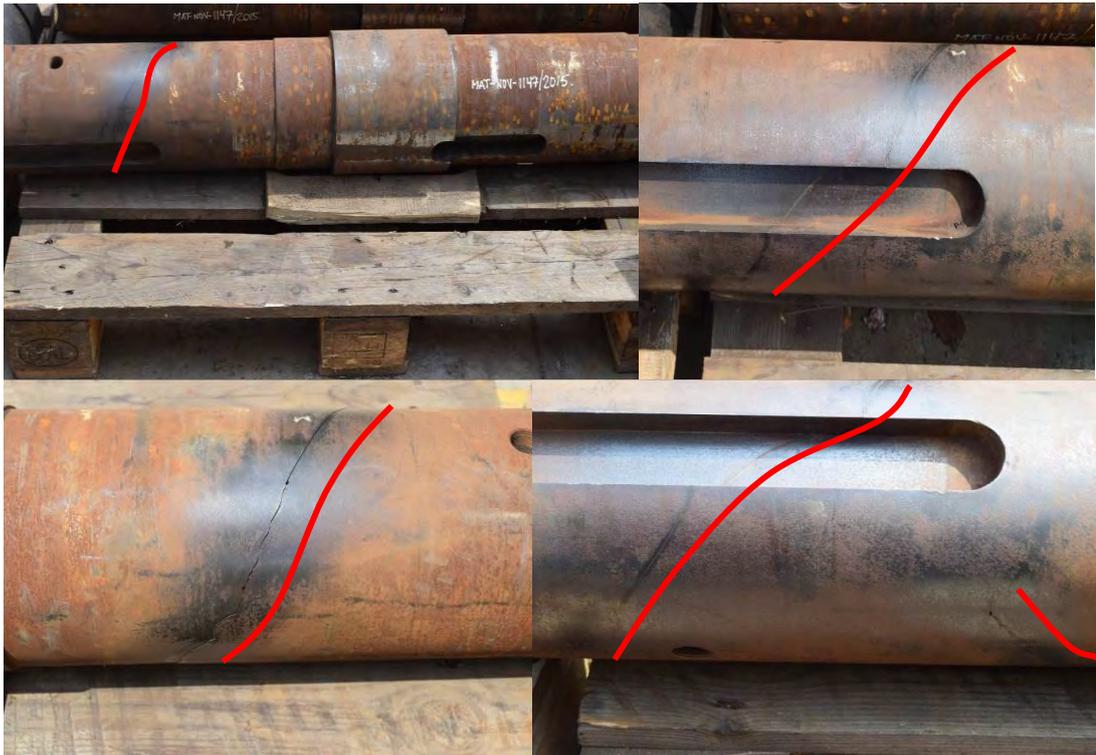


Fig. 3.3 - Fisura de Eje Falk N°1

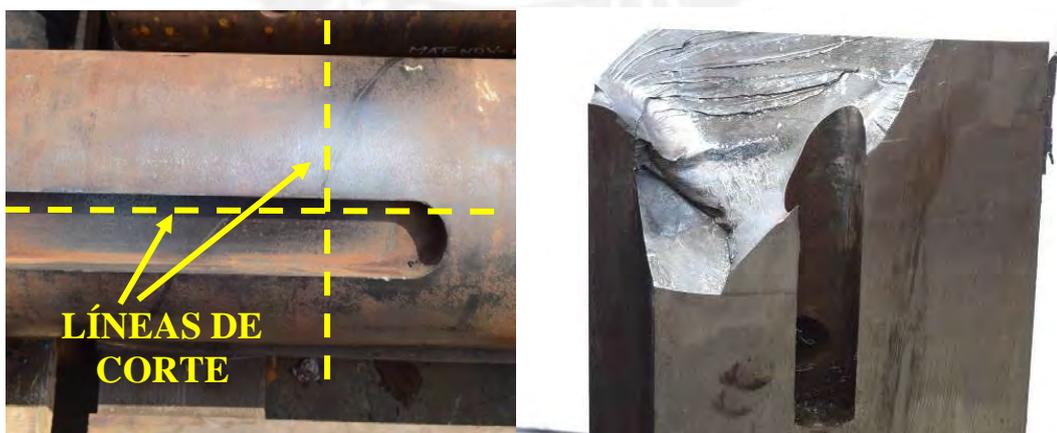


Fig. 3.4 - Corte realizado para Inspección visual en eje FALK N°1



Fig. 3.5 - Superficie de Fractura

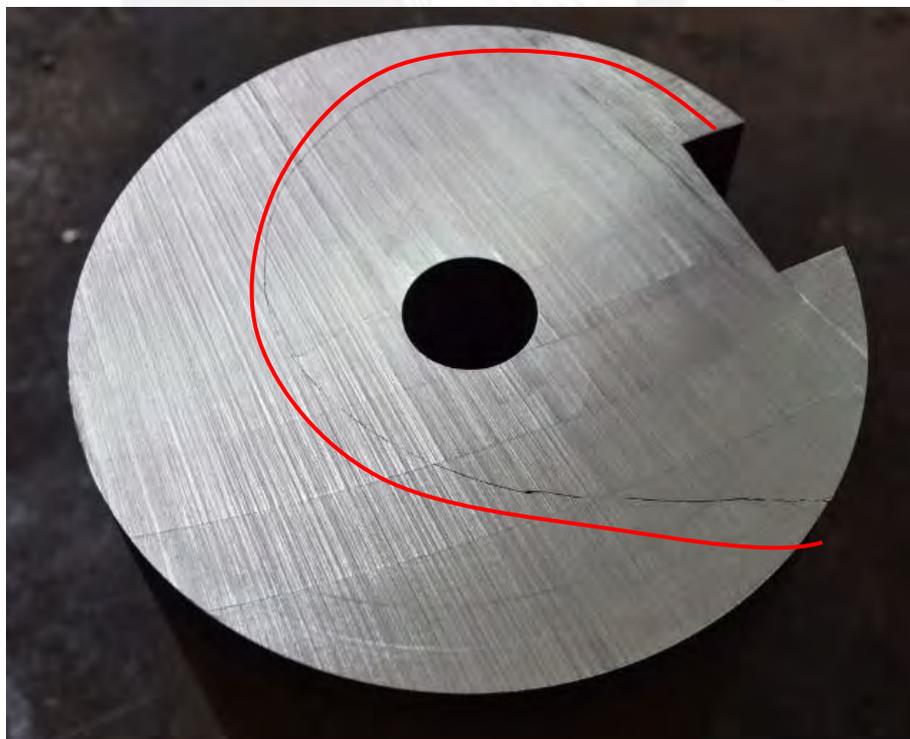


Fig. 3.6 - Propagación de la fisura en la sección transversal del componente

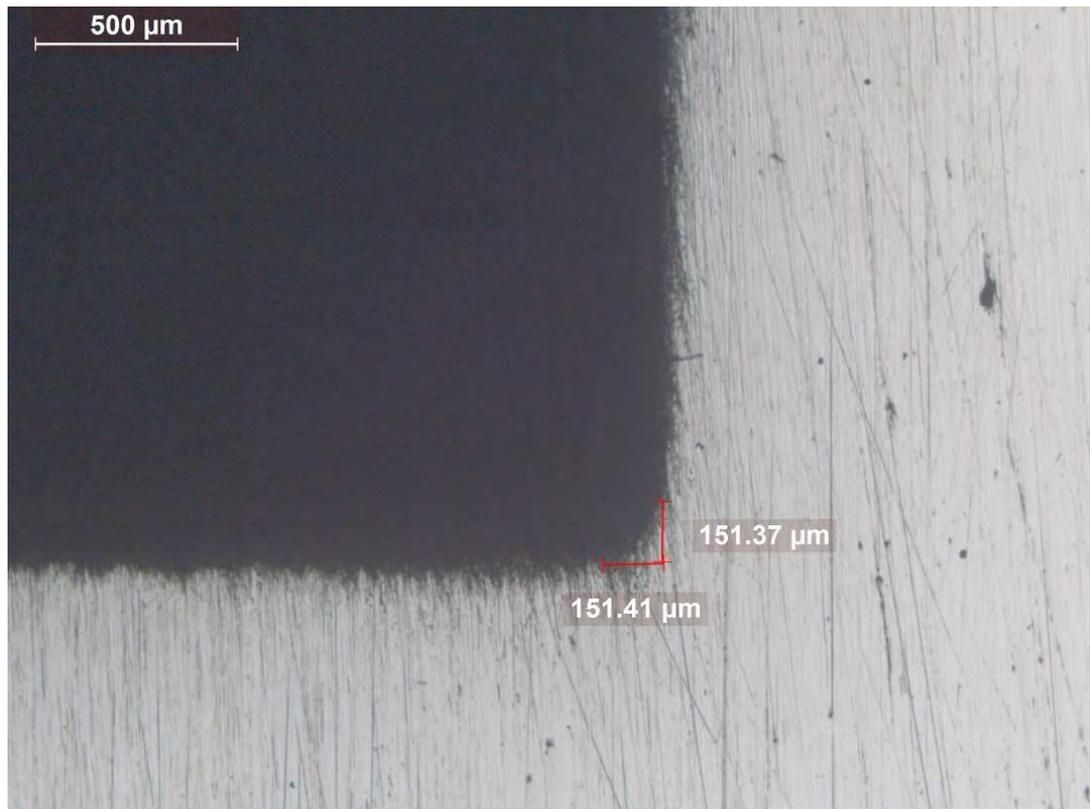


Fig. 3.7 - Radio de curvatura de la base del canal chavetero

### 3.1.3. Análisis químico

Los resultados del análisis químico realizado al componente se muestran en la Tabla 3.1 el cual corresponde a un acero de medio carbono y baja aleación, aproximadamente compatible con un acero SAE 4340, material usado comúnmente para este tipo de componentes, pero con un exceso de carbono y una deficiencia de Níquel. El cliente no entregó información del material usado para la fabricación del componente.

Tabla 3.1 - Análisis Químico a Eje FALK N°1

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
<b>Muestra del eje fallado</b>	0.49	0.75	0.26	0.010	0.033	1.32	0.80	0.29	0.19
<b>SAE 4340</b>	0.38 - 0.43	0.45 - 0.85	0.10 - 0.35	0.04 máx.	0.04 máx.	1.65 - 2.00	0.70 - 0.90	0.2 - 0.30	--

### 3.1.4. Ensayo de dureza

Los resultados del ensayo de dureza se muestran en la tabla 3.2. El promedio de la dureza del material es de 37 HRC. Este valor de dureza está ligeramente por encima de la dureza de un acero AISI/SAE 4340 en estado de bonificado, 28 a 35 HRC. Este elevado valor de dureza pudo darse por el exceso de carbono presente en el componente, o por una temperatura baja de revenido.

Tabla 3.2 -Resultados del ensayo de dureza del Eje FALK N°1

Indentación	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Rockwell promedio
1	36.9	37
2	36.8	
3	36.9	
4	37.0	
5	37.2	

### 3.1.5. Metalografía

Se tomaron muestras cercanas al inicio de fractura. En la Fig. 3.8 se puede apreciar inclusiones no metálicas del tipo oxido, alineadas y agrupadas. Este tipo de inclusiones es natural al proceso de fabricación, sin embargo, las distribuciones de estas afectan perjudicialmente a la resistencia a la fatiga del componente.

En la fig. 3.9 se puede apreciar que la matriz de la muestra es martensita revenida, por lo tanto, se puede concluir que el material recibió tratamiento térmico de temple y revenido, ratificando los resultados encontrados en los ensayos de dureza y análisis químico.

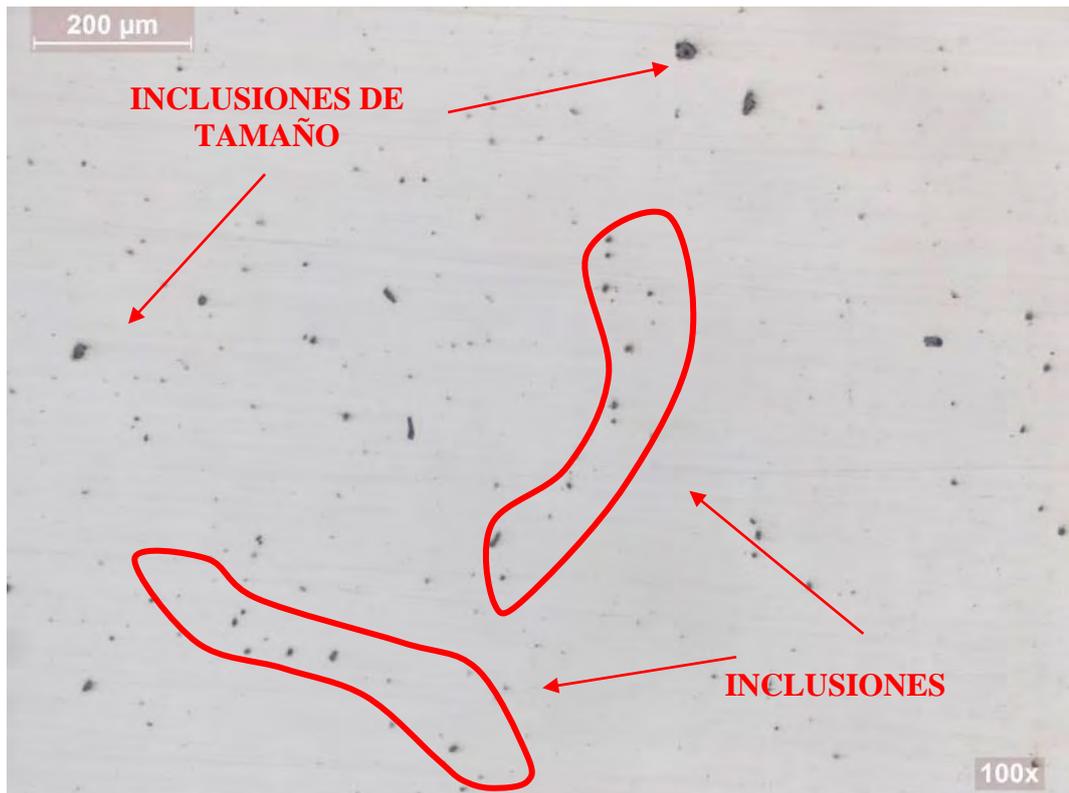


Fig. 3.8 - Micrografía de la zona afectada, sin ataque a 100x

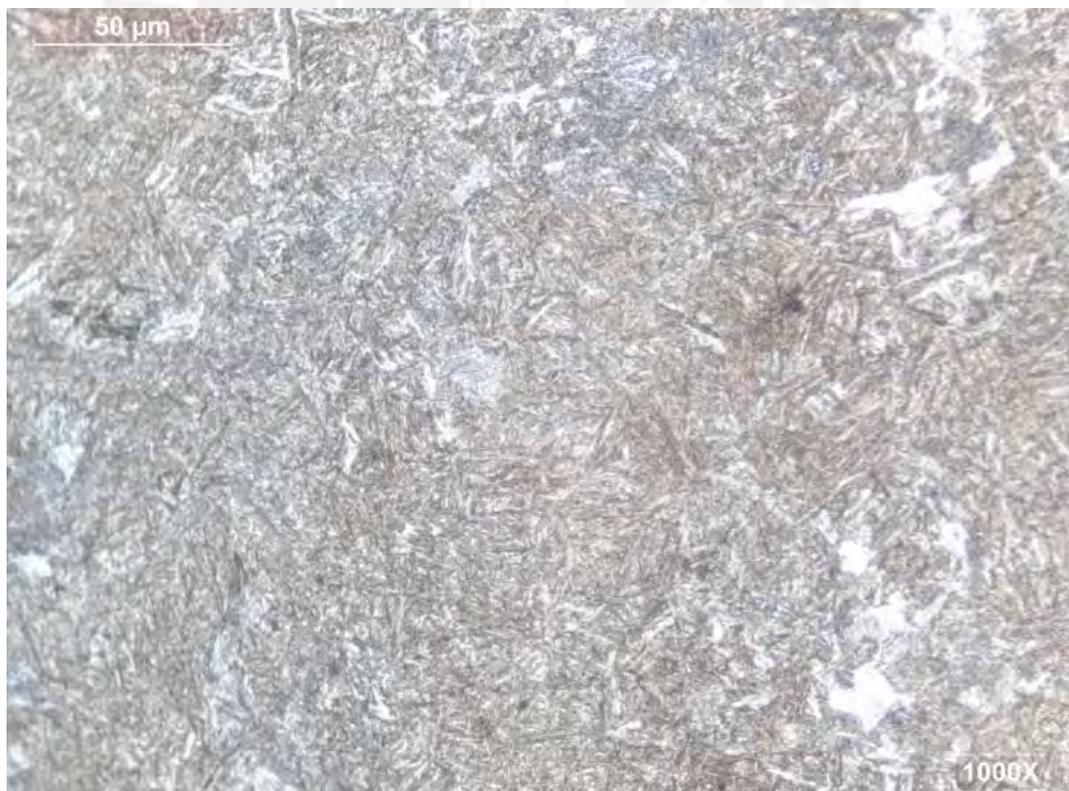


Fig. 3.9 - Micrografía de la zona afectada, con ataque a 1000x

### 3.1.6. Diagnóstico

No se puede observar en la superficie de fractura una zona frágil, esto debido a que no llegó a seccionarse o tener una fractura final del componente.

El análisis fractográfico determina que el mecanismo de falla es compatible con una falla por fatiga a torsión sometida a elevadas cargas, como se puede apreciar en la Fig. 3.10.

El material tuvo un tratamiento térmico adecuado, aunque las inclusiones encontradas pudieron haber contribuido al inicio de falla. Además, el exceso de carbono y el poco porcentaje de níquel también ayudaron a disminuir la resistencia del material a la fatiga.

El radio de curvatura encontrado es un gran concentrador de tensiones, esto sumado a los pequeños defectos encontrados en el material (exceso de Carbono, insuficiente Níquel y presencia de inclusiones) iniciaron la falla.

