



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Implementación del método de análisis de falla y análisis de causa raíz a tres componentes mecánicos

Edwin Alexander Rativa Sáenz

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de ingeniería
Bogotá D. C. , Colombia
2017

Implementación del método de análisis de falla y análisis de causa raíz a tres componentes mecánicos

Edwin Alexander Rativa Sáenz

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

Ingeniero Mecánico

Director:

Magíster en Ingeniería Mecánica - Ing. Edwin Darío Cendales Ladino

Línea de Investigación:

Análisis de propiedades en materiales de ingeniería

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D. C. , Colombia

2017

Dedicatoria

A mis padres *Mari Luz Sáenz* y *Pedro Julio Rativa* que siempre me apoyaron en cada momento y paso durante la realización y culminación de esta meta, sé que sin ellos no hubiese sido posible, por ello cada logro siempre será a su nombre.

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.**

Magíster en Ingeniería Mecánica - Ing. Edwin Darío Cendales Ladino
Director de Proyecto de grado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Lista de Figuras

1-1. Distribución de fallas en el tiempo, curva de “tina de baño” [2].	3
1-2. Analogía de investigación en forma de pirámide [31].	4
3-1. Diagrama de flujo que muestra la relación entre la fase de diseño y las tareas de investigación para fallas en servicio, envejecimiento estructural y acciones correctivas [13].	7
3-2. Palabras clave descriptivas del desgaste y sus interrelaciones [10].	15
3-3. Desgaste Adhesivo [10].	16
3-4. Circulo de fallos - Interacción entre algunos modos de fallos [2].	17
3-5. Modelo de resolución de problemas [2].	19
3-6. Mínimo ángulo para una inspección visual [20].	22
3-7. Profundidad de penetración por el método Rockwell [32].	25
4-1. Analogía del análisis de falla.	28
4-2. Ejemplo diagrama de espina de pescado.	30
4-3. Esquema jerárquico de The 5-Whys [39].	31
5-1. Pieza A - Eje de Piñón de reversa.	32
5-2. Sección A5 - Falla.	33
5-3. Sección A5.4 - Falla.	34
5-4. Pieza B - Eje salida caja de cambios.	35
5-5. Pieza B - Sección B4.	36
5-6. Sección B4.2 - Se observan algunos de los defectos superficiales.	36
5-7. Pieza C - Eje cremallera de la caja de dirección.	37
5-8. Sección C3 - Inicio y final de la falla.	38
5-9. Sección C3 - Cambios de coloración superficial en la falla.	38
6-1. Durómetro y resultado de su calibración.	39
6-2. Obtención y ensayo de dureza en probeta de la pieza A.	40
6-3. Obtención de la probeta para análisis de dureza en la pieza B.	41
6-4. Probeta pieza B después del análisis de dureza.	41
6-5. Vista del modo de corte en la probeta A , para obtener la probeta B.	42
6-6. Probetas pieza C.	43
7-1. Instrumentos metalográficos.	44

7-2. Estructura de la superficie de falla pieza A vista a 100X.	45
7-3. Estructura de la superficie de falla pieza B vista a 10X.	46
7-4. Estructura de la superficie de falla pieza B vista a 100X.	47
7-5. Estructura de la superficie con fallas pieza C vista a 100X.	48
7-6. Estructura de la superficie sin fallas pieza C vista a 100X.	49
8-1. Análisis de causa raíz para la pieza B.	51
8-2. Análisis de causa raíz para la pieza C.	52

Resumen

En este proyecto se llevó a cabo el análisis de falla y el análisis de causa raíz a tres diferentes componentes mecánicos que presentaron algún modo de falla durante su funcionamiento. El análisis de falla consistió en pruebas de inspección visual, análisis de dureza y análisis metalográfico con el fin de detectar la causa raíz de fallo en un Eje de piñón de reversa, un Eje salida caja de cambios y por ultimo un Eje de caja de dirección. Con base en los resultados obtenidos se da un concepto técnico de lo que puedo haber ocurrido en los tres casos de estudio y se precisa recomendaciones para tratar de evitar la ocurrencia de fallos similares.

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

Abstract

In this research project, failure analysis and root cause analysis were carried out on three different mechanical components which presented some failure mode during their operation. The failure analysis consisted of tests of visual inspection, hardness analysis and metallographic analysis in order to detect the root cause of failure in a Reverse Pinion Shaft, a Gearbox output shaft and finally a Rack shaft steering gear. Based on the results obtained, it gives a technical concept of what may have gived in the three case studies and recommendations are needed to try to avoid the occurrence of similar faults.

