

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### ANÁLISIS DE FALLA EN PERNOS DE BOMBAS KSB DE 800 HP

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

**RAFAEL ROLANDO VEGA GUEROVICH**

**ASESOR:**

**MSc. ROBERTO LAZARTE GAMERO**

**Lima, noviembre de 2013**

## RESUMEN

Minera Administradora Cerro SAC cuenta en su unidad con un sistema de bombeo de aguas de interior de mina el cual es indispensable para extraer el agua drenada en sus labores. La naturaleza del sistema hace que se sobre exijan los equipos ocasionando paradas de operación reiteradas que conllevan al riesgo de inundación de la mina, pudiendo esta terminar en cuantiosas pérdidas materiales, pérdidas humanas, y la paralización de operaciones en la mina, además de significar cuantiosos gastos en mantenimiento correctivo.

El presente trabajo tiene como objetivo detectar la causa raíz en uno de los componentes que ocasionan las paradas de las bombas que operan, con el fin de reducir el riesgo que esto implica. El componente se elige entre todos por su mayor inferencia en la repetición de las paradas del equipo, siendo seleccionado el perno que va roscado en el extremo del eje de la bomba y que sujeta al impulsor de la misma.

La metodología que se aplica consiste en la recolección de data histórica acerca de las ocurrencias de mantenimiento correctivo, a partir de lo cual se selecciona el componente y se recuperan 2 muestras falladas (nombradas como perno 2 y perno 3) a las cuales se les practica inspección visual, ensayos de dureza, metalografía y análisis químico, además del levantamiento de la historia previa a la falla de cada elemento. El resultado se compara con las características del perno descrito por fábrica, hallándose que el material no corresponde al descrito por fábrica.

Finalmente se realiza la evaluación de resultados, con lo cual se concluye que ambos pernos fallan por fatiga y que la causa raíz es el material empleado en los pernos que difiere del especificado por fábrica.



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

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

TÍTULO : **ANÁLISIS DE FALLA EN PERNOS DE BOMBAS KSB DE 800 HP**

ÁREA : Materiales # 84

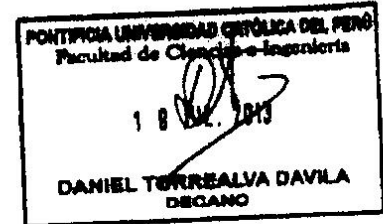
PROPUESTO POR : MSc. Roberto Lazarte Gamero

ASESOR : MSc. Roberto Lazarte Gamero

TESISTA : Rafael Rolando Vega Guerovich

CÓDIGO : 20072274

FECHA : 12 de julio de 2013



**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

La falla repetitiva del perno que ajusta el impulsor de un modelo específico de bombas KSB, las mismas que trabajan en el drenaje del agua interior de la mina, hace necesaria la investigación de la causa raíz del problema que ocasiona la falla del perno de ajuste. Los elementos analizados serán pernos individuales que sujetan los impulsores de bombas de 800 HP de la minera Administradora Cerro SAC (VOLCAN – Unidad Paragsha).

El objetivo principal de la tesis es analizar la falla de los pernos de sujeción de impulsores de bombas centrífugas KSB de 800 HP que trabajan bombeando agua, con la finalidad de detectar la causa raíz y plantear las recomendaciones adecuadas para evitar su repetición.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ANÁLISIS DE FALLA EN PERNOS DE BOMBAS KSB DE 800 HP

Introducción

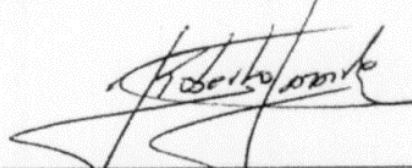
1. Conceptos Generales
2. Búsqueda de Datos
3. Pruebas de Laboratorio
- 4.- Evaluación de resultados

Conclusiones

Observaciones y Recomendaciones

Bibliografía

*Máximo: 100 páginas*



MSc. Roberto Lazarte Gamero  
Asesor



## DEDICATORIA



Dedicado a: Blas Guerovich H., mi abuelito (Papa), que confió en mi desde pequeño, ahora me acompaña desde arriba.

Ricardina Gustavson S., mi abuelita (Mama Quica), que me inculcó valores y cuidó siempre, ahora es mi turno.

Hayme y Hermes, mis padres, que dan todo por mí y mi hermano.

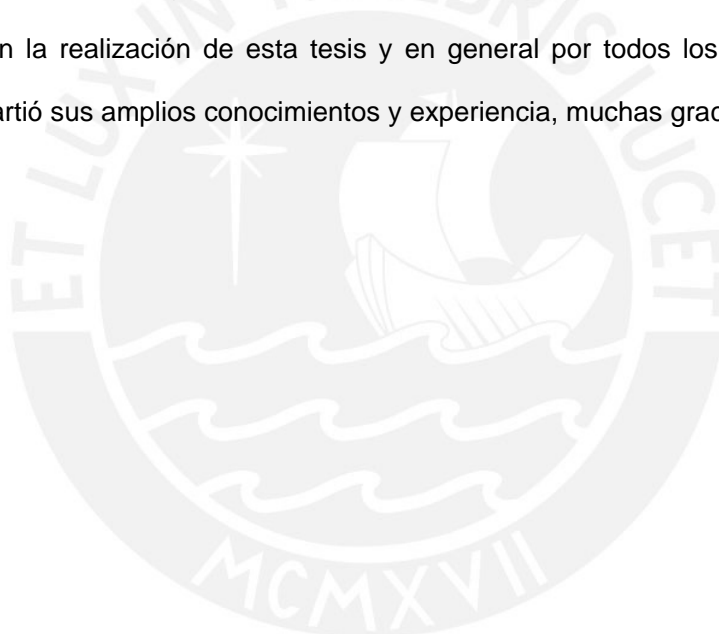
Percy, mi hermano ("Nito"), a quien vi desde recién nacido, siempre serás mi hermanito.

¡Va por todos ustedes!

## AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a la universidad que me acogió por poco mas de 5 años en un clima de compañerismo y calidad educativa, en la cual compartí clases, bromas e hice amigos que tendré siempre cerca. Agradezco a todas las personas que estuvieron cerca que con sus palabras de apoyo y coraje me dieron fuerzas para no enflaquecer y seguir siempre adelante.

Agradezco tambien a todos los profesores por la dedicación prestada, por las dudas resueltas, y por el apoyo brindado en cada etapa de la carrera que elegí y me enorgullece. En especial agradezco a mi asesor el MSc. Roberto Lazarte por la guía tan valiosa en la realización de esta tesis y en general por todos los cursos en los cuales compartió sus amplios conocimientos y experiencia, muchas gracias.



# CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 - CONCEPTOS GENERALES.....</b>	<b>3</b>
1. ¿POR QUÉ SE HACEN ANÁLISIS DE FALLAS? .....	3
2. GESTIÓN DE CICLO DE VIDA.....	3
3. FASES DEL ANÁLISIS.....	5
3.1. <i>Recolección de Data Previa y Selección de Muestras</i> .....	5
3.2. <i>Examen Preliminar de los Elementos Fallados</i> .....	6
3.3. <i>Ensayos no Destructivos</i> .....	7
3.4. <i>Pruebas Mecánicas</i> .....	8
4. FRACTURAS .....	9
4.1. <i>Clasificación de fracturas</i> .....	9
5. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS.....	12
5.1. <i>Sensibilización - Efecto de Temperaturas Elevadas</i> .....	13
6. VIBRACIONES .....	15
<b>CAPÍTULO 2 - BUSQUEDA DE DATOS.....</b>	<b>17</b>
1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA .....	17
1.1. <i>Bombas por cámara</i> .....	17
1.2. <i>Bombeo por etapas</i> .....	17
1.3. <i>Motores y Controles</i> .....	18
2. ESTACIONES DE BOMBEO.....	18
2.1. <i>Estaciones de Bombeo – Agua Ácida</i> .....	18
2.2. <i>Estaciones de Bombeo – Agua Neutra</i> .....	19
3. FALLAS COMUNES.....	21
4. PRINCIPALES DEFICIENCIAS.....	25
5. IDENTIFICACIÓN DEL ELEMENTO .....	26
5.1. <i>Consideraciones Constructivas</i> .....	26
5.2. <i>Frecuencia de Fallas en Bombas</i> .....	27
<b>CAPÍTULO 3 – PRUEBAS DE LABORATORIO .....</b>	<b>30</b>
1. IDENTIFICACIÓN DEL COMPONENTE FALLADO .....	30
2. SITUACIÓN EN QUE SE PRODUJO LA FALLA .....	32
3. HISTORIA PREVIA A LA FALLA .....	33
4. MATERIAL.....	34
5. INSPECCIÓN VISUAL.....	36
5.1. <i>Perno 2</i> .....	36
5.2. <i>Perno 3</i> .....	40
6. PRUEBAS DE LABORATORIO .....	43
6.1. <i>Composición Química</i> .....	43
6.2. <i>Ensayo de Dureza</i> .....	44
6.3. <i>Líquidos Penetrantes</i> .....	45
6.4. <i>Metalografías</i> .....	45
<b>CAPÍTULO 4 - EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
6.5. <i>Perno 2</i> .....	53
6.6. <i>Perno 3</i> .....	55
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>

1.	TIPO DE FALLA.....	56
2.	CAUSA RAÍZ.....	56
<b>OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>57</b>
1.	OBSERVACIONES.....	57
2.	RECOMENDACIONES.....	57
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>59</b>

## INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1.1 – Distribución.....	4
Gráfico N° 1.2 – Fractura por Fatiga.....	12
Gráfico N° 1.3 - Esquemas de Superficies de Fractura.....	12
Gráfico N° 1.4 - Control del Carbono en la Precipitación de Carburos – Acero Tipo 304 .....	15
Gráfico N° 1.5 - Severidad de la vibración según la norma ISO 10816 .....	16
Gráfico N° 2.1 - Circuito Esquemático Agua Ácida .....	19
Gráfico N° 2.2 - Circuito Esquemático Agua Neutra.....	20
Gráfico N° 2.3 - Causas de Mantenimiento Reactivo en Bombas Ksb de Interior de Mina .....	23
Gráfico N° 2.4 - Causa de Fallas en Ejes de Bombas Ksb.....	24
Gráfico N° 2.5 - Zona de Falla con Mayor Frecuencia .....	27
Gráfico N° 2.6 - Ensamble de las Bombas Ksb.....	29
Gráfico N° 3.1 – Diagrama de Flujo .....	31
Gráfico N° 3.2 – Zona de Falla .....	31
Gráfico N° 3.3 – Esquema Perno 2 Fallado.....	33
Gráfico N° 3.4 – Esquema Perno 3 Fallado.....	33
Gráfico N° 3.5 – Segmento de Perno Roscado en Eje .....	34
Gráfico N° 3.6 - Pre y Post Limpieza Perno 2 .....	36
Gráfico N° 3.7 - Grietas y Deformación en los Valles del Perno 2.....	37
Gráfico N° 3.8 - Grietas y Deformación en el Valle del Perno 2.....	37
Gráfico N° 3.9 - Desprendimiento de Material en una Cara del Hilo (Perno 2) .....	38
Gráfico N° 3.10 - Fractografía Perno 2 .....	38
Gráfico N° 3.11 - Inicio de la Fractura (Perno 2) .....	39
Gráfico N° 3.12 - Fractografía (Perno 2).....	39
Gráfico N° 3.13 – Intercepción de Superficies de Fatiga.....	40
Gráfico N° 3.14 - Zona de Ruptura por Sobrecarga (PERNO 2).....	40
Gráfico N° 3.15 - Pre y Post Limpieza Perno 3 .....	41
Gráfico N° 3.16 - Fisuras y Desprendimiento de Material (Perno 3).....	41
Gráfico N° 3.17 - Fractografía (Perno 3).....	42
Gráfico N° 3.18 – Borde Inicio de Fractura (Perno 3).....	42
Gráfico N° 3.19 - Desprendimiento de Material (Perno 3) .....	43
Gráfico N° 3.20 – Cambio de Dirección de Fractura (Perno 3).....	43
Gráfico N° 3.21 - Fisuras Reveladas por Líquidos Penetrantes (Perno 3) .....	45
Gráfico N° 3.22 - Limites de Grano Gruesos, 500X (Perno 2).....	46
Gráfico N° 3.23 - Presencia de Carburos en los Limites de Grano, 1000X (Perno 2) .....	46
Gráfico N° 3.24 - Grieta en el Hilo (Perno 2) .....	47



Gráfico N° 3.25 – Fondo de Hilo (Perno 2).....	47
Gráfico N° 3.26 - Inicios de Corrosión en la Superficie de los Hilos (Perno 2) .....	48
Gráfico N° 3.27 - Inicio de Corrosión en las Superficies de los Hilos (Perno 2).....	48
Gráfico N° 3.28 - Corrosión en las Bandas Desprendidas del Material (Perno 2) .....	49
Gráfico N° 3.29 - Micrografía a 500x, Estructura Austenítica (Perno 3) .....	49
Gráfico N° 3.30 - Micrografía a 1000X (PERNO 3) .....	50
Gráfico N° 3.31 - Fisura con Inicio en la Pared del Hilo (Perno 3).....	50
Gráfico N° 3.32 – Indicio de Corrosión .....	51
Gráfico N° 3.33 - Indicios de Corrosión .....	51
Gráfico N° 3.34 – Inicios de Corrosión en Pared de Hilo .....	52
Gráfico N° 3.35 – Desprendimiento de Material a Partir de Corrosión .....	52



## INTRODUCCIÓN

Minera Volcan, unidad Paragsha, es un yacimiento minero localizado en la región central, al noreste de la Ciudad de Lima. Políticamente se encuentra entre los distritos de Chaupimarca, Yanacancha y Simón Bolívar, provincia Cerro de Pasco, departamento de Pasco, a una altitud de 4,380 metros sobre el nivel del mar.

El clima característico de la región puna, cuyas temperaturas varían entre 14° C a - 6° C, presenta heladas y prolongadas lluvias dependiendo de la época del año.

El modo de extracción de mineral es subterráneo, y entre las diversas divisiones de operación interna de la mina se encuentra el de drenaje interno de la misma, el cual consta de todo un sistema de bombeo dividido por estaciones. Este sistema comprende múltiples unidades de bombeo, pozas de sedimentación, alimentación, ductos, pozas de transferencia, etc.

El agua bombeada proviene de filtraciones de la mina, agua que es encausada y dirigida a sedimentadores donde se trata de precipitar al máximo los sólidos en suspensión y lama que resultan altamente perjudiciales para las bombas. Para el precipitado de sólidos se utilizan algunos químicos que ayudan en este proceso. Luego de pasar por los sedimentadores el agua se dirige a pozas de almacenamiento de distintas capacidades, desde son dirigidas por tuberías hacia las bombas ubicadas en las estaciones de bombeo, siendo estas de succión positiva.

El sistema de drenaje de la mina es muy amplio y comprende tanto bombas estacionarias como sumergibles. La operación de las bombas sumergibles (Flygt, Grindex, etc.) es parte del trabajo del área de Servicios y el mantenimiento de estas bombas se hace externamente.

En cuanto a las bombas estacionarias, tanto operación como mantenimiento son administradas por la sección de Mantenimiento Mecánico Mina, el bombeo es tanto de

agua neutra como de ácida. El gran caudal de agua filtrado hace que se sobre exija el sistema completo, ocasionando problemas y apuros en cuanto a los trabajos de mantenimiento preventivo y de servicios, en consecuencia, los resultados operativos reflejan bajos índices de confiabilidad de los equipos.

Entre las causas de parada que se presentan con mayor frecuencia se encuentran las fallas de los ejes, rodamientos, bocinas, sellos, pernos, etc. Estas paradas espontaneas conllevan al riesgo de inundación de la mina, pudiendo esta terminar en cuantiosas pérdidas materiales, pérdidas humanas, y la paralización de operaciones en la mina, además de significar cuantiosos gastos en mantenimiento correctivo.

Esta tesis analiza uno de los componentes que más problemas trae y conlleva a múltiples paradas repentinas de los equipos de bombeo, el análisis de rotura de Pernos de Sujeción de Impulsor en bombas KSB modelo RPH que operan en el sistema de drenaje de interior de mina.

## Capítulo 1 - CONCEPTOS GENERALES

Un análisis de falla determina la causa primaria de esta, a partir de la cual se pueden tomar acciones correctivas previniendo futuras fallas similares.

### 1. ¿POR QUÉ SE HACEN ANÁLISIS DE FALLAS?

Gran mayoría de fallas en elementos de máquinas son repetitivas y dependientes de mecanismos conocidos.

La identificación de estos mecanismos y la cuantificación de los parámetros que los gobiernan son ítems principales en un análisis de fallas.

Una vez conocidos los mecanismos de daño y cómo actúan, es posible:

- Eliminar las fallas futuras.
- Minimizar la causa de falla o conocer la velocidad de evolución de forma que se pueda programar mantenimiento preventivo.

No es poco común que las fallas sean provocadas por defectos de fabricación, operación y/o mantenimiento, por ello, la identificación de la etapa o causa responsable de estas fallas favorece en el mantenimiento futuro, y en los costos involucrados.

Aprender, acumular experiencia y averiguar responsabilidades son objetivos a alcanzar con el análisis de fallas, los cuales nos llevará a los siguientes beneficios:

- Aumentar la seguridad de las personas y a preservar el medio ambiente.
- Eliminar las pérdidas de producción.
- Aumentar a confiabilidad.