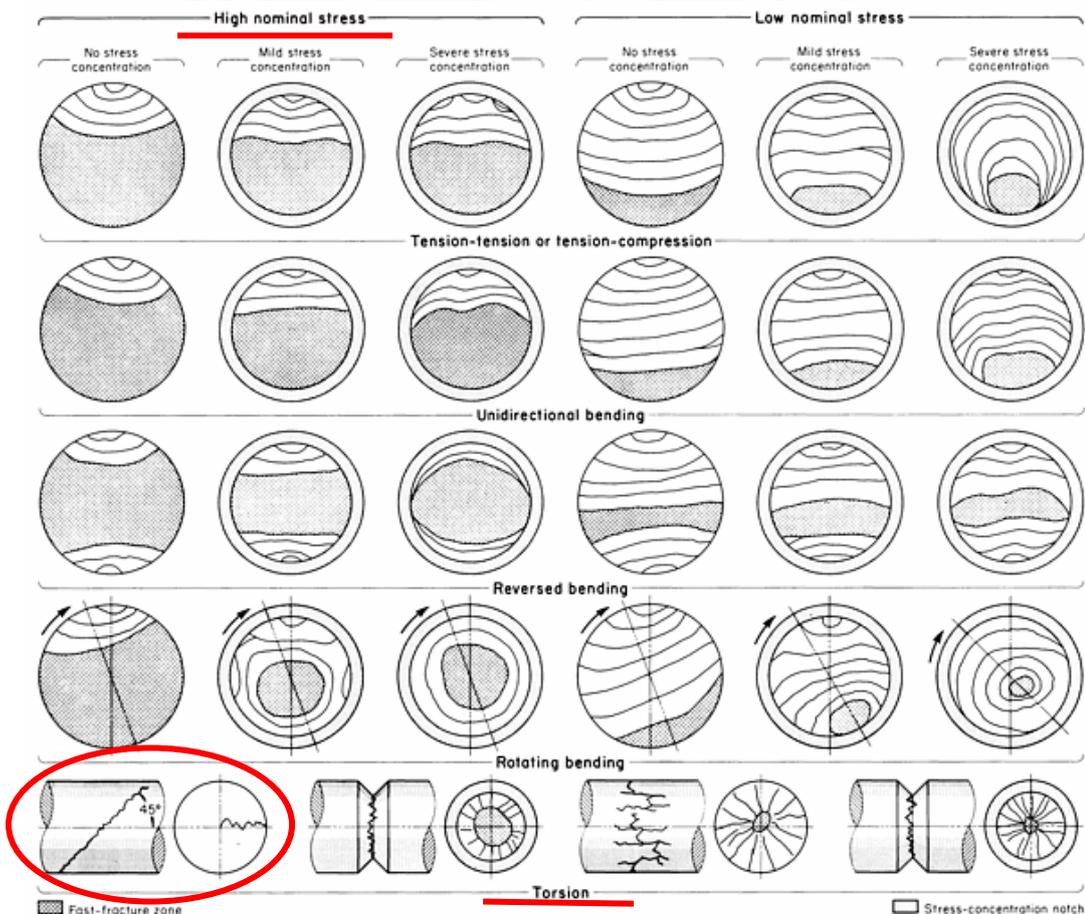


Fig. 3.10 - Tipo de falla por fatiga del eje FALK N°1

### 3.2. Caso 2: Eje 2 de Reductor FALK 465 A1

#### 3.2.1 Descripción del componente y de la falla

Este componente, pertenece a la misma caja reductora del caso 1, por lo que la descripción de este componente es similar al caso 1. La diferencia entre ambos componentes es que la vida de este componente fue de 47 días (1128 horas). En la Fig. 3.11 se muestra al componente tal cual como llegó al laboratorio de materiales de la PUCP.



Fig. 3.11 - Eje de reductor FALK N°2

### 3.2.2. Inspección visual

A la mitad del canal chavetero se puede observar una fisura con una dirección de  $45^\circ$  respecto al eje de simetría del componente estudiado como se puede apreciar en la Fig. 3.12.

Al igual que el caso anterior, el componente no fue seccionado por lo que fue necesario realizar un corte en él como se muestra en la Fig. 3.13 para realizar una inspección a la superficie de fractura.

En la Fig. 3.14 se puede observar la superficie de fractura del eje. En él, se puede apreciar el inicio de fractura, localizado en el borde del canal chavetero. Además, se puede apreciar la propagación de la fisura a través de las marcas de playa en dicha superficie.

Finalmente, una muestra es analizada en el estereoscopio para determinar el radio de curvatura del canal chavetero, como se puede apreciar en la Fig. 3.15 este tiene un ángulo de  $90^\circ$  con un radio de curvatura imperceptible a la vista.



Fig. 3.12 - Fisura del Eje Falk N°2



Fig. 3.13 - Corte realizado para inspección visual en Eje FALK N°2



Fig. 3.14 - Superficie de Fractura en el eje FALK N°2

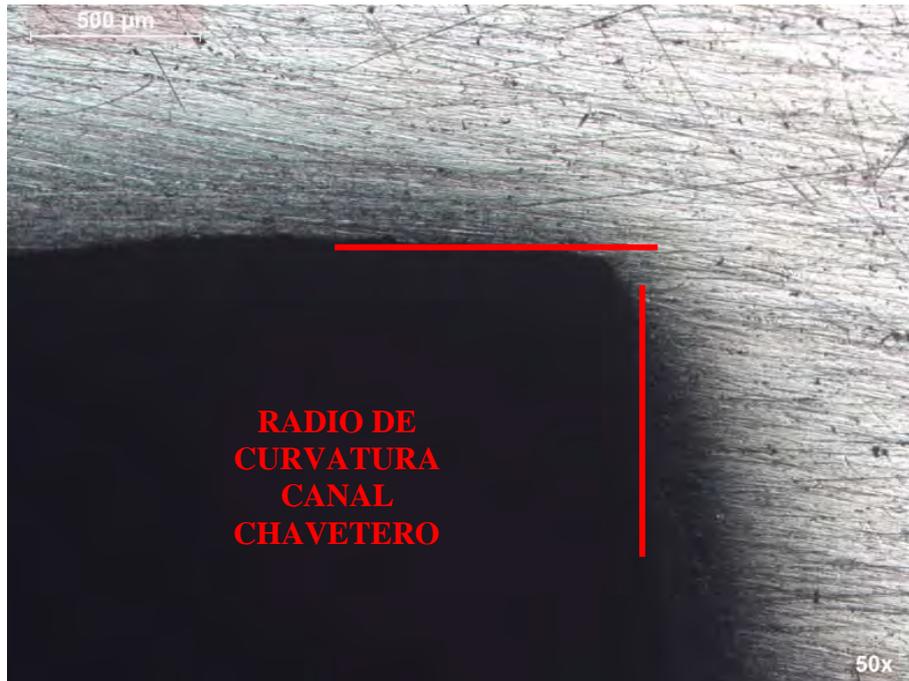


Fig. 3.15 - Radio de curvatura de la base del canal chavetero del eje FALK N°2

### 3.2.3. Análisis químico

Los resultados del análisis químico realizado al componente se muestran en la Tabla 3.3 el cual corresponde a un acero de medio carbono y baja aleación, aproximadamente compatible con un acero SAE 4340, pero con un exceso de carbono y una deficiencia de Níquel.

Tabla 3.3 - Análisis químico a Eje FALK N°2

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
<b>Muestra del eje fallado</b>	0.50	0.75	0.25	0.007	0.024	1.30	0.77	0.29	0.23
<b>SAE 4340</b>	0.38 - 0.43	0.45 - 0.85	0.10 - 0.35	0.04 máx.	0.04 máx.	1.65 - 2.00	0.70 - 0.90	0.20 - 0.30	--

### 3.2.4. Ensayo de dureza

Los resultados del ensayo de dureza se muestran en la tabla 3.4. El promedio de la dureza del material es de 30 HRC. Este valor de dureza está dentro del rango indicado de dureza para un acero AISI/SAE 4340 en estado bonificado de 28 a 35 HRC.

Tabla 3.4 - Resultados del ensayo de dureza del Eje FALK N°2

Indentación	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Rockwell promedio
1	30.9	<b>30</b>
2	30.3	
3	28.1	
4	31.0	
5	29.9	

### 3.2.5. Metalografía

Se tomaron muestras cercanas al inicio de fractura. En la Fig. 3.16 se puede apreciar un exceso de inclusiones no metálicas del tipo oxido, agrupadas. Estas inclusiones afectan negativamente a la resistencia del material contra la fatiga.

En la fig. 3.17 se puede apreciar que matriz de la muestra es martensita revenida, por lo tanto se puede concluir que el material recibió tratamiento térmico de temple y revenido, ratificando los resultados encontrados en los ensayos de dureza y análisis químico.



Fig. 3.16 - Micrografía de la zona afectada, sin ataque a 100x



Fig. 3.17 - Micrografía de la zona afectada, con ataque a 100x

### 3.2.6. Diagnóstico

No se puede observar en la superficie de fractura una zona frágil, esto debido a que no llegó a seccionarse o tener una fractura final del componente.

El análisis fractográfico determina que el mecanismo de falla es compatible con una falla por fatiga a torsión sometida a elevadas cargas, como se puede apreciar en la Fig. 3.18.

El material tuvo un tratamiento térmico adecuado, aunque las inclusiones encontradas pudieron haber contribuido al inicio de falla. Además, el exceso de carbono y el poco porcentaje de níquel también ayudaron a disminuir la resistencia del material a la fatiga.

El radio de curvatura encontrado es un gran concentrador de tensiones, esto sumado a los pequeños defectos encontrados en el material iniciaron la falla.

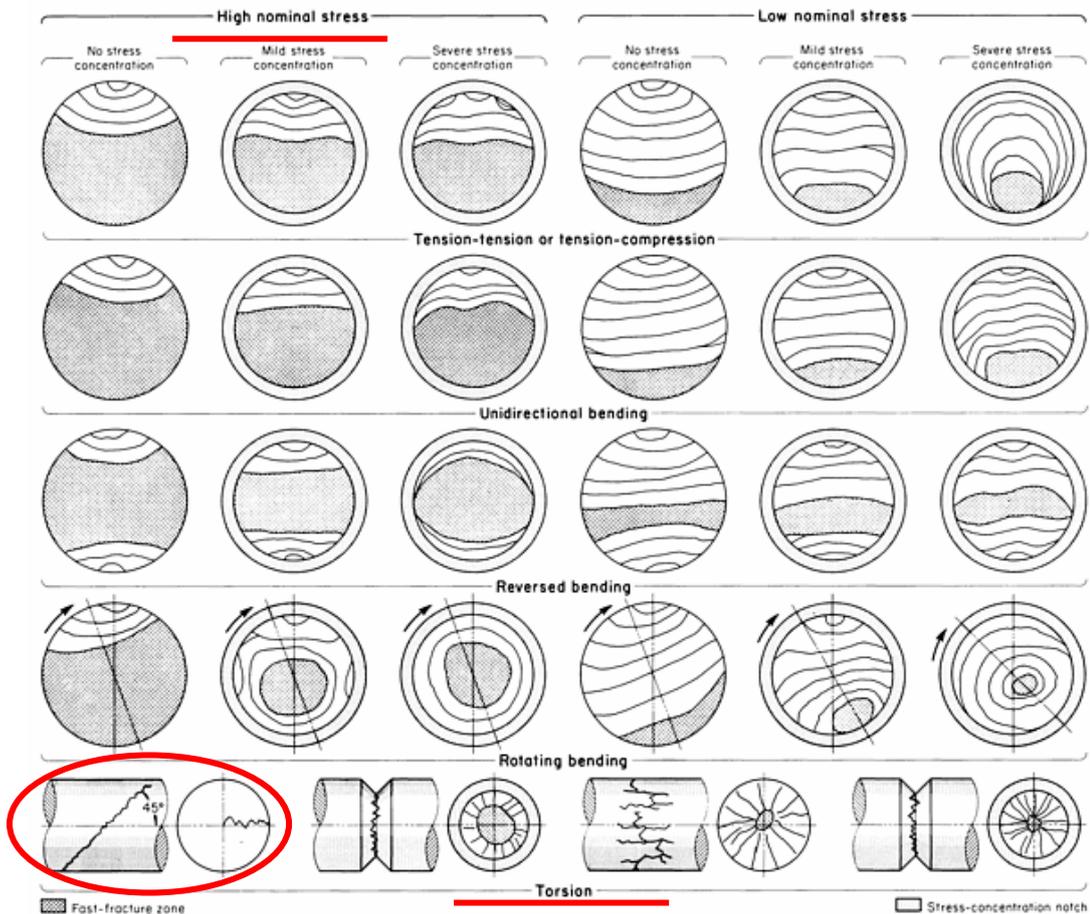


Fig. 3.18 - Tipo de falla por fatiga del eje FALK N°2

### 3.3. Caso 3: Eje Reductor de Bomba

#### 3.3.1. Descripción del componente y de la falla

El mes de junio del año 2011 llega al laboratorio dos partes de un eje fracturado, los cuales pertenecen a la entrada de alta de una caja reductora de un equipo de bombeo, dichas partes del componente fallado se muestra en la Fig. 3.19. El eje es entregado con la finalidad de determinar que la falla del componente se debió a un mal diseño, o en su defecto, el uso de materiales inadecuados, petición del cliente. Esta solicitud se debe a que la caja reductora siempre trabajó entre un 91% a 98% de su capacidad nominal y, sobretodo, porque solo estuvo trabajando 2 meses desde su instalación hasta el momento de falla. El equipo fue comprado nuevo, sin ninguna reparación. El cliente entregó información del material que debió ser empleado para la fabricación de dicho componente, este debió ser 35CrMo4 equivalente con un SAE 4130 y con una dureza entre 207 a 269 HB equivalentes a una dureza entre 23 a 30 HRC en estado bonificado. La forma en la que se produjo la falla no es conocida.



Fig. 3.19 - Eje de caja reductora de bomba

### 3.3.2. Inspección Visual

En la Fig. 3.20 se puede apreciar la superficie de fractura, en ella se aprecia claramente que tuvo varios frentes de inicio de fisura alrededor de toda la circunferencia del eje. La nucleación del eje se llevó a cabo en el fondo del canal de cambio de sección del eje reductor. Se puede apreciar que la zona final de rotura está al centro del eje y que la zona frágil ocupa aproximadamente un 20% de la superficie total, esto se puede apreciar claramente en la Fig. 3.21, en la misma foto se puede apreciar levemente las marcas de playa de forma concéntrica a la zona de rotura final.



Fig. 3.20 - Superficie de fractura eje de caja reductora de bomba

Una de las cosas que saltaron a la vista en la inspección visual fue el burdo acabo que tenía una de los extremos del eje como se puede apreciar en la Fig. 3.22.

Con ayuda de un estereoscopio se procedió a inspeccionar una muestra retirada del eje a la altura del canal de cambio de sección a 20X. En dicha inspección se pudo detectar un acabado superficial basto, se nota las marcas del mecanizado, con presencia de corrosión, esto se aprecia en la Fig. 3.23.



Fig. 3.21 - Zona de fractura final de eje de reductor de bomba



Fig. 3.22 - Acabado superficial de un extremo del eje con huellas del mecanizado

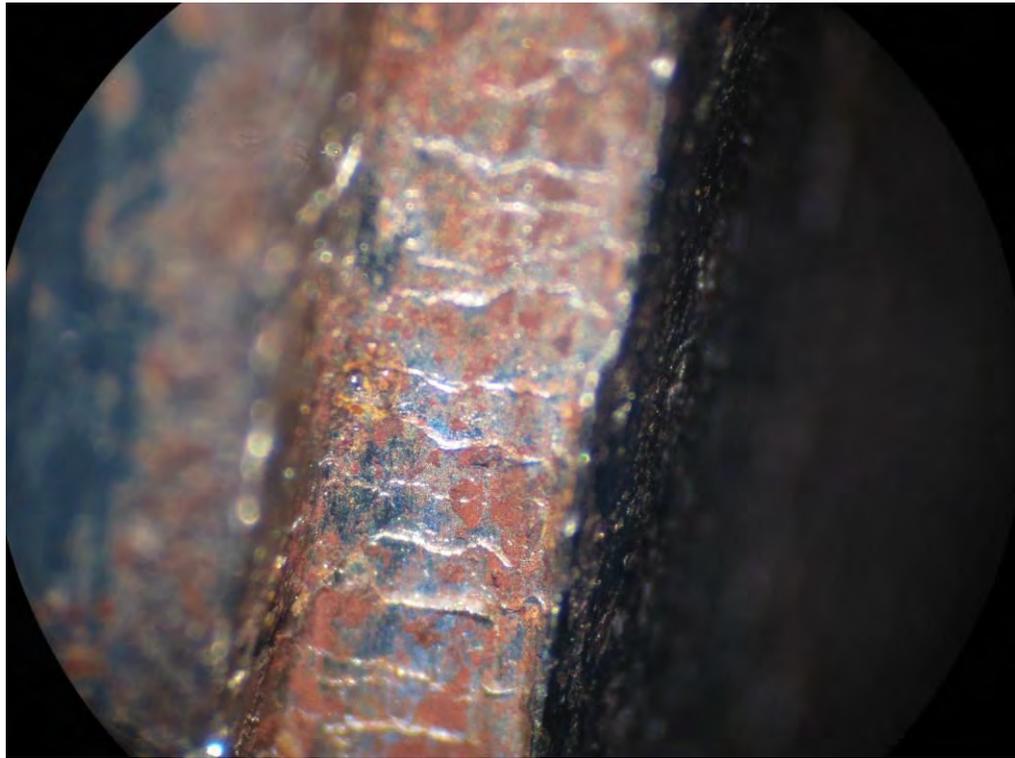


Fig. 3.23 - Presencia de corrosión en el fondo del canal además de un pésimo acabado superficial

### 3.3.3. Análisis Químico

Los resultados del análisis químico realizado al componente se muestran en la Tabla 3.5 el cual corresponde a un acero de medio carbono aleado al cromo, cuya composición química cumple con las especificaciones de un AISI SAE 5140. Este material no cumple con las especificaciones del acero 35CrMo4

Tabla 3.5 - Análisis químico a Eje reductor alta equipo de bombeo

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
<b>Muestra del eje fallado</b>	0.40	0.57	0.20	0.015	0.003	0.04	0.89	0.02	0.06
<b>SAE 5140</b>	0.38 - 0.44	0.50 - 0.80	0.15 - 0.40	Max 0.025	Máx. 0.035	--	0.90 - 1.20	--	--
<b>35CrMo4</b>	0.32 - 0.40	0.40 - 0.70	0.17 - 0.37	--	--	--	0.80 - 1.10	0.15 - 0.25	--

### 3.3.4. Ensayo de Dureza

Los resultados del ensayo de dureza se muestran en la tabla 3.6. El promedio de la dureza del material es de 27.2 HRC. La dureza esperada de un AISI/SAE 5140 en estado bonificado es desde 36 hasta 41HRC, por lo tanto la dureza encontrada no está acorde a los resultados hallados en el análisis químico.

Tabla 3.6 - Resultados del ensayo de dureza del Eje reductor de bombeo

Indentación	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Rockwell promedio
1	29.7	27
2	27.8	
3	28.2	
4	27.2	
5	25.3	
6	26.1	
7	25.9	

### 3.3.5. Metalografía

Se tomaron muestras cercanas al inicio de fractura. En la Fig. 3.24 se puede apreciar que el material fue sometido a un tratamiento de recubrimiento metálico, así mismo se observan puntos compatibles con corrosión por picadura previos al recubrimiento metálico.

En la Fig. 3.25 se puede apreciar inclusiones del tipo óxido circulares y de un tamaño considerable. Además, en la misma figura se puede apreciar que el espesor del recubrimiento metálico no es constante en toda la superficie analizada.