Keywords: (Failure analysis, Root cause analysis, visual inspection, hardness, metallographic analysis)

Contenido

Resumen	xii
1 Introducción	2
2 Objetivos	5
3 Fundamentos - Análisis de Falla	6
3.1 Falla	6
3.2 Causas de fallo	8
3.3 Modos de fallo	14
3.4 Análisis de falla	18
3.5 Metodología del análisis de falla	21
4 Fundamentos - Análisis de Causa Raíz (RCA)	28
5 Inspección Visual	32
5.1 Pieza A	32
5.2 Pieza B	35
5.3 Pieza C	37
6 Ensayos de dureza Rockwell	39
6.1 Pieza A	40
6.2 Pieza B	41
6.3 Pieza C	43
7 Análisis Metalográfico	44
7.1 Pieza A	45
7.2 Pieza B	46
7.3 Pieza C	48
8 Análisis de falla - RCA	50
9 Conclusiones	54
Bibliografía	55

1 Introducción

Una de las partes más problemáticas de la ingeniería es el fallo de componentes mecánicos, que sin importar cualquiera que sea, trae consigo una serie de problemas y catástrofes para todo aquello que rodee y este en contacto con el fallo. Las piezas y componentes se diseñan para que cumplan una determinada funcionalidad que con el pasar del tiempo y el trabajo se ponen en constante desafío de confianza para el usuario. En un mundo ideal los componentes no fallarían y por ende toda máquina, sistema o estructura jamás sufrirían daños, pero esto no ocurre, los componentes debido a diversos factores humanos o ambientales pueden llegar a caer en un fallo, además que no es económicamente factible obtener cero defectos, lo que implica que los fracasos en algún nivel de ocurrencia siempre estarán con nosotros [19]. Dichos daños pueden traer consecuencias tales como [36]:

- Fatalidades y muertes.
- Lesiones personales.
- Daños materiales.
- Cierre de una planta entera.
- La pérdida de producción.
- Problemas ecológicos.
- Mantenimientos costosos y prolongados que afectan a la credibilidad de los fabricantes y la fiabilidad de sus productos.

Es allí donde la implementación del análisis de falla entra como parte importante en la prevención de riesgos así como la mejora continua de los productos. American Society for Metals (ASM) define el Análisis de falla como: *“Es un proceso que combina diversas técnicas con el fin de determinar las causas y factores que han conducido a una pérdida no deseada de funcionalidad”* [2].

El análisis de falla por definición es un estudio multidisciplinar que une conocimientos de muchas áreas de la ciencia para determinar la consecuencia de fallo de algún componente. Realizar un análisis de falla de amplias proporciones dependiendo del caso a estudiar podría

emplear conocimientos de Ingenieros expertos en: Fatiga, Corrosión, Metalurgia, Transferencia de calor, Mecánica de fluidos, Ingeniería Aeroespacial, Hidráulica, Ensayos no destructivos, Mantenimiento, etc. Por ende elaborar un estudio preciso, que determine las causas de fallo y se den pautas y recomendaciones para evitar la repetición de fracasos similares, conlleva un arduo trabajo de investigación el cual podríamos llamar como un proceso de retroalimentación e ingeniería inversa.

Un componente mecánico puede pasar por tres periodos de tiempo en su funcionamiento (desde la perspectiva de la falla), las cuales son: un primer periodo en el cual puede sufrir algún tipo de falla prematura o temprana, un segundo periodo de funcionalidad en donde desarrolla su tiempo de vida útil con posibles probabilidades de que sufra algún daño y un último periodo en el cual se evidencia desgaste debido a su funcionamiento y por ende a su obligatoria sustitución, tal como se aprecia en la figura 1-1 [2, 17, 36]. Una de las metas del análisis de falla es la reducción del periodo de falla temprana y por ende la ampliación del tiempo de vida útil que todo diseñador y usuario espera. Otras metas y alcances en el análisis de falla serán tratadas en capítulos posteriores.

