



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Implementación del método de análisis de falla a rodamiento de doble rodillo a rotula

Fabián Zacipa Pinilla

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de ingeniería y ciencias básicas
Bogotá D.C., Colombia
2018

Implementación del método de análisis de falla a rodamiento de doble rodillo a rotula

Fabián Zacipa Pinilla

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:
Magister en Ingeniería Mecánica – Ing. Jorge Armando Villalba

Línea de investigación
Análisis de propiedades en materiales de ingeniería

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de ingeniería y ciencias básicas
Bogotá D.C., Colombia
2018

Dedicatoria

A mis padres y mi esposa Mónica quienes siempre me apoyaron durante mi etapa académica, y especialmente a mi hijo Mattias, quien es la persona más importante en mi vida y me motiva día a día.

Proyecto de grado aprobado por la Facultad de Ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de: Ingeniero Mecánico.

Magister en Ingeniería Mecánica.
Ing. Jorge Armando Villalba Vidales.

Director de Proyecto de grado.

Ingeniero.
Jurado 1.

Ingeniero.
Jurado 2.

Lista de figuras

1-1:	Distribución de fallas en el tiempo [3].	3
1-2:	Análisis de falla y su función en el diseño mecánico [1].	4
3-1:	Piezas (dúctil derecha y frágil izquierda) sometidas a sobre carga por tensión. [11]	12
3-2:	Piezas (dúctil derecha y frágil izquierda) sometidas a sobre carga por torsión. [11]	13
3-3:	Piezas (dúctil derecha y frágil izquierda) sometidas a sobre carga por cizallamiento [11].	14
3-4:	Fatiga típica en eje de carga uniforme de único origen por flexión unidireccional a tensiones bajas y altas.	15
3-5:	Fatiga típica en eje de carga uniforme de único origen por flexión inversa en tensiones moderada y severa [11].	16
3-6:	Ilustración esquemática de las marcas inducidas por fatiga en un eje rotativo con carga uniforme a tensiones moderadas y severas. La rotación de eje está en sentido de las manecillas del reloj [11].	17
3-7:	Superficie de un diente engranaje fallido por fatiga de contacto [11].	17
3-8:	Corrosión uniforme en bridas y pernos [13].	19
3-9:	Pitting [14].	20
3-10:	Representación esquemática de fatiga por corrosión [11].	22
3-11:	Objetivos en el análisis de falla [3].	23
3-12:	Dispositivos de mano amplificación visual.	27
3-13:	Principio de la prueba Rockwell [23].	29
3-14:	Rodamiento de doble rodillo a rotula.	32
3-15:	Dimensiones de doble rodillo a rotula [27].	33
3-16:	Tabla dimensiones de doble rodillo a rotula [27].	33
3-17:	Compactador DYNAPAC CA 250 [28].	34
3-18:	Sistema del lado de vibración del cartucho del tambor de compactador DYNAPAC CA 250. [28]	34
4-1:	Primer corte transversal anillo exterior rodamiento.	36
4-2:	Segundo corte transversal anillo exterior rodamiento.	36
4-3:	Rodamiento doble rodillo a rotula.	37
4-4:	Superficie fractura rodamiento.	38
4-5:	Banco de lijado muestra de rodamiento.	39

4-6:	Metallographic Lapping/Polishing Machine.....	39
4-7:	Muestra de rodamiento superficie pulida.....	39
4-8:	Microscopio metalográfico invertido OLYMPUS GX 41F.....	40
4-9:	Puntos aproximados de observación muestra.....	41
4-10:	Estructura de la superficie de falla.....	41
4-11:	Durómetro y resultado de su calibración.	42
4-12:	Indentaciones en distintos puntos de la muestra.	42
4-13:	Cronograma actividades análisis de falla rodamiento de doble rodillo a rotula.	43
5-1:	Fractura forzada en rodamiento de bolas por ajuste excesivo.	44
5-2:	Clasificación de falla rodamientos ISO 15243.....	45
5-3:	Fractura forzada anillo exterior rodamiento.	45

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo un análisis de falla a un rodamiento de doble rodillo a rotula perteneciente a un rolo compactador Dynapac CA250, el cual presentó una falla durante su funcionamiento. Se realizaron pruebas de inspección visual, metalografía y dureza con el fin de identificar las características de la falla presentes en el elemento. A partir del análisis de los resultados obtenidos se dictaminó la posible causa de la fractura y se impartirán recomendaciones precisas para evitar sucesos similares.

Palabras clave: (Análisis de falla, inspección visual, dureza, metalografía)

Abstract

This work was carried out an analysis of the failure of a roller double roller bearing belonging to a roller compactor Dynapac CA250, which presented a fault during its operation. Tests of visual inspection, metallography and hardness were carried out in order to identify the characteristics of the fault present in the element. From the analysis of the results obtained, the possible cause of the fracture was dictated and precise recommendations will be given to avoid similar events.

Keywords: (Failure analysis, visual inspection, hardness, metallography)

Contenido

Resumen	XI
1. Introducción	2
2. Objetivos	5
2.1. Objetivo General.....	5
2.2. Objetivos Específicos	5
3. Fundamentos – Análisis de falla	6
3.1. Definición de falla	6
3.2. Causas de falla	6
3.3. Tipos de falla	11
3.4. Análisis de falla	23
3.5. Metodología del análisis de falla	24
3.6. Antecedentes análisis de falla Fundación Universitaria Los Libertadores	30
3.7. Rodamiento de doble rodillo a rotula	31
4. Metodología análisis de falla a rodamiento de doble rodillo a rotula	35
4.1. Cronograma de actividades análisis de falla.....	43
4.2. Obtención de muestras.....	35
4.3. Inspección visual.....	37
4.4. Tratamiento de la muestra (pulido).....	38
4.5. Prueba Metalográfica	40
4.6. Ensayo de dureza	42
5. Análisis de falla	44
6. Conclusiones	46
7. Recomendaciones	47
Bibliografía	48

1. Introducción

Todos los elementos mecánicos de la industria son propensos a presentar fallas, debido a que las condiciones reales de funcionamiento, manufactura y/o propiedades de los componentes de los materiales, no se comportan de la misma manera en los cuales fueron diseñados [1]. Lo que puede ocasionar eventos indeseados como: paradas no programadas, disputas legales, mala imagen corporativa, pérdidas económicas y en situaciones catastróficas lesiones temporales o permanentes o pérdidas humanas. Para prevenir la recurrencia de esta problemática, es necesario llevar a cabo pruebas técnicas a las piezas y/o elementos mecánicos, que permitan identificar las posibles causas de la falla para tomar medidas correctivas que minimicen las probabilidades de falla. Además, de ser necesarios, los análisis de falla son utilizados en procesos de reclamación de garantías y seguros, fines comerciales, desarrollo de materiales y mejoramiento de propiedades de los existentes [2].

En la cadena de desarrollo de un producto en ingeniería, de la cual hacen parte sus etapas de diseño, fabricación y funcionamiento, se presentan todo tipos de fallas estudiados hasta el momento, sin excepción. Un análisis de falla exitoso consiste en identificar el punto más débil de la cadena y proponer medidas correctivas ante tales situaciones. El estudio se recomienda realizarse con un equipo multidisciplinario que involucre, en lo posible, la mayoría de las ciencias que permitan una retroalimentación a las demás áreas y lleven a determinar la posible causa de la falla [1, 2].

Por otra parte la administración de la vida útil de un sistema, estructura o componente, agrega mayores costos en temas de investigación, diseño, materiales, fabricación y de mantenimiento. Se debe comprender que las fallas de un producto no pueden ser evitadas en su totalidad, sino que deben entenderse, prevenirse y controlarse. En algunas situaciones, el cliente puede preferir una vida útil corta a un costo más económico, en otros casos, se escoge un producto planificado cuidadosamente gestionado con rutinas de mantenimiento, que pueden alargar su vida útil [3].

Cuando se analiza la distribución típica de la falla de un producto determinado respecto al tiempo, es de suma importancia observar los patrones de falla. Las fallas prematuras están asociadas a problemas en la manufactura, de control de calidad o tensiones iniciales, mientras tanto, las fallas relacionadas con la vida útil están relacionadas con el tiempo, por

último, las fallas por desgaste son debidas a su funcionamiento, las cuales son normales y se encuentran entre lo estimado. La intención del análisis de falla es la reducción del periodo de fallas prematuras, de esta forma aumentar el tiempo de vida útil del elemento [3].

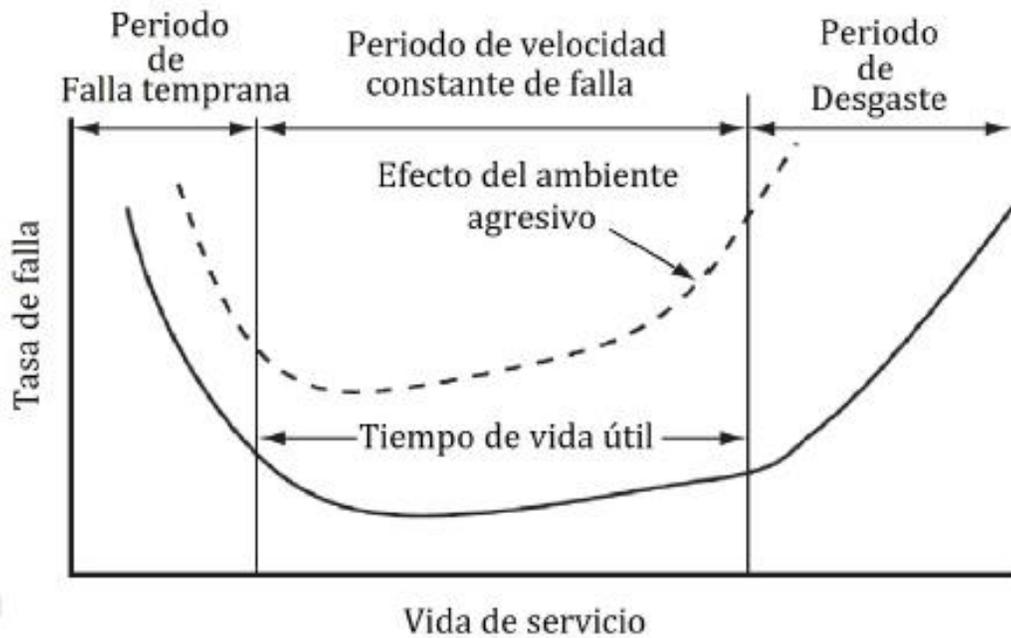


Figura 1-1: Distribución de fallas en el tiempo [3].

Para finalizar se debe tener en consideración el papel que tiene el análisis de falla en el diseño mecánico, aunque en la mayoría de los casos un elemento individual es el que sufre la falla, una maquina está integrada por decenas, cientos o miles de piezas individuales. Lo cual implica que en un ensamble de una máquina, se ponga a prueba la operación y el mantenimiento de sistemas y sub-sistemas en conjunto [1].

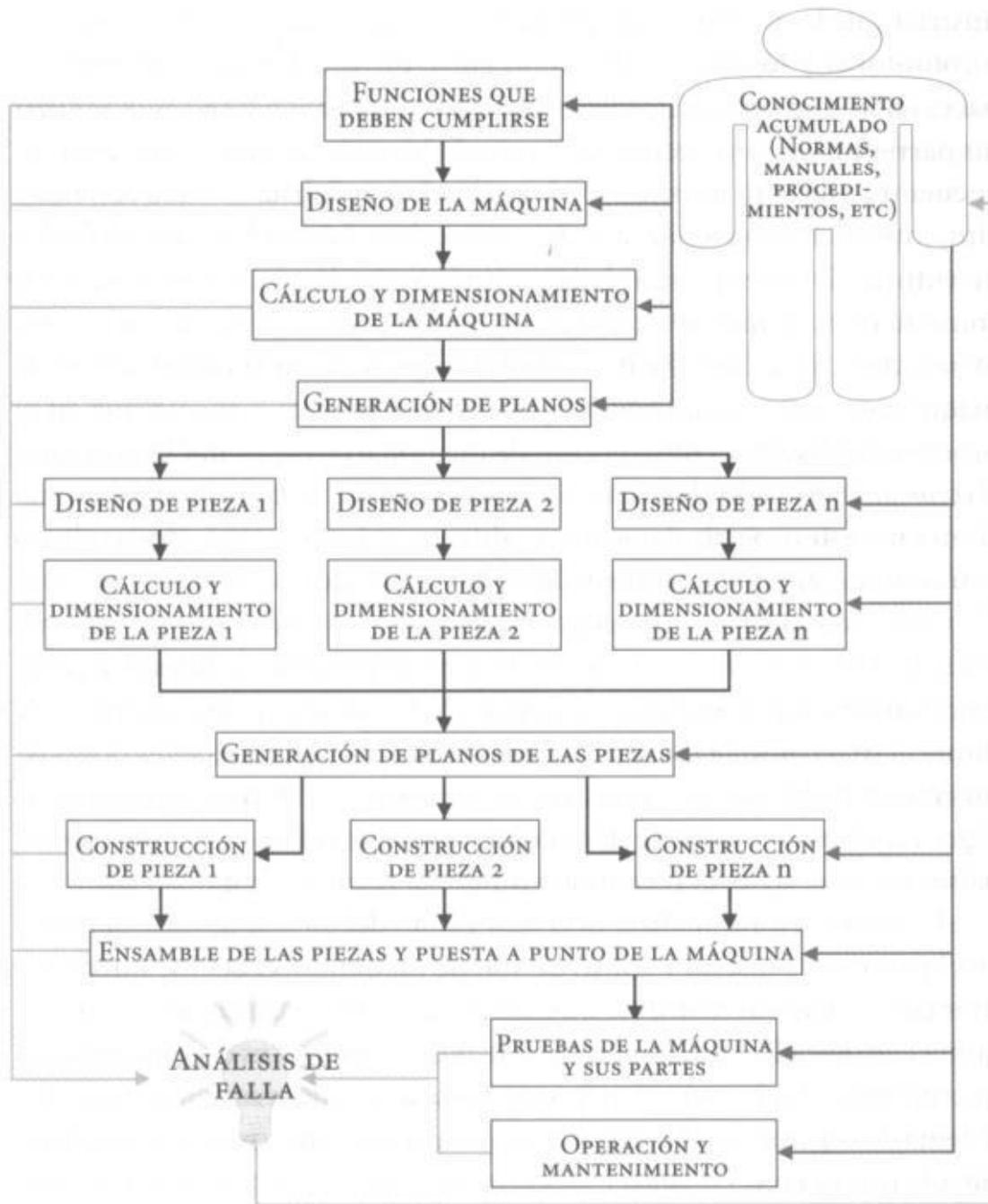


Figura 1-2: Análisis de falla y su función en el diseño mecánico [1].