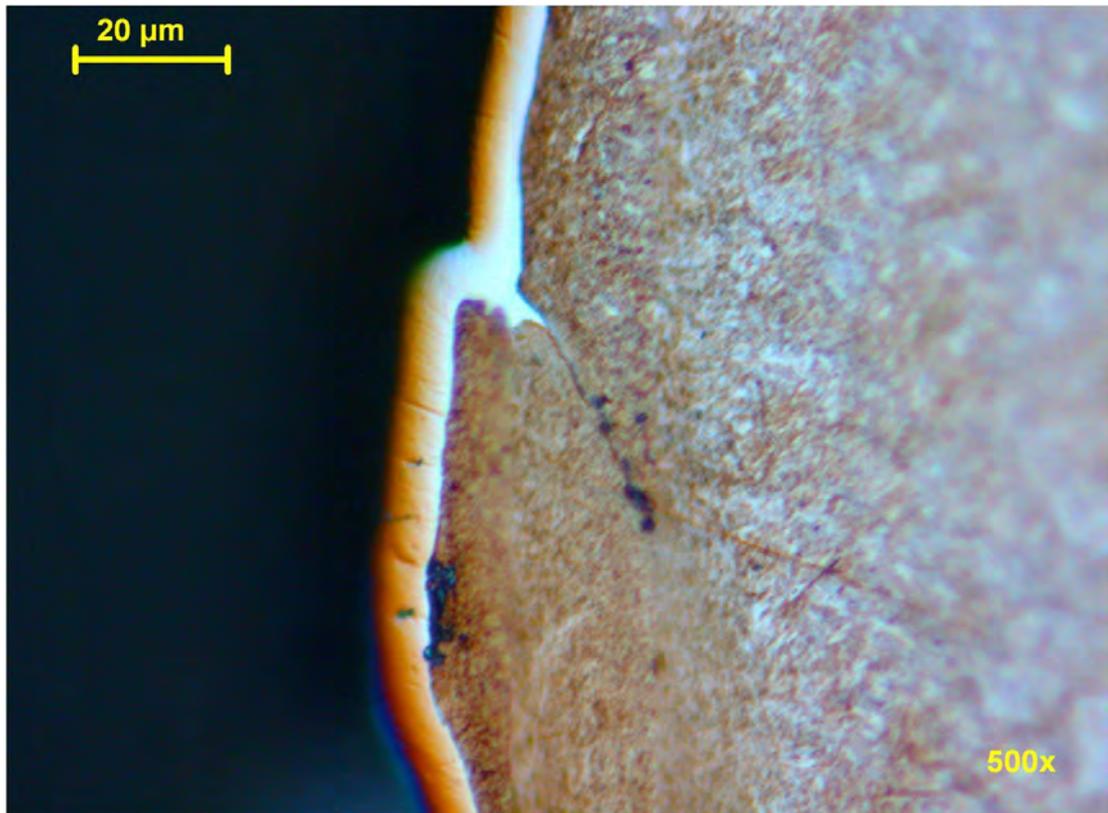


Fig. 3.24 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 500x

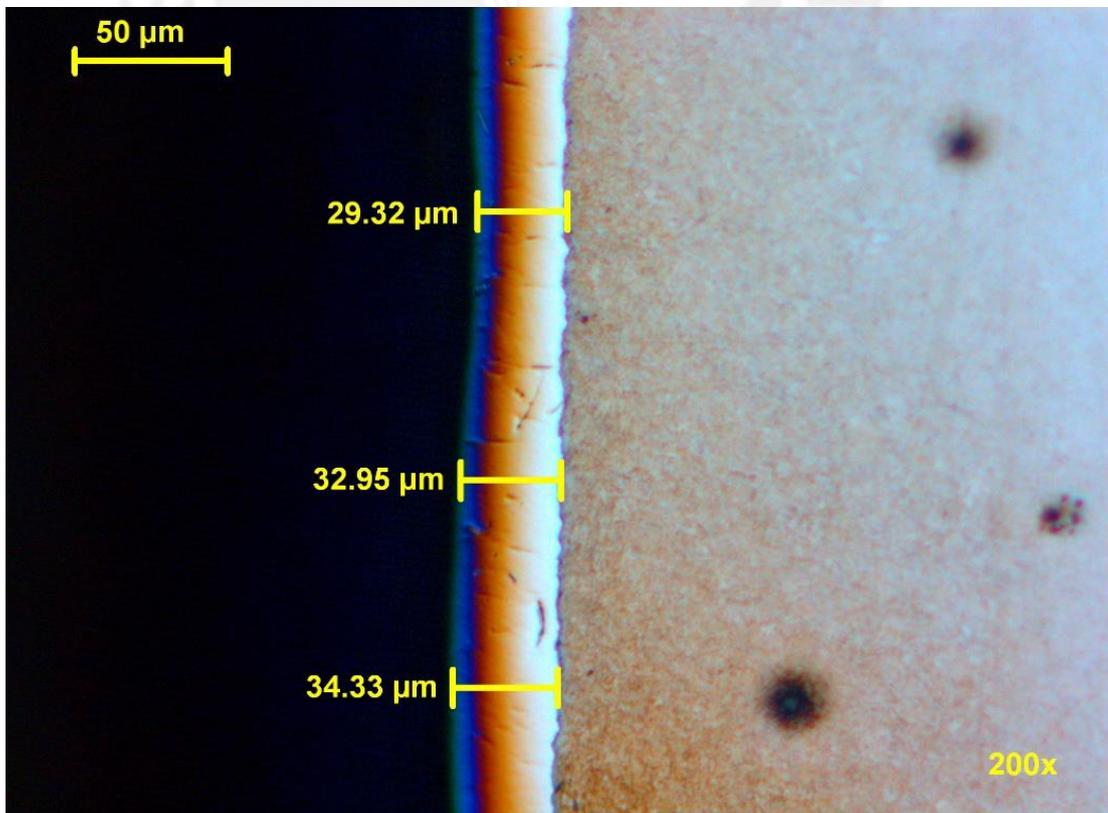


Fig. 3.25 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 200x

En la Fig. 3.26 se puede apreciar que la microestructura del material está conformada por martensita revenida, con significativa presencia de perlita y ferrita.

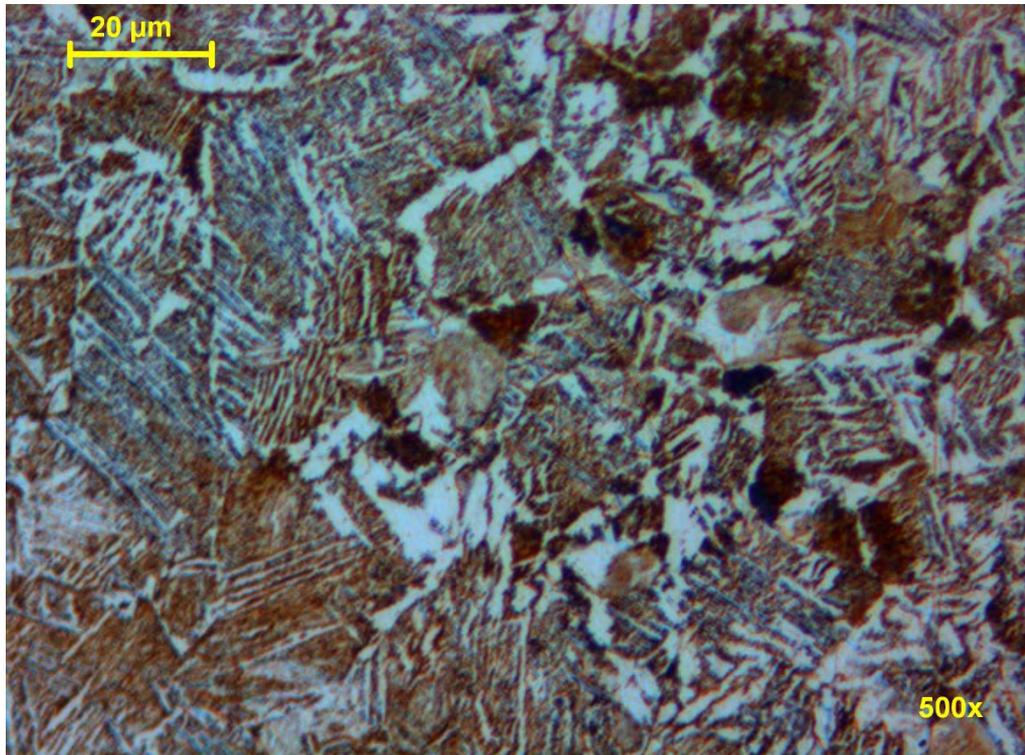


Fig. 3.26 - Micrografía de la zona afectada con ataque a 500x

### 3.3.6. Diagnóstico

El análisis fractográfico determina que el mecanismo de falla es compatible con una falla por fatiga por flexión rotativa a bajas cargas y elevados concentradores de tensiones como se puede apreciar en la Fig. 3.27.

La composición química del material analizado es compatible con un acero AISI/SAE 5140 y no cumple con las especificaciones de un 35CrMo4 por la ausencia del molibdeno. Es importante resaltar que el molibdeno incrementa la templabilidad del material y mejora sus propiedades mecánicas.

La microestructura encontrada en el análisis metalográfico revela que el material fue sometido a un tratamiento térmico inadecuado, por lo tanto no se alcanzaron los valores esperados de dureza para el tipo de material encontrado en el análisis químico.

La nucleación de las fisuras se dio en toda la circunferencia del canal de cambio de sección. Esto debido a que la corrosión por picadura actúa como grandes concentradores de tensión al igual que el basto acabo que tiene, disminuyendo notablemente la resistencia a la fatiga del componente.

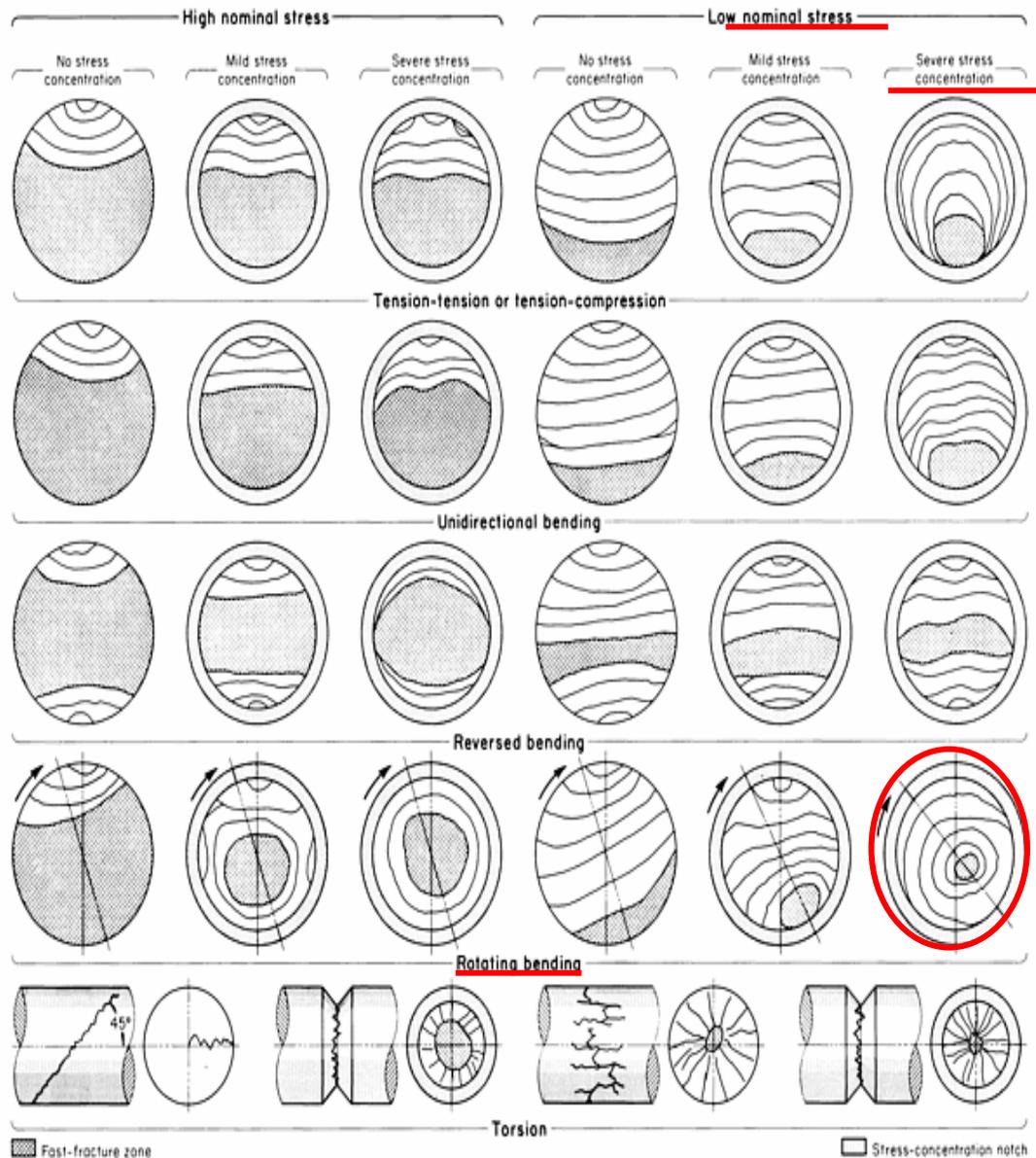


Fig. 3.27 - Mecanismo de falla por fatiga del eje del reductor del equipo de bombeo

### 3.4. Caso N°4: Eje fracturado lado de altas de reductor SWE Type

#### 3.4.1. Descripción del componente y de la falla

En el mes de mayo del 2011 llega al laboratorio tres partes de un eje fracturado, los cuales pertenecen a la entrada de alta de una caja reductora de un equipo de bombeo, dichas partes del componente se puede apreciar en las figuras Fig. 3.28 y Fig. 3.29.

La caja reductora es marca SEW Eudrive, tipo MB2HSF450 con las siguientes especificaciones técnicas:

- Potencia : 2000 HP (1492kW)
- Velocidad de entrada/salida : 1750/310 rpm
- Factor de Servicio : 2.5

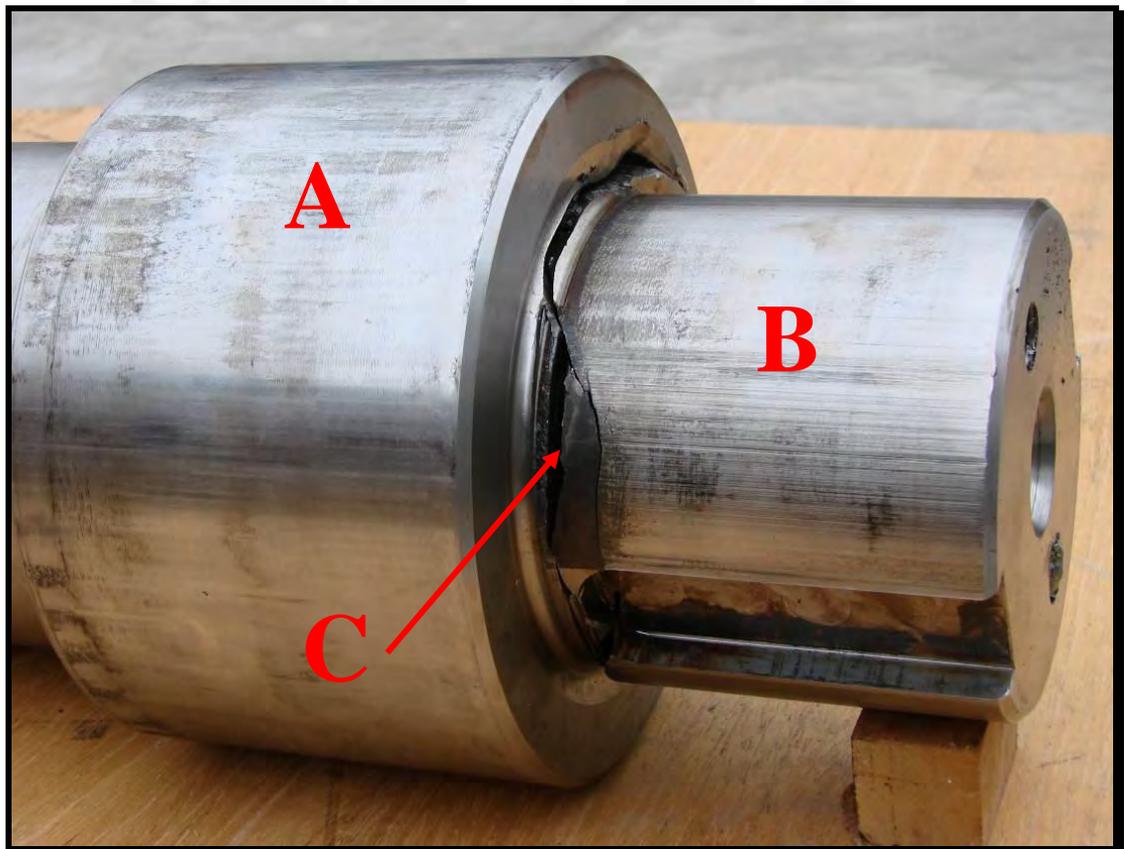


Fig. 3.28 - Eje de caja reductora de equipo de bombeo



Fig. 3.29 - Parte "C" atrapada entre los dos extremos del eje

El eje fue reparado por el fabricante incluyendo un cambio en el diseño que no se especifica. Además el tiempo de servicio que tuvo el componente luego de ser reparado fue de tan solo 62 días, operando en dos oportunidades. La primera operación fue de 21 días y la segunda puesta en marcha fue de 41 días hasta que ocurrió la falla.

En la Fig. 3.30 se aprecia un esquema de la caja reductora, en él se indica el eje fallado y la ubicación de la fractura.

El cliente no entrega ningún dato respecto a la caracterización del material.

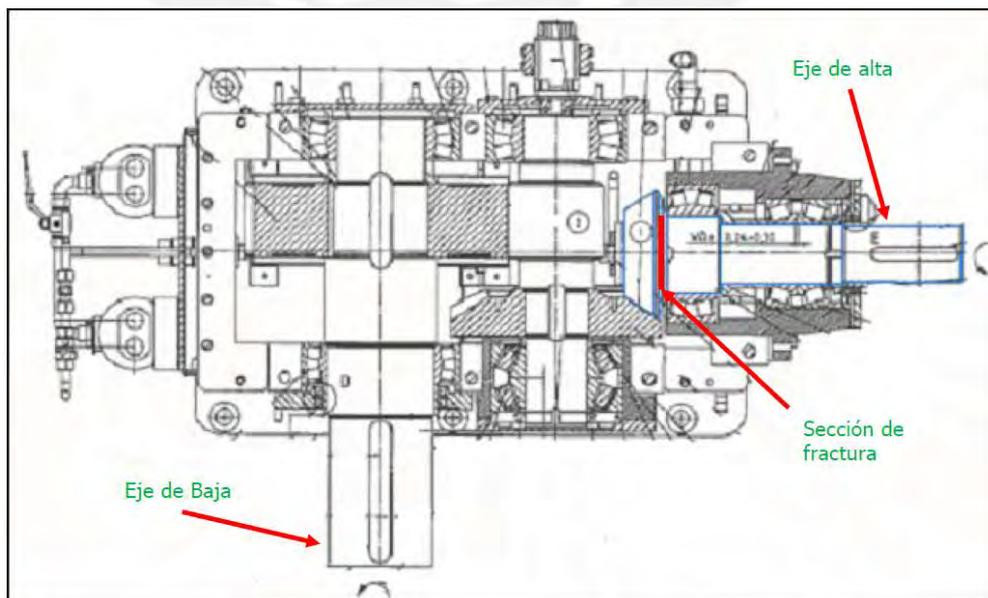


Fig. 3.30 - Esquema de la caja reductora del equipo de bombeo

### 3.4.2. Inspección Visual

Lo primero que se puede apreciar en la inspección visual es que hubo dos frentes de propagación de fisura, estas llegan a juntarse en un momento dejando atrapado a la parte C como se muestra en la Fig. 3.31.



Fig. 3.31 - Frentes de propagación de fisura del eje

En la Fig. 3.32 se muestra el inicio de fractura del frente de propagación 1. En la Fig. 3.33 se muestra el inicio de fractura del frente de propagación 2.