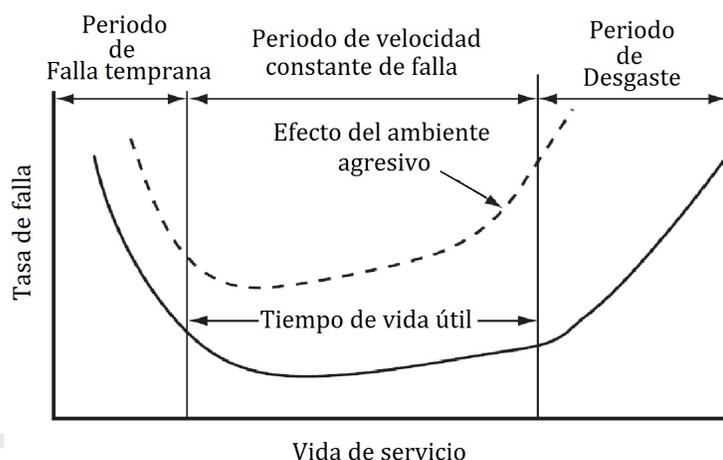


Figura 1-1: Distribución de fallas en el tiempo, curva de “tina de baño”[2].

Por otra parte el análisis de casusa raíz (RCA, por sus siglas en inglés) es la parte complementaria del análisis de falla como metodología criminalística. Por si solo el Análisis de falla no daría los resultados esperados ya que su alcance puede, pero no necesariamente, conducir a una causa raíz corregible del fallo [2]. RCA es una serie de pasos lógicos secuenciales que el investigador logra aislar, determinando los hechos que rodean un evento de falla [28]. Una vez que el problema sea totalmente definido, el análisis determina sistemáticamente el mejor curso de acción que resolverá el evento, razonando la causa más básica de fallo donde el investigador tiene control para corregir y asegurar que no se repita, esto puede implicar la identificación y gestión de procesos, procedimientos, actividades, inactividad, comportamientos o condiciones [9, 28, 33].



Figura 1-2: Analogía de investigación en forma de pirámide [31].

Basado en lo anterior el objetivo de este proyecto es determinar mediante el Análisis de falla una visión general de cada fallo encontrado en los tres componentes mecánicos seleccionados, implementando la búsqueda de pistas de fallo empleando técnicas como inspección visual, análisis metalográfico y análisis de dureza a partir de los cuales se podrán determinar los factores de pérdida de funcionalidad, con esto el siguiente paso será el uso de RCA en el cual se plantearán todas las posibles raíces de fallo que se irán descartando, reduciendo el sesgo de posibilidades hasta lograr determinar la causa raíz de fallo, emitiendo una serie de recomendaciones que podrían prevenir la reiteración de la falla encontrada en piezas mecánicas similares a las estudiadas. Tal como se observa en la figura **1-2** la analogía expresa que la investigación conformará una base sólida a partir del análisis de falla, seguidamente RCA será el segundo escalón y por último el reporte y conclusiones darán finalización al estudio de los componentes mecánicos.

2 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a tres componentes mecánicos que han sido obtenidos de talleres automotrices y otras piezas metálicas que presentan algún tipo de falla con el fin de determinar la causa probable de falla.

2.2. Objetivo Específicos

- Obtener diferentes piezas mecánicas que hayan sufrido diferentes tipos de fallas.
- Recopilar información bibliográfica teórica acerca de estudios sobre análisis de falla relacionados con los componentes mecánicos obtenidos.
- Realizar pruebas de laboratorio tales como inspección visual, análisis de dureza y análisis metalográfico, bajo normatividad internacional que permitan evidenciar las posibles causas raíz de fallo.
- Determinar las posibles causas de fallo de las piezas seleccionadas mediante la aplicación de la metodología del análisis de causa raíz con el fin de emitir un concepto técnico para evitar la falla de componentes similares debido a la misma causa.
- Elaborar un artículo científico en el cual se plasmen los aspectos más relevantes de la investigación, para su posterior postulación en alguna revista indexada en publinde.

3 Fundamentos - Análisis de Falla

3.1. Falla

La falla en ingeniería se define como todo desempeño inaceptable e incorrecto en el funcionamiento previsto de algún componente, maquina, sistema o proceso. Dicha condición no permite realizar las funciones para las cuales se a diseñado de manera segura, fiable y económica. La “falla” es simplemente el resultado físico de un conjunto de circunstancias preexistentes, una secuencia de acontecimientos, o una situación en desarrollo [2, 36].