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Elaborar un análisis de falla al rodamiento de doble rodillo a rotula que presentó fractura durante su funcionamiento.

2.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar pruebas de inspección visual, análisis metalográfico y dureza bajo las normas internacionales ASTM al rodamiento de doble rodillo a rotula.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de las pruebas de inspección visual, metalografía y dureza respecto a las especificaciones del material por parte del fabricante del rodamiento de doble rodillo a rotula.
- Determinar y concluir las posibles causas que originaron la fractura en el rodamiento de doble rodillo a rotula según el análisis de los resultados de las pruebas realizadas.

3. Fundamentos – Análisis de falla

3.1. Definición de falla

En un concepto general de la palabra, una falla es un evento o condición no deseable. En el ámbito relacionado con el análisis de fallas, se refiere, cuando a un componente no puede desarrollar sus funciones adecuadamente en términos económicos, de seguridad y de fiabilidad para los cuales fueron diseñados [3, 4, 5]. La falla se puede definir a partir de varios niveles diferentes, iniciando por la más simple en el cual un sistema o componente que no realiza correctamente su función prevista. Un ejemplo a esta condición es un motor a reacción, que solo produce un empuje parcial, lo cual no permitiría el despegue de una aeronave [3]. El nivel siguiente de falla considera un sistema o componente que realiza su función en forma insegura o no confiable [3]. En este punto, el sistema o componente ha sufrido la pérdida de su vida útil. Por ejemplo, un cable de un elevador, cuando en algunos de sus cables individuales presenta fracturas de fatiga debido a irregularidades en el recubrimiento de su polea. Este ha perdido su vida útil aunque el cable continúe funcionando, ya que se considera una condición no segura del desarrollo de su función [3]. Por último, el siguiente nivel es un sistema o componente inoperable, un ejemplo a este nivel es la fractura del eje de una bomba, causando que el impulsor se trunque, impidiendo en su totalidad el desarrollo del trabajo del sistema [3, 6].

3.2. Causas de falla

Las etapas que proceden a la falla final son: falla incipiente, daño incipiente, estrés, deterioro y finalmente daño. Lo cual hace que el elemento y/o sistema no sea seguro para un uso continuo. Las clasificaciones más relevantes de las causas de la falla son [7]:

- Deficiencias de diseño.
- Defectos de materiales.
- Deficiencias de fabricación e instalación.
- Condiciones de servicio no deseadas y operación incorrecta.
- Deficiencias de mantenimiento.

3.2.1. Deficiencias de diseño

Son características inaceptables de un producto o sistema debido al proceso de diseño, que abarca el desarrollo del concepto original, definición de la configuración y el diseño detallado. El proceso incluye la selección y especificación de los materiales y métodos de fabricación.

En la etapa del diseño se identifica y se define la necesidad a satisfacer, además de los requisitos de rendimiento, las condiciones anticipadas de servicio en las funciones a desempeñar, limitaciones del diseño y las consecuencias de una falla [3, 8]. Algunas posibles causas de una falla por deficiencias de diseño se listan a continuación:

- Elección incorrecta de materiales, que no satisfagan las propiedades mecánicas adecuadas para la aplicación como: resistencia, resistencia a la fatiga, tenacidad a la temperatura elevada, así mismo las características los materiales anisótropos que no sean tenidas en cuenta en el desarrollo de los productos son fallas de diseño [3].
- Las fallas causadas por la geometría comprometen las capacidades del elemento y/o sistema, como la preparación inadecuadas de juntas de soldadura o soldadura fuerte. ranuras faltantes o alivio insuficiente en soldadura de embonado. Además también puede presentarse grosores insuficientes en la secciones de rendimiento bruto [3].

3.2.2. Defectos de materiales

Las discontinuidades o imperfecciones en los materiales son inaceptables, y algunos tipos de estas condiciones pueden ser generalmente perjudiciales para el rendimiento o la apariencia de un producto y/o sistema. Algunos tipos de discontinuidades comunes en materiales que se han identificado como factores causantes de falla son [3]:

- Piezas forjadas:
 - Vueltas.
 - Explosiones.
 - Copos.
 - Segregación.
 - Contracción de cavidad.
 - Tubo central.

- Línea de partición del flujo de grano.
- Inclusiones.
- Piezas fundidas:
 - Porosidad, gas y micro encogimiento.
 - Contracción de la cavidad.
 - Segregación.
 - Cierres fríos.
 - Inclusiones.
- Placa y hoja:
 - Agrietamiento de los bordes.
 - Laminaciones.
 - Escamas.
- Extrusiones y productos dibujados:
 - Agrietamiento de los bordes.
 - Costuras.
 - Pasos.
 - Estallidos centrales.

3.2.3. Deficiencias de fabricación e instalación

La fabricación de un producto se realiza bajo materia prima y documentación técnica, por lo general, la manufactura se realiza en fabrica y su instalación en sitio. Los productos pueden terminar siendo defectuosos debido al material suministrado durante su proceso de fabricación [3]. Existe una gran variedad de defectos causados por la fabricación y montaje, ya que intervienen muchas variables que al no ser controladas pueden derivar en imperfecciones [8].

A continuación se muestran algunos ejemplos de anomalías de fabricación e instalación más comunes [9, 10]:

- Procesos de eliminación de metal:
 - Grietas debido a un mecanizado agresivo
 - Daño micro estructural debido a una herramienta externa.

- Quemadura de molienda.
- Agrietamiento de capa de refundición de mecanizado por descarga eléctrica.
- Ataque intergranular de mecanizado electroquímico.
- Agrietamiento por tensión residual debido al sobre calentamiento.
- Procesos de metalurgia
 - Agrietamiento, roturas o estrechamiento debido al proceso empleado en su manufactura.
 - Vueltas debido a la rosca/giro.
 - Marcas de herramientas y arañazos de formación.
 - Roturas superficiales debido a la preparación deficiente de la superficie antes de trabajar.
 - Agrietamiento por tensión residual debido a la formación de flujo.
 - Líneas de Luders debido a la formación de velocidad de deformación
 - Daño micro estructural debido a cizallamiento, cegamiento o perforación.
 - Agrietamiento por corrosión bajo tensión debido al uso de lubricantes inadecuados.
- Tratamiento térmico
 - Crecimiento del grano.
 - Transformación de fase incompleta.
 - Descarburación.
 - Martensita no templada.
 - Fricción por temple y condiciones similares de fragilidad.
 - Perdida de propiedades debido al sobrecalentamiento durante el horneado posterior al recubrimiento.
- Soldadura
 - Falta de fusión.
 - Agrietamiento frágil en la zona por el calor (HAZ).
 - Sensibilizado (ZAZ).

- Agrietamiento por estrés residual.
- Inclusiones de escoria.
- Agrietamiento en caliente.
- Fragilidad del hidrogeno debido a condiciones de humedad.
- Fricción de metal liquido por contaminación de placas.
- Agrietamiento a bajas temperaturas de exposición.
- Limpieza/Acabado
 - Corrosión debido a una limpieza inadecuada antes de pintar.
 - Ataque intergranular a fragilidad por hidrogeno debido a limpieza con ácido.
 - Fragilidad del hidrogeno debido a la formación de placas.
- Montaje en fabrica/Instalación en el sitio
 - Desalineación.
 - Piezas faltantes y/o incorrectas.
 - Ajuste inadecuado.
 - Sistema de sujeción inapropiado.
 - Herramientas incorrectas.
 - Preparación inadecuada de la superficie.

3.2.4. Condición de servicios no deseados y operación incorrecta

La vida útil de un elemento y/o sistema depende de las condiciones bajo las cuales el producto opera en servicio. La operación del equipo fuera de los parámetros de diseño del fabricante podría ocasionar un mal desempeño en las funciones a cumplir en piezas, maquinas o sistemas. El personal responsable del manejo de los equipos debe estar capacitado y contar con experiencia en dichas funciones, algunas de las posibles causas de fallo a causa de condiciones de servicio no deseadas son [3]:

- Lubricación y limpieza inadecuada
- Vibraciones
- Temperatura
- Operadores mal entrenados
- No cumplir las condiciones recomendadas por fabricantes:

- Sobre carga
- Tiempo de funcionamiento excesivo

3.2.5. Deficiencias de mantenimiento

Las fallas causadas por errores en mantenimiento son los problemas más comunes en cualquier tipo de industria. A raíz de esto, el sector de la aviación de los Estados Unidos a mediados de los años 80 implemento la metodología de RCM (Mantenimiento basado en confiabilidad), la cual plantea lineamientos para el desarrollo y mejora de la calidad de los mantenimientos, que garanticen la disminución de las fallas, paradas no programadas de producción y disminución en los tiempos de mantenimiento. Cuando no se aplican metodologías de mantenimiento a los equipos, lo más probable es que presente algunas de estas causas de fallo [3]:

- Choque:
 - Térmico.
 - Mecánico.
 - Puesta en marcha incorrecta.
- Lubricación:
 - Suciedad en el aceite.
 - Lubricante incorrecto.
 - Agua en el lubricante.
 - Falta de aceite.
 - Filtración inadecuada.
- Reemplazo de piezas incorrectas.
- Inspección incorrecta.

3.3. Tipos de falla

Es de gran importancia en el proceso del análisis de fallas, además de la identificación de los tipos de fractura y sus principales características, una correcta interpretación de los resultados obtenidos de a partir de las pruebas realizadas a estos. Una mala lectura podría incurrir en conclusiones no acertadas sobre el elemento o el sistema estudiado. Varios tipos de fallas que comúnmente ocurren con los posibles modos son listados a continuación [3, 11]:

3.3.1. Fallas por sobre carga

Cuando un componente o un sistema fallan debido a una sola aplicación de carga superior que su límite de resistencia, se denomina una falla por sobrecarga [3]. Puede presentarse de tipo dúctil, frágil o una combinación de los dos, dependiendo del tipo de material, su geometría, velocidad y tipo de carga y las condiciones de temperatura. La ductilidad de la pieza disminuye al aumentar la dureza del material mediante un tratamiento térmico o trabajo en frío, presencia de un concentrador de esfuerzos (porosidades, rasguños, micro grietas, agujeros), disminución considerable de la temperatura. Las fracturas frágiles carecen de la zona plástica, presenta ruptura de forma súbita con una superficie brillante en la zona de corte [3, 11].