(Bernasconi 2007)

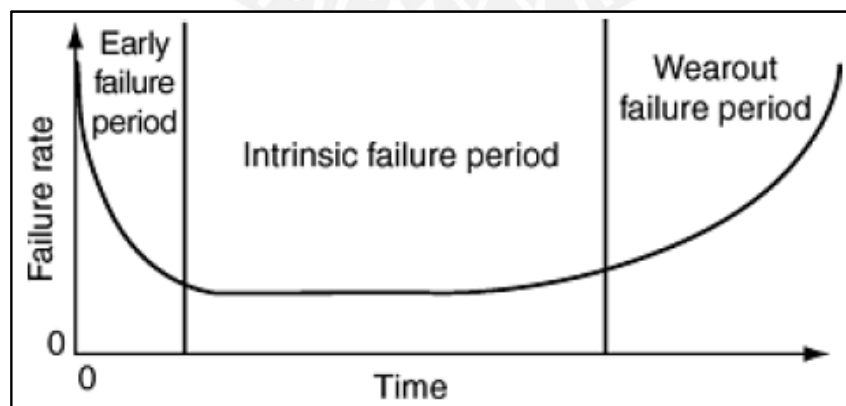
### 2. GESTIÓN DE CICLO DE VIDA

Este concepto se asocia a la idea de manejar el ciclo de vida de un componente,

sistema, estructura, etc., para lo cual hay que entender que las fallas no pueden ser totalmente evitadas, por lo que cada componente tiene un tiempo de vida.

Extender el tiempo de vida de un componente se relaciona con su costo, ya sea en diseño, materiales o mantenimiento, siendo los costos más elevados a medida que se extiende el periodo de vida del equipo. Para algunos equipos se prefiere un tiempo de vida corto a un bajo costo, en otros se prefiere un tiempo de vida largo teniendo que pasar por inspecciones de rutina y mantenimiento preventivo, lo que incrementa la confiabilidad del equipo. Sin embargo, el extender la vida de algunos componentes más allá de un determinado tiempo puede ser perjudicial, incrementando los tiempos de mantenimiento y costos involucrados, por este motivo, se recomienda un estudio de ciclo de vida de los componentes.

Las fallas tempranas en los componentes están comúnmente asociadas con problemas de fabricación y control de calidad. Las fallas van incrementándose con el tiempo llegando a un alto ratio, estas son atribuidas al tiempo de operación o antigüedad del componente. En el Gráfico N° 1.1 se muestra una distribución típica del tiempo de falla en componentes dividida en 3 segmentos, fallas prematuras, fallas comunes, y fallas de equipos antiguos.



(International 2002: 19)

**Gráfico N° 1.1 – Distribución**

### 3. FASES DEL ANÁLISIS

La secuencia de análisis depende de la naturaleza específica de la falla, los principales pasos que comprenden un análisis de falla son los siguientes:

- Recolección de data previa y selección de muestras.
- Examen preliminar de los elementos fallados.
- Ensayos mecánicos
- Selección, identificación, preservación y limpieza de las muestras
- Examen y análisis macroscópico (comprende superficies de fractura, fracturas secundarias y otras superficies relevantes)
- Examen y análisis microscópico
- Selección y preparación de las secciones a metalografiar
- Examen y análisis de las secciones metalográficas
- Determinación del mecanismo de falla
- Análisis químico
- Análisis del mecanismo de fractura
- Ensayos bajo simulación de condiciones de servicio.
- Análisis de la evidencia, formulación de conclusiones y desarrollo del reporte. (incluyendo recomendaciones) (International 2002).

A continuación se definen los principales pasos que se siguen en un análisis de falla:

#### 3.1. Recolección de Data Previa y Selección de Muestras

Esta etapa comprende todos los datos relevantes a la falla, proceso de manufactura del componente, tratamientos especiales, dimensiones, historia de servicio, etc.

##### 3.1.1. Historia de Servicio

Obtener la historia completa de servicio puede simplificar en gran medida el análisis de falla. La historia de servicio, especialmente debe tomar atención en las condiciones

ambientales de servicio, cargas normales y anormales, cargas cíclicas, variación en presión, temperatura y operación en ambientes corrosivos.

### **3.1.2. Selección de muestras**

Las muestras de los elementos fallados generalmente se obtienen antes de iniciar el propio análisis. Usualmente es necesario comparar componentes fallados con otros similares que no fallaron para determinar y/o comparar si la falla se debió a condiciones de servicio o es el resultado de errores de manufactura o diseño. Muchas veces también es necesario el análisis de los componentes que entran en contacto con los elementos que fallaron, ya que estos pudieron influir en alguna medida a la falla de los primeros. Algo que también es común es el análisis de los fluidos con los que trabajaron los elementos analizados.

## **3.2. Examen Preliminar de los Elementos Fallados**

Las partes falladas y todos sus fragmentos deben de ser evaluados visualmente, algunos inclusive antes de proceder a la limpieza. Los restos que podrían encontrarse pueden dar evidencia y establecer la causa de la falla o determinar la secuencia de eventos que llevaron a la falla.

### **3.2.1. Inspección Visual**

La inspección visual es un ensayo no destructivo que brinda la capacidad de detectar y examinar una gran variedad de defectos superficiales como corrosión, acabado superficial, discontinuidades, etc. Este método es el más empleado para la detección y examinación de fracturas superficiales, lo que lo hace particularmente importante para la evaluación de fallas en mecanismos.

El ensayo consiste en la observación detallada de un material u objeto, ya por inspección visual directa (a simple vista u ojo desnudo), o con ayuda de instrumentos auxiliares que pueden ser lupas, linternas, y hasta microscopios para medir la profundidad o amplitud de fracturas en la superficie de los elementos evaluados.

Para el ensayo existen 2 métodos, el reproductivo y el subjetivo. El método subjetivo consiste en la inspección visual y toma de decisiones inmediatas sobre lo observado. El método reproductivo consiste en fotografiar, realizar bocetos, tomar dimensiones y anotar lo evaluado, lo que permite la posterior comparación con patrones, además de dejar constancia del ensayo.

El ensayo visual esta normado por ASME SECC. V Art. 9.

### **3.2.2. Inspección macroscópica de superficies de fractura (Fractografía)**

El examen detallado de superficies de fractura en el rango de 1 a 100 aumentos puede ser hecho directamente con el ojo o con la ayuda de instrumentos de aumento, como lupas, microscopios ópticos de bajo aumento, etc. Para el fotografiado de las muestras se requiere de cámaras de alta calidad y altos aumentos, además de la iluminación adecuada. Los principios, instrumentación y aplicación con estos instrumentos son abordados en la 9na edición de Metals handbook, volúmenes 8 y 10.

Con una inspección macroscópica es típico poder determinar la dirección de crecimiento de la fractura, y con eso el origen de la misma. Dependiendo del tipo de fractura (frágil o dúctil), podemos ver marcas características que nos indicaran el mecanismo de fractura.

### **3.2.3. Fotografiado de las Fracturas**

Este paso es esencial para la examinación y documentado. Para ello se deben de tomar las fotografías con distintos ángulos de iluminación para poder captar las distintas zonas de la fractura.

### **3.3. Ensayos no Destructivos**

Muchos ensayos no destructivos son de gran utilidad en un análisis de falla. Estos tests son usados para detectar fracturas y discontinuidades. Los ensayos no destructivos más conocidos son:



- Partículas magnéticas
- Líquidos penetrantes
- Radiografía Industrial
- Ultrasonido

### 3.4. Pruebas Mecánicas

Las pruebas mecánicas en general son ensayos destructivos, que toman parte del material para aplicar ensayos como metalografía, dureza, impacto, tensión, entre otros. Los ensayos mecánicos que utilizaremos se definen brevemente a continuación.

#### 3.4.1. Dureza

La más simple de las pruebas mecánicas es el examen de dureza y es, generalmente, la herramienta más versátil del análisis de falla. Esta prueba puede ser usada para evaluar el resultado de tratamientos térmicos, para comparar los materiales entre componentes fallados y los que se muestran en las especificaciones de fábrica, para aproximar un esfuerzo de fluencia en los aceros, y para detectar endurecimientos en funcionamiento y ablandamiento del material causado por decarburización, picaduras, etc.

#### 3.4.2. Metalografía

La examinación metalográfica provee al investigador con una buena indicación acerca de la clase del material y si esta es la estructura deseada. Algunas veces es posible atribuir las causas de falla a una composición defectuosa y otras a defectos de servicio. El análisis por microscopio puede inclusive proveer información acerca de la manufactura del componente analizado y del tratamiento térmico producido intencionalmente o sin intención durante la manufactura del componente.

Otros defectos de servicio tales como corrosión, oxidación, y severo endurecimiento de las superficies por deformación plástica también pueden ser revelados por este

procedimiento.

Defectos estructurales como segregación o alargamiento de grado desfavorable pueden contribuir a la fractura sin mostrar evidencia que pueda ser detectada por inspección visual, aun cuando indicadores macro están presentes.

Aun cuando las fracturas generalmente se originan en las discontinuidades, el tipo de discontinuidad no necesariamente determina el mecanismo de falla. En general las discontinuidades son los lugares de inicio de una fractura, provocando fallas prematuras o a bajas cargas.

La selección del lugar a metalografiar depende de la información que se desea obtener. Por ejemplo de querer conocer la estructura del metal de un componente que fallo, y asumiendo que esta fue diseñada con una misma estructura en todo el componente, existe las posibilidades de analizar a) una zona alejada del área de fractura y revisar si la estructura corresponde a la deseada, b) analizar una zona cercana al área de fractura para ver si hubieron variaciones micro estructurales que pudieron conducir a la fractura y en qué medida estas fueron las causales de la falla o siguiendo todo un proceso de análisis llegar a la conclusión que la variación micro estructural fue a causa de la falla misma.

#### **4. FRACTURAS**

La causa y el tamaño de fracturas pre existentes son de gran importancia en los mecanismos de falla así como en el análisis de falla. El inicio de estas fracturas puede ser atribuidos a sobreesfuerzos, malos maquinados, corrosión intergranular, tratamientos térmicos, etc.

##### **4.1. Clasificación de fracturas**

Muchos elementos encontrados en la fractura son usados para describir y categorizar los tipos de fractura encontrados en el análisis de laboratorio y en servicio. Estos

elementos incluyen condiciones de carga y tiempo de crecimiento de las fracturas.

En un análisis de falla esta clasificación resulta muy útil al poder ser realizada en escala macroscópica. Las principales tipos de fractura que pueden ser identificados son: fractura dúctil, fractura frágil, fracturas por fatiga, y fracturas resultantes de la combinación del efecto de fallas bajo tensión y ambiente donde opera.

**a. Fracturas por sobrecarga**

Una fractura resultado de la carga sobre el punto de fractura del material es comúnmente llamado fractura por sobrecarga. Cuando la carga supera en un gran ratio al esfuerzo de ruptura, la fractura resultante es llamada fractura por impacto.

**b. Fracturas dúctiles**

Fracturas dúctiles son caracterizadas por la gran deformación plástica del metal apreciable y considerable consumo de energía para su deformación antes de la ruptura del elemento. Las fracturas dúctiles en la mayoría de metales tienen una superficie fibrosa de color mate, son de propagación lenta, propagando la fisura a través del plano de máximo esfuerzo cortante, esta característica se puede observar en la fractura de tipo copa-cono.

**c. Fracturas frágiles**

Las fracturas frágiles son caracterizadas por su rápida propagación y el menor consumo de energía de deformación frente a las fracturas dúctiles, además de no presentar deformación plástica apreciable a simple vista. La apariencia visual de las superficies de fractura frágiles varía en función del tipo de falla y de las condiciones de esta como por ejemplo de la temperatura. Comúnmente son de apariencia brillante, granular, con poca o ninguna estricción y con un plano de fractura perpendicular a la dirección de los máximos esfuerzos de tracción. Rasgos comunes percibidos son por ejemplo las Líneas de Chevron que pueden estar presentes sobre un rango de temperatura. Si la temperatura a la cual se produce la falla es baja, estos signos

pueden desaparecer.

#### **d. Fracturas por fatiga**

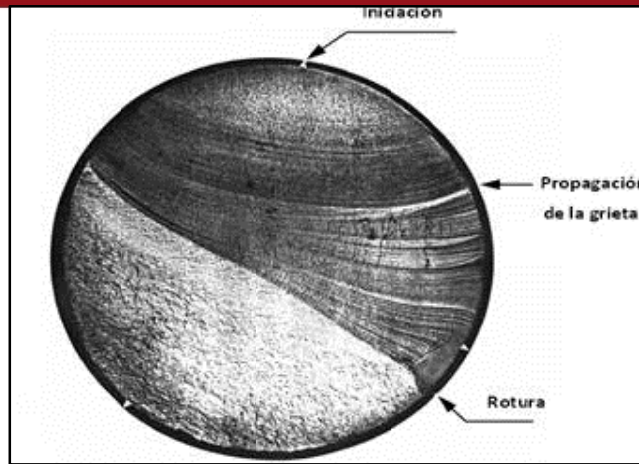
Estas fallas son el resultado del trabado con cargas cíclicas. Materiales sometidos a este fenómeno, pueden fracturar a una tensión inferior al límite de resistencia máxima y al límite de fluencia. Frecuentemente, el avance de la fractura se muestra en forma conocida como marcas de playa, estas se desprenden del origen.

El proceso de fatiga consiste en tres etapas (estadios): nucleación (iniciación) de la grieta, propagación de la grieta y rotura.

La iniciación de las grietas de fatiga está ligada a la acumulación de deformación plástica, en general en la superficie del material, mediante deslizamiento de los planos cristalográficos. Las grietas pueden iniciarse en defectos o inclusiones en el material, o sea, en puntos de concentración de tensiones, en lugares no homogéneos y puntos de variación abrupta de la geometría de la estructura.

En la segunda etapa, las grietas generalmente se propagan perpendicularmente a la dirección de las tensiones principales de un modo estable, hasta cierta extensión con el desarrollo de las marcas de playa. El último estadio del proceso de fatiga se caracteriza por la propagación de la grieta de modo inestable, resultando en el colapso mecánico de la estructura al superar un determinado tamaño crítico.

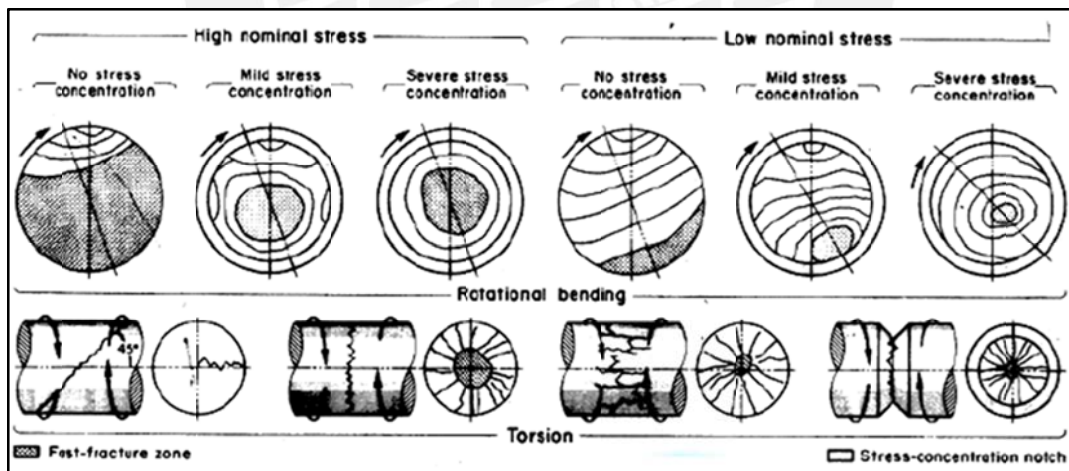
En el Gráfico N° 1.2 se muestra la superficie de fractura típico de un elemento sometido a fatiga.



(Rodríguez 2010)

**Gráfico N° 1.2 – Fractura por Fatiga**

Este tipo de falla es caracterizada por el incremento de la velocidad de propagación de las fracturas en cuanto la sección transversal se va reduciendo hasta que ya no puede soportar la carga aplicada. Dependiendo de la carga aplicada y de la morfología de la superficie del elemento, podemos encontrar alguna de las superficies de fractura que se muestran en la Gráfico N° 1.3.



(International 1987: 216)

**Gráfico N° 1.3 - Esquemas de Superficies de Fractura**

### 5. ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Los aceros inoxidable austeníticos no son magnéticos y no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. El inoxidable austenítico más popular es el Tipo AISI 304, que contiene básicamente 18% de cromo y 8% de níquel, con un porcentaje en peso de

carbono limitado a un máximo de 0,08%. Tiene gran aplicación en las industrias químicas, farmacéuticas, de alcohol, aeronáutica, naval, uso en arquitectura, alimenticia, y de transporte. Es también utilizado en cubiertos, vajillas, piletas, revestimientos de ascensores y en un sin número de aplicaciones.

En determinados medios, especialmente en aquellos que contienen iones cloruro, el inoxidable AISI 304 muestra propensión a una forma de corrosión llamada corrosión por picadura. Es un tipo de corrosión localizada, en la cual en determinados puntos de la superficie del material el medio agresivo consigue quebrar la película pasiva para después progresar en profundidad. Aunque la pérdida de masa a causa de este tipo pueda ser a veces insignificante, esta forma de corrosión es muy insidiosa, ya que muchas veces un picado es suficiente para dejar un equipo fuera de servicio.

La corrosión por intersticios, puede ser considerada como una corrosión por picado artificial. El aspecto es frecuentemente semejante al de la corrosión por picadura, sin embargo, la existencia de un intersticio es necesaria para la ocurrencia del fenómeno, lo que no sucede en la corrosión por picado. Los mismos medios capaces de provocar la corrosión por picadura, promueven la corrosión por intersticios en los aceros inoxidables.

Para disminuir la susceptibilidad a estas formas de corrosión se agrega molibdeno como elemento de aleación en los aceros inoxidables. La presencia de molibdeno permite la formación de una capa pasiva más resistente, y en casos en que el inoxidable AISI 304 no resiste a la acción de determinados medios, los inoxidables AISI 316 y AISI 317 constituyen una excelente solución. Son aceros con gran utilización en las industrias químicas, de alcohol, petroquímicas, de papel, celulosa, industrias textil, farmacéutica y en medios marinos.