La falla puede ser definida en distintos niveles. El primer tipo es aquel donde el sistema o componente funciona pero no cumple el deseo final que se espera, esto se considera una *pérdida de función*, por ejemplo una lámpara de estacionamiento fallida en un automóvil, esta representa poca importancia en el desempeño total del coche como sistema de transporte, pero es un fallo (a un nivel muy bajo de falla), otro ejemplo se presenta en la falla de un motor a reacción que sólo puede producir un empuje parcial, insuficiente para permitir que un avión despegue, es claro que funciona pero no cumple las expectativas de diseño y funcionalidad esperadas por el usuario. El siguiente nivel de fallo implica que el sistema o componente realiza su función pero de ninguna forma es confiable o seguro, la *pérdida de vida útil* es clara y de deben tomar acciones, por ejemplo un cable de subida y bajada de un ascensor ha perdido su vida útil al sufrir fracturas por fatiga en algunos de los alambres individuales en su entretejido debido a irregularidades en el envoltorio sobre la polea, a pesar de que el cable sigue funcionando, la presencia de fracturas resulta en una condición insegura para los usuarios por lo tanto se considera un fallo. El último nivel de falla se presenta cuando el sistema o componente es inoperable, es decir ha sufrido un daño profundo y se requiere una sustitución inmediata, por ejemplo la fractura de un eje en una bomba, destrucción de un rodamiento, daño en cojinetes, etc [2, 29]. La falla también se contempla desde la perspectiva de la vida humana, tal como se observa en la figura 1-1, y explicada en la introducción de este proyecto.

La ocurrencia de fallas mecánicas tiene implicaciones significativas para todos los interesados, desde los científicos hasta los responsables políticos. Los beneficios de costos, las mejoras en el diseño y el crecimiento de la confiabilidad que surgen de las fallas y sus posteriores análisis son lo suficientemente enormes como para hacer que la inversión a largo plazo de estos estudios valga la pena. El dicho “la basura de un hombre es el tesoro de otro hombre” se aplica a las fallas, es indiscutible que las historias de fracasos son generalmente mucho más

útiles que las historias de éxito [2, 17, 30].

En el gráfico **3-1** se muestra la relación de todos los aspectos en la vida de un componente, desde la fase de diseño, vida de servicio, análisis sistemático de fallas y estudio post funcionamiento. Todo ello contribuye a un mejoramiento en las distintas prácticas que desarrollan un producto [13].