- Tensión:** En la Figura 3-1, se observa el comportamiento de un material dúctil y frágil sometido a una sobrecarga de tensión. En el material dúctil se identifica la zona plástica mediante la reducción en su geometría (diámetro), antes de su fractura a 45 grados. Mientras que la pieza frágil no presenta dicha característica y su ruptura se presenta a 0 grados [3, 11]

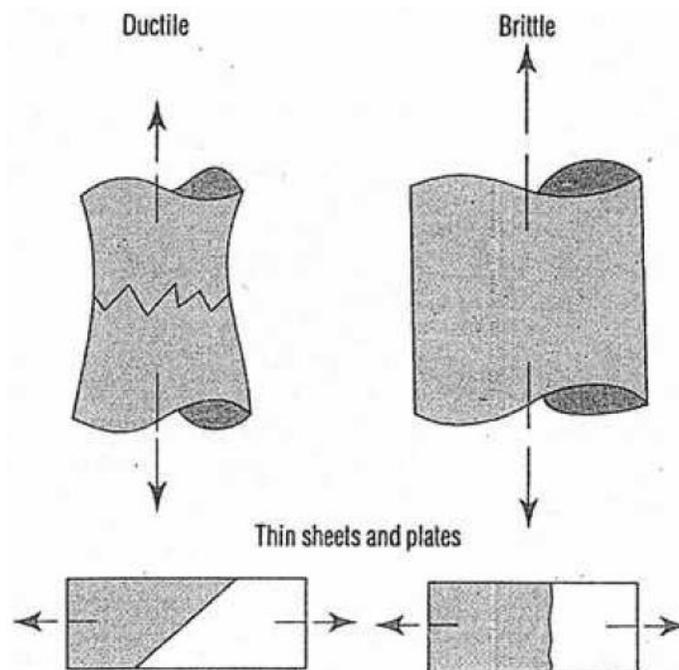


Figura 3-1: Piezas (dúctil derecha y frágil izquierda) sometidas a sobrecarga por tensión. [11]

- Torsión:** En la Figura 3-2, muestra el comportamiento de un material dúctil y frágil, sometidos a una sobrecarga de torsión. Se identifica como el material

dúctil sufre una fractura usualmente perpendicular a la dirección del esfuerzo máximo. En el material frágil presenta fractura a 45 grados de la dirección del esfuerzo máximo [3, 11].

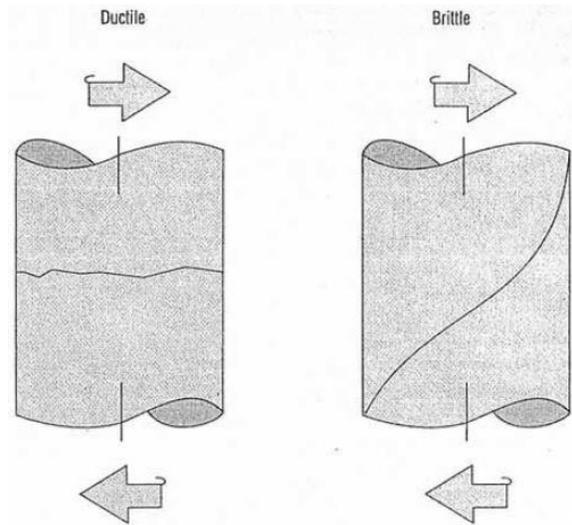


Figura 3-2: Piezas (dúctil derecha y frágil izquierda) sometidas a sobre carga por torsión. [11]

- **Flexión:** Las características de los materiales dúctiles y frágiles que sometidos a sobre carga por flexión, son similares a las presentadas por sobrecarga por tensión. Además de esto, los materiales dúctiles muestran regiones de cara plana, perpendiculares a la dirección de esfuerzo normal principal y dirección de corte a 45° del mismo [3, 11].
- **Cizallamiento:** Las principales características presentes en un material dúctil sometido a una sobrecarga por cizallamiento son: Una deformación adyacente a la fractura en el eje axial, la presencia de círculos alargados parabólicamente detectados en un barrido microscópico electrónico Por último, zonas de medias lunas brillantes en la zona del inicio de la fractura. Un material frágil no presenta deformaciones o desplazamientos en el eje central Figura 3-3 [3, 11].

3.3.2. Fallas por fatiga

La fatiga es el cambio en la estructura de un material de forma progresiva, localizada y permanente, que experimenta al ser sometido a cargas repetitivas o fluctuantes menores que el límite elástico del mismo. Esta situación puede terminar en grietas o la ruptura del material después de un número suficiente de fluctuaciones. Para que se dé lugar el fenómeno de la fatiga se deben presentar una acción simultánea entre el esfuerzo cíclico, el esfuerzo

de tensión y el límite plástico. Si alguno de las anteriores condiciones no se hace presente, la grieta de la fatiga no iniciaría [3, 4, 11].

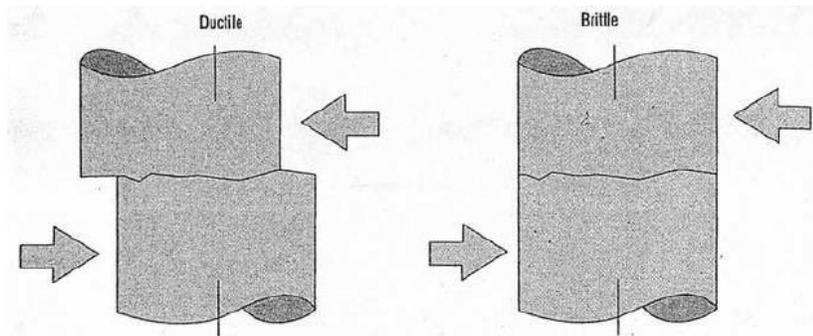


Figura 3-3: Piezas (dúctil derecha y frágil izquierda) sometidas a sobre carga por cizallamiento [11].

El proceso de falla por fatiga se puede dividir en cinco etapas [4]:

- Deformación plástica antes de la formación de micro grietas.
- Iniciación de micro grietas
- Propagación o crecimiento de micro grietas hasta convertirse en macro grietas.
- Propagación o crecimiento de macro grietas.
- Falla final

En la falla por fatiga en un material sin presencia de grietas inicialmente, inicia por la formación de micro grietas, posteriormente, se combinan o crecen hasta convertirse en macro grietas que se propagan hasta producir la fractura en el material. La falla se origina en zonas puntuales como lo son concentradores de esfuerzos, agujeros del material, cambios de tamaño bruscos en la sección transversal o defectos de la manufactura [11].

- **Fatiga por flexión:** la fatiga puede ser resultado de una combinación de tres tipos de cargas de flexión: unidireccional, bidireccional y rotativa. Cuando un elemento de geometría cilíndrica, como un eje, es sometido a un esfuerzo de flexión, su superficie convexa experimenta el componente de tracción, mientras que su parte cóncava es sometida a compresión [4, 11].
- **Fatiga por flexión unidireccional:** Las marcas descritas como huellas de playa, propias de una grieta de fatiga, muestran un punto de origen, Figura 3-4 (a). La zona de la fractura final más grande en la figura (b), indica una falla por fatiga

en mayor esfuerzo nominal. Sin embargo, la grieta por la que se presenta la falla por fatiga parece originarse por la fusión de varias microgrietas individuales Figura 3-4 (c). Por su parte, la Figura 3-4 (d, e y f), muestran las marcas de playas típicas, baja una carga moderada de tensión en un eje cargado uniformemente [3, 4].

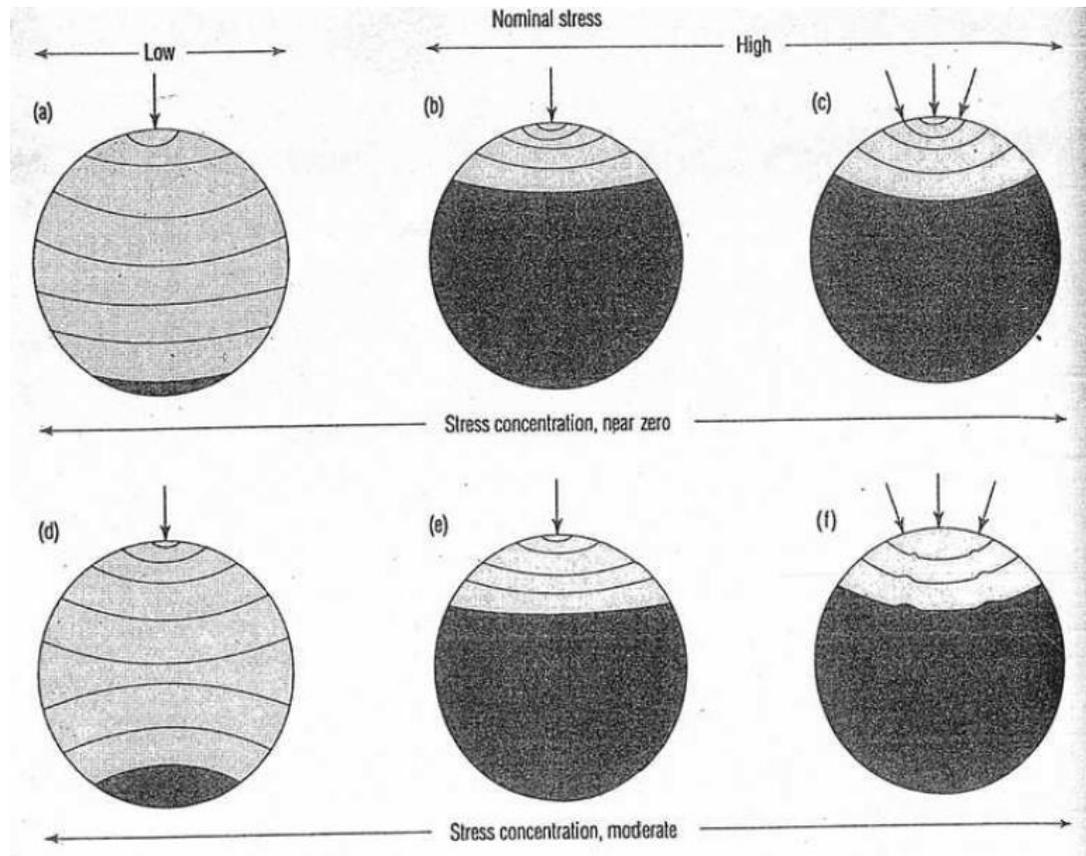


Figura 3-4: Fatiga típica en eje de carga uniforme de único origen por flexión unidireccional a tensiones bajas y altas.

- Fatiga por flexión inversa:** Si el momento flector aplicado sobre un elemento se invierte y conserva su magnitud en cualquier dirección. Dos grietas de similar longitud se formarán idénticamente en lados opuestos de origen a su geometría, y generalmente, en el mismo plano transversal. Sin embargo, las grietas diferirán en su longitud si la flexión a la que es sometida es mayor en una dirección que en la otra. La Figura 3-5 muestra las marcas típicas de un eje no giratorio con carga uniforme sometido a tensiones de flexión inversa. La marca en la Figura 3-5 (a) es generalmente un eje de diámetro único sin concentrador de esfuerzos, lo cual indica un momento de flexión igual en ambas direcciones. La Figura 3-5 (b) muestra las marcas de playa debido a un concentrador de esfuerzos moderado por tensión debido a un filete de radio grande en un cambio de diámetro del eje. Finalmente, la Figura 3-5 (c), indica la marca característica de un concentrador de esfuerzos de tensión severo por un filete de radio pequeño en un cambio del diámetro del eje [3, 4, 11].

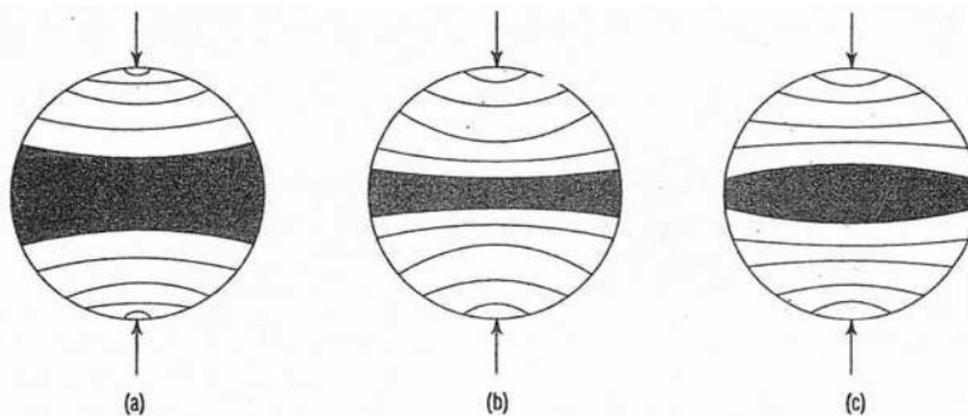


Figura 3-5: Fatiga típica en eje de carga uniforme de único origen por flexión inversa en tensiones moderada y severa [11].

- Fatiga por flexión rotativa:** A diferencia de un eje estacionario, donde el esfuerzo a tensión se enfoca a una parte de la periferia, un eje giratorio mantiene un esfuerzo a tensión en cada punto de la periferia, de tal modo, que la grieta de inicio de fatiga puede iniciarse en cualquier punto de esta Figura 3-6 (b y d). La grieta frontal que tiende a extenderse en una dirección opuesta a la de rotación, por lo general, oscila a 15° o más Figura 3-6 (a y c) [3, 4, 11].
- Fatiga por contacto:** Este tipo de falla se observa generalmente partes que involucre rodamientos y deslizamientos entre si bajo una alta presión de contacto y carga cíclica. El continuo sometimiento de tensiones cíclicas sobre o cerca de la superficie de contacto durante la operación da como resultado un deterioro

gradual del material por daños que conducen a la iniciación y propagación de grietas por fatiga. En algunos casos se alcanza a observar en las superficies de contacto pulidas antes del desprendimiento Figura 3-7 [3, 4, 11].