### **5.1. Sensibilización - Efecto de Temperaturas Elevadas**

Cuando están sometidos por algún tiempo a las temperaturas entre 450 y 850 °C, los

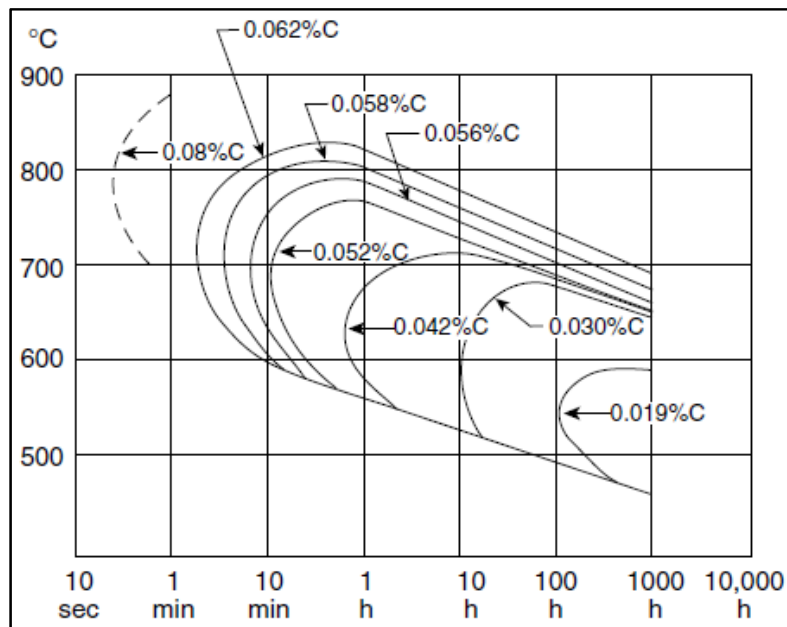
aceros inoxidables austeníticos están propensos a la precipitación de carburos de cromo en sus contornos de granos, lo que los torna sensibilizados. Esta precipitación abundante de carburos, la sensibilización, resulta en la disminución del contenido de cromo en las regiones vecinas a los bordes, regiones que tienen así su resistencia a la corrosión drásticamente comprometida, tornando el material susceptible a la corrosión intergranular en ciertos medios. Las zonas térmicamente afectadas por operaciones de soldado son particularmente sensibles a esta forma de corrosión, ya que durante el ciclo térmico de soldado parte del material es mantenido en la faja crítica de temperaturas. La consideración de este fenómeno llevó al desarrollo de los inoxidables austeníticos de bajo carbono, AISI 304L, AISI 316L y AISI 317L, en los cuales el porcentaje de carbono es limitado a un máximo de 0,03%, reduciendo así la posibilidad de sensibilización.

En la Gráfico N° 1.4 se muestra las curvas de sensibilización para el acero AISI 304 en función de su contenido de carbono, de la temperatura que puede alcanzar, y del tiempo que permanece a dicha temperatura. Estos factores son los que establecen las condiciones para la sensibilización del material.

Además de reducir el contenido de carbono, la utilización de estabilizadores también tiene la finalidad de evitar el problema de la sensibilización. El titanio, adicionado como elemento de aleación, inhibe la formación de carburo de cromo debido al hecho de tener una afinidad mayor por el carbono que aquella que tiene el cromo. Así, se precipita carburo de titanio y el cromo permanece en solución sólida. Con la misma finalidad puede ser utilizado el niobio.

Tanto el titanio como el niobio son estabilizadores del carbono y los aceros inoxidables así obtenidos, el AISI 321 y el AISI 347 son conocidos como aceros inoxidables estabilizados. El inoxidable AISI 316 Ti es la versión estabilizada del tipo AISI 316. Para aplicaciones en equipos que operan entre 400 y 900 °C, los aceros inoxidables

estabilizados son los más recomendados, ya que conservan mejores propiedades mecánicas en esas temperaturas que los aceros de extra bajo carbono. (S.C.)



(ACERIND S.C.)

**Gráfico N° 1.4 - Control del Carbono en la Precipitación de Carburos – Acero Tipo 304**

El inoxidable AISI 304 es recomendado para trabajo al aire libre, a temperaturas inferiores a 925 °C en servicios continuos.

El inoxidable AISI 316, por su contenido de molibdeno, tiene mejor resistencia a la corrosión.

## 6. VIBRACIONES

El monitoreo de la intensidad de vibraciones en los equipos ayuda a prever las ocurrencias de falla, detectando de manera anticipada problemas como desbalanceo, desalineaciones, problemas con rodamientos, problemas con engranajes, solturas mecánicas, etc. Una buena guía para comenzar un acercamiento a lo que representa una condición normal de la máquina lo constituyen las normas, siendo las más conocida la norma ISO 10816, la cual reúne las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración. Este estándar consta de cinco



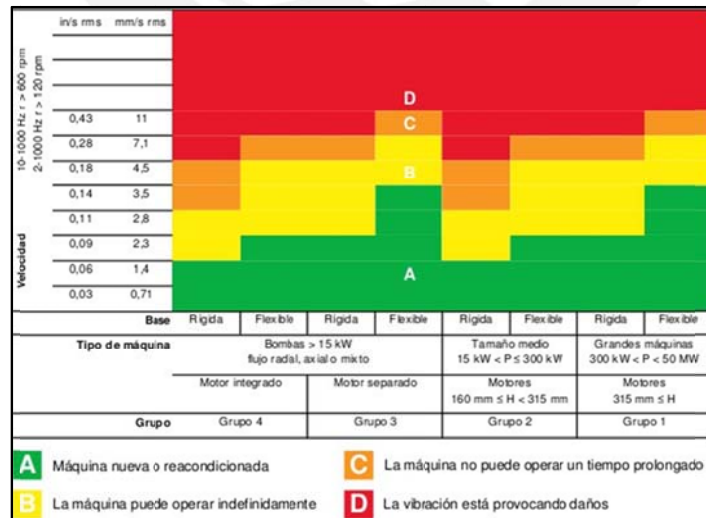
partes, de las cuales la que aplica en los equipos que evaluamos es la parte 5:  
Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo.

La severidad de la vibración, según esta norma, se clasifica conforme a los siguientes parámetros:

- Tipo de máquina.
- Potencia o altura de eje.
- Flexibilidad del soporte.

En el Gráfico N° 1.5 se presenta un cuadro con el cual se puede evaluar al equipo según zonas de acuerdo a sus niveles de vibración. Las zonas que se representan son:

- Zona A: Valores de vibración de máquinas recién puestas en funcionamiento o reacondicionadas.
- Zona B: Máquinas que pueden funcionar indefinidamente sin restricciones.
- Zona C: La condición de la máquina no es adecuada para una operación continua, sino solamente para un período de tiempo limitado. Se deberían llevar a cabo medidas correctivas en la siguiente parada programada
- Zona D: Los valores de vibración son peligrosos, la máquina puede sufrir daños.



(SINAIS, s/a)

Gráfico N° 1.5 - Severidad de la vibración según la norma ISO 10816

## Capítulo 2 - BUSQUEDA DE DATOS

### 1. DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema de bombeo de mina subterránea de la unidad minera Paragsha del grupo VOLCAN cuenta con 5 estaciones de bombeo principales de agua ácida y neutra, las cuales cuentan con sistemas de bombeo que constan del motor eléctrico y bomba centrífuga horizontal, habiendo varias de estas unidades de bombeo por cada cámara.

Las cámaras de bombeo se encuentran ubicadas a diferentes profundidades, estando ubicada la unidad más profunda a 2100 pies<sup>1</sup> (640 m) bajo la superficie. Los detalles del sistema se detallan en el presente capítulo.

#### 1.1. Bombas por cámara

El total en interior de mina es de 24 bombas estacionarias, de las siguientes marcas:

- Bomba KSB 250-710 : 04 und (Principal)
- Bomba KSB 200-670 : 10 und (Principal)
- Bomba KSB 150-450 : 02 und (Principal)
- Bomba Worthington : 03 und (Principal)
- Bomba Ruhr Pumpen : 02 und (Principal)
- Bomba KSB RDL 200-620A : 01 und (Auxiliar)
- Bomba KSB WKL 125/4 : 01 und (Auxiliar)
- Bomba Goulds 130 : 01 und (Auxiliar)

#### 1.2. Bombeo por etapas

Para lograr el bombeo a grandes alturas se tienen pares de bombas enseriadas denotadas por las letras A y B en donde las bombas A funcionan de booster y las B le adicionan mayor presión.

---

<sup>1</sup> Los distintos niveles de la mina subterránea son nombrados por la profundidad en pies a los que se encuentran, por ejemplo el nivel ubicado a 2100 pies de profundidad se lo nombra nivel 2100.

### 1.3. Motores y Controles

Las potencias de los motores de las bombas estacionarias varían desde los 300HP en motores ubicados en la cámara nombrada Excelsior del nivel 1400 (426 m. desde la superficie) hasta 1300HP en las demás cámaras con motores Siemens, Continental, etc. y una tensión de línea trifásica de 4000V.

Las bombas en su totalidad son movidas por motores eléctricos, los cuales al ser de gran potencia no pueden ser arrancados directamente por lo que se emplean autotransformadores los cuales son programados siguiendo recomendaciones de los fabricantes de motores. La medición de parámetros como flujo y presión se hace con instrumentación de campo, los parámetros medidos son visualizados en paneles digitales ABB ubicados localmente y en las salas de control principales, del mismo modo se tiene la medición de temperatura de las diferentes capas de bobinados, rodamientos, carcasa, detección de carga baja en los motores, etc., de esta manera se puede contar con un registro de todos los datos. De superar ciertos valores preestablecidos como corrientes o temperatura en el estator, el enclavamiento del sistema automáticamente detiene los motores. Además de los sensores, se cuenta también con algunas válvulas motorizadas, permitiendo este conjunto realizar el bombeo de manera remota desde la sala de control principal ubicadas en la superficie.

De ocurrir cualquier otra emergencia, los equipos pueden ser detenidos remotamente o desde las botoneras de campo, siendo estas paradas visibles en los tableros de control.

## 2. ESTACIONES DE BOMBEO

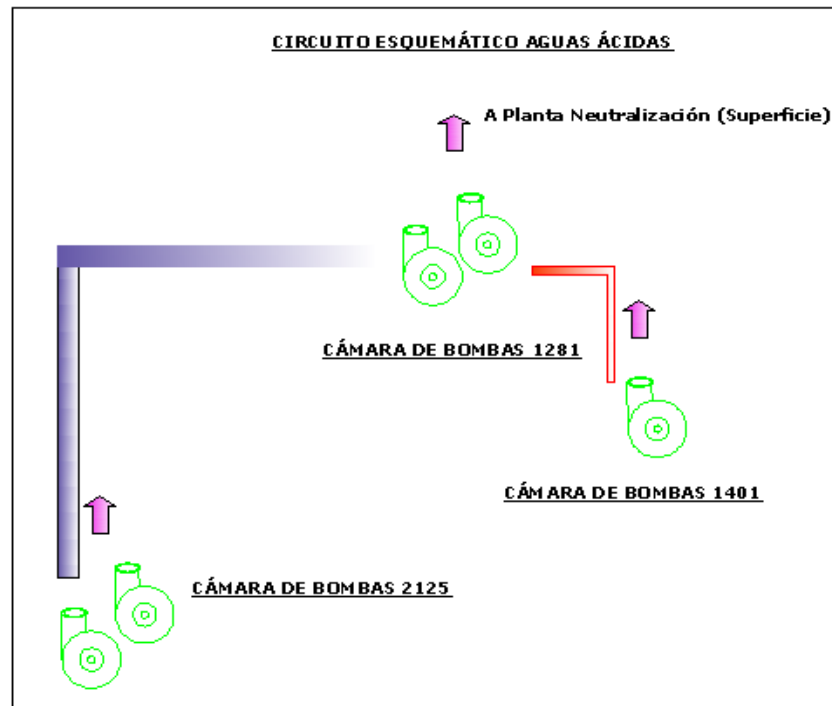
El total de estaciones está dividida en estaciones de agua ácida y estaciones de agua neutra, el detalle de cada una de estas se presenta a continuación:

### 2.1. Estaciones de Bombeo – Agua Ácida

Las cámaras de bombas de agua ácida son:

- C.B 2125
- C.B 1281
- C.B 1401<sup>2</sup>

En el Gráfico N° 2.1 se presenta el esquema de impulsión para las estaciones de agua ácida.



**Gráfico N° 2.1 - Circuito Esquemático Agua Ácida**

### 2.1.1. Características del Fluido

En la Tabla N° 1 se presentan las características del fluido que se pudieron obtener.

### 2.2. Estaciones de Bombeo – Agua Neutra

Las cámaras de agua neutra son:

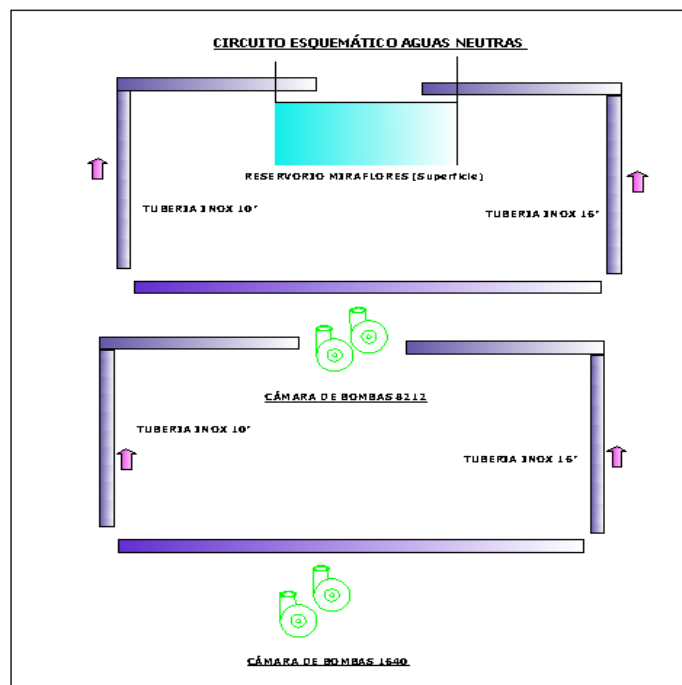
- C.B 1640
- C.B 8212

<sup>2</sup> La estación de bombeo 1401 funciona esporádicamente como almacenamiento en caso de rebose de agua de la cámara 1281. Los equipos de esta estación no se detallarán.

En el Gráfico N° 2.2 se presenta el esquema de impulsión para las estaciones de agua neutra.

**Tabla N° 1 – Características del Fluido Ácido<sup>3</sup>**

	LUGAR	VALOR	UNIDAD	OBSERVACIONES
PH promedio	TODAS	2.5	-	-
Sólidos en Suspensión	C.B 1281	402	mg/l	Valor promedio tomado en noviembre de 2011
	C.B 2125	720	mg/l	Valor promedio tomado en noviembre de 2011
	C.B 1401	176	mg/l	Valor promedio tomado en noviembre de 2011
Condiciones ambientales	C.B 1281	3980	msnm	-
	C.B 2125	3600	msnm	-
	C.B 1401	3920	msnm	-
Temperatura	TODAS	10 – 30	°C	-
Humedad	TODAS	50 – 90	%	-



**Gráfico N° 2.2 - Circuito Esquemático Agua Neutra**

<sup>3</sup> Datos tomados de reportes de mina.

### 2.2.1. Características del Fluido

En la Tabla N° 2 se presentan las características del fluido que se pudieron obtener.

**Tabla N° 2 - Características del Fluido Neutro**

	LUGAR	VALOR	UNIDAD	OBSERVACIONES
<b>PH promedio</b>	TODAS	7.5	-	-
<b>Sólidos en Suspensión</b>	C.B 1640	150	mg/l	Valor promedio tomado en noviembre de 2011
	C.B 8212	150	mg/l	Valor promedio tomado en noviembre de 2011
<b>Condiciones ambientales</b>	C.B 1640	3960	msnm	-
	C.B 8212	4110	msnm	-
<b>Temperatura</b>	TODAS	10 – 30	°C	-
<b>Humedad</b>	TODAS	50 – 90	%	-

En la Tabla N° 3 se resumen las bombas estacionarias de interior de mina, cada una con sus características de trabajo.