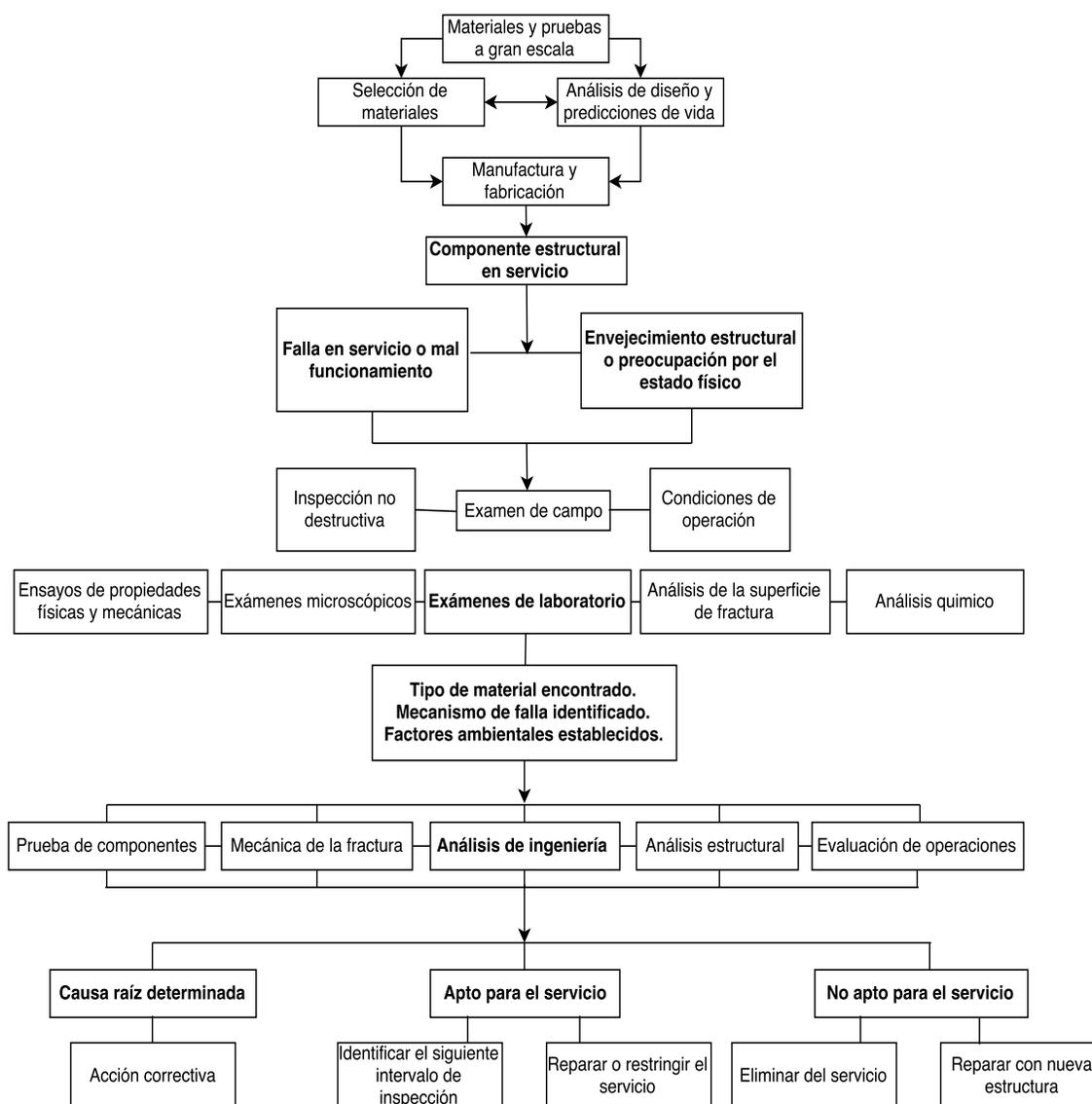


Figura 3-1: Diagrama de flujo que muestra la relación entre la fase de diseño y las tareas de investigación para fallas en servicio, envejecimiento estructural y acciones correctivas [13].

3.2. Causas de fallo

Las causas de fallo ocurren por distintos tipos de eventos (o combinación de ellos) que bajo ciertas circunstancias humanas o ambientales se presentan. Estas causas se categorizan de tal forma que pueda ayudar al analista a identificar de manera más sencilla una(s) causa raíz del fallo. Se identifican 6 grupos de categorización en la búsqueda de la falla: Defectos de diseño, Defectos de manufactura, Defectos de montaje, Anomalías de servicio y abuso, Mantenimiento inadecuado y Sabotaje. Es claro que se puede llegar a ser más particular en cada una de las causas para encontrar una causa raíz más profunda, por ello solo se mencionan eventos generales para cada categoría de causas de falla [2, 11, 14, 36].

Defectos de diseño

Las deficiencias en el diseño son características inaceptables en un producto o sistema, son resultado del proceso y concepción como tal del diseño. Dichos errores abarcan desde el concepto original (idea), la configuración general del diseño y la selección de materiales y procesos de fabricación. Para analizar los factores del proceso de diseño que contribuyó a un fallo de ingeniería, es necesario revisar las fases del proceso de diseño en el contexto del historial original del proyecto, su gestión, las presiones comerciales predominantes y los factores externos de influencia. Al comenzar con el componente fallido y retroceder a lo largo de su historia, recopilando evidencias sobre cómo fue diseñado, desarrollado y producido, a menudo es posible identificar y caracterizar las debilidades que se convirtieron en factores que contribuyeron al fracaso [2]. Se presentan algunas posibles causas de fallo debido a mal diseño:

- Subestimación de la tensión de servicio.
 - Baja capacidad
 - Sobre capacidad
 - Proporciones físicas incorrectas
 - Condiciones físicas incorrectas (temperatura, presión etc)
 - Rodamientos inadecuados.
 - Acoplamiento incorrecto.
- Geometría indeseable.
 - Concentradores de esfuerzos.
 - Radios inadecuados en las esquinas.
- Falta de acceso para inspección.
- Difíciles de fabricar.
- Inadecuada elección de material.
 - Corrosión y / o erosión
 - Desgaste rápido.
 - Fatiga.
 - Fuerza excesiva.
 - Galling.
- Inadecuada elección de tratamiento térmico.
- Insuficiencia de instrumentación.

- Error de control electrónico.
- Fallo en el control neumático.