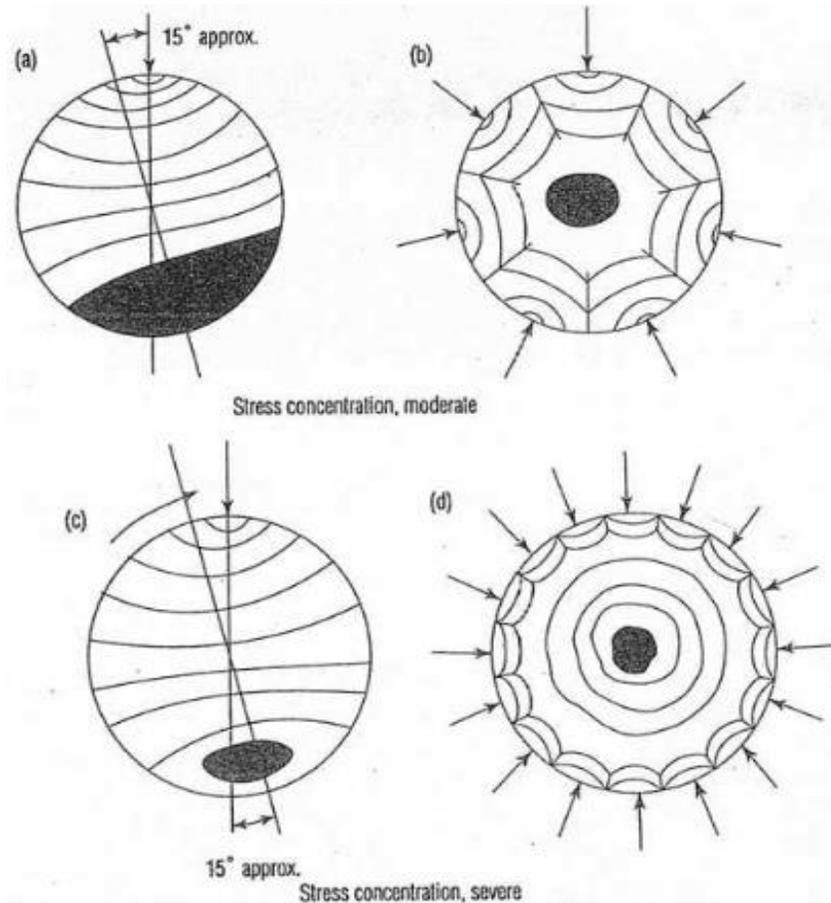


Figura 3-6: Ilustración esquemática de las marcas inducidas por fatiga en un eje rotativo con carga uniforme a tensiones moderadas y severas. La rotación de eje está en sentido de las manecillas del reloj [11].

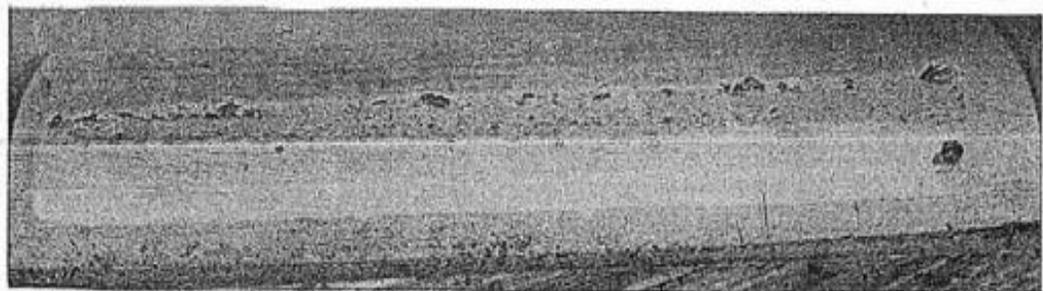


Figura 3-7: Superficie de un diente engranaje fallido por fatiga de contacto [11].

- **Fatiga por torsión:** las grietas de fatiga resultantes por esfuerzos de torsión tienen las mismas características que las producidas por los esfuerzos de flexión (marcas de playa), Un eje sometido a esfuerzos de torsión, los esfuerzos de tensión locales máximas están a 45° con respecto al eje del elemento. Bajo una carga fluctuante, la grieta por fatiga puede desarrollarse de manera normal a las tensiones de tracción. En caso de torsión invertida, puede presentar conjunto de grietas de fatigas perpendiculares entre sí. [3, 4, 11]
- **Fatiga por Brinelling:** Las fallas de fatiga producidas por Brinelling, son comúnmente identificadas en casos de un cojinete estacionario o en un componente de motor bajo presión excesiva o carga de impacto. Las deformaciones son permanentes, como lo son los huecos y abolladuras causados por el flujo plástico del metal y se identifican como las incrustaciones correspondientes al espaciado de las bolas en un rodamiento de bolas. Estas características diferencian al Brinelling a las vibraciones u oscilaciones o abolladuras realizadas por desechos que están repartidas aleatoriamente [11]
- **Fatiga térmica:** Es el resultado de ciclos térmicos repetitivos que generan unos gradientes de tensión repetidos en un componente libre, o ciclos de tensión dentro de un componente restringido a dimensiones fijas. La característica principal de la fractura por fatiga térmica es el agrietamiento superficial formado por múltiples sitios de inicio de grietas que se unen mediante el deslizamiento del borde para formar una grieta principal. Además de esto, las fracturas son planas y transversales sin deformación plástica visible. las superficies fracturas oxidadas y las grietas llenas de óxido son características de la fatiga térmica [11].

3.3.3. Fallas por corrosión

Por definición, es la degradación a desgaste de algún material por causa de una actividad química o electroquímica que implica una pérdida de material. Existen varios tipos de corrosión, cada tipo se clasifica por apariencia externa o propiedades físicas modificadas. Generalmente, la mayoría de las formas de corrosión se producen por un mecanismo electroquímico [7, 11, 12]. La corrosión convierte el metal en un compuesto metálico como oxido, hidróxido o sulfato implicando dos cambios químicos: anódico y catódico. Sin embargo, ni la pérdida de peso ni los productos característicos del metal base por causa de la corrosión pueden estar necesariamente presentes en las fallas asistidas por la corrosión [3, 11, 12].

- **Uniforme:** Es un ataque uniforme a la superficie del metal química y estructuralmente homogénea, resultante del contacto de electrolitos fuertemente ácidos o alcalinos y condiciones ambientales húmedas. Esto produce una decoloración por la película de óxido, en una superficie pulida produce un depósito de polvo en la superficie. La corrosión uniforme se mide por la disminución del grosor del material Figura 3-8, generalmente medido en milímetros por año (mpy).



Figura 3-8: Corrosión uniforme en bridas y pernos [13]

- **Pitting:** Es la forma más común de la corrosión, es el resultado de una acción química o galvánica, generalmente toma la forma de cavidades en la superficie. Se puede presentar en cualquier sistema de metal, pero se observa mayormente en aleaciones de aluminio (Al) y magnesio (Mg). Primero las picaduras se presentan como un depósito blanco localizado sobre aluminio, al pulir la superficie se revelan pequeños hoyos [11].

Las picaduras se forman cuando un área de una superficie metálica se vuelve anódica con respecto a la superficie Figura 3-9, o con cambios altamente localizados en contacto con el metal. Generalmente, comienza en sitios de discontinuidad localizada, inclusión, límite de grano o con cualquier otra irregularidad en la superficie. Las causas de las picaduras se deben principalmente a la falta de homogeneidad en la superficie del metal, a la pérdida de pasividad local, la rotura mecánica o química en la capa protectora de óxido y a la corrosión galvánica [11, 12].

- **Parting/Dezincification:** Es un tipo especial de corrosión. Ocurre cuando uno a más componentes reactivos de la aleación se corroen de forma selectiva, dejando un residuo poroso atrás. La dezincification es una parte del proceso de corrosión

que ataca las aleaciones de contienen zinc, corroyendo este ultimo de manera preferencial. Característicamente este tipo de corrosión, además de su naturaleza porosa, es que no sufre ningún daño aparente. Sin embargo, la resistencia a la tracción y la ductilidad de la aleación se reducirán drásticamente [11, 12].



Figura 3-9: Pitting corrosión [14]

- **Corrosión filiforme:** Se encuentra comúnmente en un ambiente de alta humedad, oxígeno e iones corrosivos. El lugar de mayor presencia es alrededor de los sujetadores, en las articulaciones o en las roturas de las capas de recubrimiento. La corrosión filiforme implica solo corrosión superficial leve sin daños estructurales [11].
- **Corrosión intergranular:** Es la disolución preferente en las zonas adyacentes al límite del grano, con un ataque leve o insignificante sobre el cuerpo principal del grano. El ataque es producido por la diferencia de potencial entre la zona límite de grano y los cuerpos de limítrofes. Esta situación se mejora con la segregación de elementos o compuestos específicos, o el mejoramiento de uno de los elementos de la aleación en las áreas límite del grano [15]. Cuando la grieta es severa, ocurre la falla baja carga residual o aplicada, debido a la pérdida de resistencia y ductilidad [11].

- **Corrosión bajo tensión:** Es el resultado de dos situaciones que actúan simultáneamente, la tensión de tracción residual y aplicada y la acción química por un ambiente corrosivo. Esta corrosión se manifiesta por una grieta en el metal no necesariamente acompañada por corrosión. Dicha grieta difiere enormemente de las características del agrietamiento de un metal expuesto a cualquiera de los dos. El tiempo de desarrollo de la grieta de corrosión por tensión, depende de diversos factores como la composición del material, fabricación, tipo e intensidad del entorno corrosivo y la magnitud de esfuerzo al que es sometido. Se produce con frecuencia en materiales con aleaciones de aluminio y de magnesio, así como en aceros [3].
- **Corrosión-fatiga por fricción:** La generación de óxido entre dos superficies rugosas en contacto sometidas a carga con un movimiento oscilatorio. El frotamiento entre los elementos elimina la capa protectora de la superficie metálica, las pequeñas partículas liberadas se oxidan convirtiéndose en abrasivos que conducen a la corrosión por pitting por fricción [4, 11, 12]. La fricción destruye la precisión dimensional de las piezas ajustadas y disminuye la resistencia a la fatiga en materiales que trabajan bajo ciclos de carga, cuando la falla por fatiga se produce por estas circunstancias, se denomina fricción por fatiga [11, 16].
- **Fatiga por corrosión:** Se debe a la combinación de la corrosión y la carga cíclica en las partes metálicas, esto implica la formación de extrusiones e intrusiones en la superficie, deteriorando o destruyendo por completo la capa protectora superficial en esos puntos y dando lugar al ataque electroquímico. Estos puntos actúan como microgrietas produciendo la fractura por fatiga bajo la influencia de la reacción química directa. La resistencia a la fatiga puede reducirse en un 50% en condiciones de ambiente húmedo o corrosivo en ambiente seco. El proceso de fatiga por corrosión comprende dos etapas, en la primera, la acción combinada de corrosión y tensiones cíclicas deterioran el metal hasta iniciar una fisura. La segunda etapa se desarrolla el proceso de fatiga, la cual, la propagación de grietas se acelera por la corrosión y hasta presentar la fractura en la Figura 3-10 se observa una superficie de metal picada y las grietas en el fondo del material [11].
- **Fragilidad del hidrogeno:** Es un proceso de falla que resulta de la presencia o absorción de cantidades excesivas de hidrogeno en los metales, comúnmente en combinación con tensiones de tracción residuales o aplicadas. Generalmente ocurre en aceros de baja aleación tratados térmicamente a 180,000 psi.

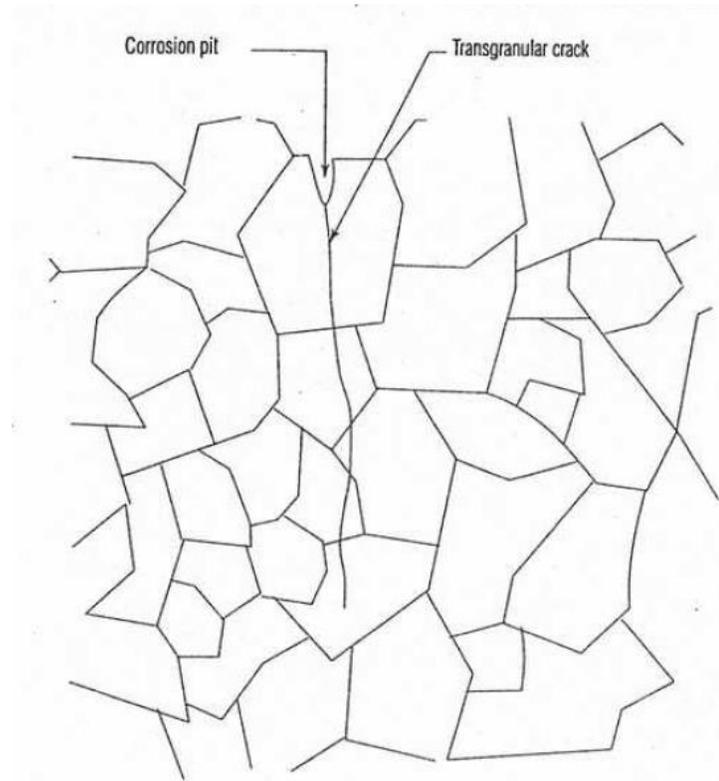


Figura 3-10: Representación esquemática de fatiga por corrosión [11].