### 3. FALLAS COMUNES

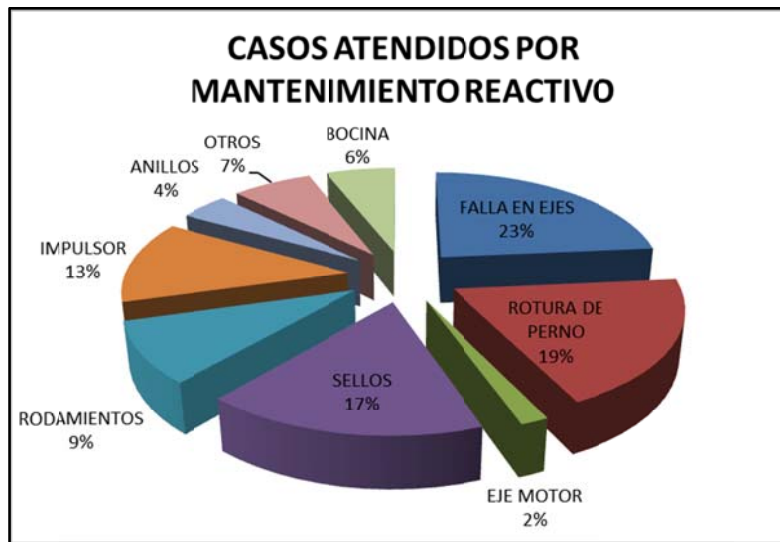
Las fallas en los sistemas de bombeo se dan principalmente en las bombas, las causas de paradas repentinas son muchas, a continuación se enumera una lista de las más comunes:

- Rotura de ejes
- Rotura o desgaste excesivo de rodamientos
- Rotura de anillos
- Desgaste de bocinas
- Desgaste de sellos
- Rotura del acoplamiento motor-bomba
- Fuga de aceite por el visor
- Desgaste de impulsor
- Rotura de perno de sujeción del impulsor
- Desgaste prematuro en forros
- Rotura de cilindro porta rodamiento

Tabla N° 3 – Equipos de Impulsión

FLUIDO	CAMARA	DENOMINACION	PH prom	BOMBA								
				CODIGO SAP	MARCA	PROCEDENCIA	MODELO	MATERIAL DEL PERNO	CAUDAL PROMEDIO DE BOMBEO (gln/min)	ALTURA DE BOMBEO (m)	Hp Nominal	Hp Real
AGUAS ACIDAS	CAMARA 2125	BBA # 4A	2.5	BOM-0277-CE	KSB	BRASIL	RPH 200-670	AISI 316	3300	274	400	502
		BBA # 4B		BOM-0278-CE	KSB	BRASIL	RPH 200-670	AISI 316	3300	274	800	978
		BBA # 5A		BOM-0279-CE	KSB	BRASIL	RPH 200-670	AISI 316	3300	274	400	504
		BBA # 5B		BOM-0282-CE	KSB	BRASIL	RPH 200-670	AISI 316	3300	274	800	984
	CAMARA 1200	BBA # 7A		BOM-0283-CE	KSB	BRASIL	RPH 200-670	AISI 316	3300	365	500	512
		BBA # 7B		BOM-0286-CE	KSB	BRASIL	RPH 200-670	AISI 316	3300	365	800	925
		BBA # 8A		BOM-0126-CE	KSB	BRASIL	RPH 250-710	AISI 316	3300	365	500	542
		BBA # 8B		BOM-0284-CE	KSB	BRASIL	RPH 200-670	AISI 316	3300	365	800	963
AGUAS NEUTRAS	CAMARA 8212	BBA # 3	7,5	BOM-0281-CE	KSB	BRASIL	RPH 200-670	AISI 316	4300	265	1300	1295
		BBA # 4		BOM-0125-CE	KSB	BRASIL	RPH 250-710	AISI 316	4300	265	1300	1295
	CAMARA 1640	BBA # 3		BOM-0124-CE	KSB	BRASIL	RPH 250-710	AISI 316	4000	265	1300	1318
		BBA # 4		BOM-0124-CE	KSB	BRASIL	RPH 250-710	AISI 316	4000	265	1300	1330

Del total de fallas en las cámaras de bombeo de interior de mina se obtiene que las de mayor frecuencia son las fallas en rodamientos, ejes, pernos de sujeción de impulsor, sellos, bocinas e impulsor, estas fallas analizadas en los últimos 2 años representan la proporción mostrada en el Gráfico N° 2.3.



**Gráfico N° 2.3 - Causas de Mantenimiento Reactivo en Bombas Ksb de Interior de Mina<sup>4</sup>**

Estas fallas son atendidas por mantenimiento correctivo y son adicionales a las anticipadas por mantenimiento preventivo.

De la Gráfico N° 1.4 se puede decir que las fallas con mayor repetición son las de filtraciones en sellos, rotura de perno de sujeción de impulsor y falla en ejes en mayor porcentaje.

En cuanto a las fallas en ejes estos son de múltiple naturaleza, una falla en el eje puede atribuirse a la ruptura del mismo, a la disminución de sección en el punto de apoyo de los cojinetes, en el desgaste o rayado en su superficie, en la deformación o ruptura de los canales chaveteros, entre otros.

Las causas a las cuales se atribuye estas fallas en el eje son varias, como por

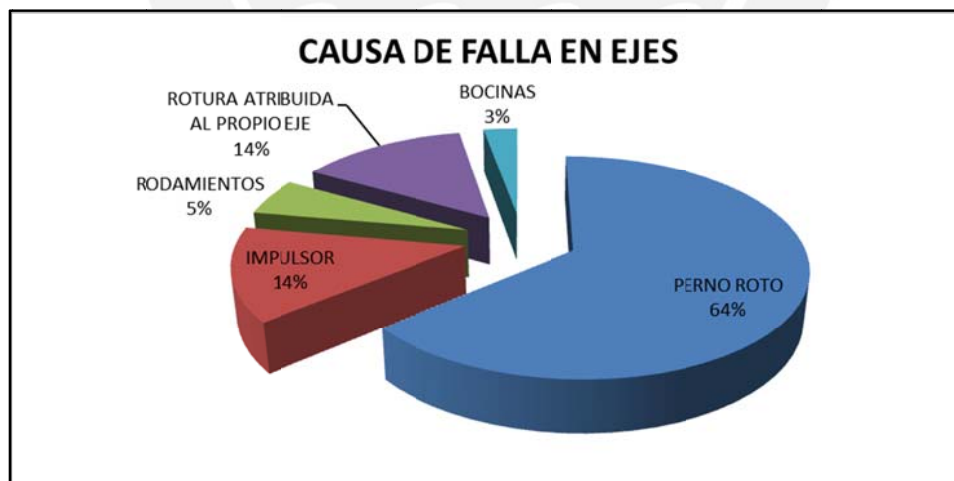
<sup>4</sup> Gráfico elaborado a partir de data histórica almacenada en el software administrativo de mantenimiento (SAP) de la unidad minera. Datos del periodo enero 2011 - abril 2012.



ejemplo:

- Falla en los rodamientos, causando desbalance en el eje hasta llevarlo al colapso.
- Desgaste acelerado en bocinas, desbalanceando el eje.
- Trabado del impulsor a causa de impurezas o materiales extraños en el fluido, causando sobrecargas y el trabado del mismo, afectando los canales chaveteros tanto del eje como del impulsor.
- Ruptura del perno de sujeción del impulsor, ocasionando la liberación del impulsor sobre el eje, terminando en el trabado o contacto con el caracol de la bomba. Esto a ocurrir a altas velocidades (aproximadamente 1800 RPM) y con alto par de motor, ocasiona un golpe severo que actúa directamente en el eje de la bomba dañándolo y dañando también cojinetes, sellos, etc.

En el Gráfico N° 2.4 se muestra el porcentaje de fallas los elementos de la bomba que ocasiona alguna falla que tenga que ser reparada en el eje.



**Gráfico N° 2.4 - Causa de Fallas en Ejes de Bombas Ksb<sup>5</sup>**

La ruptura de estos pernos que no sobrepasan los \$20.00 USD ocasionan paradas de unidades que, sumando los gastos de mano de obra y componentes dañados

<sup>5</sup> Id.

indirectamente, promedian los \$8000.00 USD cada vez que fallan, por lo que es preciso analizar la causa raíz de su falla.

#### 4. PRINCIPALES DEFICIENCIAS

Entre los puntos que podemos considerar como deficientes y que impacten directamente o indirectamente sobre el tema en evaluación, resaltamos la alineación que se les da a los equipos y el control vibracional al que se someten.

En la unidad donde operan los equipos que evaluamos el balanceo lo realiza el área de mantenimiento predictivo, sin embargo por la cantidad de equipos de bombeo, el personal que tiene a cargo el área y el número de equipos de diagnóstico no permite que esta labor se realice eficientemente, siendo el tiempo de vida de los componentes de los equipos los perjudicados, y causando sobrecostos en mantenimiento que no son previstos.

La Tabla N° 4 y Tabla N° 5 muestra records de niveles de vibración históricos medidos en 2 unidades de bombeo, en los cuales se puede observar que los niveles en muchos casos superan a los niveles críticos por tiempos prolongados de operación. El área de Mantenimiento Mecánico Mina manifiesta que estos niveles elevados son comunes de encontrar en muchos de los equipos de bombeo.

**Tabla N° 4 – Vibraciones Bomba 4B, Cámara 1200<sup>6</sup>**

BOM-0278-CE BOMBA 4B-2125																	
PUNTOS DE MEDICION MM/SEG																	
FECHA	1H	1P	1V	1A	2H	2P	2V	2A	3H	3P	3V	3A	4H	4P	4V	4A	RMS
06-ene.-09	0.76	0.048	0.59	0.67	0.87	0.008	0.86	0.78	7.55	0.58	4.24	3.56	6.58	1.07	2.84	3.02	19.0
27-jul.-10	0.56	0.19	0.79	0.54	0.88	0.05	0.72	0.91	6.07	0.54	4.56	3.31	5.11	0.87	2.89	2.74	16.6
10-ago.-10	0.43	0.02	0.69	0.51	0.59	0.05	0.52	0.78	6.12	0.25	3.3	2.48	4.34	0.46	2.26	2.53	14.3
17-ago.-10	0.58	0.12	0.6	0.56	0.75	0.03	0.76	0.82	4.78	0.44	4.5	3.43	2.91	0.75	2.52	2.89	14.1
24-ago.-10	0.38	0.2	0.51	0.48	0.62	0.06	0.66	0.83	4.43	0.31	3.51	2.71	3.44	0.47	2.1	2.59	12.6
01-sep.-10	0.82	0.19	0.79	0.76	1.56	0.04	1.26	2	13.5	1.63	6.01	5.17	12.1	1.9	5.23	4.36	32.1
16-nov.-10	1.02	0.41	1.21	0.86	1.55	0.06	1.25	1.68	6.62	0.92	9.7	4.78	8.14	1.25	4.29	4.47	25.7
04-dic.-10	5.59	0.04	2.42	5.36	8.39	0.02	3.9	4.88	51.1	0.65	37.3	6.29	41.1	0.77	22.8	9.77	121.1

<sup>6</sup> Data histórica tomada de la base de datos del área de mantenimiento predictivo de la unidad minera. Datos del periodo enero 2011 - abril 2012.

Tabla N° 5 – Vibraciones Bomba 7B, Cámara 1200<sup>7</sup>

BOM-0284-CE BOMBA 7B 1200																	
PUNTOS DE MEDICIÓN (mm/s)																	
FECHA	1H	1P	1V	1A	2H	2P	2V	2A	3H	3P	3V	3A	4H	4P	4V	4A	RMS
20-abr-10	2,47	0,01	3,45	3,12	1,74	0,02	2,96	3,25	11	1,05	12	10	6,4	0,74	4,1	17	45,4
08-jun-10	1,35	0,01	1,13	1,3	0,93	0,01	1,13	0,8	3,06	0,12	3,83	5,9	2,88	0,16	1,49	5,7	17,7
30-jun-10	1,95	0,01	1,19	2,24	1,29	0,05	1,46	1,38	4,7	0,11	3,92	10	2,94	0,09	2,05	5,6	24,1
06-jul-10	2,12	0,04	1,45	6,5	2,41	0,01	1,58	1,54	4,7	0,09	3,1	8,5	3,4	0,12	2,02	5,5	26,7
20-jul-10	1,3	0,03	2,76	1,2	2,3	0,09	1,39	1,8	4,8	0,11	3,62	3,32	2,45	0,09	2,27	2,76	17,0
10-jul-10	0,74	0,01	1,62	5,7	1,04	0,01	0,74	1,87	2,98	0,14	2,4	3,59	1,91	0,16	1,68	3,57	17,4
24-jul-10	1,45	0,01	3,42	0,91	0,86	0,01	0,88	0,83	3,08	0,24	2,46	3,15	1,95	0,36	1,83	2,65	13,6
01-sep-10	1,27	0,02	1,42	0,77	1,22	0,01	1,07	1,2	3,72	0,26	2,85	4,32	2,81	0,26	2,29	3,27	15,1
07-sep-10	1,34	0,02	4,05	0,82	1,2	0,01	1,39	1,22	4,36	0,32	3,43	4,6	2,43	0,34	2,95	4,49	18,7
16-sep-10	0,96	0,05	1,9	2,53	3,1	0,04	1,77	1,86	4,7	0,26	4,22	3,6	2,27	0,16	3,62	2,78	19,2
27-oct-10	0,87	0,01	2,45	2,68	1,65	0,01	1,61	2,11	9	0,34	7,9	6,4	4,1	0,17	5,5	4,7	28,3
16-nov-10	1,12	0,02	3,01	1,61	1,81	0,07	1,76	2,78	4,47	0,5	5,5	5,4	3,63	0,32	3,7	2,63	21,7

## 5. IDENTIFICACIÓN DEL ELEMENTO

El análisis se centra en el estudio del perno de sujeción de impulsor de bombas de turbina vertical KSB modelo RPH que trabajan en el bombeo de agua subterránea. A continuación se amplía esta información.

### 5.1. Consideraciones Constructivas

El perno a analizar cumple la función principal de sujetar al impulsor, sujetándolo por presión contra el cambio de sección del eje. El torque aplicado sobre el perno, establecido de fábrica, es de 300 Nm (KSB: 56).

El perno según catálogo es de material AISI 316, de rosca M 30 y paso 1.5. Para los modelos de bomba KSB RPH 200-670 y RPH 250-710, los componentes tanto como el eje, rodamientos, perno de sujeción, chavetas, etc. son intercambiables entre modelos, por ser de las mismas dimensiones.

El extremo del eje donde va sujeto el impulsor y el perno está sometido a cargas de torsión y flexión por gravedad y por el torque resultante del movimiento del impulsor. El impulsor está sometido a cargas centrífugas.

<sup>7</sup> Íd.

En cuanto al contacto de los elementos con el fluido circulante, al estar el perno sujeto interiormente al eje, este no presenta contacto directo con el fluido bombeado pero si lo hace por filtración en la rosca.

El Gráfico N° 2.6 presenta el ensamble del modelo de bomba al cual pertenece el perno evaluado.

En el Gráfico N° 2.5 se muestra ampliada la zona de falla.

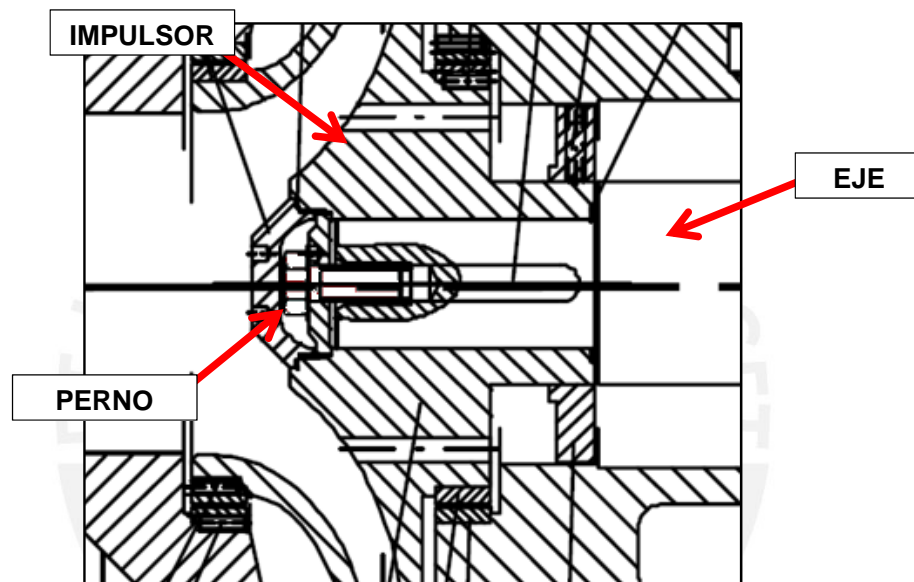


Gráfico N° 2.5 - Zona de Falla con Mayor Frecuencia

## 5.2. Frecuencia de Fallas en Bombas

Ya teniendo identificado el elemento, ahora es necesario saber con qué frecuencia falla este elemento en cada bomba. A partir de la data recolectada se tiene el detalle de estos cambios en el periodo enero 2011 a abril 2012, con lo que se resume el número de ocurrencias y se muestra en la Tabla N° 6. Para el análisis de fallas recuperamos los elementos fallados que aún se encontraban en el depósito de la mina. Los pernos pertenecían a las bombas resaltadas en la Tabla N° 6.

Se logró recuperar los elementos fracturados de 2 bombas diferentes, la bomba 4B de la cámara 2125 y de la bomba 7B de la cámara 1200.

Los pernos recuperados de estas cámaras son renombrados para el presente estudio como Perno 2 y Perno 3.

El perno 2 fue recuperado de la cámara de bombas 1200, unidad de bombeo 7B. Según lo indicado por el área de operaciones este perno fue comprado como repuesto original de la marca KSB.

A causa de problemas logísticos para la adquisición de estos pernos, el área de proyectos decide mandar a maquinar sus propios pernos, con la finalidad de agilizar el tiempo de obtención de los repuestos. Según lo manifestado este perno sería de igual geometría que el anterior y de un material con prestaciones iguales o superiores al original.

En los capítulos siguientes se expandirá la información de estos elementos.

El perno 3 en análisis fue recuperado de la cámara de bombas 2125, unidad de bombeo 4B. Según lo indicado fue mandado a maquinar con las mismas propiedades físicas y mecánicas que los de fábrica.

**Tabla N° 6 - Resumen de Operación Bombas Ksb<sup>8</sup>**

FLUIDO	CAMARA	TAG	BOMBA						CICLO DE FALLAS	
			CAUDAL PROMEDIO DE BOMBEO (gln/m in)	HORAS PROMEDIO DE OPERACIÓN	ALTURA DE BOMBEO (m)	Hp Nominal	Hp Real	CARGA	PERNOS FALLADOS EN EL PERIODO EVALUADO (1 año 4 meses)	FALLAS POR PERNOS RESPECTO AL TOTAL DE FALLAS
AGUAS ACIDAS	CAMARA 2125	BBA # 4A	3300	5	274	400	502	126%	0	5%
		BBA # 4B	3300	5	274	800	978	122%	1	24%
		BBA # 5A	3300	5	274	400	504	126%	0	8%
		BBA # 5B	3300	5	274	800	984	123%	0	21%
	CAMARA 1200	BBA # 7A	3300	6	365	500	512	102%	0	6%
		BBA # 7B	3300	6	365	800	925	116%	5	22%
		BBA # 8A	3300	6	365	500	542	108%	0	4%
		BBA # 8B	3300	6	365	800	963	120%	4	27%
AGUAS NEUTRAS	CAMARA 8212	BBA # 3	4300	12	265	1300	1295	100%	1	16%
		BBA # 4	4300	12	265	1300	1295	100%	3	32%
	CAMARA 1640	BBA # 3	4000	12	265	1300	1318	101%	1	17%
		BBA # 4	4000	12	265	1300	1330	102%	0	8%

<sup>8</sup> Id.