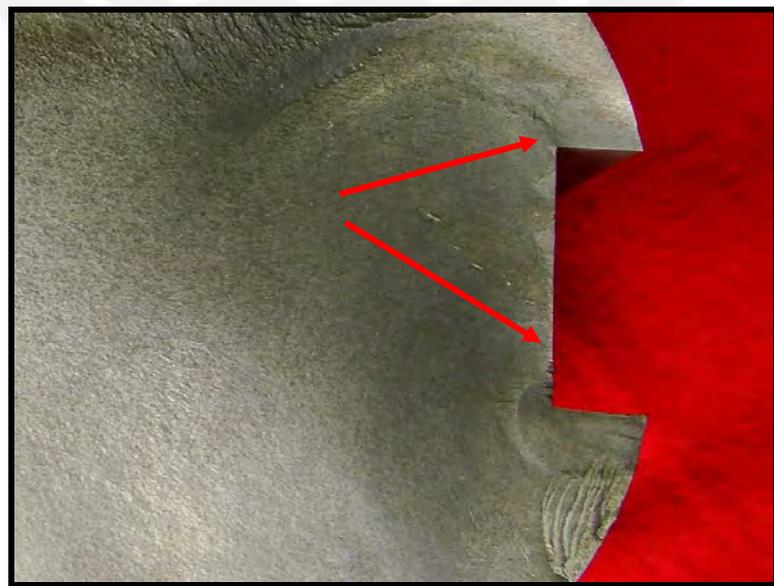


Fig. 3.32 - Inicio de fisura de Frente de propagación 1



Fig. 3.33 - Inicio de fisura de frote de propagación 2

En la Fig. 3.34 se aprecia las dos superficies de fractura, en dicha figura se puede apreciar la zona de falla final, el cual abarca aproximadamente un 15% de la superficie de fractura.

En la Fig. 3.35 se aprecia el acabado superficial de la base del canal chavetero, en esta se aprecia claramente las marcas de mecanizado.

En la Fig. 3.36 se aprecia el radio de curvatura del canal Chavetero.



Fig. 3.34 - Superficie de fractura. Zona de rotura final



Fig. 3.35 - Acabado superficial de fondo de canal chavetero

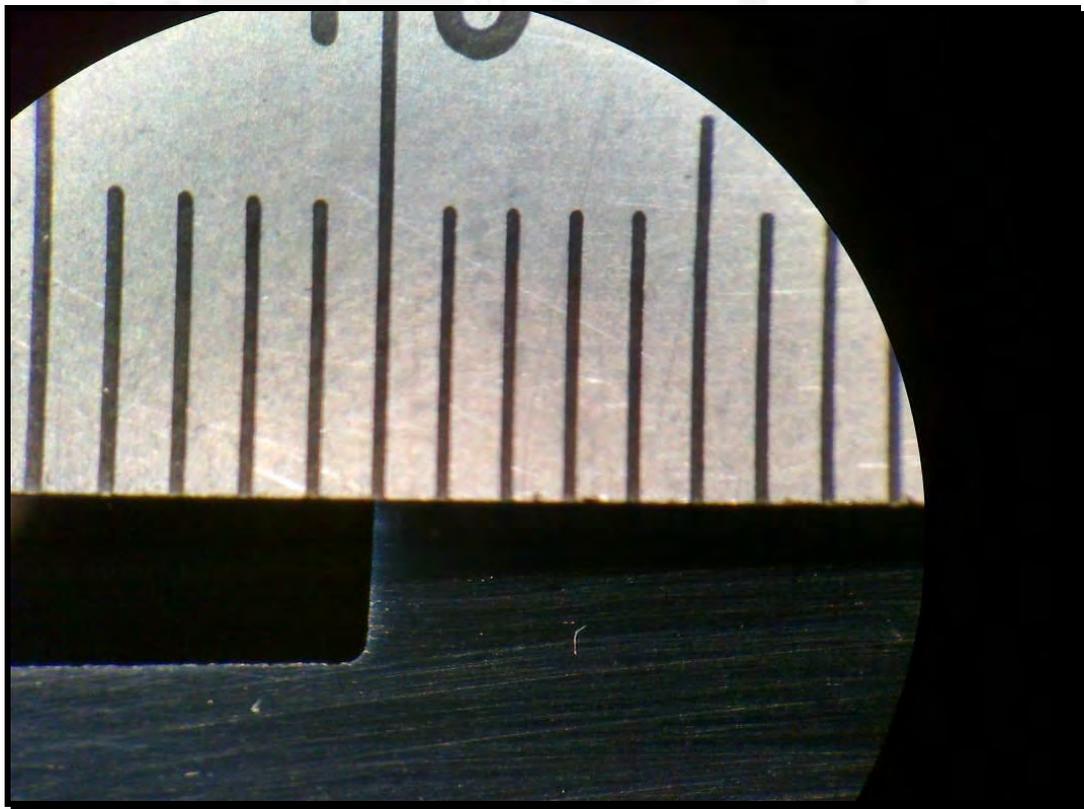


Fig. 3.36 - Radio de Curvatura de base de canal chavetero

### 3.4.3. Análisis Químico

Los resultados del análisis químico realizado al componente se muestran en la tabla 3.7 el cual corresponde a un acero de medio carbono de baja aleación. Cuya composición química se asemeja con las especificaciones de un acero AISI/SAE 4340, sin embargo, hay un exceso de sulfuro que puede afectar considerablemente la resistencia del material. El cliente no proporcionó información acerca del material utilizado en la fabricación del componente.

Tabla 3.7 - Análisis químico al Eje reductor alta caja reductora SWE

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Muestra del eje fallado	0.41	0.29	0.75	0.005	0.04	1.70	0.78	0.26	0.06
SAE 4340	0.36 - 0.43	0.15 - 0.35	0.60 - 0.90	Max 0.030	Máx. 0.030	1.60 - 2.00	0.60 - 1.00	0.15 - 0.30	--

### 3.4.4. Ensayo de Dureza

Los resultados del ensayo de dureza se muestran en la tabla 3.8. El promedio de la dureza del material es de 31 HRC. Este valor de dureza está dentro del rango indicado de dureza para un acero AISI/SAE 4340 en estado bonificado de 28 a 35 HRC.

Tabla 3.8 - Resultados del ensayo de dureza del Eje reductor de bombeo

Indentación	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Rockwell promedio
1	31.1	31
2	31.4	
3	31.0	
4	31.0	
5	31.2	

### 3.4.5. Metalografía

En la Fig. 3.37 se puede apreciar inclusiones de forma circular distribuidas aleatoriamente en toda la sección del componente, estas inclusiones son compatibles con óxidos. En la misma imagen se puede apreciar la presencia de inclusiones alargadas y orientadas hacia el mismo lado; éstas inclusiones tienen un gran tamaño y son compatibles con inclusiones del tipo sulfuro, ratificando los valores encontrados en el análisis químico.

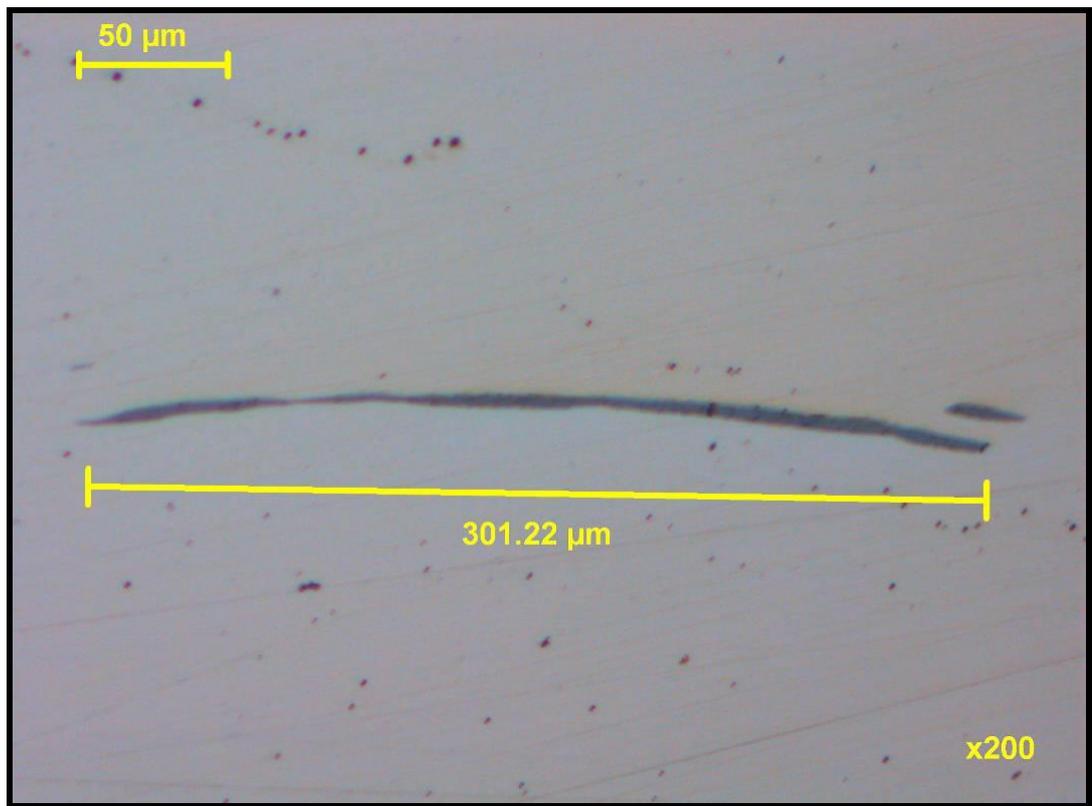


Fig. 3.37 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 200x

En la Fig. 3.38 se puede apreciar la microestructura del componente, la cual está compuesta de martensita revenida, ratificando los resultados encontrados en el ensayo de dureza y análisis químico.



Fig. 3.38 - Micrografía de la zona afectada con ataque a 500x

#### 3.4.6. Diagnóstico

El análisis fractográfico determina que el mecanismo de falla es compatible con una falla por fatiga por flexión rotativa de bajas cargas y bajos concentradores de tensiones como se puede apreciar en la Fig. 3.39.

El material empleado para la fabricación del componente es un AISI/SAE 4340 en estado de bonificado, sin embargo posee un exceso considerable de azufre, el cual origina las inclusiones alargadas del tipo sulfuro que se encuentran distribuidos en todo el componente.

La nucleación de la fisura del componente se llevó a cabo por la combinación del pobre acabado superficial en la base del canal chavetero, el pequeño radio de curvatura y sobre todo por la presencia de inclusiones alargadas del tipo sulfuro.

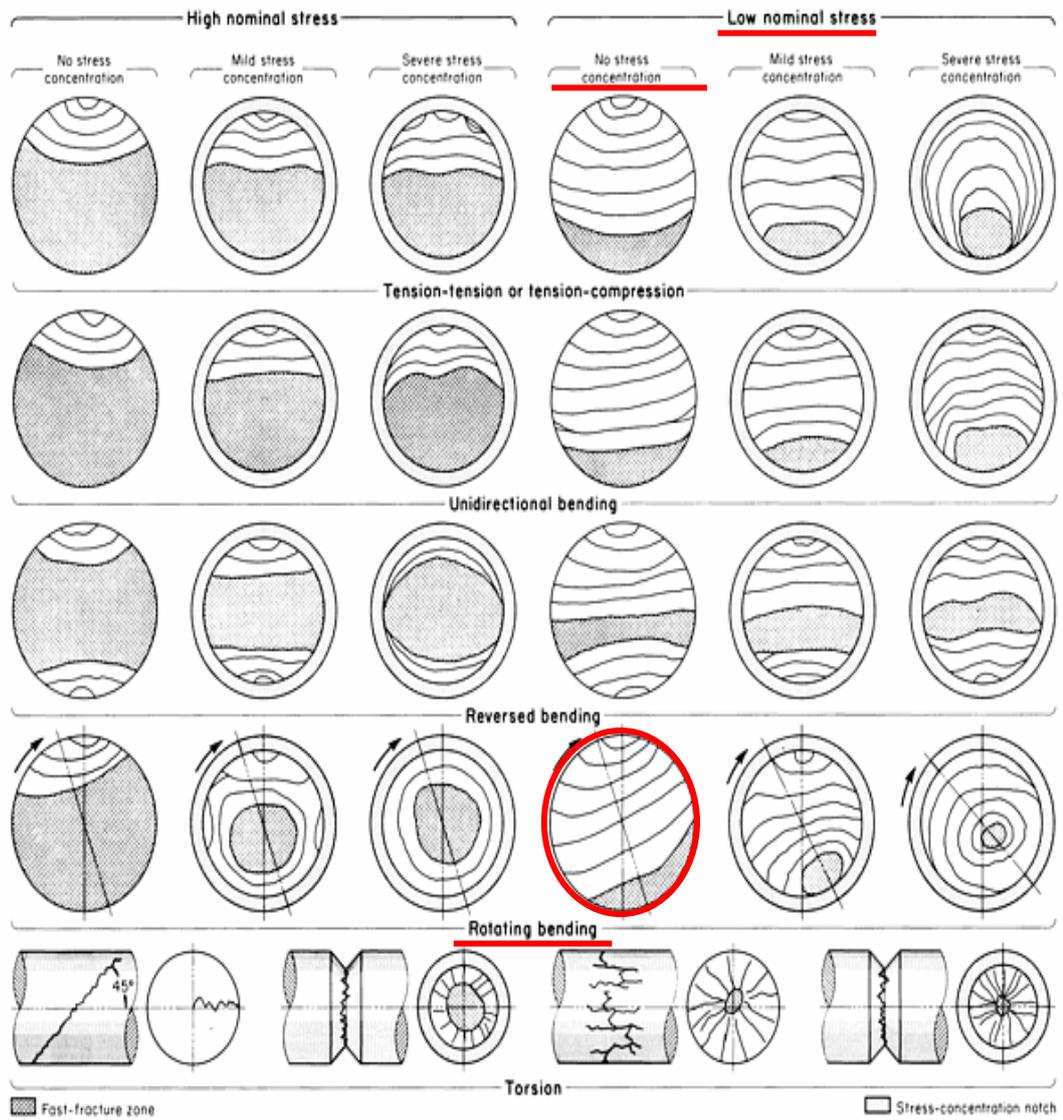


Fig. 3.39 - Mecanismo de falla por fatiga del eje reductor de equipo de bombeo

### 3.5. Caso 5: Espiga de rotor de turbo-compresor

#### 3.5.1. Descripción del componente y de la falla

En el mes de marzo del 2009 llega al laboratorio tres elementos fracturados correspondientes a una espiga de rotor perteneciente a un turbo compresor del motor de una embarcación de 50m<sup>3</sup> de capacidad, dichas partes del componente se pueden apreciar en la Fig. 3.40.



Fig. 3.40 - Partes de la Espiga del rotor del turbo compresor

El motor es un General Electric 7FDM12 y tenía un tiempo de operación de 2915 horas. No se reporta reparación alguna previa a la falla y tampoco se indica si el eje fue adquirido en estado nuevo.

La falla ocurrió en condiciones de operación normales, sin una sobrecarga reportada. En el momento de la falla se escucha un golpeteo y se observa humo negro saliendo del tubo de escape.

No se proporciona ningún dato referente a la caracterización del material.

### 3.5.2. Inspección Visual

En la inspección visual realizada a la espiga se aprecia dos zonas de fractura, uno de ellos en la zona cilíndrica y la segunda en la zona roscada. En la Fig. 3.41 se puede apreciar la superficie de fractura de la zona cilíndrica, en él se aprecia que la zona frágil abarca aproximadamente un 80% del total de la sección, además se aprecia los puntos de inicio de fractura. En la Fig. 3.42 y 3.43 se aprecia la superficie de fractura de la zona roscada, en dicha figura se puede apreciar que la superficie frágil abarca aproximadamente un 40% del total de la sección.



Fig. 3.41 - Superficie de fractura zona cilíndrica



Fig. 3.42 - Superficie de fractura zona roscada. Propagación a 45° respecto al eje axial



Fig. 3.43 - Superficie de fractura de la zona roscada. Zona de rotura final

### 3.5.3. Análisis Químico

Los resultados del análisis químico realizado al componente se muestran en la tabla 3.9 el cual corresponde a un acero de medio carbono de baja aleación al cromo, con un ligero porcentaje de Vanadio e imperceptible presencia de Níquel, molibdeno y tungsteno. El cliente no entregó datos referentes al material de diseño.

Tabla 3.9 - Análisis químico a la espiga de rotor de embarcación

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	W
Muestra del eje fallado	0,39	0,08	0,66	0,006	0,001	0,15	1,74	0,06	0,11	0,12	0,01
SAE 6150	0,45 – 0,55	0,15 – 0,35	0,65 – 0,95	Máx. 0,035	Máx. 0,035	---	0,80 – 1,10	---	---	0,15 – 0,25	

### 3.5.4. Ensayo de Dureza

Los resultados del ensayo de dureza se muestran en la tabla 3.10. El promedio de la dureza del material es de 322 HV el cual es equivalente a una dureza de 33.5 HRC. La dureza esperada para un AISI/SAE 6150 bonificado es de 41 hasta 46 HRC.

Tabla 3.10 - Resultados del ensayo de dureza de la espiga del rotor de la embarcación

Indentación	Dureza Vickers (HV)	Dureza Vickers promedio	Dureza Rockwell C promedio
1	321	322	33.5
2	310		
3	317		
4	325		
5	321		
6	332		
7	329		
8	321		

### 3.5.5. Metalografía

En la Fig. 3.44 se puede apreciar una gran presencia de inclusiones de forma circular, compatibles con el tipo óxidos agrupadas y alineadas.

En la Fig. 3.45 se puede apreciar la nucleación de una fisura de gran dimensión, 294,28 $\mu$ m, también se observa la presencia de oxidación en la abertura inicial de la fisura y que las inclusiones favorecieron a la propagación de dicha fisura.

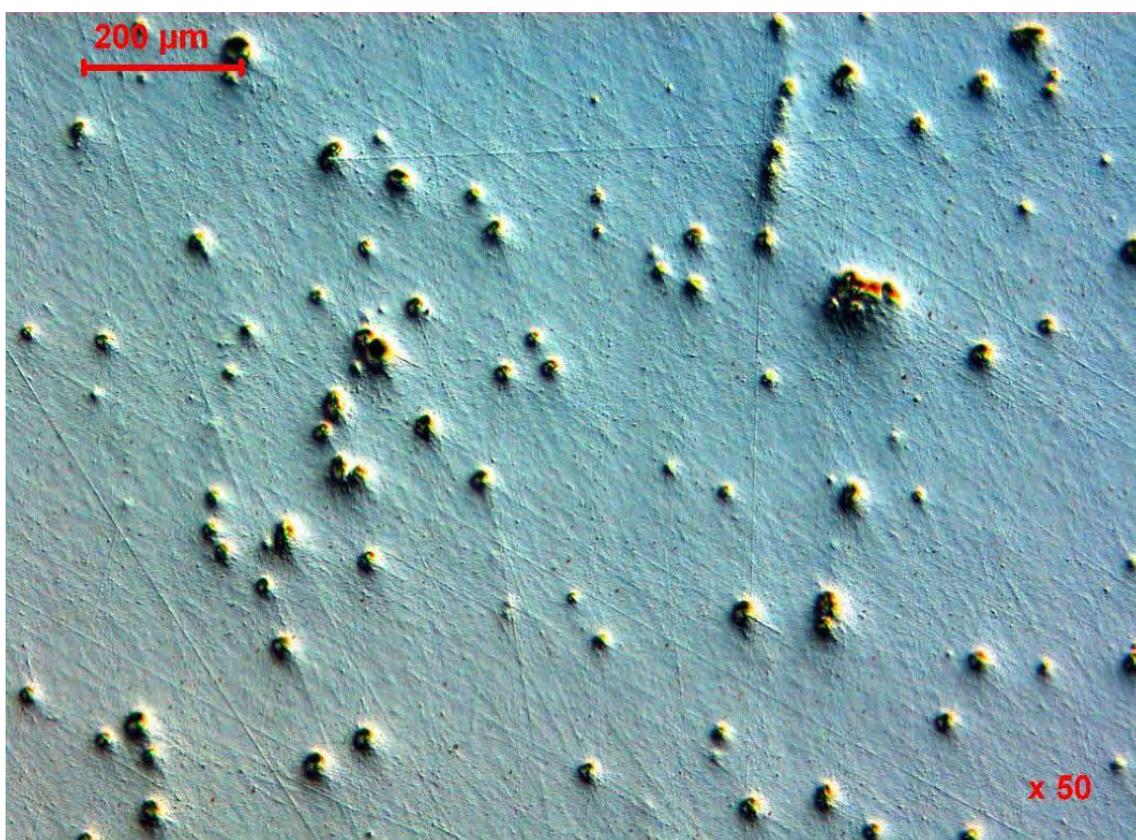


Fig. 3.44 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 50x

En la figura 3.45 se puede apreciar la presencia de inclusiones alargadas del tipo sulfuro.