3.3.4. Fallas por fluencia a altas temperaturas

Esta falla se presenta en metales o aleación a temperaturas mayores a la de recristalización, cuando está sometido a esfuerzos aplicados. La deformación es progresiva, lo cual puede ocasionar cambios lo suficientemente grandes en las dimensiones del componente hasta que este pierda su funcionalidad. La tensión de fluencia puede ocasionar fractura, conocida como fractura por estrés [11].

3.3.5. Fallas por desgaste

Esta falla es el daño a una superficie sólida causado por la eliminación o desplazamiento de material de superficie por acción mecánica de un sólido, lubricante en contacto, líquido o gas. A diferencia de la fatiga y la corrosión es menos crítico, depende del grado de desgaste que puede ser por cambio de carga, velocidad o condición ambiental, generalmente se dividen en cinco categorías [3, 11]:

- Abrasivos
- Adhesivos
- Erosivo

- Corrosivo
- Erosión-Corrosión

3.4. Análisis de falla

El análisis de falla es el proceso que se realiza con el fin de determinar las causas que han llevado a una pérdida de funcionalidad no deseada en un elemento y/o sistema. Para dicho proceso, una falla no debe ser vista como un evento único aislado en un componente físico, ensamblaje o estructura, es más útil ver la falla a múltiples niveles, los cuales puedan ser estudiados desde varios puntos útiles. Como ejemplo a lo anterior, si una pieza falla en su valor de dureza, puede involucrarse errores humanos en el endurecido incorrecto, estas circunstancias son difíciles de determinarlas en la fabricación [3, 7]. Los niveles específicos de fallas han sido definidos por *Failsafe Network* de la siguiente manera:

- Físico
- Humano
- Latente
- Raíz

3.4.1. Objetivos del análisis de falla

El objetivo principal del análisis de fallas es evitar una recurrencia de la misma. Sin embargo, hay otros tipos de intereses en los proyectos del análisis de falla. Por ejemplo, una demanda por lesiones se quiere demostrar la responsabilidad de un evento no deseado figura 3-11. Existen otros casos que puede que nunca haya una responsabilidad en las fallas ocurridas. Otro caso en el cual el objetivo de la investigación no es la prevención de repeticiones de falla, si esta es una falla muy leve en un componente de bajo valor. Si no hay presencia de un fallo en cadena o más grande debido a este, es difícil justificar la dedicación de recursos a una investigación a este fallo.

Tipos de objetivo	Posible situación precipitante	Ciclo de vida del producto
Desarrollo de productos	Demandas del mercado	Prototipos
Mejora del producto	Los costos de garantía	En marcha
Asignación de responsabilidad	Reparaciones por daños financieros / físicos o lesiones corporales o muerte	Después del evento del sujeto
Prevención de recurrencia	Alguna	Después del evento del sujeto

Figura 3-11: Objetivos en el análisis de falla [3].

3.5. Metodología del análisis de falla

Es importante que el análisis de falla sea desarrollado con una metodología de trabajo organizada y estructurada, para cumplir los objetivos propuestos [3, 7]. Aunque la secuencia esté sujeta a variaciones dependiendo de la naturaleza de la falla y la información inicial, existen etapas comunes a todos los análisis de falla correctos. A continuación se enumeran las etapas más utilizadas comúnmente. La secuencia de ejecución no tiene un orden estricto, además no todas las etapas se usaran o se podrán llevar a cabo. Las etapas iniciaran con los pasos preliminares de recopilación de información, como [3]:

- Recolección de datos y selección de muestras
- Examen preliminar (Examen visual y registros)
- Pruebas no destructivas.

Posteriormente de estos pasos preliminares, se ejecuta la evaluación del daño y las condiciones que llevan al fallo, Estas etapas pueden variar dependiendo las condiciones de fractura, corrosión y/o desgaste [3]:

- Selección, identificación, preservación y /o limpieza de elementos críticos.
- Examen y análisis macroscópico.
- Examen microscópico y análisis de superficies de fractura.
- Análisis de estrés para determinar el estado de tensión real del componente fallido.
- Mecánica de fractura.
- Determinación del modo de fractura.

Las secciones separadas también describen los factores y métodos en el análisis de corrosión y fallas de desgaste, además se pueden utilizar varias técnicas para identificar la condición del material. Están incluyen [3]:

- Metalografía o análisis micro estructural.
- Pruebas mecánicas.
- Análisis químicos.
- Pruebas en condiciones de servicios simuladas.

Finalmente, la investigación concluye con una interpretación de los resultados, el análisis puede ser un proceso multidisciplinario, que requiera la consulta de expertos de otras disciplinas en el transcurso de la investigación. Se requiere escribir un informe con recomendaciones del seguimiento para prevenir fallas futuras [3]. A continuación se profundizará en las etapas que se pueden llevar a cabo en este trabajo de investigación:

3.5.1. Recolección de datos y muestras

Es deseable que el analista visite la escena de la falla, pero en algunas veces no es posible visitar el sitio. Bajo estas circunstancias, los datos y las muestras pueden ser recolectados por otros bajo la dirección del analista de falla. Se puede utilizar un formato de informe de fallas o una lista de verificación para garantizar el registro de toda la información pertinente a la falla. Hay situaciones en las que se debe realizar el análisis de falla en sitio, si bien se recomienda que el examen se realice en un laboratorio, para estas situaciones es necesario incluir laboratorios portátiles totalmente equipados [3].

Los registros fotográficos del componente o la estructura que falla son indispensables en un análisis correcto, un registro fotográfico completo y detallado de la escena y del componente fallido puede ser crítico. Las fotografías deben ser de calidad profesional, tomadas por el analista o un fotógrafo profesional [3].

3.5.2. Examen preliminar

El elemento fallido debe ser sometido a una rigurosa inspección visual antes de cualquier limpieza, al igual las partes desprendidas de este deben ser evaluadas de la misma manera, ya que de estos se podrían encontrar características propias de algún tipo de falla específico. Tal inspección debe registrarse fotográficamente [17, 18].

La inspección visual es una técnica de ensayo no destructivo, por el cual es posible detectar y examinar defectos superficiales, como la corrosión, contaminación, acabado superficial y discontinuidades superficiales en juntas (soldaduras, uniones adhesivas y sellos). Además de ser la más utilizada en la detección de grietas superficiales, es de gran importancia debido a su relación con los mecanismos de falla estructurales. Por la gran variedad de imperfectos superficiales que pueden detectarse mediante esta técnica, la inspección visual puede llevarse a cabo de diferentes formas, dependiendo de los productos y del tipo de falla que se monitorea [17, 19]. La inspección visual se basa en la capacidad y experiencia del inspector, además se requiere que posea la mayor cantidad de información acerca de la pieza a inspeccionar, de lo cual depende la interpretación acertada de las posibles causas de los defectos encontrados. El inspector debe cumplir con los siguientes requisitos [18]:

- Amplia experiencia y preparación técnica de la inspección visual.
- Examen visual (cercana y lejana) cada 6 o 12 meses.
- Lentes para la inspección por prescripción médica.
- Examen de discriminación cromática (Casos especiales)

Por otra parte los métodos de inspección visual incluyen una amplia gama de equipos para facilitar y mejorar el registro de la pieza, algunos de estos equipos son: [17, 18, 20]

- Dispositivos de aumento figura **3-12**:
 - Potencia de aumento.
 - Longitud focal.
 - Tipos de lentes.
 - Lupas simples.
 - Lupas iluminadas.
- Iluminación para inspección visual:
 - Iluminación general.
 - Dispositivos de iluminación específicos.
- Aparatos de medición:
 - Dispositivos de medición lineal.
 - Retículas.
 - Micrómetros.
 - Comparadores ópticos.
- Dispositivos de medición diversos:
 - Microscopio estereoscópico.
 - Espejos.
 - Boroscopio.
 - Fibra óptica.
- Dispositivos de mantenimiento de registros:
 - Grabadores de voz.
 - Fotografía.

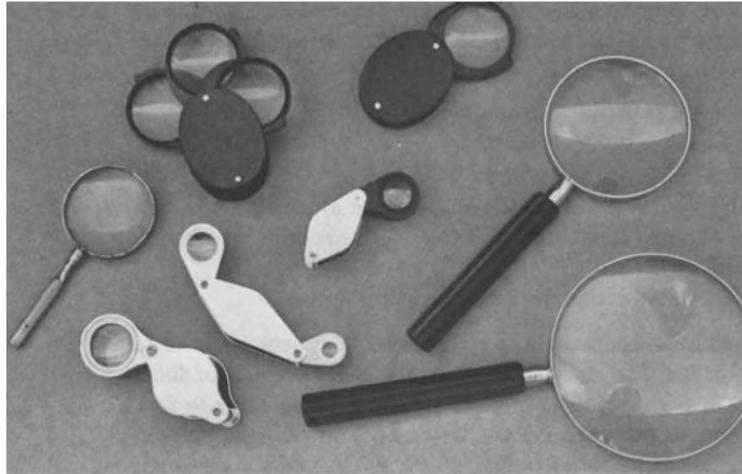


Figura 3-12: Dispositivos de mano amplificación visual.

3.5.3. Prueba de dureza

La dureza tiene diferentes conceptos dependiendo el campo donde se aplique, en la industria de los metales se considera como la resistencia a la deformación permanente, para la metalurgia es la resistencia a la penetración y para el diseño de máquinas es una medida del estrés de flujo por mencionar algunos casos. Algo que tienen en común estas definiciones son las características relacionadas con el estrés de flujo plástico de los materiales [21].

La dureza tiene una variedad de pruebas para su determinación, en las que se encuentran:

- Pruebas de rebote
- Pruebas de rayones
- Pruebas de arado
- Pruebas de amortiguación
- Pruebas de corte
- Pruebas de abrasión
- Pruebas de erosión
- Pruebas electromagnéticas.

Por último, se encuentra la prueba de indentación estática, que consiste en una bola, cono o pirámide que es forzado sobre la superficie del material examinado. La medida de dureza es la relación de la carga aplicada con el área a o profundidad de la indentación, esta metodología se hace presente en los ensayos de Brinell, Knoop, Rockwell y Vickers [22].

3.5.4. Prueba de dureza Rockwell

El número de dureza Rockwell se basa en la diferencia de la profundidad del penetrador a partir de dos aplicaciones de carga Figura 3-13. Inicialmente se establece un punto de referencia a partir de una carga inicial menor, posteriormente se aplica una carga mayor durante un tiempo determinado, alcanzando una profundidad mayor a la obtenida en la carga aplicada anteriormente. El número de dureza Rockwell es la diferencia entre el punto de referencia y la profundidad de la carga máxima. Todo el procedimiento no toma más de 10 segundos en su ejecución [22]. La carga inicial es importante para la precisión de la prueba, pues elimina la holgura del sistema y hace que el penetrador rompa con la rugosidad superficial, Así en la Figura 3-13 se muestra la punta de diamante, es el mismo procedimiento con penetradores en acero endurecido [22].

Los valores de dureza Rockwell se expresan mediante una combinación del número de dureza y el término HR que indica el penetrador y las cargas menores y mayores. Una dureza 64.0 HRC representa el número de dureza Rockwell 64.0 en una escala C. El símbolo S o W se utilizan para identificar el tamaño de la bola utilizada (acero o carburo), por ejemplo; una lectura de 80 HRB obtenida mediante una bola de acero se representa 80 HRBS, mientras el mismo resultado con una bola de carburo es 80 HRBW [22, 21]. La prueba de dureza Rockwell es simple de realizar, pero se debe tener en consideración algunos aspectos para garantizar resultados precisos, las superficies deben estar limpias y libre de virutas, aceites o demás objetos que impidan un asentamiento correcto.

Debe verificarse visualmente que el penetrador se encuentre sin daños físicos, además si este es de bola de acero o yunque se debe realizar varias pruebas para asentar estas partes. Para la preparación de la superficie de trabajo se debe considerar el grado de rugosidad de la misma, la cual puede tolerarse dependiendo de la escala Rockwell que se utilice. Una regla general para el penetrador de diamante se usa una carga de 150 kgf, o en un penetrador de bola de 100 kgf. Una superficie de acabado de liso es suficiente para resultados precisos, a medida que las cargas sean más pequeñas, los requisitos para la superficie serán más exigentes, para una carga de 15 kgf, comúnmente se requiere una superficie pulida [21].