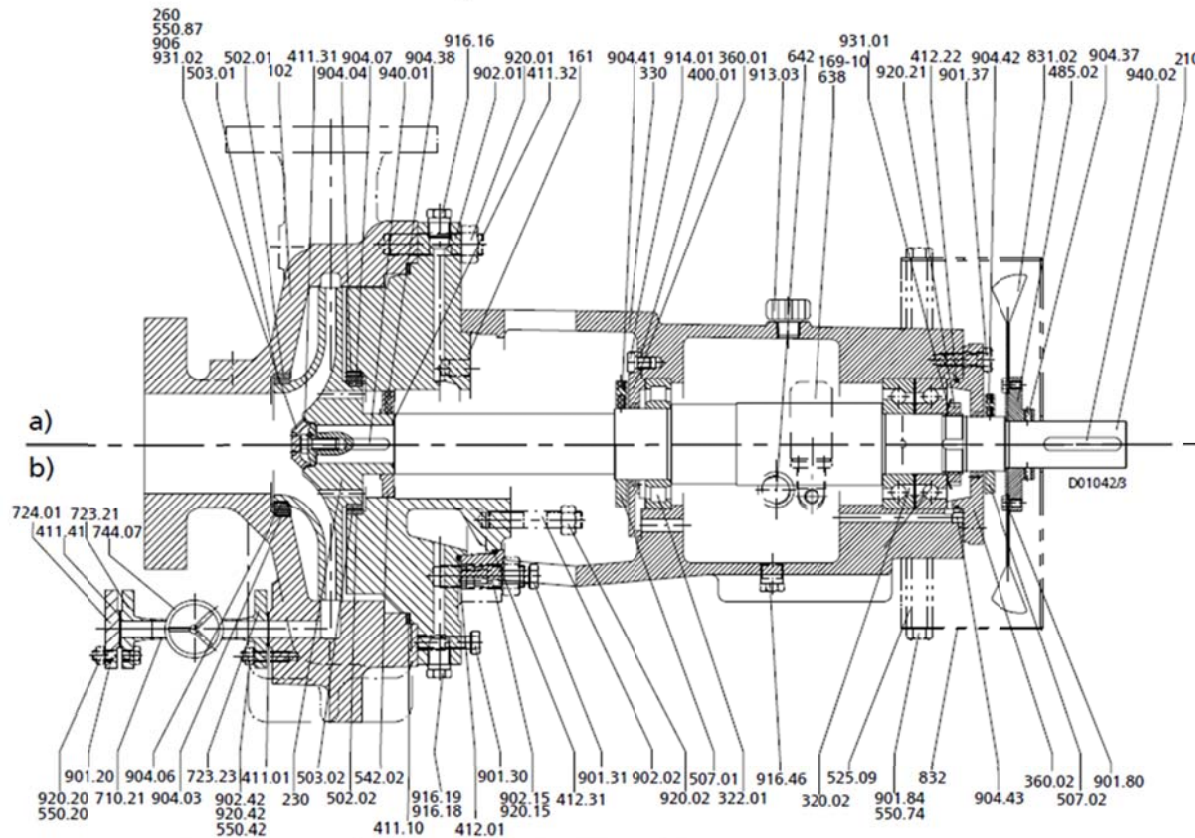


Fig. 13: Bearing brackets B06 and B07, a) uncooled and b) cooled

Gráfico N° 2.6 - Ensamble de las Bombas Ksb

(Ksb, s/a: 63)

## Capítulo 3 – PRUEBAS DE LABORATORIO

La metodología para la realización del análisis de falla seguirá los siguientes pasos:

- Identificación del componente fallado
- Situación de Falla
- Antecedentes
- Material
- Inspección visual
- Análisis fractográfico
- Líquidos penetrantes
- Dureza
- Análisis químico
- Metalografía
- Diagrama de flujo de los ensayos

En el diagrama de flujo (Gráfico N° 3.1) mostramos la secuencia que se sigue en la inspección de los componentes analizados. Esta secuencia se sigue en paralelo para los 2 componentes.

### 1. IDENTIFICACIÓN DEL COMPONENTE FALLADO

Se analiza 2 pernos fracturados pertenecientes a bombas centrífugas de eje horizontal. Cada perno se encarga de restringir el desplazamiento longitudinal del impulsor de la bomba con respecto al eje, con el cual va sujeto de manera concéntrica como se muestra en el Gráfico N° 3.2.

Unos de los pernos analizados, según control interno del área de mantenimiento, es provisto por la misma fábrica como repuesto de catálogo de la bomba en la que trabaja (Tabla N° 7). Esta bomba trabaja con fluido ácido de Ph 2.5, impulsada por un motor eléctrico de 800HP. El perno recibido se identifica a partir de ese momento como

“Perno 2”.

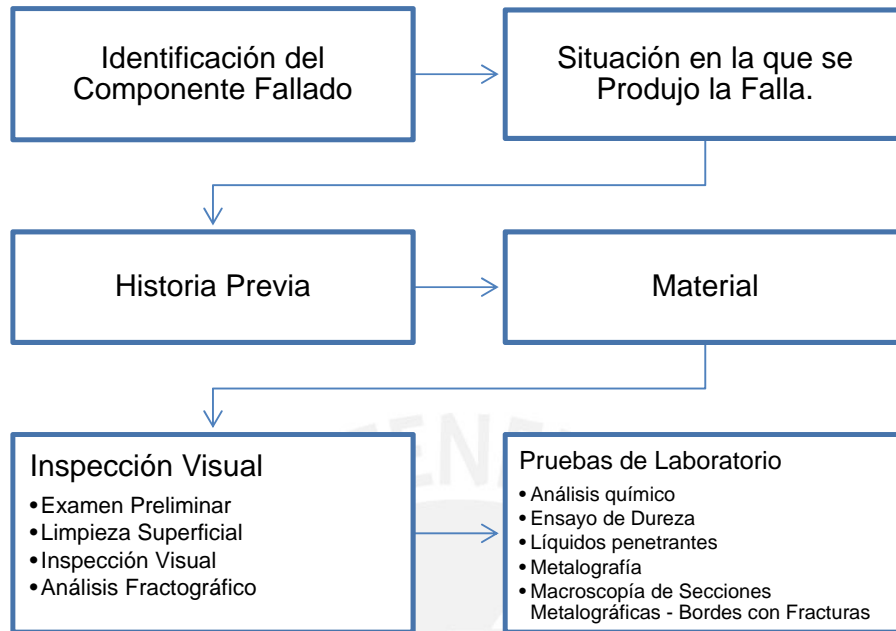


Gráfico N° 3.1 – Diagrama de Flujo

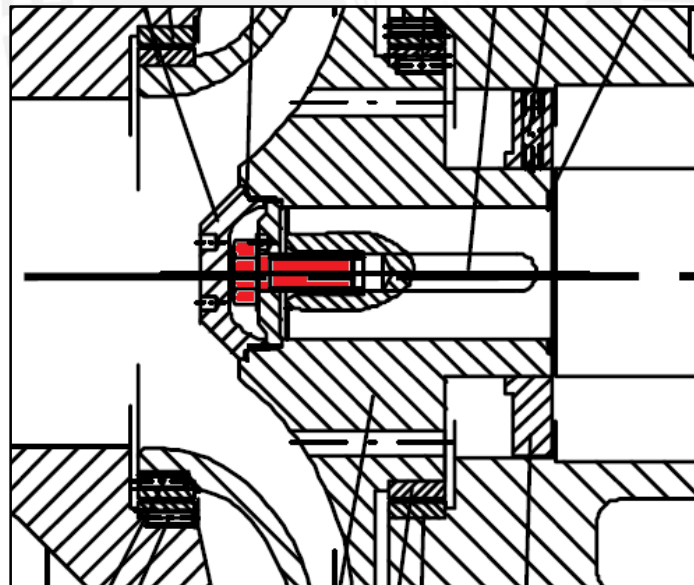


Gráfico N° 3.2 – Zona de Falla

La otra muestra recuperada la identificamos como “Perno 3”. El perno 3 es maquinado en la misma unidad minera. No se recibe información del procedimiento de maquinado seguido.



**Tabla N° 7 - Especificaciones Técnicas Bomba (Perno 2)**

<b>EQUIPO</b>	Bomba centrífuga horizontal
<b>MARCA</b>	KSB
<b>MODELO</b>	RPH 200-670
<b>CAUDAL</b>	3300 Gln/min
<b>VELOCIDAD DE GIRO</b>	1780 RPM
<b>POTENCIA</b>	800HP

El perno 3 fue recuperado de una bomba KSB igual a la del caso del perno 2. Las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla N° 8.

**Tabla N° 8 - Especificaciones Técnicas Bomba (Perno 3)**

<b>EQUIPO</b>	Bomba centrífuga horizontal
<b>MARCA</b>	KSB
<b>MODELO</b>	RPH 200-670
<b>CAUDAL</b>	3300 Gln/min
<b>VELOCIDAD DE GIRO</b>	1780 RPM
<b>POTENCIA</b>	800HP

## 2. SITUACIÓN EN QUE SE PRODUJO LA FALLA

El perno 2 se rompió durante la operación de la bomba, a 37mm de la cabeza. Sus dimensiones nominales son: M30X70 y paso de 1.5 mm. El Gráfico N° 3.3 muestra el esquema del perno fallado.

El perno 3 se rompió durante la operación de la bomba, a 40mm de la cabeza. Sus dimensiones nominales son: M30X70 y paso de 1.5mm. El Gráfico N° 3.4 muestra el esquema del perno fallado.

El eje trabaja en posición horizontal, soportando en el extremo al impulsor. Al momento de la falla se escuchó un sonido fuerte inusual y el caudal bombeado descendió apreciablemente, por lo que se procedió a apagar el equipo. Al desarmar la bomba se encontró el perno fracturado y el impulsor fuera de lugar con daños leves en este. En ambos casos un segmento de perno quedo en el interior del eje como se muestra en el Gráfico N° 3.5.

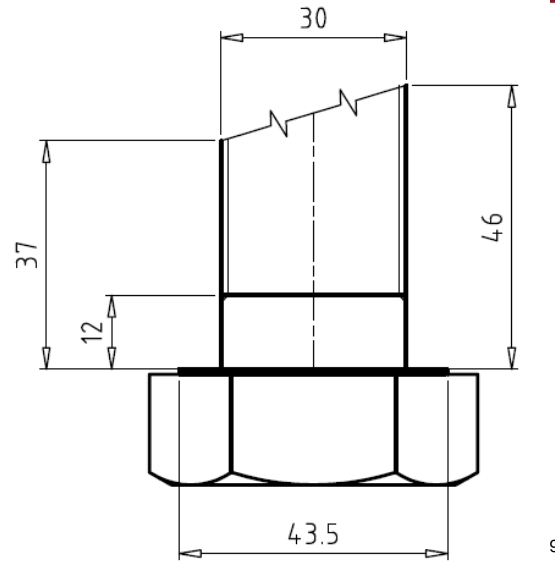


Gráfico N° 3.3 – Esquema Perno 2 Fallado

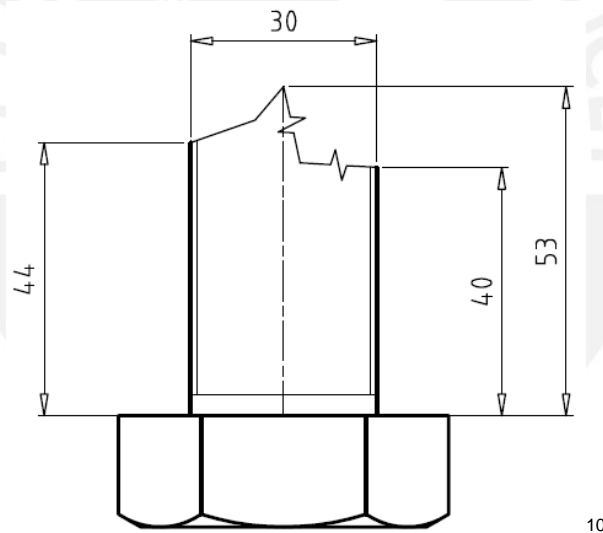


Gráfico N° 3.4 – Esquema Perno 3 Fallado

### 3. HISTORIA PREVIA A LA FALLA

El tiempo de servicio del perno 2 fue sido de 25 días, con un periodo de servicio de 6 horas por día. En el transcurso de ese tiempo se dieron paradas para la corrección de otros problemas, quitando el perno en cuestión y volviéndolo a colocar sin mayor cuidado o revisión.

<sup>9</sup> Todas las dimensiones están en milímetros

<sup>10</sup> Íd.



**Gráfico N° 3.5 – Segmento de Perno Roscado en Eje<sup>11</sup>**

El tiempo de servicio en el caso del perno 3 fue de 2 meses, con un periodo de servicio de 6 horas por día. En el transcurso de ese tiempo se dieron paradas para la corrección de otros problemas, quitando el perno 3 y volviéndolo a colocar sin mayor cuidado o revisión.

#### **4. MATERIAL**

El material del perno 2 según catálogo es acero inoxidable 316, la composición química de este acero se detalla en la Tabla N° 9, en la Tabla N° 10 se presentan sus propiedades mecánicas.

Dada la continua ocurrencia de rotura de pernos, el área de proyectos de la unidad recomienda cambiar el material del perno de 316 a AQUALOY 22 (compatible con Nitronic 50W según AWS E209 y ER209), con esta modificación se esperaba mejorar el tiempo de vida de los pernos. Según el reporte del área de mantenimiento, el perno 3 recuperado es del material recomendado AQUALOY 22, su composición química se presenta en la Tabla N° 11.

---

<sup>11</sup> La imagen se presenta con fines ilustrativos, el segmento de perno dentro del eje no pertenece a los pernos rescatados para evaluación.

Tabla N° 9 - Composición Química Acero AISI 316 (Perno 2)

AISI 316	
Cr	16 - 18
Ni	10 - 14
C	0.03
Si	1.0
Mn	2.0
P	0.045
S	0.03
Mo	2 - 3

Tabla N° 10 – Propiedades Mecánicas Acero AISI 316 (Perno 2)

AISI 316	
Dureza	150 HB
Esfuerzo de Fluencia	242 MPa
Esfuerzo máximo	586 Mpa
Elongación mínima (% EN 2")	60
Reducción de área mínima (70)	70

Tabla N° 11 - Composición Química Acero Aqualoy 22 (Perno 3)

AQUALLOY 22	
Cr	20.5 - 23.5
Ni	11.5 - 13.5
Cmax	0.06
Simax	1.0
Mnmax	4 - 6
Pmax	0.04
Smax	0.03
Mo	1.5 - 3
N	0.2 - 0.4
V	0.1 - 0.3

Tabla N° 12 - Propiedades Mecánicas Acero Aqualoy 22 (Perno 3)

AQUALLOY 22	
Dureza	302 HB
Esfuerzo de Fluencia	862 MPa
Esfuerzo máximo	1034 Mpa
Elongación mínima (% EN 2")	25
Reducción de área mínima (%)	58

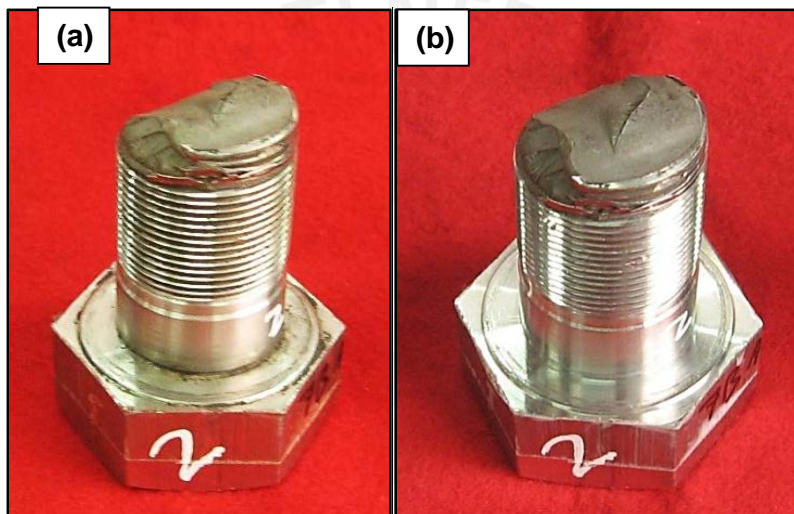
## 5. INSPECCIÓN VISUAL

### 5.1. Perno 2

Recibido el perno, se realiza un análisis visual macroscópico, observándose residuos de grasa e impurezas a lo largo de los hilos.