Defectos de manufactura

La fabricación de componentes mecánicos se refiere al proceso de creación de un producto con documentación técnica y materias primas, generalmente realizado en una fábrica. Los defectos relacionados a la manufactura pueden estar sujetos a una serie de acumulación de errores desde el trabajo hecho en la fundición, tratamiento térmico, mecanizado y soldadura, cada uno de estos ítems tiene un estudio propio y conlleva un análisis más profundo de todos los defectos que se puedan presentar en su ejecución. Todos los inconvenientes que se presenten en la manufactura logran ser controlados con mejores procesos de verificación de calidad en la línea de producción o fuera de esta, para cada una de dichas actividades, siempre y cuando se tenga un plan de acción de control en el proceso de creación del producto [2, 18]. Se presentan a continuación algunas posibles causas de defectos en la manufactura del producto:

- Materiales.
 - Confusión de materiales.
 - Mala calidad.
 - No conformidad con especificaciones.
 - Fases indeseables.
 - Inclusiones No metálicas.
- Fundición.
 - Porosidad.
 - Inclusiones.
 - Segregación.
- Piezas forjadas
 - Pliegues.
 - Fisuras.
 - Líneas de flujo desfavorables.
- Soldadura.
 - Falta de fusión.
- Fisuras frágiles en la zona afectada por el calor (HAZ).
- HAZ sensibilizado.
- Fisuras de esfuerzos residuales.
- Inclusiones de escoria.
- Craterización de la zona de fusión en el punto final.
- Contorno de metal de relleno fuera de especificación.
- Grietas en caliente.
- Fisuras a bajas temperaturas de exposición.
- Fragilidad del hidrógeno debido a la contaminación por humedad.
- Procesos de eliminación de metales.
 - Acabado Superficial pobre.
 - Grietas debidas a mecanizado abusivo.

- Daño microestructural debido a herramientas en mal estado ó equivocadas.
- Grinding burn (daño térmico a la pieza de trabajo durante el rectificado).
- Fisuras residuales por sobrecalentamiento.
- Ataque intergranular por mecanizado electroquímico.
- Tratamiento térmico.
 - Crecimiento del grano.
 - Transformación de fase incompleta.
 - Retirar las grietas.
 - Decarburización.
 - Martensita no templada.
 - Temblor de fragilidad y condiciones similares de fragilización.
 - Microestructura sensibilizada.
- Inhomogeneidades en la microestructura.
- Pérdida de propiedades debido al sobrecalentamiento durante el horneado posterior.
- Tratamiento superficial / Acabado.
 - Limpieza inadecuada.
 - Corrosión debido a una limpieza inadecuada antes de pintar.
 - Ataque intergranular o fragilización por hidrógeno debido a la limpieza ácida.
 - Recubrimiento inadecuado.
 - Post tratamiento inadecuado.
 - Fragilidad del hidrógeno debida a la galvanoplastia.
 - Corrosión por estrés por lixiviación del núcleo de autoclave cáustico de fundición.

Defectos de montaje

Los defectos de montaje, están relacionados a posibles fallas en la elaboración de instalaciones donde las piezas, maquinas o sistemas ejecutaran sus correspondientes funciones. Estas fallas pueden ser del tipo obra civil, montaje eléctrico, hidráulico, neumático, desagüe etc, generalmente debido a una incorrecta planeación y ejecución de dichas tareas. Los ingenieros de proyectos encargados de realizar los montajes tienen que garantizar que la puesta en marcha sea correcta, de no ser así surgirán complicadas situaciones en las cuales las pérdidas de tiempo y dinero sean factores importantes en la ejecución del montaje [2]. Se presentan a continuación algunos errores en montajes:

- Ajuste inadecuado.
- Tolerancias incorrectas.
- Partes omitidas.
- Partes erréneas.
- Empernado inadecuado.
- Piezas / tornillos no apretados.

- Mal alineamiento.
- Contacto inadecuado del cojinete.
- Pruebas inadecuadas.
- Malas conexiones.
- Materiales extraños dejados in situ.
- Controles desactivados o no puestos en servicios.
- Pobre mano de obra.
- Cimientos.
 - Asentamiento.
 - Datos de suelo insatisfactorios.
 - Rejuntado inadecuado o insuficiente.
 - Fisura o separación.
 - Desequilibrio.
- Tubería.
 - Desalineación.
 - Limpieza inadecuada.
 - Drenaje insuficiente de líquidos.
 - Tubería de menor tamaño
- Apoyo inadecuado.
- Almacenamiento.
 - Sistema de aceite no limpio.
 - Drenaje inadecuado.
 - Revestimiento protector no aplicado.
 - Recubrimiento incorrecto utilizado.
 - Equipo no limpiado.
 - Protección insuficiente.
 - Corrosión por sal.
 - Corrosión por la lluvia o la humedad.
 - Embalaje deficiente.
 - Desecante omitido.
 - Contaminación con suciedad, etc.
 - Daño de carga.
 - Daño en el transporte.
 - Soportes insuficientes.
 - Daños por descargas.