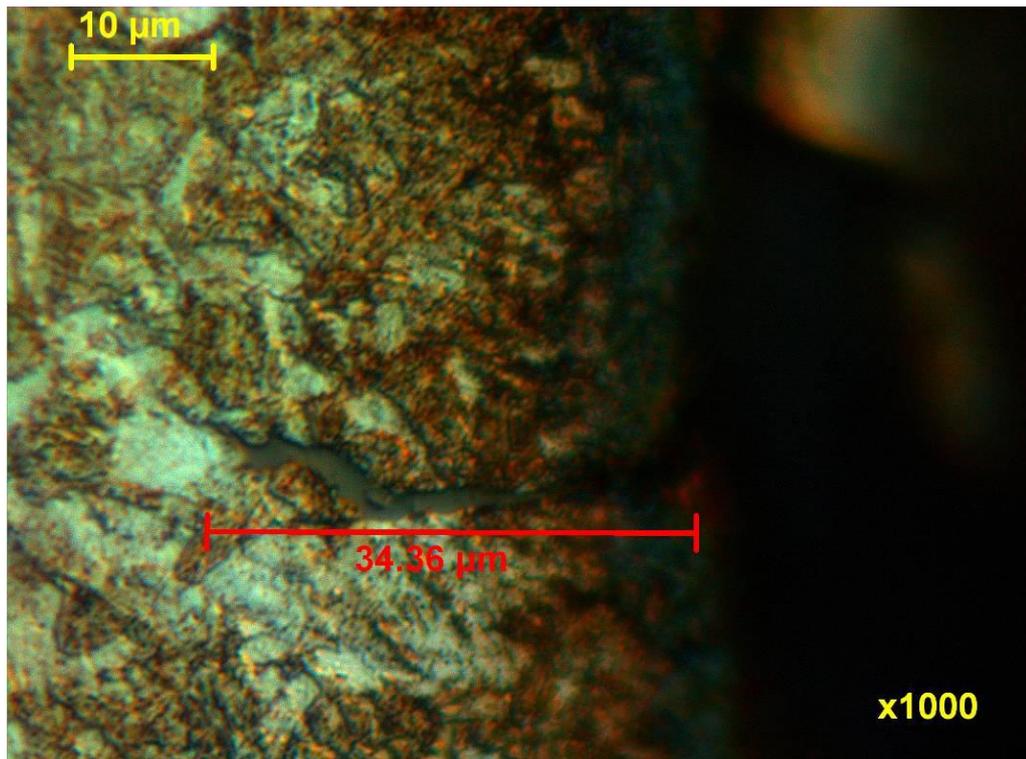


Fig. 3.45 - Micrografía de la zona afectada con ataque a 1000x

En la figura 3.46 se puede apreciar la microestructura de la muestra, la cual está compuesta de martensita revenida con trazas de ferrita.

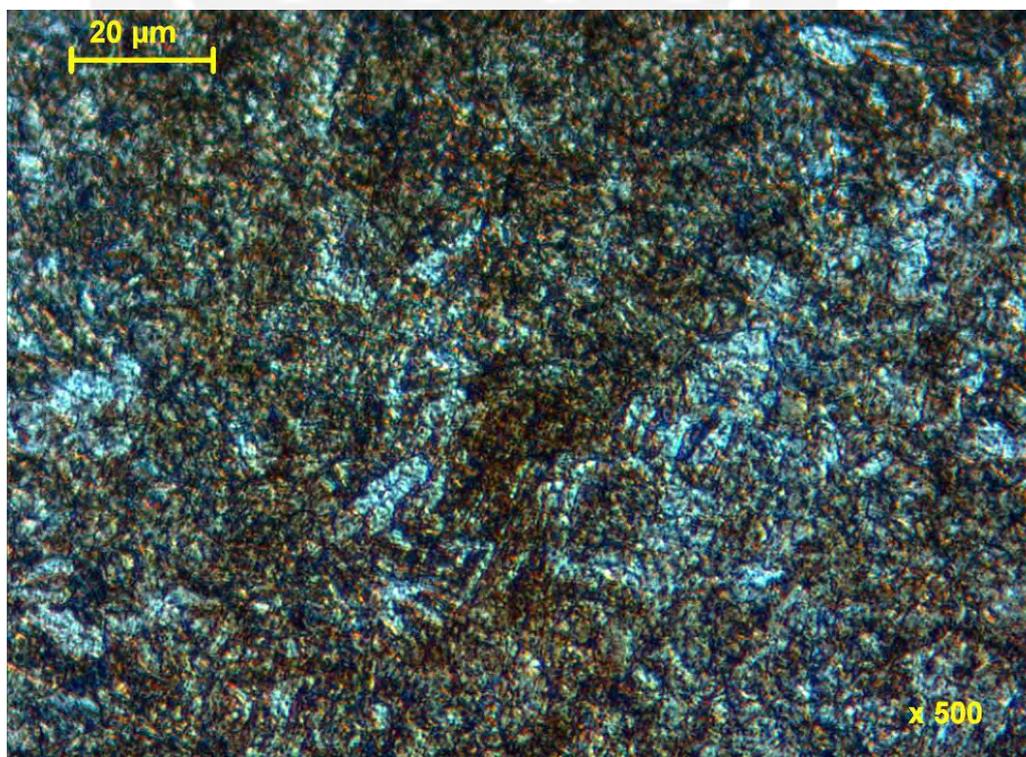


Fig. 3.46 - Micrografía a 500x

### 3.5.6. Diagnóstico

El análisis fractográfico determina que el mecanismo de falla de la zona cilíndrica es compatible con una falla por fatiga a flexión rotativa sometida a elevadas cargas y bajos concentradores de tensiones, como se puede apreciar en la Fig. 3.47 (color rojo). Realizando el mismo análisis se determina que el mecanismo de falla de la zona roscada es compatible con una falla por fatiga a torsión sometida a cargas medias (color amarillo).

El acero es un acero de medio carbono de baja aleación al cromo, con ligera presencia de Níquel e imperceptible presencia de Vanadio, Tungsteno y Molibdeno.

En las muestras analizadas se encontró una significativa cantidad de inclusiones del tipo circular y alargadas, éstas eran inclusiones no metálicas (sulfuro y óxidos). Estas inclusiones son propensas a iniciar una nucleación por fatiga al material y además ayudó a la propagación de la fisura. La presencia de ferrita en la microestructura de las muestras analizadas nos indica que no hubo un adecuado tratamiento térmico.

Todo lo mencionado anteriormente favoreció a la disminución de la resistencia a la fatiga del componente, el cual originó la falla causada.

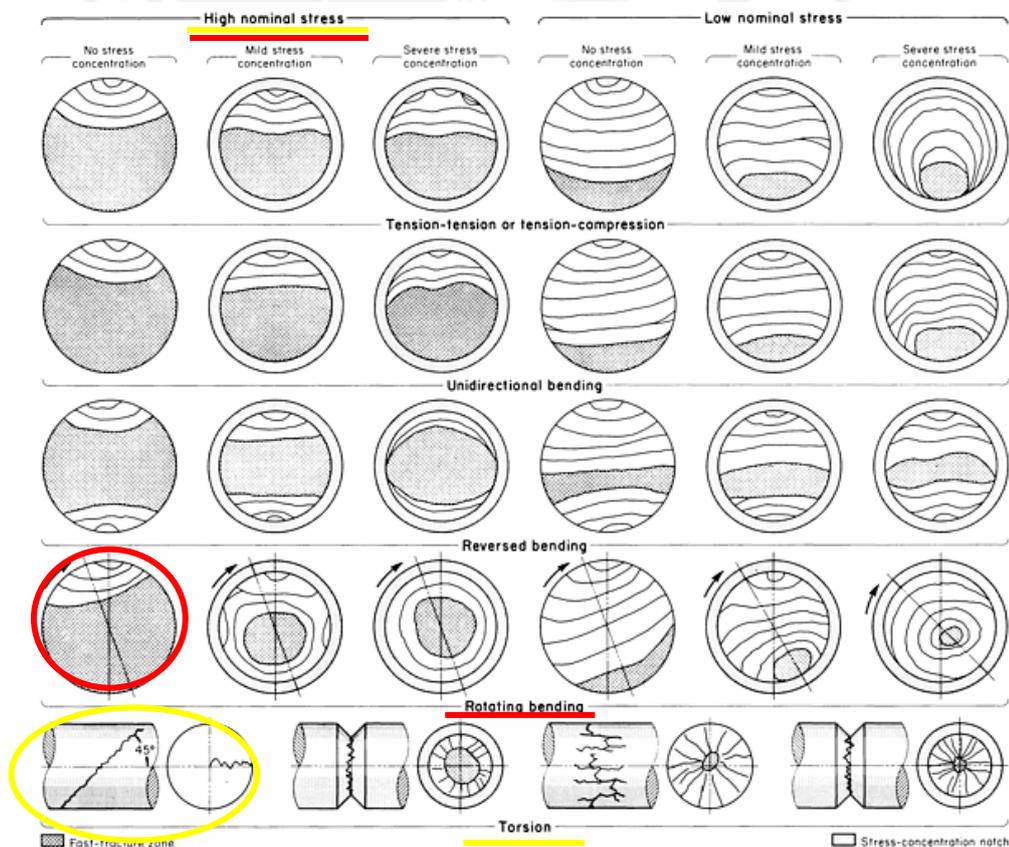


Fig. 3.47 - Mecanismo de falla por fatiga de las dos superficies de fractura

### 3.6. Caso 6: Eje reductor de faja transportadora

#### 3.6.1. Descripción del componente y de la falla

En el mes de julio del año 2010 llega al laboratorio de materiales 1 eje, 1 chaveta y 2 ruedas dentadas pertenecientes a un reductor de la faja de una planta de chancado como se puede apreciar en la Fig. 3.48.

La faja a la cual pertenecía el componente transportaba aproximadamente 2800 TON/hora trabajando 24 horas al día.



Fig. 3.48 - Componentes para analizar de la faja de la planta de chancado

El componente no sufrió una falla catastrófica, fue retirado en un mantenimiento predictivo ya que se encontró elevadas partículas de desgaste en una inspección.

Este componente fue reparado con anterioridad. Tiene una longitud aproximada de 480mm y su canal chavetero una longitud aproximada de 310mm como se puede apreciar en la Fig. 3.49.

El cliente no brinda ninguna información referente al material.



Fig. 3.49 - Dimensión del eje de la faja de la planta de chancado

### 3.6.2. Inspección Visual

En la Fig. 3.50 se puede apreciar que el eje sufrió desprendimiento de material, además en la misma figura se aprecia la superficie de fractura, la cual presenta varios frentes de ataque y todos ellos partieron del fondo del canal chavetero. En la Fig. 3.51 se puede apreciar que la zona de falla final abarca aproximadamente un 15% del total de la superficie de fractura, así como también la forma de las marcas de playa.

En la Fig. 3.52 se puede apreciar el radio de curvatura de la base del canal chavetero, el cual es muy pequeño, prácticamente nulo.

Luego de realizar un corte transversal al eje, se logra apreciar la dirección de la propagación de una fisura, como se muestra en la Fig. 3.53 y 3.54.

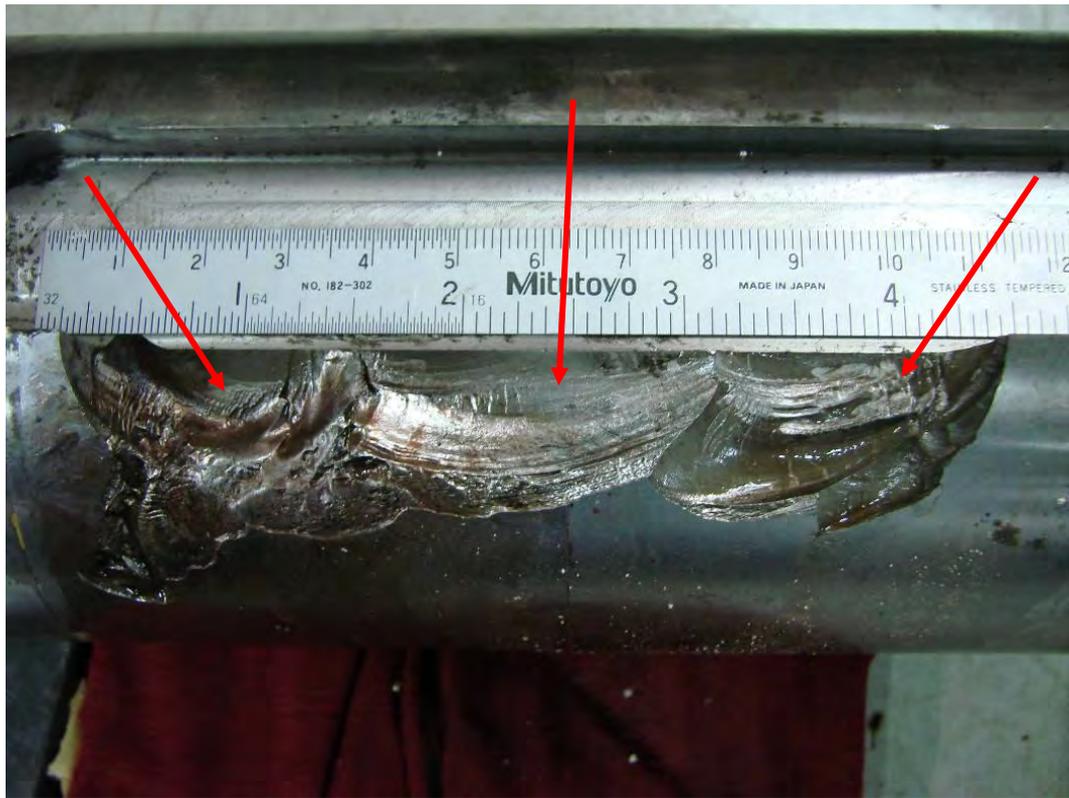


Fig. 3.50 - Diferentes puntos de inicio de fractura. Zona final de rotura

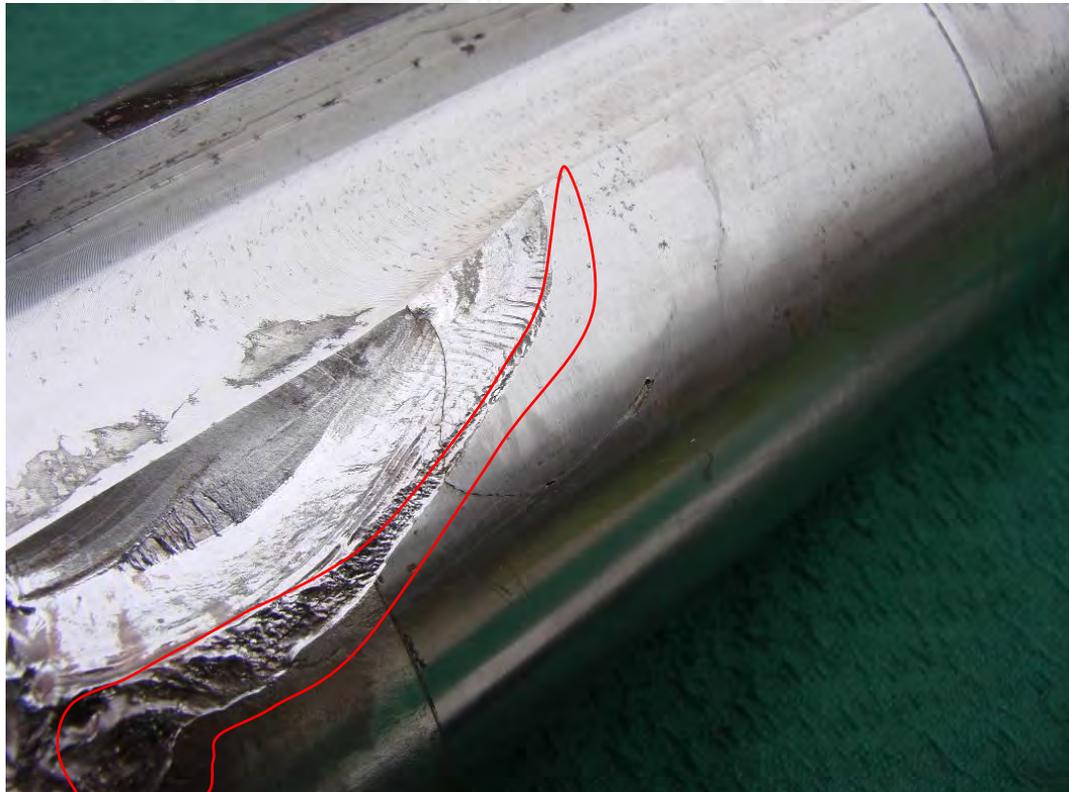


Fig. 3.51 - Superficie de Fractura de eje de faja de chancado. Zona de rotura final

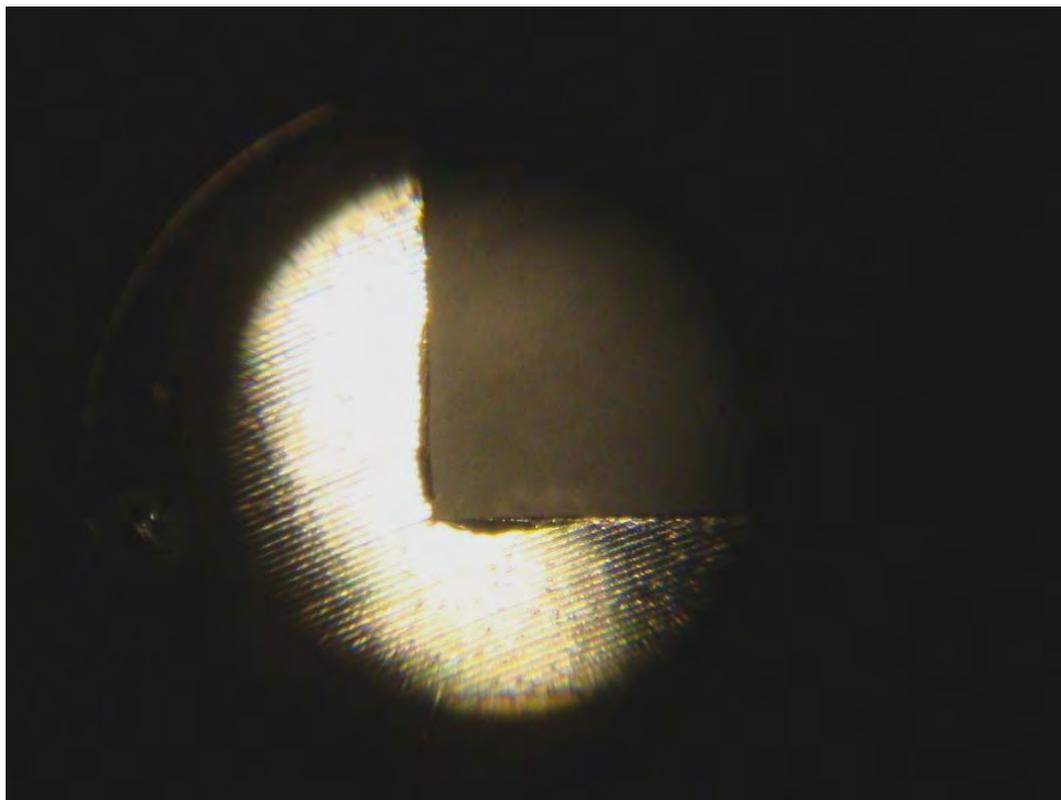


Fig. 3.52 - Radio de curvatura de base de canal chavetero



Fig. 3.53 - Dirección de propagación de fisura dentro de canal chavetero. Transversal al eje