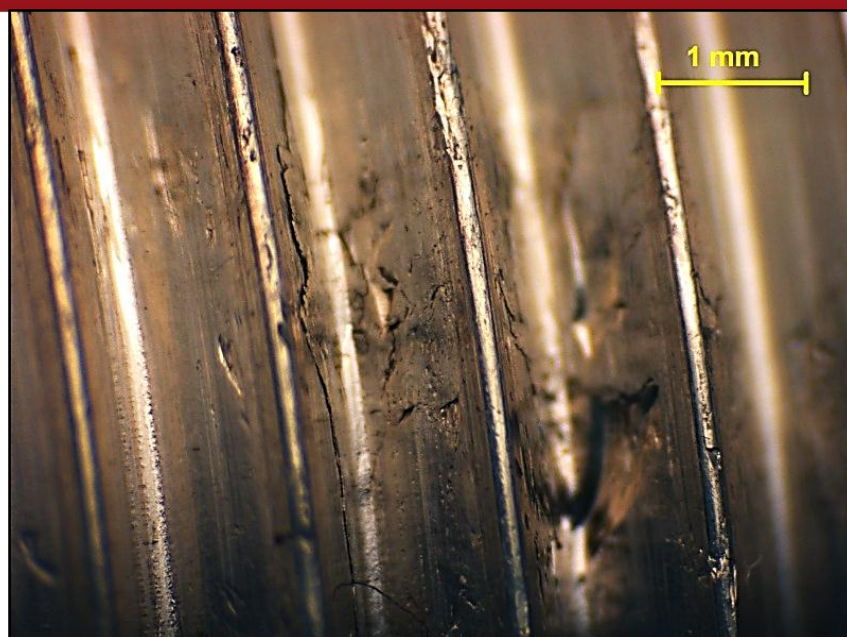
En el Gráfico N° 3.6 (a) se muestra al perno en las condiciones que se recibió.

En el Gráfico N° 3.6 (b) se observa al perno luego de la limpieza superficial, pudiéndose evaluar con más claridad los detalles.

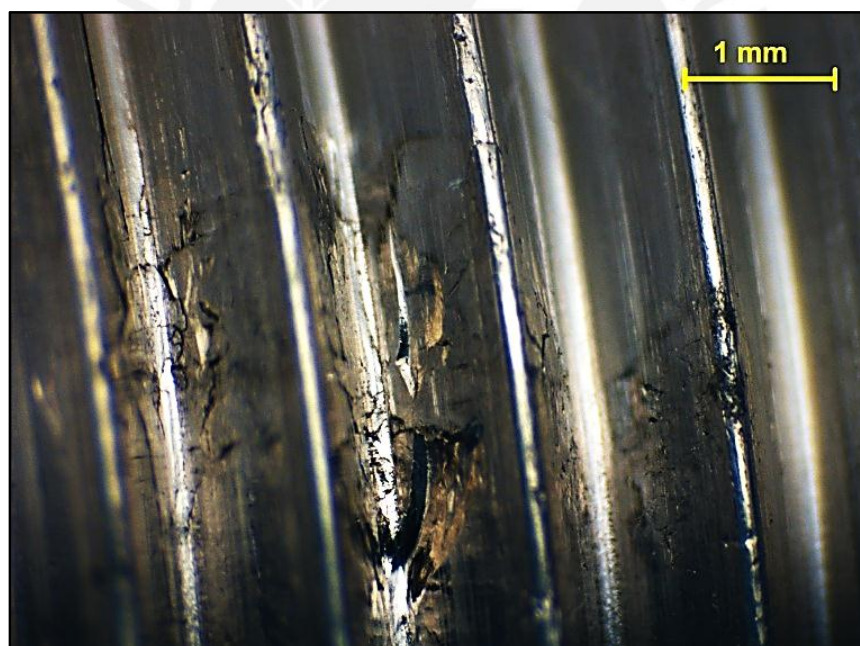


**Gráfico N° 3.6 - Pre y Post Limpieza Perno 2**

En el fondo de los hilos y en las paredes de los mismos se llegan a apreciar grietas ubicadas a lo largo del perno, algunas de ellas cerca al área de fractura. En el Gráfico N° 3.7 se muestran estas grietas. Además de las grietas se encuentran zonas con deformación plástica severa, tanto en el valle como en las cumbres de los hilos, estas lucen como marcas de aplastamiento a partir de las cuales se observa el inicio de algunas grietas. En la Gráfico N° 3.8 se muestran estas marcas encontradas.



**Gráfico N° 3.7 - Grietas y Deformación en los Valles del Perno 2**



**Gráfico N° 3.8 - Grietas y Deformación en el Valle del Perno 2**

Otro tipo de marcas encontradas son las que se muestra en el Gráfico N° 3.9, estas muestran signos de aplastamiento y desprendimiento de material en las paredes de los hilos, iniciando pequeñas grietas.



**Gráfico N° 3.9 - Desprendimiento de Material en una Cara del Hilo (Perno 2)**

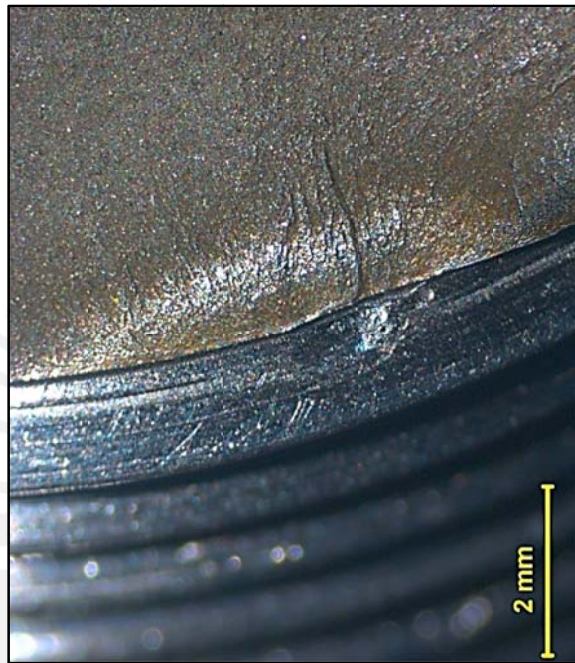
En el Gráfico N° 3.10 se muestra la superficie fracturada. Se aprecian dos zonas lisas, en la marcada con el número (1) se observan marcas de playa que se inician en una quinta parte de la circunferencia de una vuelta de hilo y que avanza hacia el centro. En la zona marcada con el número (2), el inicio se da en un punto localizado, el mismo que se muestra en el Gráfico N° 3.11.



**Gráfico N° 3.10 - Fractografía Perno 2**

Las marcas de playa expuestas son indicadores de fatiga que fue avanzando por dos

planos distintos hasta cubrir en conjunto aproximadamente 70% del área transversal (Gráfico N° 3.12). En la zona central, intercepción de los planos de fatiga, se aprecia la falla final producto de sobrecarga (Gráfico N° 3.13). Del mismo modo en la sección cercana a los hilos se observa fractura frágil por sobrecarga de la sección (Gráfico N° 3.14).



**Gráfico N° 3.11 - Inicio de la Fractura (Perno 2)**



**Gráfico N° 3.12 - Fractografía (Perno 2)**



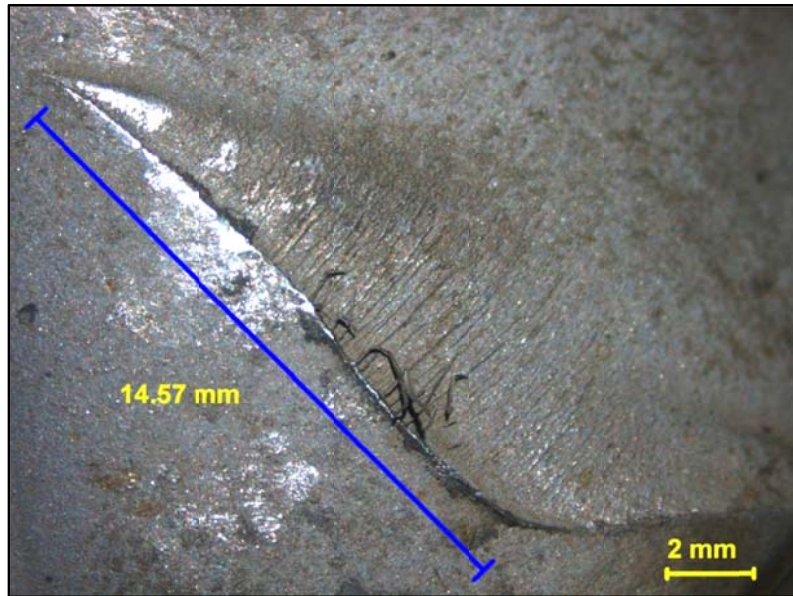


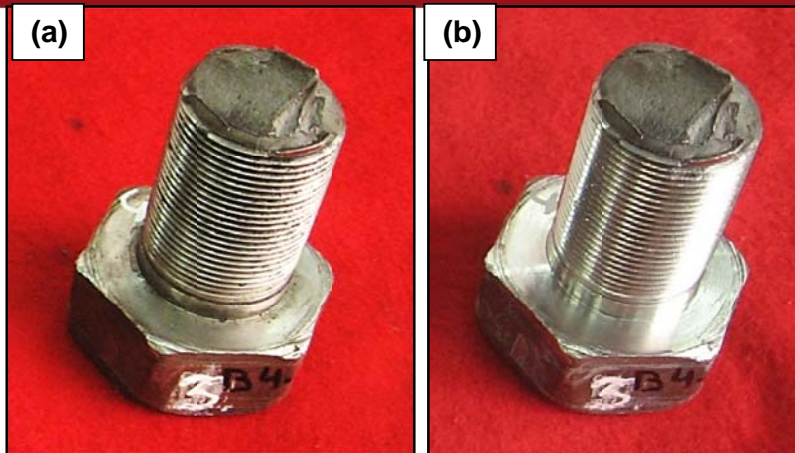
Gráfico N° 3.13 – Intersección de Superficies de Fatiga



Gráfico N° 3.14 - Zona de Ruptura por Sobrecarga (PERNO 2)

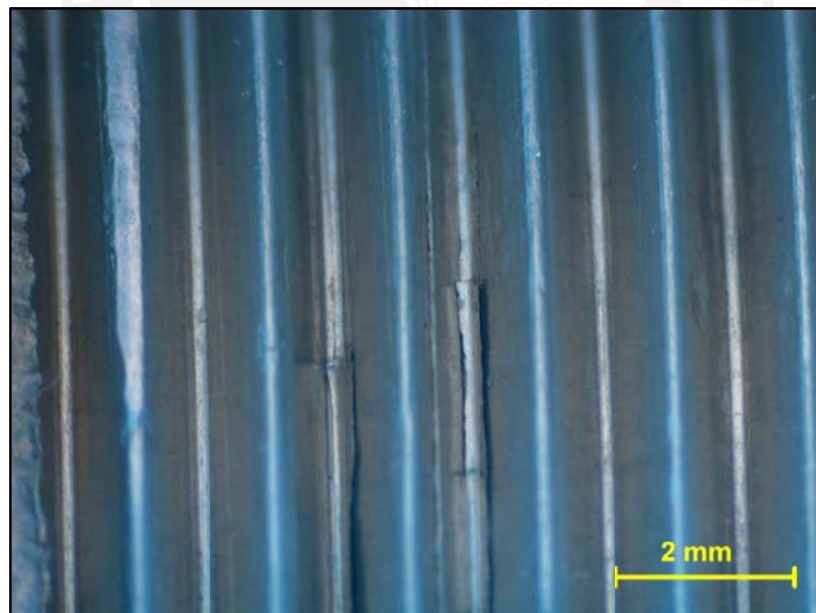
### 5.2. Perno 3

Recibido el perno, se realiza un análisis visual macroscópico. Al igual que para el caso anterior, para identificar la causa real de la falla, se comenzó por un análisis visual a ojo desnudo del perno fracturado, observándose residuos de grasa e impurezas a lo largo de los hilos del tornillo. En el Gráfico N° 3.15 (a) se muestra al perno en las condiciones que se recibieron.



**Gráfico N° 3.15 - Pre y Post Limpieza Perno 3**

Luego de una limpieza superficial con agua y detergente (Ver Gráfico N° 3.15, b), se continúa con la inspección visual. En el fondo de los hilos y en las paredes de los mismos se aprecian bandas de material desprendidas de la superficie, estas están ubicadas a lo largo del perno. En la Gráfico N° 3.16 se muestran las bandas mencionadas.



**Gráfico N° 3.16 - Fisuras y Desprendimiento de Material (Perno 3)**

En el Gráfico N° 3.17 se muestra la superficie fracturada en la cual se observa en casi todo el rededor de la superficie de fractura que el inicio se dio en el fondo del hilo y fue avanzando hacia la zona central. Se ve que esta zona representa un porcentaje bajo

del área transversal, alrededor del 25%.

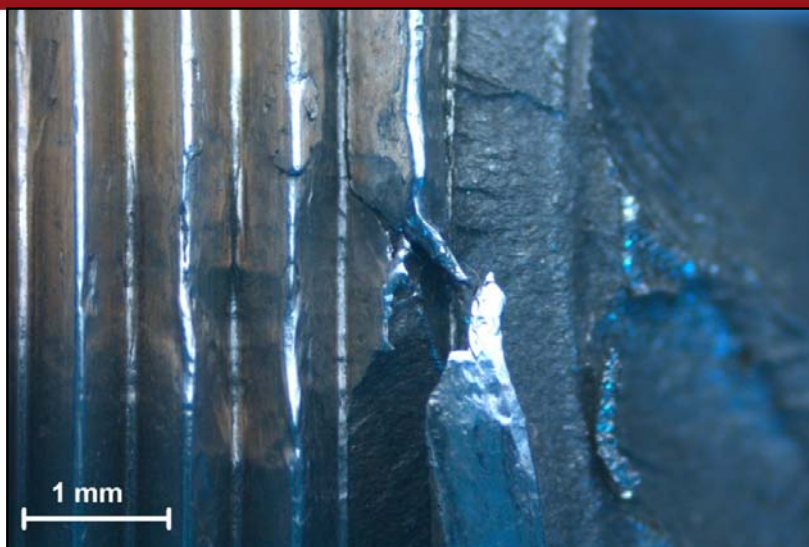


**Gráfico N° 3.17 - Fractografía (Perno 3)**

En el Gráfico N° 3.18 se observa mejor el borde de inicio de la fractura, y en Gráfico N° 3.19 observamos una grieta en un hilo por debajo de la zona de fractura que muestra desprendimiento del material.



**Gráfico N° 3.18 – Borde Inicio de Fractura (Perno 3)**



**Gráfico N° 3.19 - Desprendimiento de Material (Perno 3)**

El Gráfico N° 3.20 muestra un cambio de dirección brusco en la superficie de fractura.



**Gráfico N° 3.20 – Cambio de Dirección de Fractura (Perno 3)**

## 6. PRUEBAS DE LABORATORIO

### 6.1. Composición Química

El análisis químico se realiza por el método de espectroscopia de emisión atómica por chispa en un laboratorio ajeno al de la universidad, el resultado del análisis químico para el perno 2 se muestra en la Tabla N° 13.

Tabla N° 13 - Composición Química (Perno 2)

COMPONENTE	PERNO 2
C	0,051
Mn	0,85
Si	0,53
P	0,037
S	0,004
Ni	7,97
Cr	18,23
Mo	0,39
Cu	0,49

El resultado del análisis químico para el perno 3 se muestra en la Tabla N° 14.

Tabla N° 14 - Composición Química (Perno 3)

COMPONENTE	PERNO 3
C	0,024
Mn	0,74
Si	0,37
P	0,045
S	0,023
Ni	7,87
Cr	18
Mo	0,42
Cu	0,46

## 6.2. Ensayo de Dureza

Para evaluar la dureza en los pernos, se hace un barrido a la mitad del radio ( $R/2$ ) en la sección transversal tomando cuatro puntos. El corte de la sección se hace por debajo de la cabeza del perno y alejado del área de falla.

El resultado del ensayo de dureza para el perno 2 se muestra en la Tabla N° 15.

Tabla N° 15 - Ensayo de Dureza (PERNO 2)

MUESTRA	MEDICION				PROMEDIO
	1	2	3	4	
PERNO 2	185.8 HB	185.8 HB	178.0 HB	181.0 HB	182.7 HB

Del mismo modo, se procedió a realizar el barrido de dureza sobre el perno 3. El resultado del ensayo de dureza se muestra en la Tabla N° 16.

Tabla N° 16 - Ensayo de Dureza (PERNO 3)

MUESTRA	MEDICION				PROMEDIO
	1	2	3	4	
PERNO3	150.0 HB	146.7 HB	146.7 HB	152.5 HB	149.0 HB

### 6.3. Líquidos Penetrantes

Se realiza el ensayo de líquidos penetrantes fluorescentes basándonos en la norma ASTM E1219-94, este método ofrece muy buena visibilidad y sensibilidad a discontinuidades poco profundas.

Con este ensayo se revelan algunas fisuras en el fondo de algunos hilos, en el Gráfico N° 3.21 se observa una pequeña fisura revelada en el perno 3. Se hace un corte longitudinal al perno pasando por la fisura, con lo cual se pueden ver a grandes aumentos la grieta.

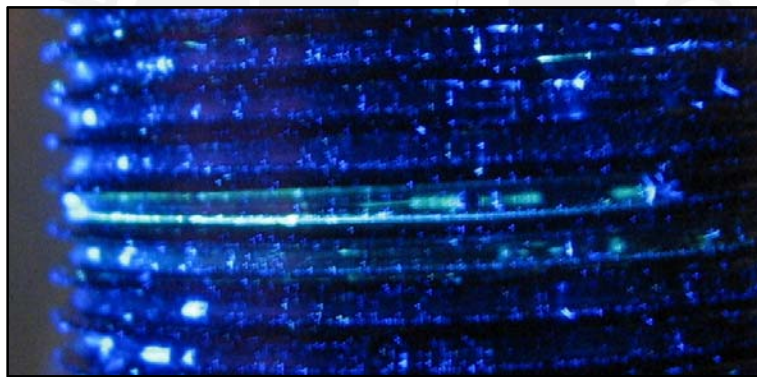


Gráfico N° 3.21 - Fisuras Reveladas por Líquidos Penetrantes (Perno 3)

### 6.4. Metalografías

#### 6.4.1. Perno 2

Se corta una muestra cerca de la región de fractura, la cual se prepara para someterla a un análisis metalográfico. A la probeta se la ataca electroquímicamente con ácido oxálico al 10% (10% de  $H_2C_2O_4$  en agua destilada). Como se muestra en la Gráfico N° 3.22, el material muestra una estructura austenítica con límites de grano gruesos. En el Gráfico N° 3.23 se muestran estos límites a mayor aumento, pudiendo observar la

presencia de carburos.