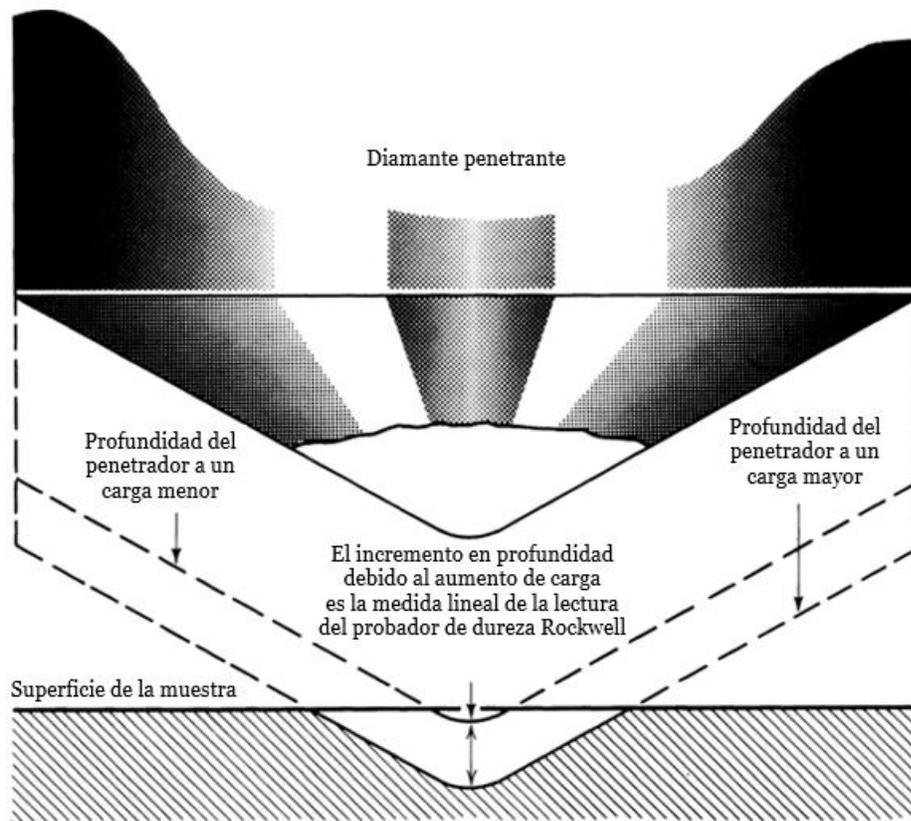


Figura 3-13: Principio de la prueba Rockwell [21]

3.5.5. Prueba de metalografía

Es la disciplina que examina y determina la constitución de los componentes de los metales y aleaciones, el examen puede realizarse mediante una amplia gama de escalas o aumentos ópticos que van de 20x hasta 1'000.000x mediante microscopios electrónicos. El equipo generalmente empleado para este examen es el microscopio óptico, con aumentos que van desde 50x hasta 1000x, con capacidad de visualizar características micro estructurales de 0.2 μm o mayores [6]. La preparación de la muestra para el examen metalográfico consiste en las siguientes operaciones

- Elección de corte de la muestra: Se debe escoger cuidadosamente la sección del corte de la pieza o conjunto de piezas de las cuales se desea identificar su estructura microscópica. Se deben considerar los factores que transforman las estructuras de las piezas a metales blandos como la excesiva compresión, elevadas temperaturas y los golpes [23].
- Desbaste y pulimiento: Las muestras destinadas al microscopio deben tener una superficie plana generada por el corte con el que se separó de la pieza, se procede

a desbastarla y pulirla por operaciones sucesivas evitando su calentamiento, sumergiéndola con frecuencia en agua fría [23].

- Ataque químico: La muestra pulida, para que se haga visibles su estructura cristalina y en ocasiones identificar impurezas, deben ser sometidas a un procedimiento para este fin. El ataque químico es el procedimiento usado con más frecuencia. consiste en poner la superficie pulida en algún reactivo, por determinado tiempo, generalmente en frío. Se observa que a causa del reactivo la superficie se empaña lentamente, se debe tener cuidado con el tiempo de exposición, en ciertas ocasiones las muestras excesivamente atacadas, no permiten una correcta visualización de su estructura [23].

3.5.6. Informe de investigación

Los informes de análisis de falla son un medio de información tangible, en forma escrita, cuyo propósito es de comunicar a los interesados, ya sean clientes, profesores o comunidad científica, los resultados obtenidos de la investigación. Un informe es una herramienta de conocimiento por parte del investigador hacia cualquiera que esté interesado en el estudio [7]. Para una comunicación clara de los resultados del análisis de fallas, el informe debe ser conciso y mantener una lógica detrás de las conclusiones. Las secciones deben incluir la siguiente información [3, 5]:

- Descripción del componente que presenta falla.
- Antecedentes.
- Examen visual y pruebas de laboratorio (metalúrgicas, mecánicas, químicas).
- Anomalías.
- Conclusiones y recomendaciones para la prevención de tales fallas.
- Referencias bibliográficas.

3.6. Antecedentes análisis de falla Fundación Universitaria Los Libertadores

Actualmente la investigación en el campo de la ingeniería, se puede evidenciar como abarca cada vez más los temas relacionados con los análisis de fallas mecánicas, en materiales y elementos específicos. Lo cual genera un volumen de información de gran importancia abierta a los lectores, permitiendo establecer un punto de partida a investigaciones nuevas. En el caso de la *Fundación Universitaria Los Libertadores* se realizaron trabajos previos al análisis de falla, como lo es el trabajo de grado de: Jiménez Casallas D., Borraez Correa F.,

y Cantor Barragán D. en el que implementaron el análisis de falla a cinco componentes mecánicos para determinar la causa probable de falla. Para lo cual llevaron a cabo pruebas de laboratorio (dureza y metalografía). Con los resultados obtenidos realizaron una clasificación de las principales causas y consecuencias de las fallas presentadas en las piezas. El propósito de esta investigación es evitar que se presenten nuevamente este tipo de fallas a futuro, sugiriendo una análisis preventivo, control de calidad, mantenimiento y seguimiento constante sobre los sistemas [24].

Así mismo, Rativa Sáenz A. realizó un trabajo del análisis de falla y análisis de causa raíz a tres componentes mecánicos, con el fin de determinar la causa probable de las fallas. Para lo cual realizó pruebas de inspección visual, análisis de dureza y análisis metalográfico, con el fin de detectar la causa raíz de falla en un eje de piñón de reversa, un eje de salida caja de cambios y un eje de caja de dirección. Con base en los resultados obtenidos dio concepto técnico de lo que pudo haber ocurrido y precisó recomendaciones para tratar de evitar la ocurrencia de fallos similares [25].

3.7. Rodamiento de doble rodillo a rotula

Estos rodamientos cuentan con un número determinado de rodillos que tienen forma cilíndrica y alojada en el anillo interior, Adicionalmente cuentan con dos pistas de rodadura una a la derecha y la otra a la izquierda, y el anillo exterior que tiene una sola pista de rodadura. El anillo exterior está alineado con el eje, sin embargo cuando hay un desalineamiento producido por una carga axial, estos tipo de rodamientos son autoalineantes de forma similar a la de los rodamientos de bolas autoalineantes. Es decir, se corrige de automáticamente la alineación controlando así un exceso de fuerza sobre los rodamientos. Los rodillos esféricos pueden soportar, no sólo cargas radiales, sino también cargas axiales en una dirección. Cuentan con capacidad para soportar cargas radiales y resultan adecuados para tipos de operación donde hay cargas elevadas o impactos. Algunos rodamientos tienen agujeros interiores cónicos y pueden ensamblarse en ejes cónicos sobre ejes cilíndricos si se utilizan adaptadores o manguitos. Las jaulas utilizadas son las de acero estampado y bronce mecanizado figura 3-14 [26].

- **Anillo flotante:** Es una pieza que se encarga de mantener los rodillos esféricos en su posición de trabajo, no soportan ningún tipo de carga.
- **Arandela de bloqueo tuerca de manguito:** Este componente permite ajustar al rodamiento al eje, al cual será ajustado en el eje.

- **Tuerca:** Ajusta el manguito que va fijo al eje, entre más vueltas se le dé a la tuerca el manguito se expande ajustando la base del eje, de esta manera se define la carga a soportar en el rodamiento.
- **Manguito:** Es una pieza similar a un buje que cuando es ajustada con la tuerca cierra el manguito y se ajusta al eje.
- **Anillo interno y anillo externo:** Es uno de los elementos principales en la composición de los rodamientos, el anillo interno es la pieza por donde se deslizan los cilindros. Este anillo debe estar constantemente lubricado con el fin de reducir la fricción entre los rodillos y la pista. El anillo externo es la pieza que va fija a un soporte en la maquina o un alojamiento, por este anillo también se desplazan los rodillos cilíndricos y tiene como objetivo mantener alineados los rodillos internos.
- **Rodillo esférico:** El rodillo esférico es el corazón del rodamiento, estos rodillos están en constante movimiento rotacional, sus cargas son distribuidas de manera uniforme.
- **Dos pistas de rodadura:** Son el alojamiento de los rodillos, es similar a una canasta que divide de manera uniforme los rodillos sobre los anillos internos y externos.

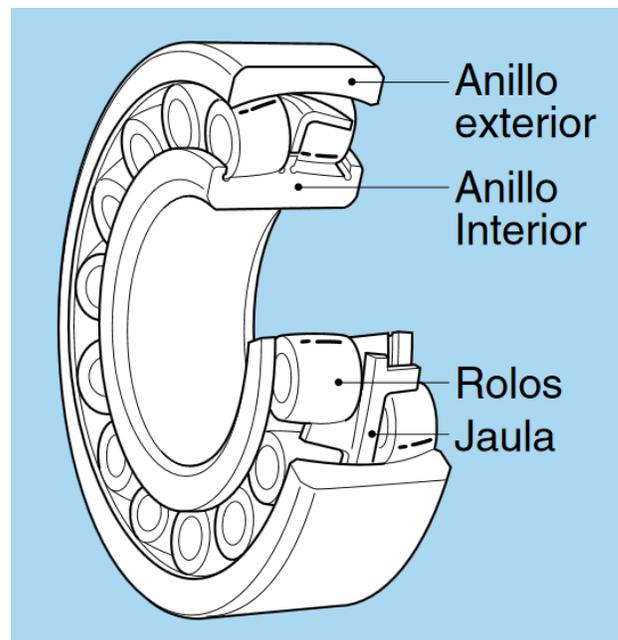


Figura 3-14: Rodamiento de doble rodillo a rotula

Las dimensiones del rodamiento de doble rodillo a rotula a realizarle el análisis de falla se pueden consultar por medio de la Figura 3-15 y 3-16:

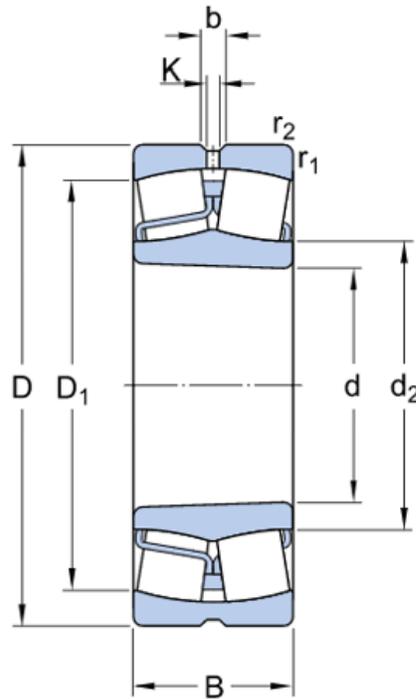


Figura 3-15: Dimensiones de doble rodillo a rotula [27]

d		90	mm
D		160	mm
B		40	mm
d2	≈	106	mm
D1	≈	141	mm
b		6	mm
K		3	mm
r1,2	min.	2	mm

Figura 3-16: Tabla dimensiones de doble rodillo a rotula [27]

El rodamiento estudiado hace parte de un rolo compactador *DYNAPAC CA 250*, del sistema del lado de vibración del cartucho del tambor, ítem No. 18 [28, 29, 30], como se muestra en la Figura 3-17 y 3-18.