Mantenimiento inadecuado

Los errores de mantenimiento son uno de los problemas más comunes a la hora de hablar de fallas, es una problemática que se presenta de las formas más comunes en cualquier tipo de industria, generalmente vinculadas a prácticas no apropiadas o inexistentes de mantenimiento. Desde los años 80 se ha implementado la metodología de RCM (Mantenimiento basado en confiabilidad, por sus siglas en inglés), usada por primera vez en la aviación estadounidense y adoptada por las industrias de todo el mundo con el transcurso del tiempo, RCM plantea metodologías para el desarrollo de mantenimientos y procesos de mejora en la calidad de los productos o servicios que garantice a la maquinaria a intervenir con esta práctica, disminución en los tiempos de manutención, disminución de fallas funcionales y paradas precipitadas de producción debido a fallos. RCM es una completa metodología que

reduzca los fallos debido al funcionamiento prolongado de componentes mecánicos [2]. Estas son algunas de las fallas más comunes cuando no se tiene un programa de mantenimiento:

- Cualificación mano de obra.
 - No horarios de inspección y calibración de herramientas.
 - Poca accesibilidad.
- Reemplazo incorrecto.
- Herramientas equivocadas.
- Concesiones excesivas.
- Inspecciones inadecuadas.
- Alteraciones.
- Choque.
 - Térmico.
 - Mecánico.
 - Inicio incorrecto.
- Mantenimiento preventivo.
 - Pospuesto.
 - Programa demasiado largo.
- Inspección Incorrecta.
 - Desviación de las tolerancias aprobadas.
 - Desviación de las normas de aceptación.
 - Técnicas incorrectas.
- Lubricación.
 - Suciedad en el aceite.
 - Aceite insuficiente.
 - Lubricante incorrecto.
 - Agua en el lubricante.
 - Fallo de la bomba de aceite.
 - Baja presión de aceite.
 - Líneas conectadas.
 - Filtración inadecuada.
 - Aceite contaminado.
- Efectos ambientales.
 - Varios tipos de Corrosión química.
 - Corrosión bajo tensión.
 - Fatiga por corrosión.
 - Erosión.

Anomalías de servicio y abusos

Las anomalías de servicio y abuso son generalmente representadas por toda aquella acción que involucre el mal uso por parte de los operarios de los componentes. Son acciones que conllevan una sobrecarga o deficiencia en las funciones para las cuales han sido diseñadas las piezas, maquinas o sistemas. El desconocimiento o ignorancia en el manejo y uso de las instrucciones consigue ser la causa raíz de los fallos, para ello siempre es conveniente que los operarios sean personal capacitado y entrenado en dichas funciones. Las responsabilidades de estas personas en el manejo de las maquinas pueden o no alargar el tiempo de vida útil de los componentes [2]. Algunas de las causas de fallo debido a estas anomalías son:

-
- Lubricación inadecuada
 - Limpieza inadecuada
 - No seguimiento a las instrucciones de operación.
 - Exceso de velocidad.
 - Sobrecarga.
 - Operadores mal entrenados.
 - Condiciones de servicio inesperadas.
 - Temperatura y estrés.
 - Vibraciones.
 - Cambios en el entorno.

Sabotaje

El sabotaje ocurre cuando la persona esta consiente del daño que puede traer para la pieza, maquina o sistema, conlleva respectivas acciones legales dependiendo el grado de peligro que genere sus acto [36].

- Daño deliberado.
- Daños mecánicos.
- Sabotaje explosivo.

3.3. Modos de fallo

Los modos de fallo se definen como todos los posibles mecanismos físicos que combinan sus efectos para producir un fallo dentro de un sistema, el cual se somete a la aplicación de cargas únicas o monótonas durante su funcionamiento o no funcionamiento [16, 23]. Los fallos mecánicos implican una interacción extremadamente compleja entre factores tales como, la carga aplicada, el tiempo de funcionamiento y la exposición al ambiente [40]. Se presentan a continuación los modos de fallo más comunes [11, 17, 23, 40].