Sobre la misma muestra se analiza el fondo de los hilos del perno, en los cuales se encuentran pequeñas grietas como se muestra en la Gráfico N° 3.24.

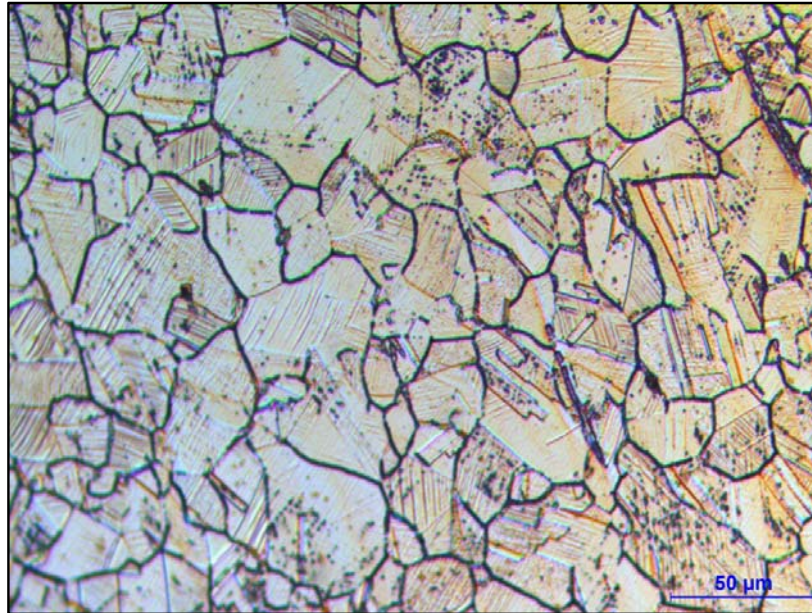


Gráfico N° 3.22 - Límites de Grano Gruesos, 500X (Perno 2)

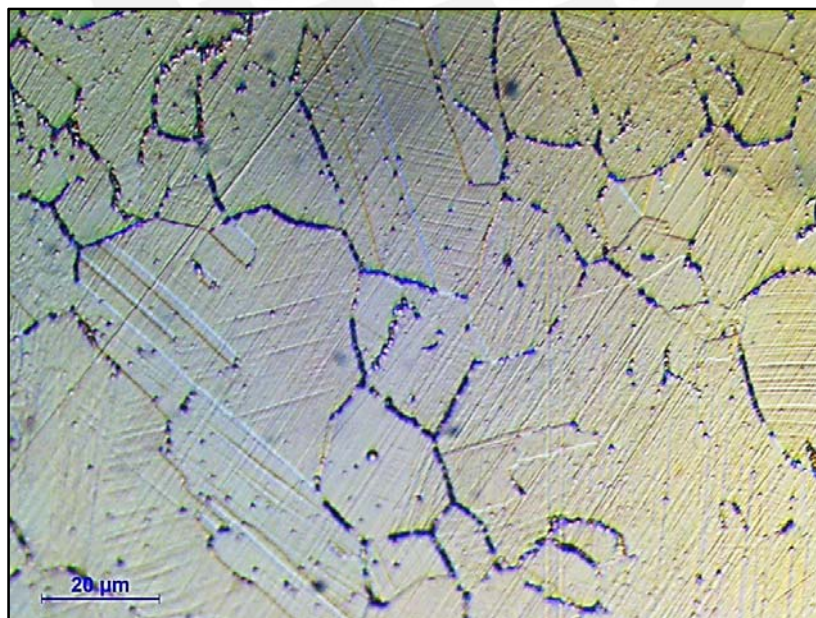
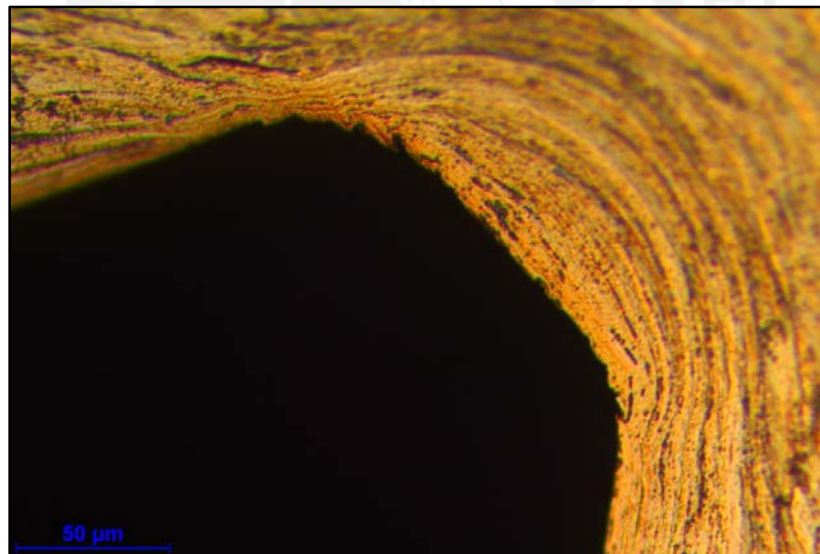


Gráfico N° 3.23 - Presencia de Carburos en los Límites de Grano, 1000X (Perno 2)



**Gráfico N° 3.24 - Grieta en el Hilo (Perno 2)**

El Gráfico N° 3.25 presenta una sección del fondo del hilo donde se desprendió una banda de metal como la que se muestra en el gráfico anterior.



**Gráfico N° 3.25 – Fondo de Hilo (Perno 2)**

En el Gráfico N° 3.26 y Gráfico N° 3.27 se observa corrosión intergranular que se inicia en la superficie de los hilos de los dientes, este patrón está presente a lo largo del perno en varios puntos.



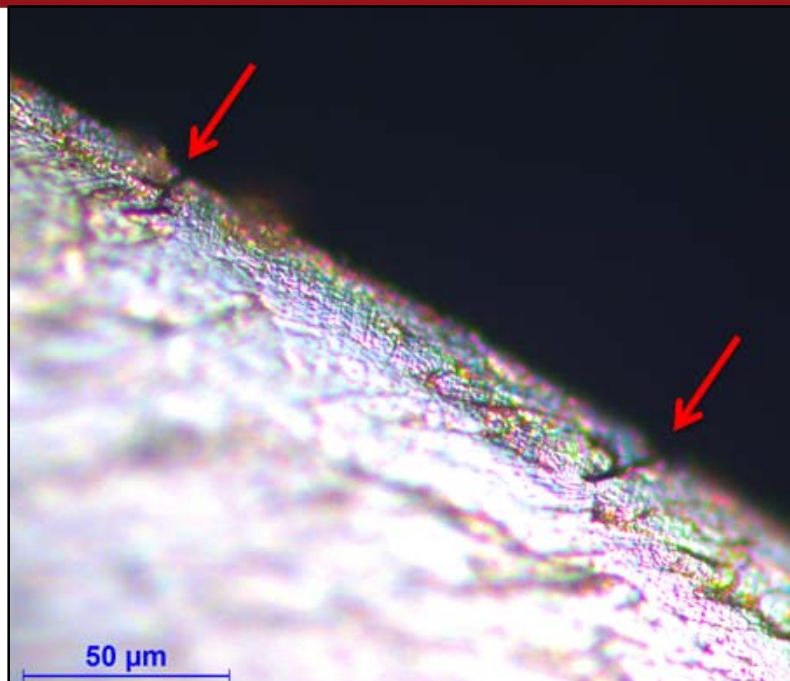


Gráfico N° 3.26 - Inicios de Corrosión en la Superficie de los Hilos (Perno 2)

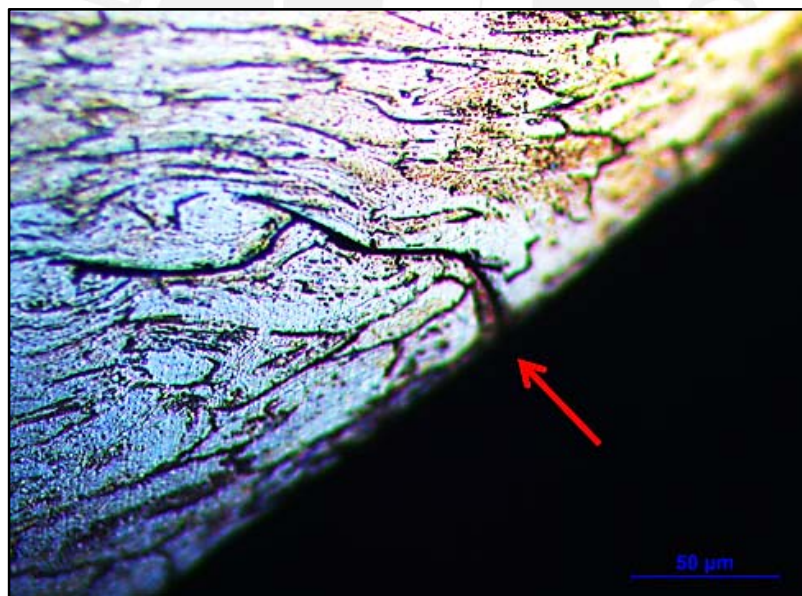


Gráfico N° 3.27 - Inicio de Corrosión en la Superficie de los Hilos (Perno 2)

#### 6.4.2. Perno 3

Del mismo modo para el perno 3, se cortó una muestra cerca de la región de fractura, la cual se preparó para someterla a un análisis metalográfico, a la probeta se la ataco electroquímicamente con ácido oxálico al 10% (10% de  $H_2C_2O_4$  en agua destilada), como se muestra en la Gráfico N° 3.29 y Gráfico N° 3.30, el material mostró una

estructura austenítica.

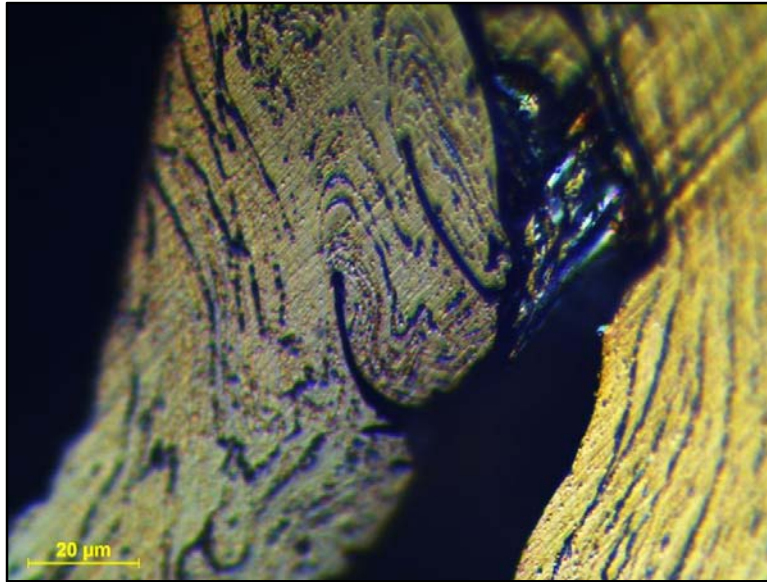


Gráfico N° 3.28 - Corrosión en las Bandas Desprendidas del Material (Perno 2)

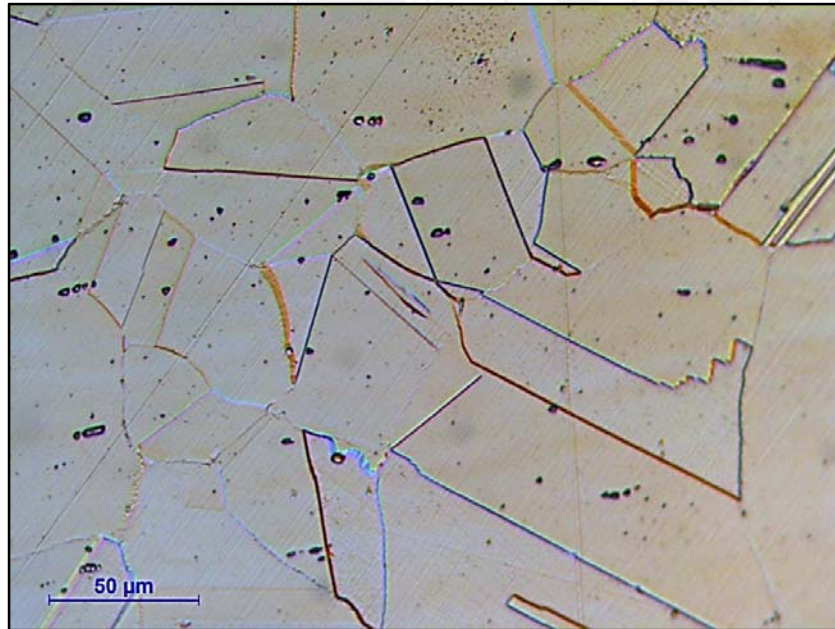
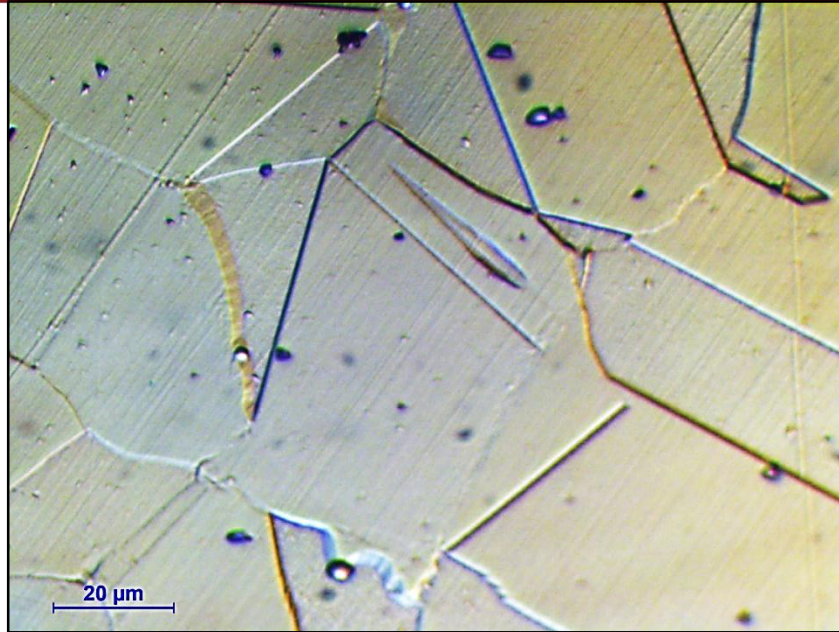
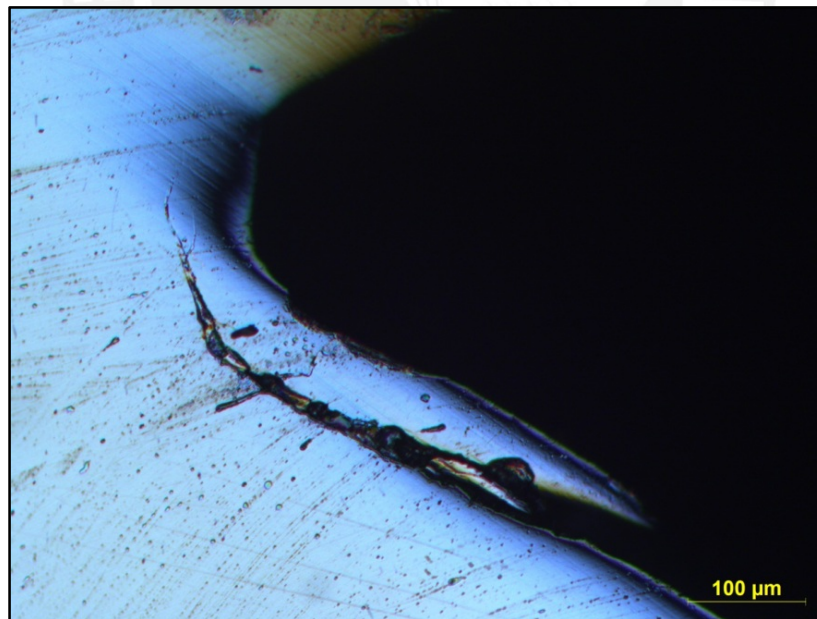


Gráfico N° 3.29 - Micrografía a 500x, Estructura Austenítica (Perno 3)