Figura 3-17: Compactador DYNAPAC CA 250 [28]

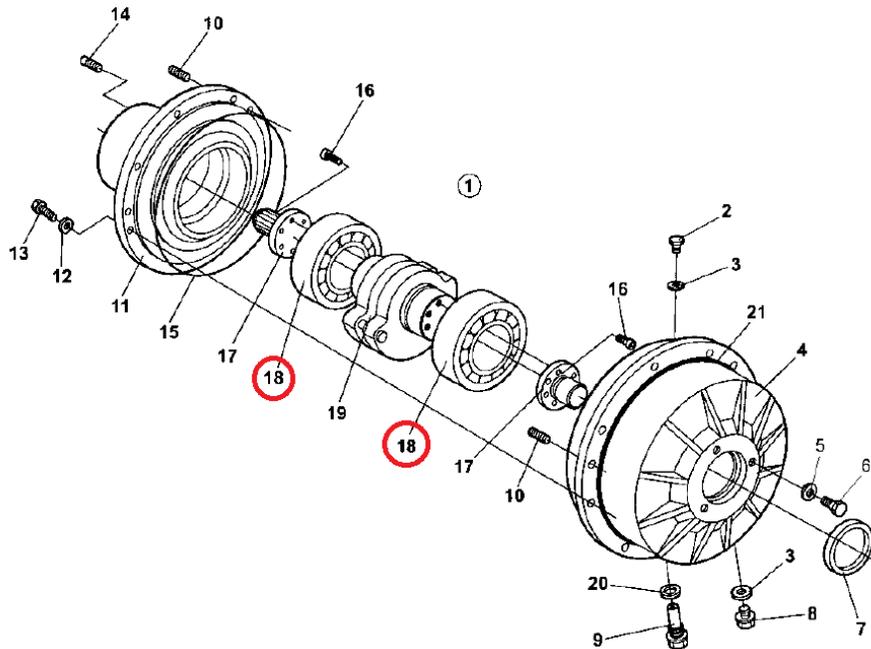


Figura 3-18: Sistema del lado de vibración del cartucho del tambor de compactador DYNAPAC CA 250. [28]

4. Metodología análisis de falla a rodamiento de doble rodillo a rotula

El análisis de falla será a un rodamiento de doble rodillo a rotula SFK Ref. 22218CAW33, de un rolo compactador Dynapac CA250, para el cual, se tomará como referencia el estándar internacional ISO 15243 *Rolling bearings - Damage and failures – Terms, characteristics and causes* [31]. Se obtuvo la muestra con las dimensiones adecuadas para realizar los pruebas de laboratorio, en esta etapa se le realizaron cortes al anillo exterior del rodamiento, los cuales permitieron una inspección visual completa a la superficie de la falla, posteriormente esta superficie fue pulida con un acabado de brillo espejo para las pruebas de metalografía y la examinación en el microscopio. A continuación se describen detalladamente cada paso realizado y bajo que norma se basó para su realización.

4.1. Obtención de muestras

La obtención de la muestra se llevó a cabo teniendo en cuenta lo sugerido en la sección 3.5.1 **Recolección de datos y muestras**. El rodamiento fue obtenido con todos sus componentes de una empresa distribuidora de equipos de maquinaria amarilla. Este rodamiento no contó con un formato de falla ni un listado de verificación durante de su retiro del compactador Dynapac CA250 en sitio. Cabe resaltar que los equipos y materiales para la preparación de la muestra fueron suministrados por la Fundación Universitaria Los Libertadores. Debido a la geometría original del anillo exterior del rodamiento, fue necesario realizar dos cortes transversales para obtener la muestra con una dimensión adecuada y llevar a cabo las pruebas de laboratorio sobre la superficie fracturada. Un primer corte transversal al anillo exterior figura **4-1**, se llevó a cabo en el taller de materiales, con el equipo CUT OFF SAW Modelo: L3GE-400, con un número de activo fijo 16686 (23615) con la asesoría del docente German Saavedra Calixto. Posteriormente, se realizó un segundo corte transversal para reducir el tamaño de la parte del rodamiento figura **4-2**, en esta ocasión el corte se realizó con el equipo cortadora de disco, que tiene un número de activo fijo 23579 (25141) dicho corte se realizó en el laboratorio de procesos de manufactura. En este proceso se mantuvo el elemento refrigerado con agua, para evitar el calentamiento y los cambios de la estructura de los materiales de la superficie de fractura.



Figura 4-1: Primer corte transversal anillo exterior rodamiento



Figura 4-2: Segundo corte transversal anillo exterior rodamiento.

4.2. Inspección visual

El primer análisis el cual permite registrar las características de la fractura del elemento es la inspección visual. El registro fotográfico ha sido realizado con una cámara profesional Canon Rebel EOS T6i, para mejorar precisiones de inspección figura 4-3, donde se ha dividido en tres secciones. La sección A1 indica la fractura del anillo exterior, la sección A2 corresponde al anillo exterior y A3 al anillo interior.



Figura 4-3: Rodamiento doble rodillo a rotula.

A partir de los cortes realizados anteriormente, se puede analizar la superficie de fractura del rodamiento figura 4-4. De la cual se puede observar que la fractura presentó un corte sin grados de inclinación, en las partes A1.2 y A1.3. El corte finaliza en forma de arista en punta, perdiendo un poco del material, el cual no fue recuperado. Se nota dos tonalidades de grises en el material, un gris oscuro sin brillo predominante en la superficie A1.1 y un gris brillante en regiones no continuas A1.4. No hay presencia de discontinuidades o defectos ni presencia de deformaciones a causa de altas temperaturas.

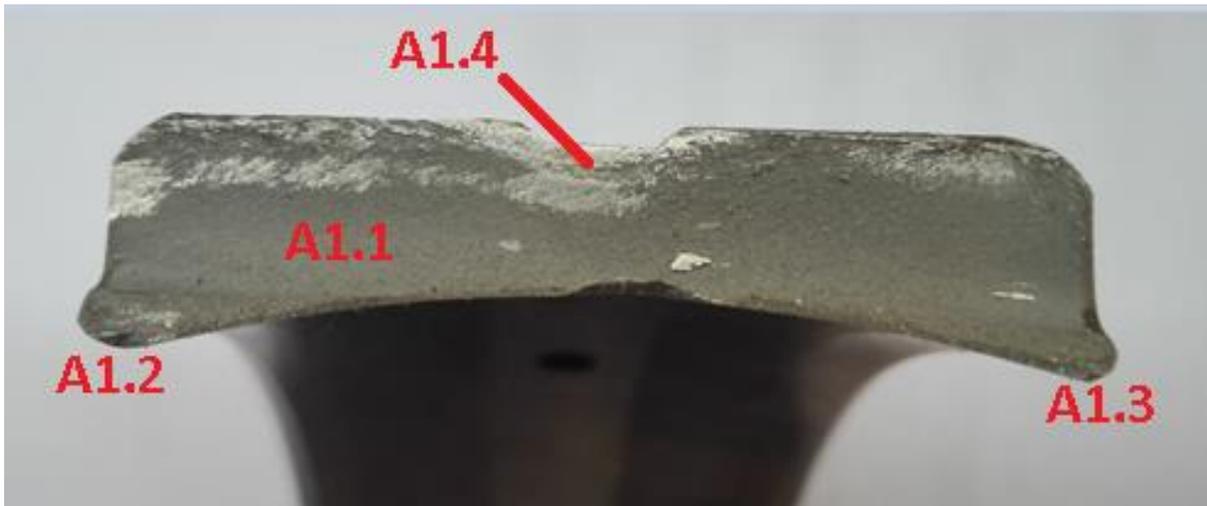


Figura 4-4: Superficie fractura rodamiento.

4.3. Tratamiento de la muestra (pulido)

Para continuar con los ensayos correspondientes al análisis de falla, se debe preparar la superficie de fallo con un acabado de brillo espejo para su análisis metalográfico. En el laboratorio de procesos de manufactura de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se llevó a cabo el proceso y lijado y pulido de la superficie de la muestra. Este procedimiento se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma internacional ASTM E3-01 *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* [32]. Se inicia el desbaste con una lija calibre 60 en una dirección uniforme hasta que la superficie no presente ralladuras en una dirección distinta, la lija debe estar húmeda para que el desbaste se realice de forma suave y evitar el calentamiento de la superficie. Posteriormente se realiza el mismo procedimiento con lijas calibre 100, 240, 320 y 1000, cambiando la dirección de lijado a 90° del procedimiento inmediatamente anterior. Una vez se termine el desbaste con la lija calibre 1000, se realiza el proceso de pulido, el cual se realiza con una concentración de alúmina al 5% en una base con superficie de paño giratoria del equipo *Metallographic Lapping/Polishing Machine* con número de activo fijo 25143 figuras 4-5, 4-6 y 4-7.



Figura 4-5: Banco de lijado muestra de rodamiento.



Figura 4-6: Metallographic Lapping/Polishing Machine.

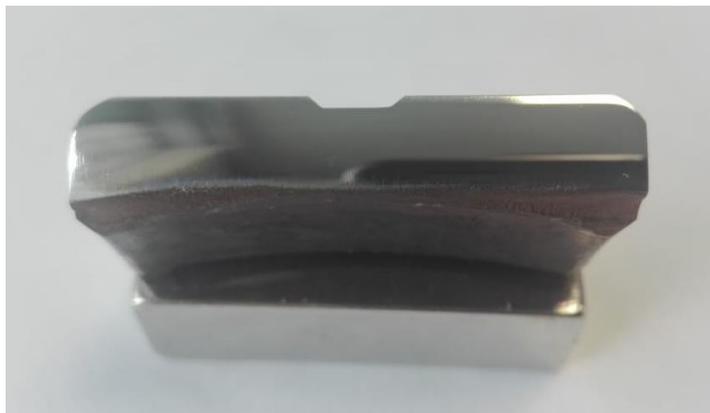


Figura 4-7: Muestra de rodamiento superficie pulida.

4.4. Prueba Metalográfica

La elaboración del análisis metalográfico en el rodamiento de doble rodillo a rotula para el análisis de falla, tiene como fin observar cambios en la composición y microestructura en distintas zonas internas de cada elemento, que permita interpretar los cambios y como estos han afectado la resistencia del material. La elaboración de este análisis fue basado en la norma internacional ASTM E 3-01 *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* [32] y ASTM E 340-00 *Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys* [33].

Se inicia el análisis metalográfico con la preparación de la muestra con un ataque químico que revele su microestructura, el rodamiento al ser fabricado en un material de acero al cromo-carbono temple total, que contiene aproximadamente un 1% de carbono y un 1,5% de cromo según la normativa ISO 683-17 *Heat-treated steels, alloy steels and free-cutting steels: Ball and roller bearing steels* [34], se ataca químicamente con agua regia, una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico, en un relación de 1/3 (25% de ácido nítrico y 75% ácido clorhídrico). Una vez atacado la muestra del material, se lleva al microscopio metalográfico invertido OLYMPUS GX 41F figura 4-8, con número de activo fijo 16498-16. Tanto el ataque químico como el análisis metalográfico fueron desarrollados en la Fundación Universitaria Los Libertadores en el laboratorio de manufactura.

Se indican los puntos sobre los cuales se tomaron las fotografías del registro del prueba metalográfica en la figura 4-9 y 4-10.



Figura 4-8: Microscopio metalográfico invertido OLYMPUS GX 41F

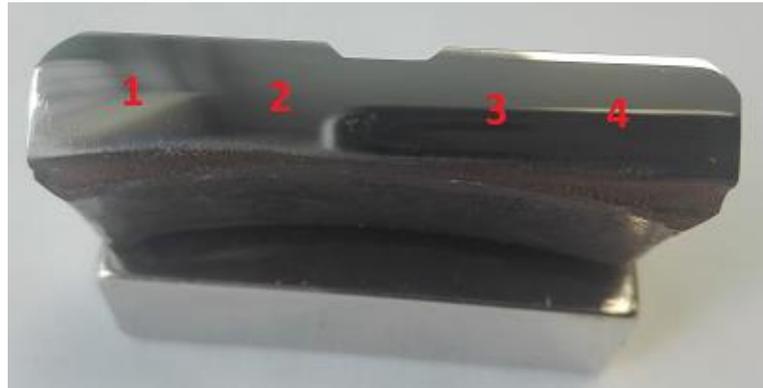
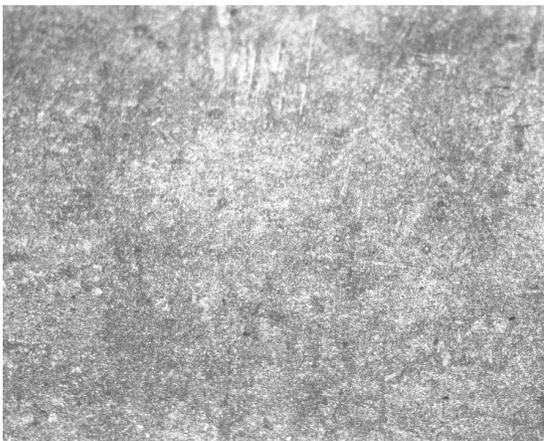
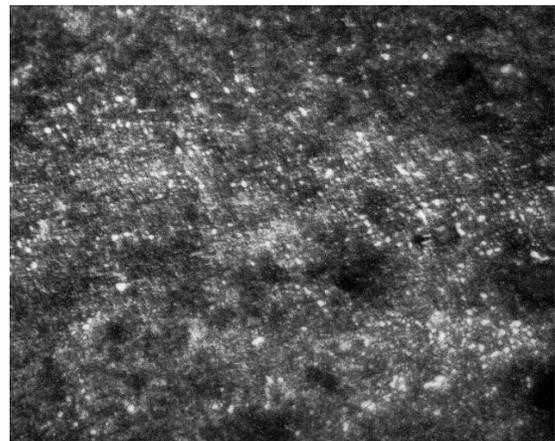


Figura 4-9: Puntos aproximados de observación muestra



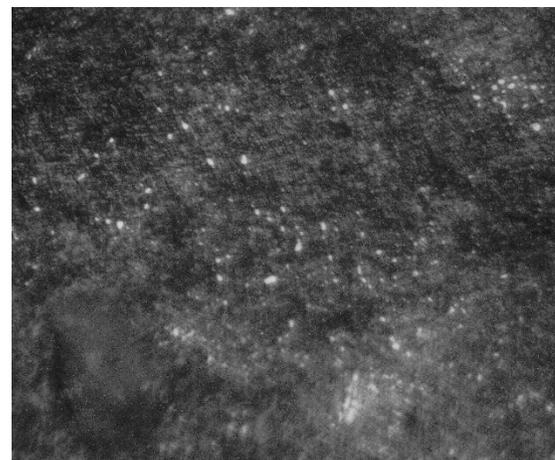
Punto 1 (10x)



Punto 2 (100x)



Punto 3 (10x)



Punto 4 (100x)

Figura 4-10: Estructura de la superficie de falla

4.5. Ensayo de dureza

La ejecución del ensayo de dureza Rockwell tiene como fin determinar cambios de dureza en las zonas internas y externas de las superficies del elemento, de esta manera determinar si dichos cambios han afectado la resistencia del material y hayan propagado el fallo.