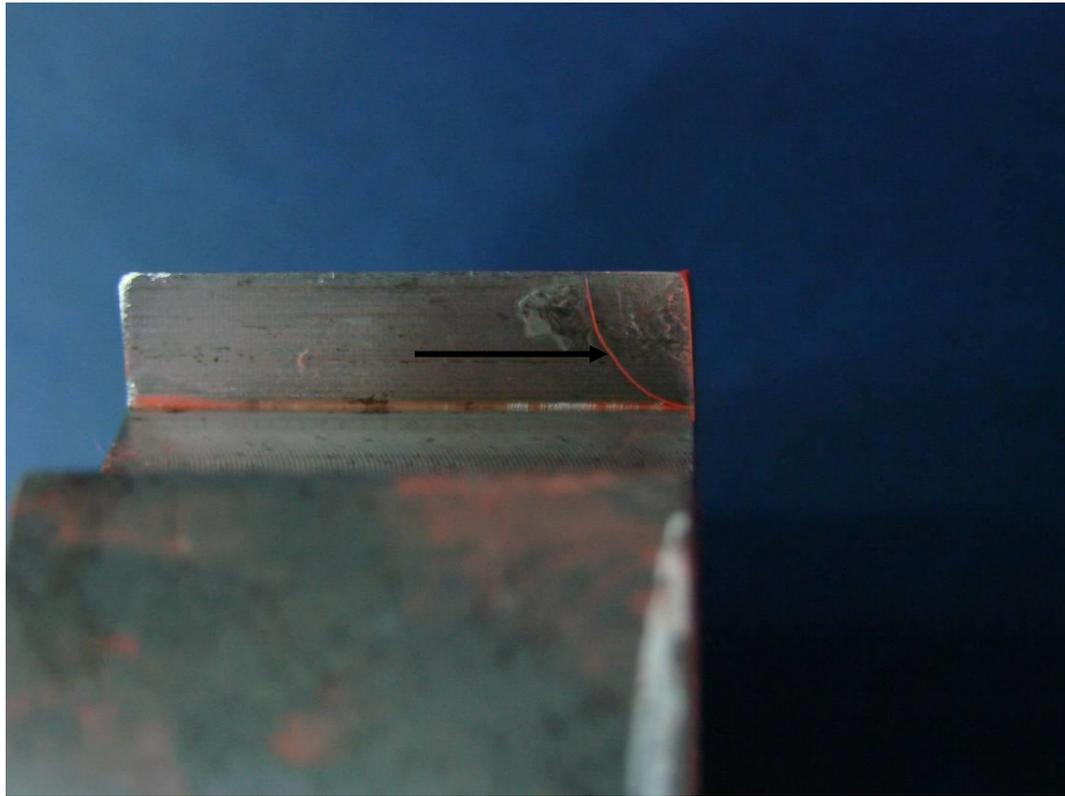


Fig. 3.54 - Dirección de propagación de fisura dentro de canal chavetero. Longitudinal al eje

### 3.6.3. Análisis Químico

Los resultados del análisis químico realizado al componente se muestran en la tabla 3.11 el cual corresponde a un acero de medio carbono de baja aleación. Cuya composición química se asemeja con las especificaciones de un acero AISI/SAE 4340, pero con un ligero exceso de carbono y un déficit de níquel.

Tabla 3.11 - Análisis químico al eje de la faja transportadora de la planta de chancado

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
<b>Muestra del eje fallado</b>	0,52	0,28	0,73	0,006	0,016	1,27	0,81	0,24	0,22
<b>SAE 4340</b>	0,35 — 0,45	0,15 — 0,35	0,50 — 0,70	Máx. 0,035	Máx. 0,035	1,40 — 1,70	0,90 — 1,40	0,20 — 0,30	---

### 3.6.4. Ensayo de Dureza

Los resultados del barrido de dureza se muestran en la tabla 3.12. El promedio de la dureza del material es de 41.1 HRC

Tabla 3.12 - Resultados del ensayo de dureza eje de la faja transportadora de la planta de chancado

Indentación	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Rockwell promedio
1	41.8	<b>41.1</b>
2	41.9	
3	41.3	
4	40.3	
5	40.7	
6	41.2	
7	41.1	
8	41.3	
9	41.7	
10	41.7	
11	40.4	
CENTRO	40.1	

### 3.6.5. Metalografía

En la Fig. 3.55 se puede apreciar la presencia de inclusiones compatibles con óxidos agrupados y alineados, presentes en toda la muestra analizada.

En la Fig. 3.56 se puede apreciar la microestructura de la muestra analizada, la cual corresponde a martensita revenida en su totalidad.

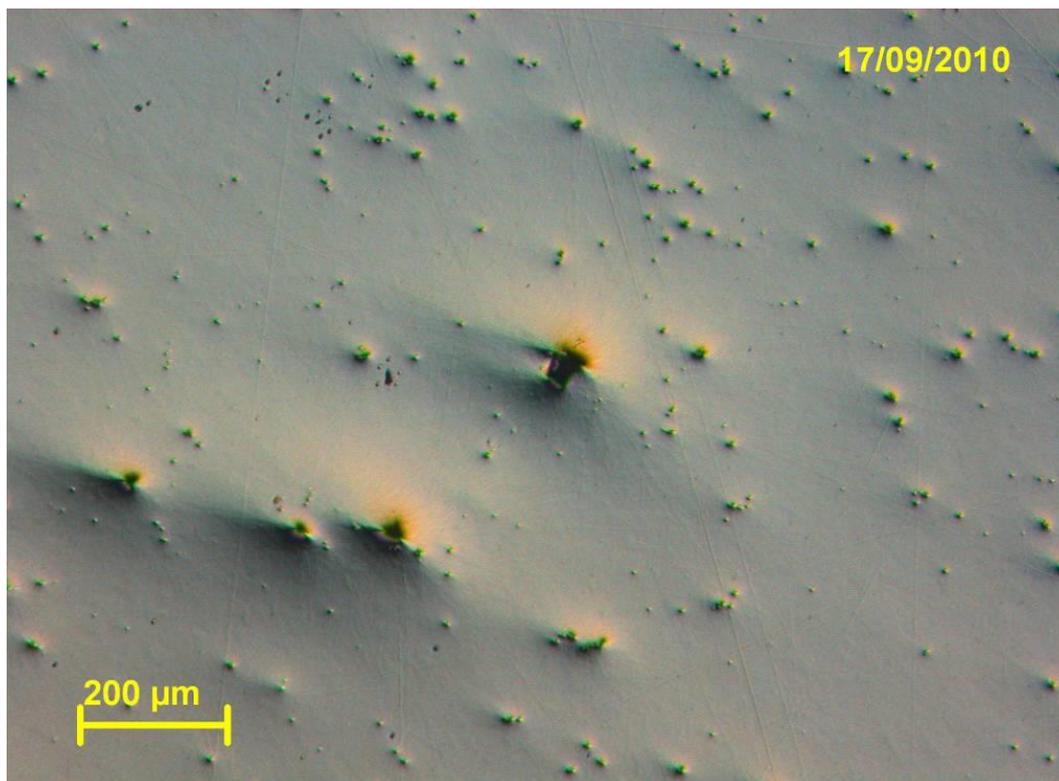


Fig. 3.55 - Micrografía de la zona afectada sin ataque a 50x

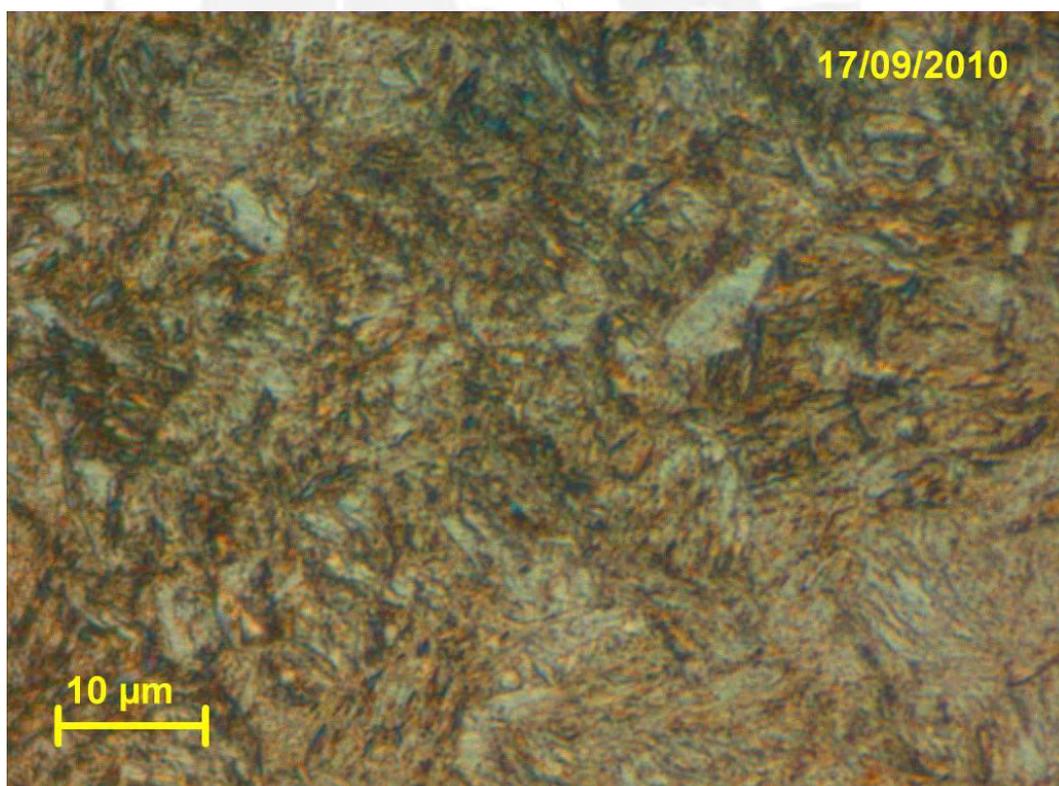


Fig. 3.56 - Micrografía de la zona afectada a 1000x

### 3.6.6. Diagnóstico

El análisis fractográfico determina que el mecanismo de falla es compatible con una falla por fatiga por flexión unidireccional de bajas cargas y concentradores de tensiones medios como se puede apreciar en la Fig. 3.57.

El radio de curvatura para aliviar tensiones en la base del canal chavetero es muy reducido, casi nulo.

La presencia de inclusiones alineadas reduce la resistencia del material a la fatiga.

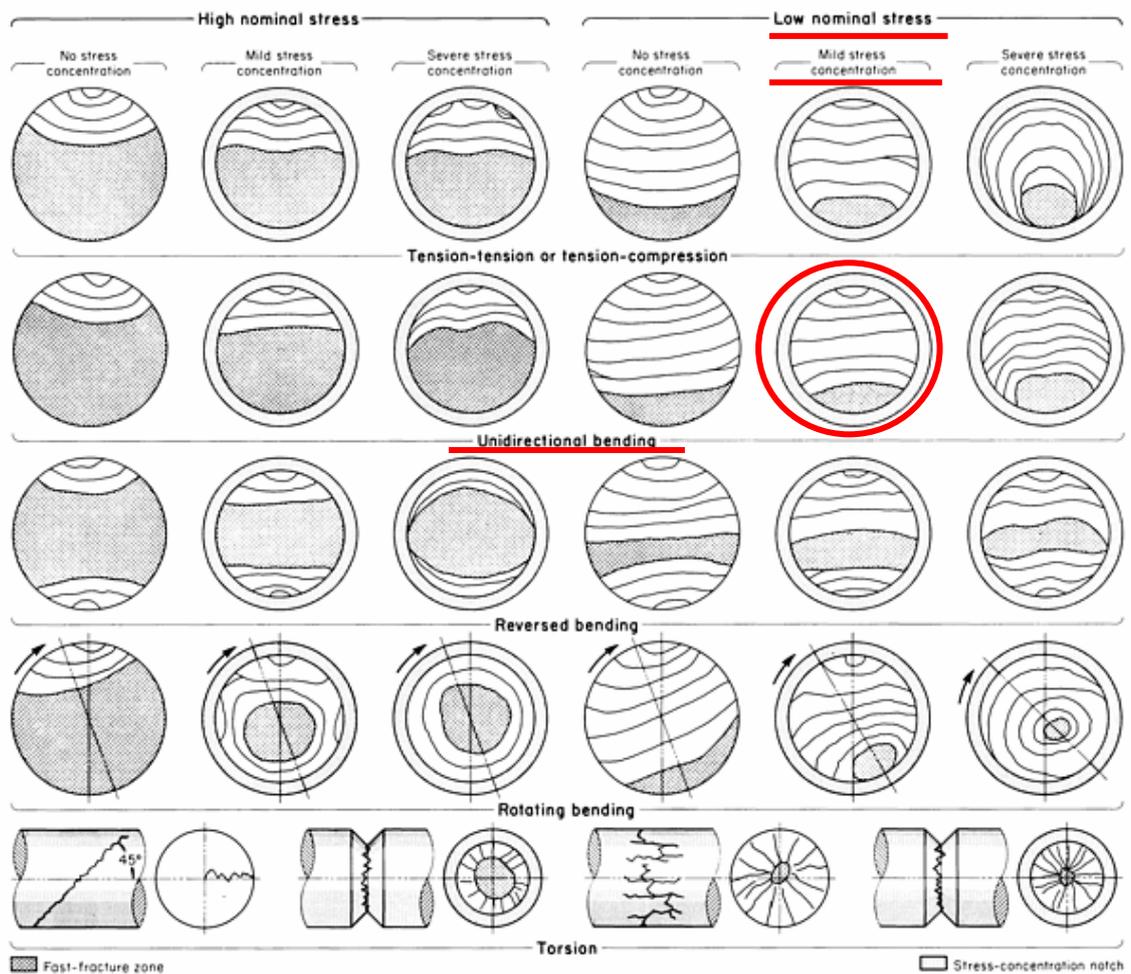


Fig. 3.57 - Mecanismo de falla por fatiga del eje de faja de chancado

### 3.7. Caso 7: Eje de polea de Sistema de izaje de una mina

#### 3.7.1. Descripción del componente y de la falla

En el mes de noviembre del 2009 llega al laboratorio de la PUCP un cubo, un cable y dos partes de un eje fallado, los cuales pertenecen a un equipo de izaje de mina a socavón, como se puede apreciar en la Fig. 3.58. El análisis de falla se realizará al eje de polea mostrado en la figura anterior.

El eje está en servicio aproximadamente 5 años y falló durante una operación.

El cliente no brinda información alguna acerca del material.



Fig. 3.58 - Componentes para análisis de sistema de izaje

### 3.7.2. Inspección Visual

La falla del eje ocurrió aproximadamente a la mitad del componente como se puede apreciar en la Fig. 3.59. En la misma figura se aprecia que una de las superficies de fractura posee deformaciones plásticas, posiblemente estas deformaciones ocurrieron posteriores a la falla.

En la Fig. 3.60 se puede observar la superficie de fractura, en ella se observa que la zona de fractura final abarca aproximadamente un 20% del total de la superficie, además se observa las marcas de playa.

En la Fig. 3.61 se puede apreciar el inicio de fractura, el cual se ubica cerca al canal chavetero, mas no dentro de él.



Fig. 3.59 - Superficies de fractura de ambas partes del eje del sistema de izaje



Fig. 3.60 - Superficie de Fractura sin deformación plástica. Rotura final

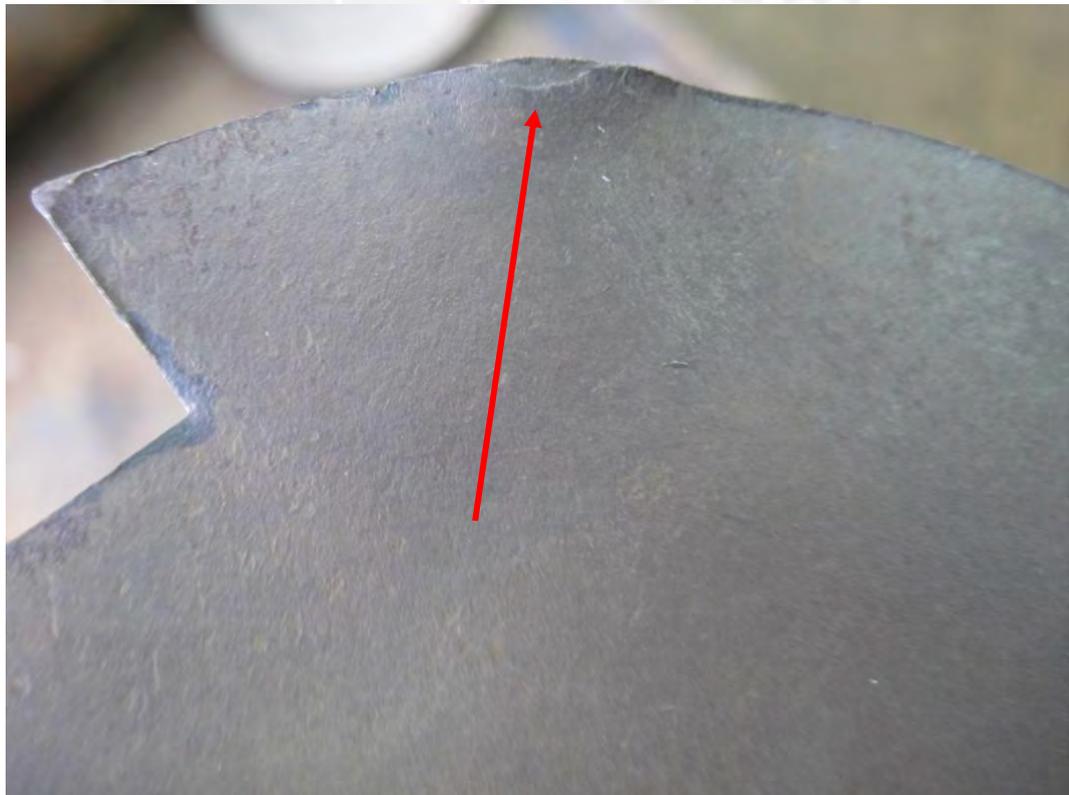


Fig. 3.61 - Inicio de fractura en eje de sistema de izaje

### 3.7.3. Análisis Químico

Los resultados del análisis químico realizado al componente se muestran en la tabla 3.13 el cual corresponde a un acero de medio carbono de baja aleación. Cuya composición química se asemeja con las especificaciones de un acero AISI/SAE 4340, pero con un ligero déficit de carbono y un exceso de cromo. El material de fabricación no fue indicado por el cliente.