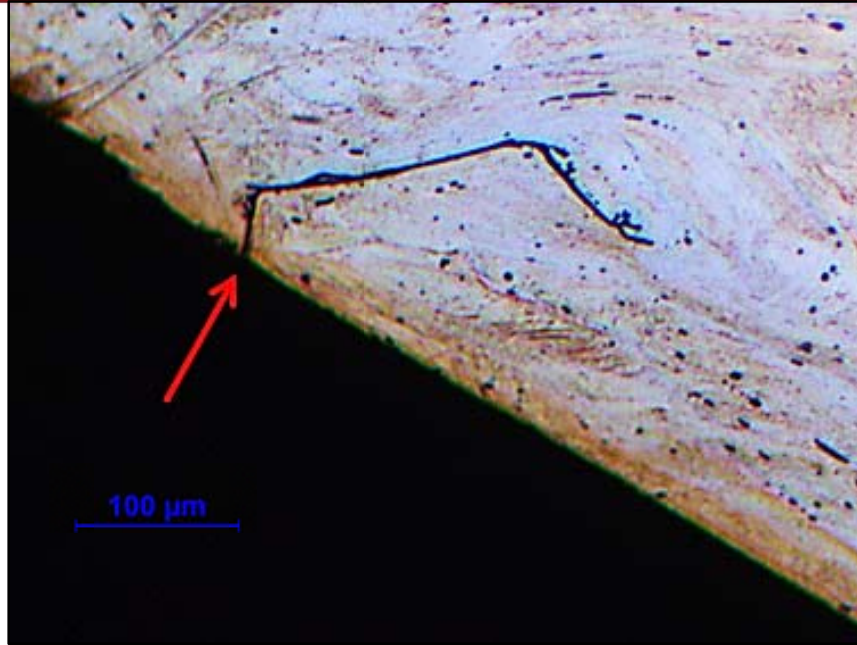
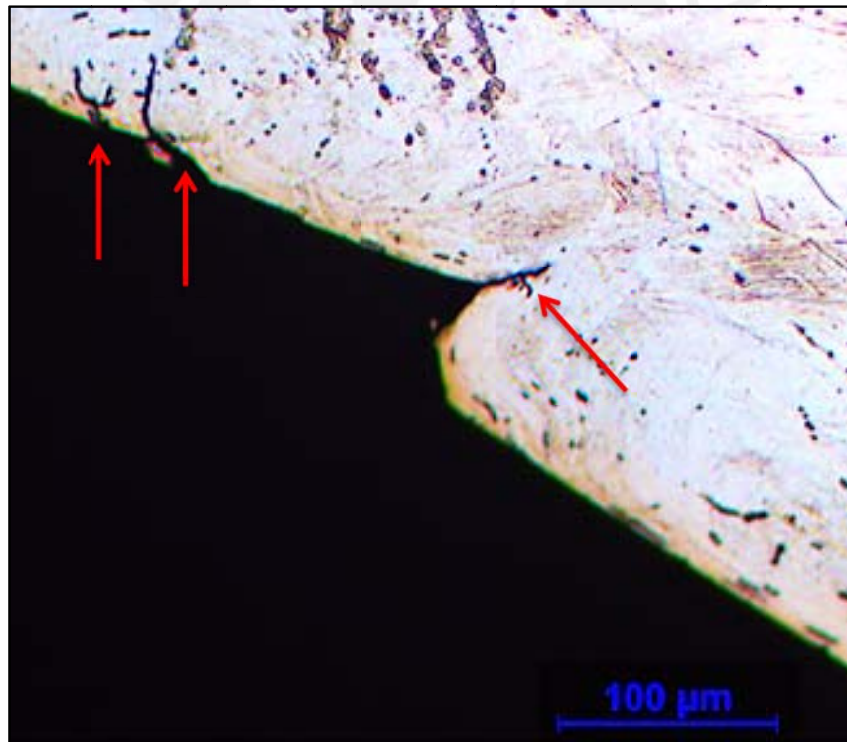
**Gráfico N° 3.30 - Micrografía a 1000X (PERNO 3)**

En un corte longitudinal del perno, se pulió la superficie, pudiendo apreciar en el microscopio una de las fisuras, la imagen se muestra en el Gráfico N° 3.31.



**Gráfico N° 3.31 - Fisura con Inicio en la Pared del Hilo (Perno 3)**

En el Gráfico N° 3.32 y Gráfico N° 3.33 se observa corrosión intergranular que se inicia en la superficie de los hilos.

**Gráfico N° 3.32 – Indicio de Corrosión****Gráfico N° 3.33 - Indicios de Corrosión**

En el Gráfico N° 3.34 y Gráfico N° 3.35 se muestran líneas de material atacado por la corrosión, a un mayor aumento se aprecia un desalineamiento entre las 2 superficies formadas.

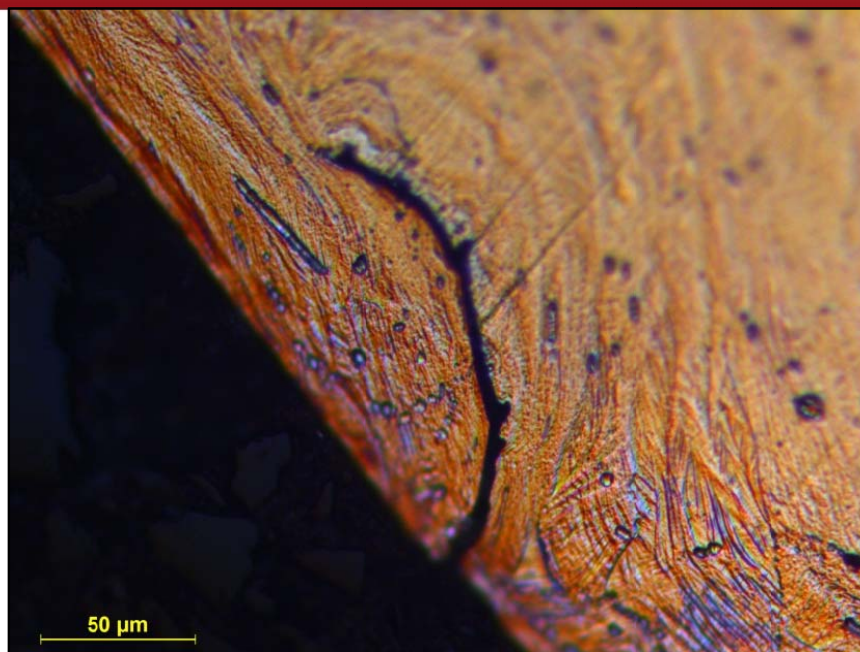


Gráfico N° 3.34 – Inicios de Corrosión en Pared de Hilo

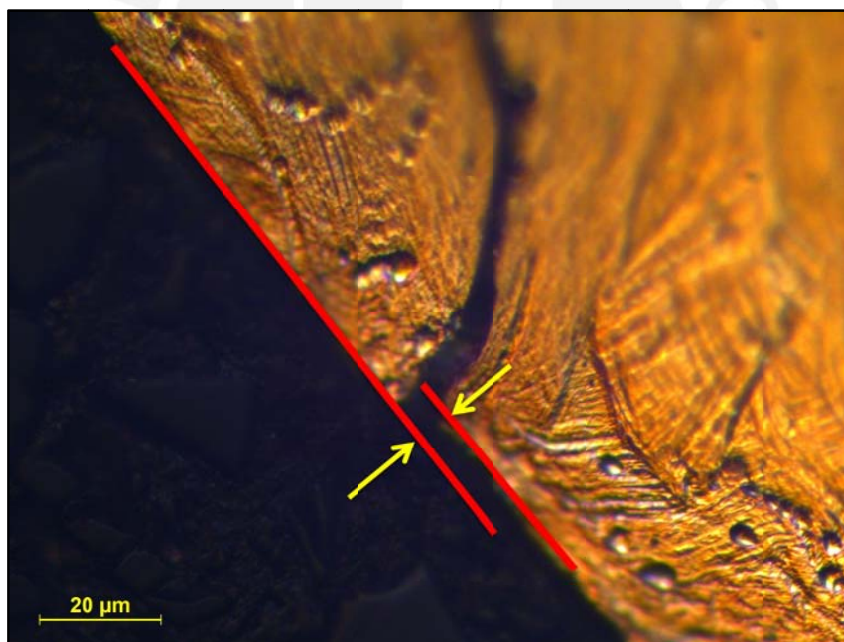


Gráfico N° 3.35 – Desprendimiento de Material a Partir de Corrosión

## Capítulo 4 - Evaluación de Resultados

Los ensayos de laboratorio revelan pistas que nos ayudan a llegar a la causa raíz del problema y decifrar la mecánica de falla de los pernos analizados.

En primer lugar comparamos los componentes del material de los pernos 2 y 3 con los de un AISI 316 declarado por fábrica. En ambos pernos se detecta que el material no corresponde al declarado por fábrica. Al compararlos con el material que se dijo era sustituto del original (Aqualoy 22), observamos nuevamente que la composición química no se ajusta al material. En la Tabla N° 17 se muestra la composición de los materiales en cuestión.

**Tabla N° 17 – Comparación Composición Química**

COMPONENTE	C	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	V
PERNO	2	0.051	0.85	0.53	0.037	0.004	7.97	18.23	0.39	0.49	
	3	0.024	0.74	0.37	0.045	0.023	7.87	18	0.42	0.46	
AISI 316	0.03	2.0	1.0	0.045	0.03	10 - 14	16 - 18	2 - 3			
AQUALOY 22	0.06	4 - 6	1.0	0.04	0.03	11.5 - 13.5	20.5 - 23.5	1.5 - 3		0.2 - 0.4	0.1 - 0.3
304	0.08	2	1	0.045	0.03	8.00-10.50	18.00-20.00				
304L	0.03	2	1	0.045	0.03	8.00-12.00	18.00-20.00				

**Tabla N° 18 – Comparación Durezas**

	DUREZA PROMEDIO (HB)
PERNO 2	183
PERNO 3	149
316	150
AQUALOY 22	302
304	160
304L	160

La evaluación para cada perno se detalla a continuación:

### 6.5. Perno 2

En cuanto al perno 2, su composición química lo ubica en una categoría de acero inoxidable AISI 304, utilizado para ambientes corrosivos leves y no recomendado para contacto directo con un fluido como es el caso nuestro.

En las metalografías practicadas al perno se puede comprobar su microestructura 100% austenítica, sin embargo, se observan límites de grano grueso, tanto en las zonas cercanas a los hilos de los pernos como en lugares más alejados de la superficie. A grandes aumentos podemos observar claros signos de sensibilización del acero por precipitados en los límites de grano. Esta sensibilización ocurre a causa de temperaturas elevadas ya sea en la producción de la materia prima, en la manufactura de los pernos, o en servicio. Con respecto a esta sensibilización del material, el elemento no opera a temperaturas elevadas como para atribuir la sensibilización a condiciones de funcionamiento, tampoco se daría el caso de migración de carbono del elemento donde enroscan los pernos ya que la sensibilización se da tanto cerca a la superficie como en el interior de los pernos. El punto de falla se podría atribuir directamente a las barras que se emplean para la manufactura de los pernos.

En cuanto a la dureza, esta es cercana al valor promedio.

Revisando el ensayo de inspección visual podemos notar que gran parte de la superficie de factura presenta una textura lisa que evidencia falla por fatiga. A mayores aumentos podemos notar pequeñas bandas desprendidas de las paredes de los hilos. Un corte longitudinal al perno que pasa entre algunas de las bandas observadas muestra este desprendimiento de material y las pequeñas irregularidades que deja y que actúan como concentradores de esfuerzos. El análisis metalográfico sobre la misma superficie revela inicios de corrosión intergranular en los bordes de los hilos, esto sumado a los constantes ajustes y desajustes del perno, llegan a iniciar el desprendimiento de pequeñas bandas de material, las cuales ocasionan concentradores de esfuerzos en donde inicia la fatiga.

Los elevados niveles de vibración reportados, junto con el material sensibilizado, elevan en gran medida la velocidad de avance de la grieta generada por fatiga.

La rotura final del perno se da cuando la fatiga avanza hasta un nivel en el cual la

sección remanente ya no es suficiente para soportar la tensión que actúa sobre ella, fallando por sobrecarga.

### 6.6. Perno 3

En cuanto al perno 3, su composición química es similar a la del perno 2, sin embargo su bajo contenido de carbono lo ubica como un acero AISI 304L. Su designación es, al igual que para el perno 2, para ambientes corrosivos leves y no recomendado para contacto directo con un fluido como es el caso nuestro.

En las metalografías practicadas al perno se puede comprobar su microestructura 100% austenítica y sin signos de precipitados de cromo; esta ausencia de precipitados se puede dar gracias a su bajo porcentaje de carbono en su composición química.

La dureza es cercana al valor típico para este material.

En el ensayo visual se aprecia los bordes con una entrada radial de textura lisa que, al igual que el perno 2, evidencia falla por fatiga. A mayores aumentos se aprecian pequeñas bandas desprendidas de las paredes de los hilos y algunos puntos con material desprendido. Un corte longitudinal al perno que pasa entre algunas de las bandas observadas muestra este desprendimiento de material y las pequeñas irregularidades que deja y que actúan como concentradores de esfuerzos. El análisis metalográfico sobre la misma superficie revela leves inicios de corrosión intergranular en los bordes de los hilos, esto sumado a los constantes ajustes y desajustes del perno, llegan a iniciar el desprendimiento de pequeñas bandas de material, las cuales ocasionan concentradores de esfuerzos en donde inicia la fatiga.

Los elevados niveles de vibración reportados, elevan la velocidad de avance de la grieta generada por fatiga.

La rotura final se da del mismo modo que para el perno 2, cediendo por sobrecarga.



## CONCLUSIONES

### 1. TIPO DE FALLA

A partir de la evidencia presentada se concluye que el mecanismo de falla en los dos casos es fatiga.

### 2. CAUSA RAÍZ

1. Pequeños concentradores de esfuerzos originados por desprendimiento de material inician la grieta de fatiga.
2. El desprendimiento de material inicia en conjunto por corrosión intergranular y ajustes y desajustes reiteradas de los pernos a causa de mantenimiento general de los equipos.
3. En el caso del perno 2, un acelerador de la mecánica de falla es la corrosión intergranular que presenta.
4. Para ambos pernos, la causa raíz del problema es el empleo de un material que difiere del especificado por fábrica y que posee propiedades que no se ajustan a la aplicación. El acero AISI 304 posee baja resistencia a la corrosión en comparación al AISI 316. Su empleo en un ambiente corrosivo bajo cargas estáticas y vibración, establecen las condiciones que originan el inicio de la falla acelerada.

## OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

### 1. OBSERVACIONES

1. Según lo referido por el personal encargado del área de mantenimiento, el ajuste de los pernos se hace sin instrumentación adecuada, por lo que no se tiene un control de la carga de ajuste que se le da a los pernos, ésta según catálogo debe de ser de 300 Nm (KSB: 56). De sobre ajustar estos pernos, la carga de trabajo acelerara el mecanismo de fatiga, además de poder ser el causante de las deformaciones plásticas que se encontraron.
2. El constante mantenimiento del equipo y la constante remoción del perno, lo expone a sufrir reiteradamente la deformación de sus superficie, siendo estas deformaciones un iniciador más de las grietas que son muy fuertes concentradores de esfuerzos e iniciadores de la fatiga del elemento.
3. Al estar en medio de una falla reiterada con un coste de mantenimiento elevado, a partir del presenta análisis de falla se pueden implementar acciones inmediatas que detengan o reduzcan el número de paradas por mantenimiento reactivo a causa de roturas de pernos de los bombas KSB RPH que operan en el interior de la mina.

### 2. RECOMENDACIONES

1. Asegurar que los pernos utilizados sean del material establecido por el fabricante (Acero inoxidable AISI 316), ya que el material base de los pernos que fallaron en servicio no tienen la suficiente resistencia a la corrosión para trabajar en un medio corrosivo. Se recomienda trabajar con el material establecido y no con otro.
2. La responsabilidad de la sensibilización del material y del uso de un material distinto al especificado es responsabilidad del proveedor del cual se compraron los pernos y/o material para maquinarlos. Ponerlo al tanto del problema para que pueda corregirlo.

3. Se recomienda implementar las herramientas necesarias para ajustar correctamente los pernos a la hora del ensamble y así evitar sobrecargas en estos, ya que se estaría acelerando el proceso de fatiga de los pernos.
4. Como solución temporal o de emergencia, se sugiere no reutilizar estos pernos luego de ser removidos a causa de mantenimiento de otros elementos, en cambio, remplazarlos por un perno nuevo desechando el anterior. Con esto aunque no solucionamos la causa raíz del problema, intercedemos en el periodo de fatiga del elemento evitando que llegue al punto de rotura. Teniendo los tiempos de falla bien identificados se podría realizar un plan de mantenimiento más adecuado, optimizando el uso de los recursos.



## Bibliografía

- ACERIND S.C.  
s/a "Parte II - Para el Ingeniero de Materiales". Soldadura de los aceros inoxidables. P. 21. Consulta: 29 de junio de 2012. <<http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox2.pdf>>
- ASTM E165-02  
2002 Método de Ensayo Normalizado para el Examen por Líquidos Penetrantes. 2002.
- ASTM E3-11  
2002 Preparation of Metallographic Specimens. 2002.
- BERNASCONI, E.,  
2007. "5W + H en el concepto de Análisis de Fallas". Artículo. Consulta: 18 de junio de 2012.  
<<http://analizandofallas.blogspot.com/2007/05/5w-h-en-el-concepto-de-analisis-de.html>>
- F606M-11  
2011 Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, and Rivets (Metric). Junio de 2011.
- INTERNATIONAL, A.  
2002 ASM Metal Handbook, Volumen 11 – Failure Analysis and Prevention. Tercera edición. Estados Unidos de América: International, A., pp. 18-19  
1989 ASM Metal Handbook, Volumen 10 - Material Characterization. Tercera edición. Estados Unidos de América: International, A.  
1987 ASM Metal Handbook, Volumen 12 – Fractography. Tercera edición. Estados Unidos de América: International, A., pp. 857, 216.
- KSB  
s/a Installation/Operating Manual. Brasil: KSB.
- RODRIGUEZ, A.  
2010 "Consideraciones sobre el crecimiento de la grieta por fatiga en materiales de ingeniería". monografias.com. Martes 22 de junio de 2010. Artículo. Consulta: 23 de mayo de 2012.  
<<http://www.monografias.com/trabajos82/crecimiento-grieta-fatiga-materiales-ingenieria/crecimiento-grieta-fatiga-materiales-ingenieria.shtml>>
- SINAIS,  
s/a "Vibración mecánica. - evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas". Artículo. Consulta: 15 de mayo de 2012.  
<<http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/normativa/iso10816.html>>

- WULPI, D.  
(1977). Understanding How Components Fail. Estados Unidos: ASM International.
- SCHWEITZER, P. A.  
2006 Fundamentals of Metallic Corrosion. Segunda Edición. Estados Unidos.