La prueba se llevara a cabo en las instalaciones de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se realizaron con el durómetro marca Brooks Inspection Equipment, que tiene el número de activo fijo 16500 (23580) figura 4-11 (a), con una carga principal de 150 kg, con una incertidumbre de medición de ± 1 , Antes de ser usado el equipo, se ha verificado sus resultados con una patrón de calibración de 61.8 HRC figura 4-11 (b). Basado en ello, los resultados obtenidos durante su uso son correctos y verificables. La práctica internacional recomendada para el procedimiento de las pruebas de dureza es ASTM E 18-15 *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials* [31].



(a) Durómetro Rockwell

(b) Patrón base de 61.8 HRC

Figura 4-11: Durómetro y resultado de su calibración.



Figura 4-12: Indentaciones en distintos puntos de la muestra.

Se realizó el ensayo de dureza en 6 puntos distintos de la muestra figura 4-12, en la cual se indica también el orden de la ejecución de las penetraciones, los resultados obtenidos se registran en la figura 4-13.

Punto de penetración	1	2	3	4	5	6
Dureza (HRC) ± 1	-	45	57	58	48	55

Figura 4-13: Mediciones de dureza Rockwell C sobre muestra rodamiento.

4.6. Cronograma de actividades análisis de falla

Es muy importante para conseguir un correcto análisis de falla, la organización y estructuración de sus actividades, esto con el fin de no omitir etapas ni desarrollarlas desordenadamente, lo que podría incurrir en sobre tiempos o resultados e interpretaciones incorrectas. A continuación se muestra el cronograma de las actividades a desarrollar para el trabajo de análisis de falla al rodamiento de doble rodillos a rotula figura 4-14.

CRONOGRAMA ACTIVIDADES ANALISIS DE FALLA										
Actividad	Inicio	Final	semana 1	semana 2	semana 3	semana 4	semana 5	semana 6	semana 7	semana 8
Recolección	27/08/2018	9/09/2018								
Ensayos laboratorio (Ensayo visual)	10/09/2018	24/09/2018								
Ensayos laboratorio (Ensayo metalografía)	10/09/2018	24/09/2018								
Ensayo laboratorio (Dureza Rockwell)	10/09/2018	24/09/2018								
Análisis de resultados	24/09/2018	1/10/2018								
Entrega trabajo final	8/10/2018	15/10/2018								

Figura 4-14: Cronograma actividades análisis de falla rodamiento de doble rodillo a rotula.

5. Análisis de falla

Se presentan a continuación las conclusiones del análisis de falla del rodamiento de doble rodillos a rotula estudiado, basado en lo encontrado durante la realización de la inspección visual, análisis metalográfico y análisis de dureza. También se da un concepto técnico de lo que pudo haber ocurrido durante el fallo, además unas recomendaciones para evitar que un fallo similar se presente. La inspección visual permite identificar dos zonas de la superficie de fractura anormales terminadas en aristas ver (puntos A1.2 y A1.3 de la figura 4-5), sin deformaciones plásticas o más imperfecciones notables propias como las de la corrosión o la fatiga. El análisis de la microestructura muestra una distribución de grano fino de martensita, característico de un tratamiento térmico para mejorar la dureza en aceros de herramientas. La prueba de dureza mostro valores muy cercanos al límite inferior referenciado para el tipo de acero, que normalmente es tratado térmicamente para alcanzar una dureza de 50 a 57 HRC [35]. Lo cual indica que la dureza del material se mantuvo según las especificaciones de fábrica, descartando las fallas del anillo por procesos de manufactura o materiales.

Por las características propias de la falla, se ubica en el modo de falla de **Fractura y Agrietamiento**, por **Fractura Forzada** figura 5-1 y 5-2 del estándar internacional ISO 15243 *Rolling bearings - Damage and failures – Terms, characteristics and causes* [31]. La fractura forzada se debe a la concentración de tensión superior a la resistencia a la tracción del material, por ejemplo: impacto, o por un ajuste excesivo en su puesta en marcha.

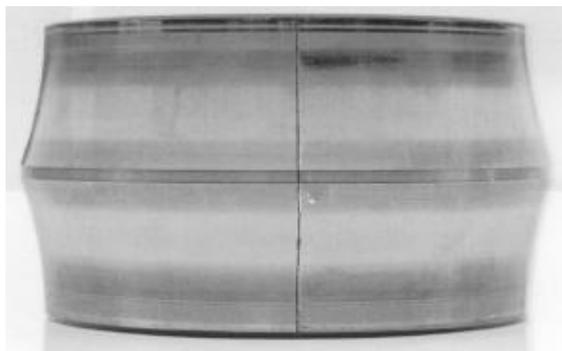


Figura 5-1: Fractura forzada en rodamiento de bolas por ajuste excesivo [36].

Modos de falla	Fatiga	Fatiga iniciada subsuelo
		Fatiga iniciada superficie
	Desgaste	Desgaste abrasivo
		Desgaste adhesivo
	Corrosión	Corrosión por humedad
		Corrosión por fricción
	Erosión eléctrica	Voltaje excesivo
		Fuga de corriente
	Deformación plástica	Sobrecarga
		Identación por escombros
		Identación por operación
	Fractura y agrietamiento	Fractura forzada
		Fatiga forzada
Fractura termica		

Figura 5-2: Clasificación de falla rodamientos ISO 15243 [31].

La fractura forzada ocurre por una inadecuada alineación del rodamiento con el eje de rotación, el cual debe ser posicionado por presión, con la holgura del anillo interno y externo que cada fabricante recomienda para determinado servicio. Un ajuste excesivo provocará que el anillo interior sea cargado más de sus límites de tensión máxima, y una holgura exagerada en el anillo exterior aumentará las posibilidades de fractura forzada.



Figura 5-3: Fractura forzada anillo exterior rodamiento [36].

6. Conclusiones

- El análisis de falla no permite identificar con certeza las condiciones de trabajo a las cuales fue sometido el rodamiento de doble rodillo a rotula. Pero si plantear una hipótesis de lo sucedido. A partir de la comparación entre los datos de fábrica del componente y los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio practicadas a la pieza fallida de sus propiedades mecánicas y su composición microestructural, se constata que no sufrió modificaciones en su estructura por temperaturas altas, tampoco se encontró microgrietas características de la fatiga en los materiales dúctiles. En base de lo anterior se puede dictaminar que el rodamiento de doble rodillo a rotula presentó fractura en el anillo exterior debido a una sobre carga por una alineación incorrecta en su mantenimiento o un golpe el cual excedió el límite de tenacidad del material.
- Un trabajo de análisis de falla permite identificar etapas de mejoramiento es los procesos de diseño, materiales, manufactura, operación y mantenimiento. En el caso particular de este trabajo, se evidenciaron las posibles causas de falla debido a un mantenimiento inadecuado en los componentes del rolo compactador Dynapac CA250.

7. Recomendaciones

Se ha evidenciado que la cantidad de trabajos de grado por parte de los estudiantes que optan al grado de ingeniero mecánico en la Fundación Universitaria Los Libertadores ha incrementado, por esta razón, la posibilidad de una línea de énfasis en el pensum académico en el tema de análisis de falla debería contemplarse, para desarrollar un mejoramiento continuo en los trabajos de los futuros ingenieros.

Bibliografía

- [1] H. Hernández A. and É. Espejo M.: *Mecánica de fractura y análisis de falla*. Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [2] H. M. Tawancy, A. Ul-Hamid, and N. M. Abbas.: *Practical Engineering Failure Analysis*. Marcel Dekker, 2004.
- [3] ASM International. HandBook Committee, W. T. Becker, and R. J. Shipley.: *ASM HandBook. Vol. 11: Failure Analysis and Prevention*. ASM International, 2002.
- [4] ASM International. HandBook Committee.: *ASM HandBook. Vol. 19: Fatigue and Fracture*. ASM International, 2013.
- [5] V. Ramachandran.: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005.
- [6] ASM International. HandBook Committee and G. F. Vander Voort.: *ASM HandBook. Vol. 9: Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004.
- [7] H. P. Bloch and F. K. Geitner.: *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Gulf Publishing Company, 1999.
- [8] C. O. Smith and B. E. Boardman.: *Concepts and Criteria in Materials Engineering, Stainless Steels and Special Purpose Metals*. ASM International, 1980.
- [9] P. F. Wilson, L. D. Dell, and G. F. Anderson.: *Root Cause Analysis: A tool for total quality management*. ASQ Quality Press, 1993.
- [10] R. P. Baggerly.: *Failure Prevention through Education: Getting to the Root Cause*. ASQ Quality Press, 2004.
- [11] A. K. Das.: *Metallurgy of Fracture Analysis*. McGraw-Hill, 1996.
- [12] ASM International. HandBook Committee, L. J. Korb, and D. L. Olson.: *ASM HandBook. Vol. 13: Corrosion*. ASM International, 2013.
- [13] P. C. y Consultoria, “P&G Capacitacion y Consultoria.” .
- [14] S. F. Services, “Steel Fabrication Services.” p. 882333, 2013.

-
- [15] G. Latorre B.: *Análisis de falla*. Universidad Industrial de Santander, 2014.
- [16] R. B. Waterhouse.: *Fretting Fatigue*. International Materials Review, 1981.
- [17] ASM International. Handbook Committee.: *ASM HandBook. Vol. 17: Nondestructive Evaluation and Quality Control*. ASM International, 2001.
- [18] A. R. García C.: *Ensayos No Destructivos por el Método de Inspección Visual*. Imende A.C., 2005.
- [19] F. C. Campbell.: *Inspection of Metals*. ASM International, 2011.
- [20] G. F. Vander Voort.: *Metallography Principles and Practice*. ASM International, 1999.
- [21] H. Chandler.: *Hardness Testing*. ASM International, 2016.
- [22] ASM International. HandBook Committee, H. Kuhn, and D. Medlin.: *ASM HandBook. Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International, 2000.
- [23] R. L. Bernau.: *Elementos de metalografía y de acero al carbono*. Andres Bello, 1958.
- [24] D. C. Jiménez, F. Borraez, and D. Cantor.: *Implementación del método de análisis de falla en componentes mecánicos*. Fundación Universitaria Los Libertadores, 2017.
- [25] E. A. Rativa S.: *Implementación del método de análisis de falla y análisis de causa raíz a tres componentes mecánicos*. Fundación Universitaria Los Libertadores, 2017.
- [26] NTN Corporation.: *Rodamientos de Bolas y de Rodillos*. NTN Corporation, 2004.
- [27] S. K. F. Explorer.: *Rodamientos de rodillos a rótula-22218 E*. Explorer S K F, 2018.
- [28] DYNAPAC.: *DYNAPAC CA250 Spare Parts Catalogue*. Metso Dynapac AB, 2015.
- [29] DYNAPAC.: *Dynapac CA 250 Rodillos monocilindrico de tierras*. Metso Dynapac AB, 2013.
- [30] DYNAPAC.: *Dynapac CA 250 Mantenimiento*. Metso Dynapac AB, 2009.
- [31] Standard International ISO.: *ISO 15243: Rolling bearings Damage and failures Terms, characteristics and causes*. Standard International ISO, 2004.
- [32] ASTM E.: *ASTM E3-01 - Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Annual Book of ASTM Standars, 2001.
- [33] ASTM E.: *ASTM E340-00 - Standard Test Method for Macroetching Metals and*

Alloys. Annual Book of ASTM Standards, 2013.

- [34] Standard International ISO.: *ISO 683-17: Heat - treated steels, alloy steels and free - cutting steels -- Ball and roller bearing stells*. Standard International ISO, 2014.
- [35] SKF.: *Catalogo general Rodamientos SKF*. SKF. 2018.
- [36] Timken.: *Analisis de diseños en los rodamientos y guia de referencia sobre lubricacion*. Timken, 2018.