Tabla 3.13 - Análisis químico al eje de polea de sistema de izaje de mina de socavón

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Muestra del eje fallado	0,34	0,26	0,69	0,009	0,026	1,52	1,60	0,20	0,16
SAE 4340	0,35 - 0,45	0,15 - 0,35	0,50 - 0,70	Máx. 0,035	Máx. 0,035	1,40 - 1,70	0,90 - 1,40	0,20 - 0,30	---

### 3.7.4. Ensayo de Dureza

Los resultados del barrido de dureza se muestran en la tabla 3.14. El promedio de la dureza del material es de 274 HV el cual es equivalente a una dureza de 26 HRC. Este valor de dureza está por debajo del rango indicado de dureza para un acero AISI/SAE 4340 en estado bonificado de 28 a 35 HRC.

Tabla 3.14 - Resultados del ensayo de dureza eje de la faja transportadora de la planta de chancado

Indentación	Dureza Vickers (HV10)	Dureza Vickers promedio	Dureza Rockwell promedio
1	282	274	26
2	273		
3	283		
4	269		
5	271		
6	271		
7	274		

8	278		
9	275		
10	275		
11	265		
12	282		
13	268		
14	276		
15	271		

### 3.7.5. Metalografía

En la Fig. 3.62 se puede apreciar inclusiones compatibles con óxidos de tamaño considerable distribuidos aleatoriamente en toda la muestra analizada.

En la Fig. 3.63 se puede apreciar inclusiones alargadas de sulfuro, éstas están alineadas y están presentes en toda la muestra analizada.



Fig. 3.62 - Micrografía de zona afectada sin ataca a 50x



Fig. 3.63 - Micrografía de zona afectada sin ataque a 100x

En la fig. 3.64 se puede apreciar la microestructura de la muestra, esta está compuesta por martensita revenida en su totalidad. En la misma figura también se puede apreciar las inclusiones alargadas de sulfuro.

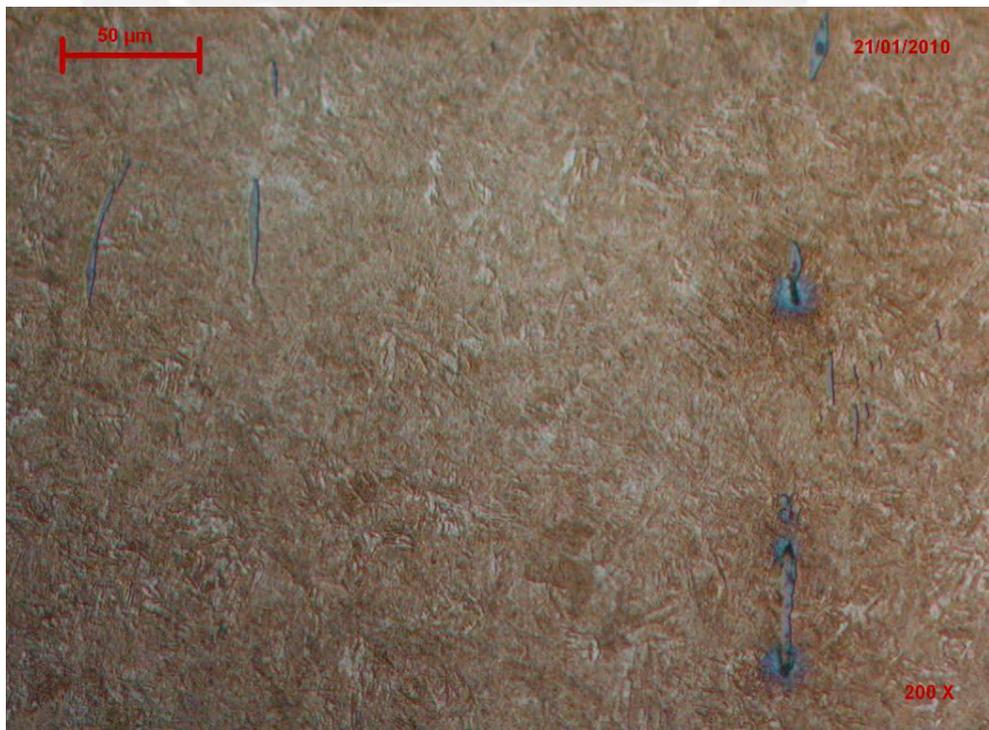


Fig. 3.64 - Micrografía de zona afectada con ataque a 200x

### 3.7.6. Diagnóstico

El análisis fractográfico determina que el mecanismo de falla es compatible con una falla por fatiga por flexión rotativa de bajas cargas y bajos concentradores de tensiones como se puede apreciar en la Fig. 3.65.

Las muestras analizadas poseen una elevada cantidad de inclusiones, estas ocasionaron la nucleación de la fisura y la posterior propagación de la misma hasta la falla final.

La microestructura indica que hubo un adecuado tratamiento térmico.

Debido a que el inicio de la falla está localizado fuera del canal chavetero y no se pudo apreciar un mecanizado deficiente, se puede afirmar que tanto el diseño como la fabricación del componente no participo de la falla del componente analizado.

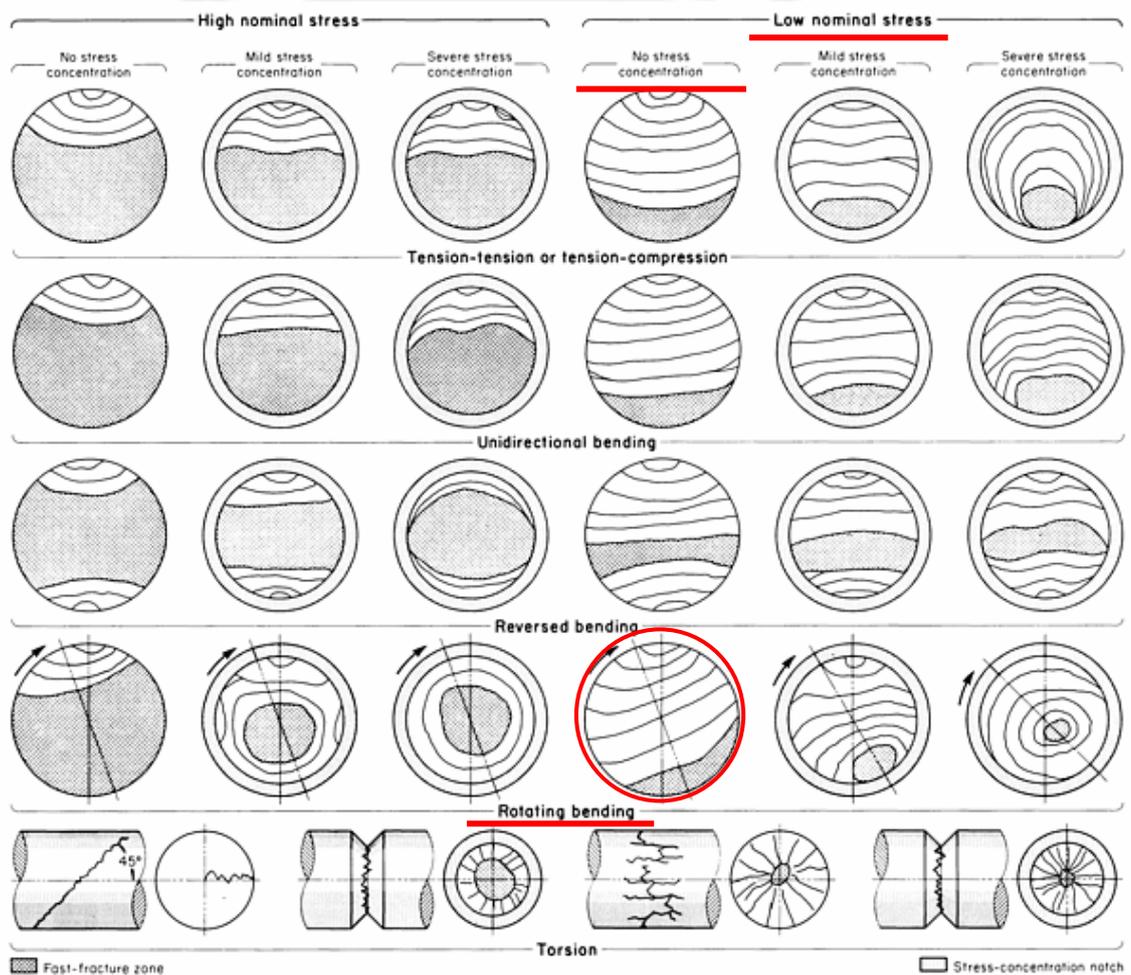


Fig. 3.65 - Mecanismo de falla por fatiga de eje de sistema de izaje

### 3.8. Caso 8: Eje principal de Trituradora

#### 3.8.1. Descripción del componente y de la falla

En el mes de enero del 2008 llega al laboratorio una parte de un eje fracturado, el cual pertenece al eje principal de una trituradora de piedra, dicho componente se puede apreciar en la Fig. 3.66



Fig. 3.66 - Eje Principal de trituradora

El componente proporcionado tiene una longitud de 660mm y un diámetro de 245mm.

El cliente no proporciona información acerca de la falla.

El cliente no proporciona información alguna del material utilizado en la fabricación del eje.

### 3.8.2. Inspección Visual

En la Fig. 3.67 se puede apreciar la superficie de fractura del componente analizado, en ella se puede apreciar que la zona final de fractura abarca aproximadamente un 30% de la superficie total. Además, en la misma figura, se puede apreciar la morfología de las marcas de playa de la superficie.



Fig. 3.67 - Superficie de fractura de eje principal de trituradora

En la Fig. 3.68 se puede apreciar tres diferentes planos de propagación de fisura hasta que al final se encuentran en un solo plano hasta la falla final. Los labios formados por la intersección de estos diferentes planos, actúan como concentrador de tensiones y aceleran la falla final.

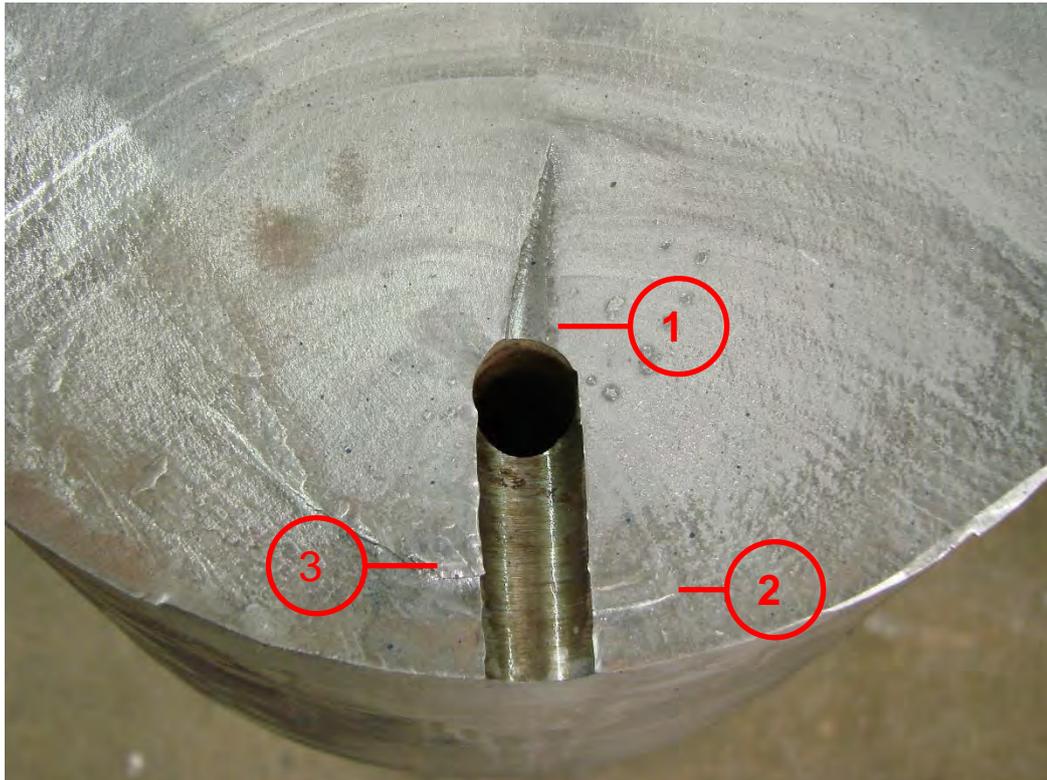


Fig. 3.68 - Zonas de inicio de fractura. Pliegues formados por los diferentes frentes de ataque

### 3.8.3. Análisis Químico

Los resultados del análisis químico realizado al componente se muestran en la tabla 3.15 el cual corresponde a un acero de medio carbono sin elementos aleantes. Su composición química se aproxima a un AISI SAE 1045, pero con un déficit de silicio.

Tabla 3.15 - Análisis químico al eje principal de trituradora

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
<b>Muestra del eje fallado</b>	0,45	0,21	0,75	0,018	0,045	0,01	0,02	0,00	0,01
<b>SAE 1045</b>	0,42 – 0,50	0,40	0,50 – 0,80	Máx. 0,045	Máx. 0,045	---	---	--	--

### 3.8.4. Ensayo de Dureza

Los resultados del barrido de dureza se muestran en la tabla 3.16. El promedio de la dureza del material es de 84.6HRBW.

Tabla 3.16 - Resultados del ensayo de dureza del eje principal de trituradora

Indentación	Dureza Rockwell (HRBW)	Dureza Rockwell promedio
1	85,0	<b>84,6</b>
2	85,1	
3	83,6	

### 3.8.5. Metalografía

Los registros fotográficos de metalografía de este reporte no estaban disponibles, sin embargo, las conclusiones sí. Éstas son las siguientes:

- Se encontró presencia de inclusiones alargadas compatibles con sulfuro de hierro y manganeso en las tres zonas analizadas, cada muestra pertenecía a un frente de propagación diferente.
- La microestructura del componente, de las muestras analizadas están constituidas aproximadamente por 50% de perlita y 50% de ferrita equiaxial.

### 3.8.6. Diagnóstico

El análisis fractográfico determina que el mecanismo es compatible con una falla por fatiga a bajas cargas, flexión unidireccional y elevados concentradores de tensiones como se puede apreciar en la Fig. 3.69.

El material usado para la fabricación del eje es un acero de baja templabilidad para ejes bonificados y por tanto no adecuado para la dimensión del eje analizado.

La dureza promedio del eje es compatible con la dureza del material sin tratamiento térmico.

Las inclusiones encontradas en el material reducen significativamente la resistencia a la fatiga

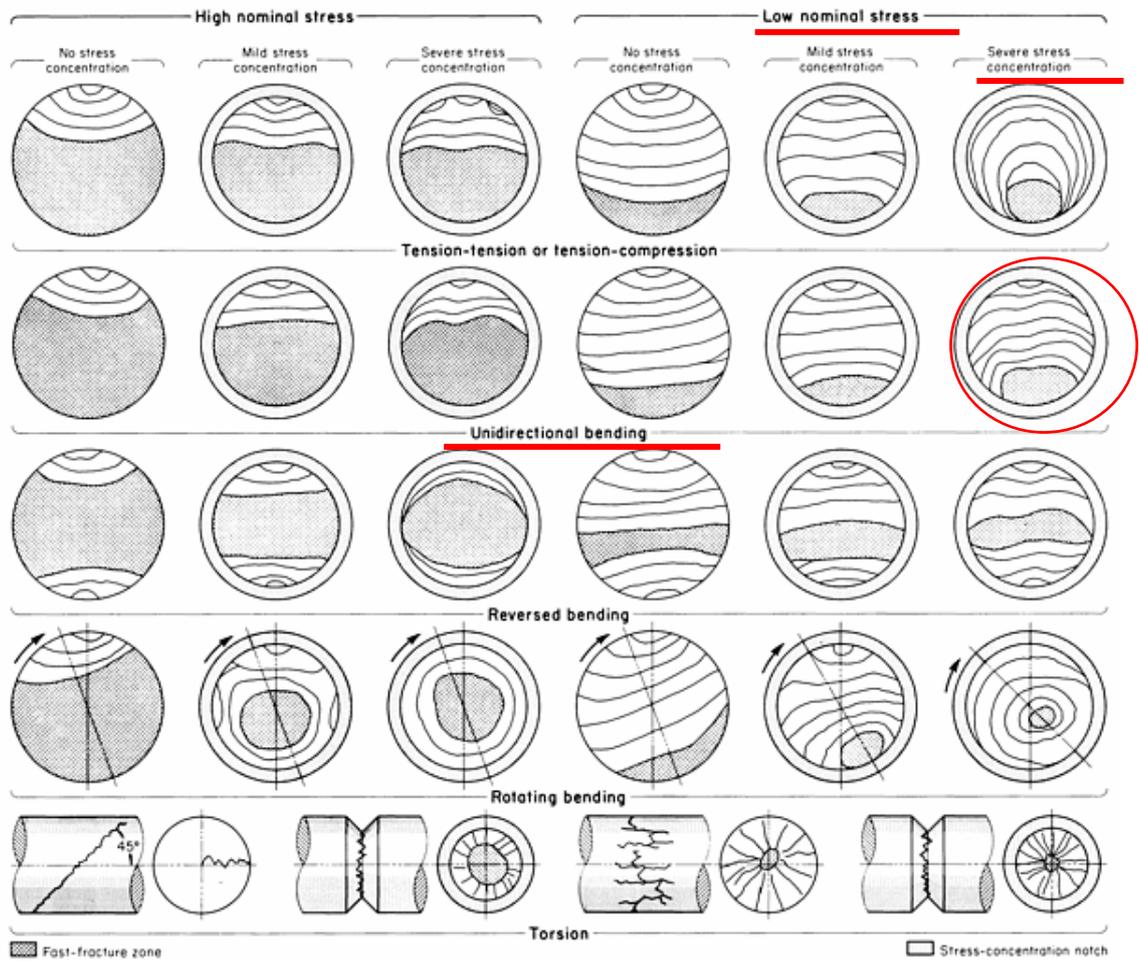


Fig. 3.69 - Mecanismo de falla por fatiga del eje principal de trituradora

### **3.9. Caso 9: Eje Inoxidable fallado**

#### **3.9.1. Descripción del componente y de la falla**

En el mes de junio del 2007 llega al laboratorio de materiales de la PUCP un eje fallado cuyo diámetro es de 25,2mm y su longitud es de 750mm como se puede apreciar en la Fig. 3.70.

El cliente no especifica a qué equipo pertenece dicho eje, tampoco indica cómo ocurrió la falla, ni brinda detalles sobre la fabricación del material.



Fig. 3.70 - Eje inoxidable fallado

#### **3.9.2. Inspección Visual**

En la Fig. 3.71 se puede apreciar la superficie de fractura del eje analizado. En ella se puede observar el inicio de fractura, así como también surcos en dirección del movimiento del componente.

En la Fig. 3.72 se puede apreciar que la zona del canal chavetero ha sufrido desgaste por abrasión de deslizamiento de superficies. Se puede apreciar también los daños causados al canal chavetero.



Fig. 3.71 - Superficie de ataque a eje inoxidable



Fig. 3.72 - Canal chavetero de eje inoxidable

### 3.9.3. Análisis Químico

La composición del acero es analizada por espectrometría de energía dispersiva (EDS), no se tiene registro de los resultados obtenidos en dicho ensayo, sin embargo, se sabe que es una súper aleación base níquel con presencia de cromo y molibdeno.

### 3.9.4. Ensayo de Dureza

Los resultados del ensayo de dureza se pueden apreciar en la tabla 3.17. El promedio de la dureza del material es de 42.2HRC.

Tabla 3.17 - Resultados del ensayo de dureza del eje inoxidable

Indentación	Dureza Rockwell (HRC)	Dureza Rockwell promedio
1	45,0	<b>42.2</b>
2	43,1	
3	42,1	
4	40,5	
5	40,3	

### 3.9.5. Metalografía

Los registros fotográficos de metalografía de este reporte no estaban disponibles, sin embargo, las conclusiones sí. Éstas son las siguientes:

- “La metalografía revela que se trata de una solución sólida de granos equiaxiales con precipitados en el límite de grano y algunos en la matriz”. [35]

### 3.9.6. Microscopía electrónica de barrido

Los registros fotográficos de la microscopía electrónica de barrido de este reporte no estaban disponibles, sin embargo, las conclusiones sí. Éstas son las siguientes:

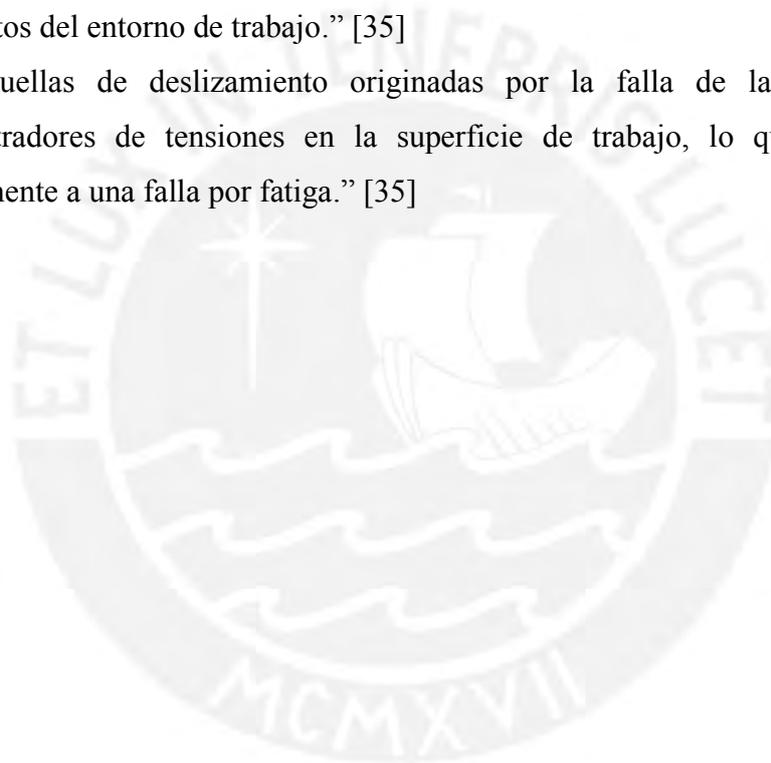
- “Se analizó diferentes zonas de la superficie inicial de fractura encontrándose la presencia significativa de silicio, aluminio, oxígeno y trazas de sodio.” [35]

### **3.9.7. Diagnóstico**

La microestructura del material es compatible con un sobre-envejecimiento del material o a una exposición a temperaturas elevadas.

“La presencia significativa de silicio, aluminio y oxígeno en la superficie inicial de rotura (compatible con óxido de silicio con rastros de aluminio) sugieren una falla por fatiga mecánica el que conforme fue avanzando fueron ingresando estos elementos del entorno de trabajo.” [35]

“Las huellas de deslizamiento originadas por la falla de la chaveta generó concentradores de tensiones en la superficie de trabajo, lo que predispone al componente a una falla por fatiga.” [35]



## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En la tabla 4.1 se puede apreciar un resumen de las causas de falla de todos los casos analizados en el capítulo anterior. Se ha dividido las posibles causas de falla en 3 grandes grupos:

- Origen de falla en el material
- Origen de falla en el diseño
- Origen de falla en la fabricación del eje

Así mismo, dentro del origen de falla en el material se puede dividir en lo siguiente:

- El material utilizado en la fabricación no cumple con las especificaciones técnicas del material estándar seleccionado por el diseñador.
- Presencia de corrosión en la superficie o sub-superficie del eje analizado.
- Presencia de inclusiones en el material utilizado en la fabricación del componente.

De la misma manera, dentro del origen de falla en el diseño se puede dividir en lo siguiente:

- No tomar en cuenta los redondeos para aliviar tensiones en los cambios de sección del eje o dentro del canal chavetero. Este problema puede ser también un error en la fabricación por lo que se tiene que corroborar con el plano de fabricación para descartar error en el diseño.
- Una mala selección de material por el diseñador.
- Un mal diseño del eje, esto se ve reflejado cuando el eje falla por sobrecarga ya que esto nos puede indicar que el eje fue subdimensionado al momento de ser diseñado.

Finalmente, cuando el origen de falla es por fabricación se encuentra los siguientes problemas:

- La ausencia de redondeos dentro del canal chavetero o cambio de sección del eje puede deberse al uso incorrecto de herramientas de corte o una mala operación al momento de la fabricación del componente.
- Que el acabado superficial no sea el adecuado, este problema también podría ser considerado un error de diseño si es que no fue mencionado en el plano, hay la necesidad de descartar esto comparando con el plano de fabricación.
- Un tratamiento térmico inadecuado, esto puede ser consecuencia de un material inadecuado, así como también un mal proceso durante la fabricación del mismo.

Lo primero que resalta al momento de observar la tabla, es que en todos los casos analizados no existe un origen único de falla, al contrario en todos ellos hay por lo menos 3 factores que influyeron en que el componente falle.

Algunos orígenes de falla son consecuencia de otros, como por ejemplo la presencia de inclusiones o corrosión en el material, puede ser consecuencia de utilizar un material que no cumple con las especificaciones técnicas de una norma, pero también existen orígenes de falla completamente independientes como la ausencia de redondeo en el cambio de sección.

Tabla 4.1 – Resumen de causas de falla encontrados en los casos Analizados

N°	Casos	Material				Diseño			Fabricación		Tratamiento Térmico
		Propiedades Mecánicas	Corrosión	Inclusiones	concentrador de tensiones	Mala selección de Material	Sobrecarga	Existen redondeos, alivios de tensiones	Acabado superficial		
1	Eje 1 de reductor FALK	Menor cantidad de Ni que el AISI/SAE 4340	No	Del tipo óxido alineadas	En el canal chavetero	No	No	muy reducido	Ok	Ok	
2	Eje 2 de reductor FALK	Menor cantidad de Ni que el AISI/SAE 4340	No	Del tipo óxido agrupadas	En el canal chavetero	No	No	muy reducido	Ok	Ok	
3	Eje reductor de Bomba	Menor cantidad de Mo que el 35CrMo4	Presencia de corrosión por picadura	Del tipo óxido de tamaños considerables	En el canal de cambio de sección	No	No	redondeo muy reducido	Pésimo acabado superficial	Temple incompleto	
4	Eje fracturado lado de altas reductor SWE	Supera los límites permitidos de Azufre de un SAE 4340	No	Alineadas del tipo óxido, y alargadas del tipo sulfuro	En el canal chavetero	No	No	muy reducido	pobre acabado superficial	Ok	
5	Espiga de rotor de turbocompresor	Menor cantidad de C, Si, V y mayor cantidad de Cr que un SAE 6150	No	Del tipo óxido agrupadas y alineadas	En la Zona Roscada	No	es probable que haya existido sobrecarga	Ok	Ok	Temple incompleto	
6	Eje reductor de Faja Transportadora	Exceso de C y menor cantidad de Ni que un AISI/SAE 4340	Presencia de corrosión por picadura	Del tipo óxido agrupadas y alineadas	En el canal chavetero	No	No	muy reducido	Ok	Ok	
7	Eje de polea de sistema de izaje de mina	Un ligero exceso de Cr respecto a un SAE 4340	No	Alineadas del tipo óxido, y alargadas del tipo sulfuro	No	No	No	Ok	Ok	Ok	
8	Eje principal de trituradora	Déficit de Silicio respecto a un SAE 1045	No	Alargadas del tipo sulfuro	En el agujero de aceite hidráulico	Material es inadecuado para este tipo de operaciones	No	Ok	Ok	Normalizado	
9	Eje inoxidable fallado	Super aleación base Níquel con presencia de Cr y Mo	No	Falta Información	Falta Información	Falta Información	Falta Información	Falta Información	Pésimo acabado superficial	Falta Información	

En la tabla se puede observar que el origen de falla más común es que la composición química del material no cumpla con las especificaciones técnicas de la norma del producto, es decir, en el 89% de los casos analizados el material no cumple con las especificaciones entregadas por el cliente. Si la composición química del material está fuera del rango esperado, sus propiedades mecánicas también podrían verse afectadas, incluso su comportamiento frente a diferentes condiciones de servicio, como por ejemplo su resistencia a la fatiga o resistencia a la corrosión.

Así mismo se puede observar que en todos los casos analizados hubo presencia de inclusiones. Esto como se menciona en los diagnósticos de cada caso, disminuye la resistencia del material a la fatiga ya que pueden comportarse como pequeños concentradores de esfuerzos y así debilitar la resistencia del mismo.

La ausencia de redondeos en los cambios de sección es otro origen de falla común, presente en el 57% de los casos analizados.

Orígenes de falla como pobre acabado superficial o presencia de corrosión en el material no son muy frecuentes, solo el 22% de los casos analizados, sin embargo, este tipo de problemas también actúan como concentradores de tensiones en el material debilitándolo de esta manera su resistencia a la fatiga.

Los orígenes de falla menos frecuentes son los orígenes de falla en el diseño del componente, solo 11% de los casos analizados. Esto es un buen indicador de que los diseñadores están realizando bien su trabajo, sin embargo, la supervisión en el resto del proceso para la obtención del componente está fallando.

En los casos trabajados, caso 1 y 2, los componentes estuvieron en servicio solo 92 días. Por lo tanto, no solo hubo un problema de concentradores de tensiones, sino también, vibraciones muy elevadas que deberían provenir del sistema. Se recomendó al cliente que realice un estudio de vibraciones para evitar futuras complicaciones con los componentes.

Finalmente, se puede aseverar que la mayoría de problemas que generan una falla por fatiga es la presencia de concentradores de tensiones, ya sea por la presencia de inclusiones (debido a la composición química del material), marcas de mecanizado, presencia de corrosión o ausencia de redondeos en los cambios de sección.

## **OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES**

Como una buena práctica se recomienda hacer un mejor seguimiento a la fabricación de los componentes después de que estos hayan sido diseñados, en especial si los repuestos son fabricados por terceros.

Así mismo, si los componentes son fabricados con proveedores locales, se recomienda que los clientes soliciten a los fabricantes de los componentes probetas del material seleccionado para la fabricación para que puedan ser sometidos a pruebas como análisis químico para asegurar que el material utilizado es el correcto y metalografía para garantizar que la cantidad de inclusiones está dentro del rango permitido por las normas.

También como buena práctica se puede recomendar a los clientes que al momento de recibir un componente de este tipo se realice una verificación de los redondeos realizados a los cambios de sección del eje y al canal chavetero. Además, verificar el acabado superficial del componente fabricado en búsqueda de huellas de mecanizado, esto para asegurar que la resistencia a la fatiga del componente no se vea afectada por una mala fabricación.

Finalmente, se recomienda realizar inspecciones periódicas a los ejes. Estas inspecciones pueden consistir en la realización de ensayos no destructivos como partículas magnéticas o líquidos penetrantes, también se puede realizar las inspecciones mediante la realización de análisis de aceites en búsqueda de cantidad

de materiales ferrosos dentro del lubricante, para que de esta manera se pueda cuantificar y determinar si la cantidad de material ferroso se encuentra dentro de los márgenes esperados o no. En caso, esta cantidad supere los límites esperados es preciso determinar cuál es el causante de este exceso, mayor desgaste del componente o nucleación de fisuras.

Se pudo observar que para realizar una buena inspección de metalografía sin ataque químico es necesario preparar bien la superficie, ya que las manchas de agua o un mal pulido pueden interpretarse como inclusiones y por lo tanto brindarnos una mala lectura de resultados.

Todos los ensayos realizados se alinearon a normas internacionales.

Realizar el análisis de falla a los dos primeros componentes han servido para poner en práctica todos los conocimientos adquiridos sobre materiales, así como también una visión rápida de problemas cotidianos que ocurren en la industria. Este trabajo realizado ha hecho que se gane experiencia tanto en un ambiente académico, al tener que revisar manuales y artículos, como en un ambiente laboral, al realizar el análisis de falla a dos casos reales que solicitaron los servicios del laboratorio de Materiales de la PUCP.

## CONCLUSIONES

1. Los ejes y ejes de transmisión son componentes susceptibles a fallar por diferentes mecanismos de falla dependiendo las condiciones de servicio a los que son sometidos, sin embargo, la principal causa de falla es el mecanismo de fractura por fatiga, esto se corrobora observando que los 9 casos presentados fallaron por este mecanismo.
2. Realizar un análisis de falla a un componente que falló en servicio es una importante herramienta para poder conocer los problemas que originaron que dicho componente falle y así poder erradicarlos.
3. El 89% de los casos analizados fallaron por fractura por flexión flexo-rotativa, el 11% restante falló por fatiga por contacto.
4. Es posible determinar el tipo de falla que sufrió el componente analizando la superficie de fractura y comparar esta con las plantillas fractográficas que se encuentran en el manual ASM Vol. 12 “Fractografía”. Sin embargo, conocer el mecanismo de falla no permite, per se, determinar cuáles fueron los causantes que originaron que dicho componente falle, objetivo principal de un análisis de falla. Es por este motivo que se ve necesario realizar todos los ensayos mencionados al componente analizado.

5. Para este tipo de falla es muy importante la caracterización del material, ya que como se pudo observar en el capítulo 4, el 89% de los casos analizados presentó problemas en la composición química del material utilizado para la fabricación del componente.
6. La presencia de concentradores de tensiones, entiéndase por discontinuidades en la superficie, cambios de sección sin redondeos, inclusiones, corrosión por picaduras, etc, es una de las principales razones que originan las fisuras que causarán la falla por fatiga de los ejes.
7. Se puede observar que la mayoría de los componentes fallaron en su edad temprana. Este tipo de comportamiento es típico en componentes que fallan por fatiga, ya que la nucleación de las fisuras, según se observa, radican principalmente en problemas que pueden ser fácilmente controlados, como por ejemplo, garantizar que el material utilizado cumpla con las normas de fabricación utilizadas, que el acabado superficial y redondeos sean fabricación según los diseños, garantizar que se realizó un correcto tratamiento térmico a los componentes, etc.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS  
1990 ASM Metals Handbook – Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys. 10<sup>th</sup> Edition. Ohio: ASM International
- [2] 2000 ASM Metals Handbook – Mechanical Testing and Evaluation. Vol. 8. 10<sup>th</sup> Edition. Ohio: ASM International
- [3] 2004 ASM Metals Handbook – Metallography and Microstructures 2004. Vol. 9. 10<sup>th</sup> Edition. Ohio: ASM International
- [4] 2002 ASM Metals Handbook – Failure Analysis and Prevention. Vol. 11. 10<sup>th</sup> Edition. Ohio: ASM International
- [5] 1992 ASM Metals Handbook – Fractography. Vol. 12. 2<sup>nd</sup> Edition. Ohio: ASM International
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS  
2015 ASTM E709-15. Standard Guide for Magnetic Particle Testing.
- [7] 2013 ASTM E1417M-13. Standard Practice for Liquid Penetrant Testing
- [8] 2015 ASTM E415-15. Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry
- [9] 2011 ASTM E3-11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
- [10] 2015 ASTM E407-07. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys

- [11] 2015 ASTM E8-15. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- [12] 2016 ASTM E18-16. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials
- [13] 2016 ASTM E384-16. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials
- [14] 2015 ASTM E10-15. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials
- [15] 2011 ASTM A370-11. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
- [16] CANALES, Laurice de Campos Franceschini  
2008 Failure analysis of heat treated steel components, Materials Park, Ohio : ASM International
- [17] LEAN, Paul  
2014 Análisis de Falla en Componentes Mecánicos. [Diapositivas]. Consulta: 25 de abril de 2016
- [18] 2014 Sesión 2 – Mecanismos de daño de los materiales. [Diapositivas]. Consulta: 25 de abril de 2016
- [19] 2014 Ensayo de materiales Aplicados al análisis de falla. [Diapositivas]. Consulta 25 de abril de 2016
- [20] 2014 Tema 3. Mecanismos de daño asistidos por esfuerzos mecánicos [Diapositivas]. Consulta: 25 de abril de 2016
- [21] 2014 Sesión 9: Procedimiento para el análisis de fallas en elementos mecánicos. [Diapositivas]. Consulta: 25 de abril de 2016
- [22] MERINO, Daniel  
2014 Ensayos no Destructivos: Inspección Visual. [Diapositivas]. Consulta: 15 de Marzo de 2016.
- [23] 2014 Partículas Magnéticas. [Diapositivas]. Consulta: 15 de Marzo de 2016
- [24] MOOLWAN, Charmont  
2013 “Failure Analysis of a Two High Gearbox Shaft”. En Social and Behavioral Sciences 88. 4th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference 2012. Bangkok: Kasem Bundit University. 154-163.
- [25] MOMCILOVIC, Dejan  
2012 “Failure analysis of hydraulic turbine shaft”. En Engineering Failure Analysis 20. Belgrado. 54 – 66
- [26] LABORATORIO DE MATERIALES DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
2007 MAT-JUN-0322/2007 [Informe]. Lima
- [27] 2007 MAT-NOV-0788/2007 [Informe]. Lima
- [28] 2008 MAT-ENE-0004/2008 [Informe]. Lima

- [29] 2009 MAT-NOV-0935-2009 [Informe]. Lima
- [30] 2010 MAT-JUL-0603-2010 [Informe]. Lima
- [31] 2010 MAT-MAR-0209-2010 [Informe]. Lima
- [32] 2011 MAT-JUN-0434/2011 [Informe]. Lima
- [33] 2011 MAT-MAY-0364-2011 [Informe]. Lima
- [34] 2015 MAT-NOV-1147-1/2015 [Informe]. Lima
- [35] 2015 MAT-NOV-1147-2/2015 [Informe]. Lima
- [36] URQUIZA, G.  
2014 “Failure analysis of a hydraulic Kaplan turbine shaft”. En Engineering Failure Analysis 41. México D.F. 108-117.
- [37] VAN ZYL, Gys  
2013 “Failure analysis of conveyor pulley shaft”. En Case Studies in Engineering Failure Analysis 1. Arabia Saudí. 144-155.
- [38] VEGA, Rafael  
2013 Analisis de falla en pernos de bombas ksb de 800 hp. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico. Lima: PUCP, Facultad de Ciencias e Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica.
- [39] ZAPATA, Emilio  
2013 Análisis de falla de cojinetes de biela de camiones de 2300 hp para minería. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico. Lima: PUCP, Facultad de Ciencias e Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica.
- [40] RUMICHE, Francisco  
2017 Fracturas y diferentes mecanismos de fractura. [Diapositivas]. Consulta: 10 de julio del 2017.