1. Deformación elástica inducida por la fuerza y/o la temperatura.
 - Corrosión por cavitación.
 - Corrosión biológica.
2. Límite elástico (Yielding).
 - Corrosión por estrés.
3. Formación de estrías (Brinnelling).
4. Ruptura dúctil.
5. Fracturas frágiles.
6. Fatiga.
 - Fatiga de ciclo alto.
 - Fatiga de bajo ciclo.
 - Fatiga térmica.
 - Fatiga superficial.
 - Fatiga de impacto.
 - Fatiga por corrosión.
 - Fatiga por fricción (Fretting).
7. Corrosión.
 - Ataque químico directo.
 - Corrosión galvánica.
 - Corrosión por rendija (Crevice corrosion).
 - Corrosión por picadura.
 - Corrosión intergranular.
 - Lixiviación selectiva.
 - Corrosión por erosión.
8. Desgaste (Wear).
 - Desgaste adhesivo.
 - Desgaste abrasivo.
 - Desgaste corrosivo.
 - Desgaste por fatiga.
9. Impacto.
 - Fractura por impacto.
 - Deformación por impacto.
 - Desgaste por impacto.
 - Fatiga de impacto.
10. Temperatura.
 - Choque térmico.
 - Pandeo (Buckling).
 - Sobrecalentamiento a largo plazo.
 - Sobrecalentamiento a corto plazo.
 - Relajación térmica.
 - Fluencia (Creep).
 - Pandeo de arrastre.
11. Ruptura por estrés.
12. Galling y aprehensión.

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| 13. Astillamiento (Spalling). | 16. Desgaste de corrosión. |
| 14. Daño por radiación. | 17. Fatiga por corrosión. |
| 15. Corrosión por estrés. | 18. Combinación de fluencia y fatiga. |

Se profundizan los modos de falla que fueron encontrados en las piezas mecánicas estudiadas para esta investigación.

Desgaste

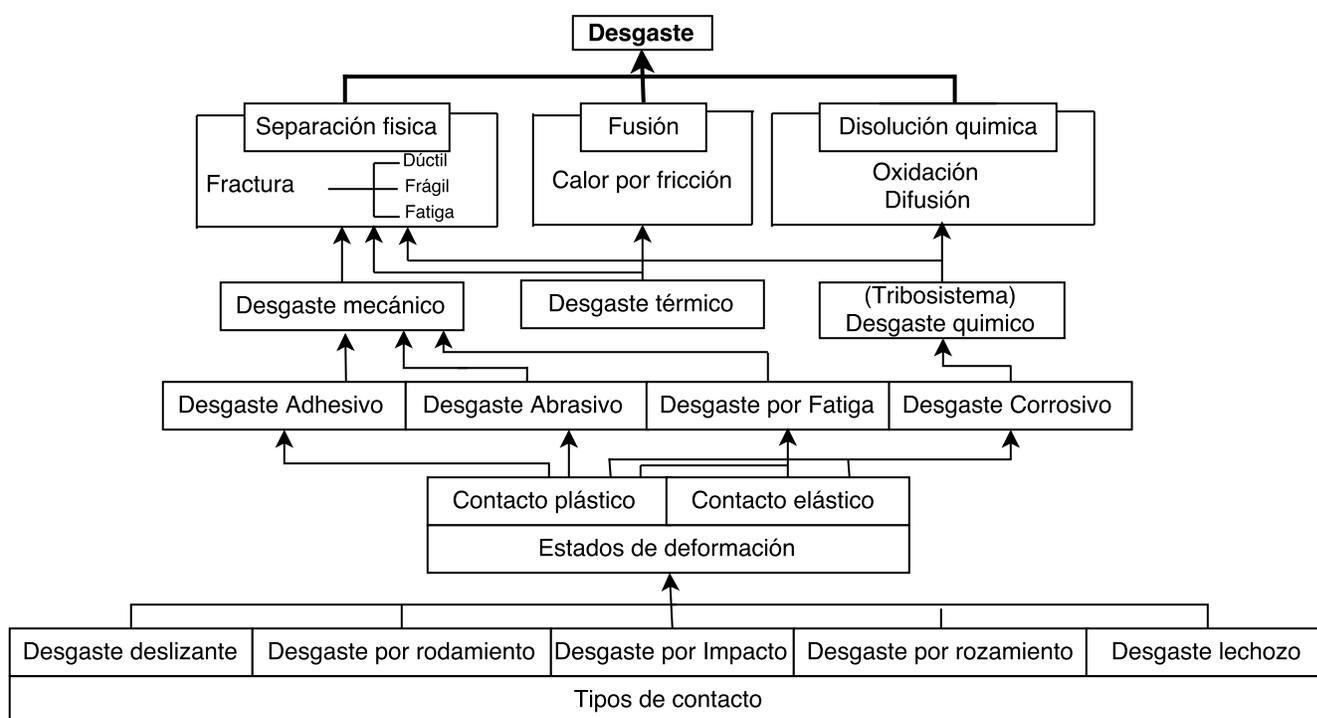


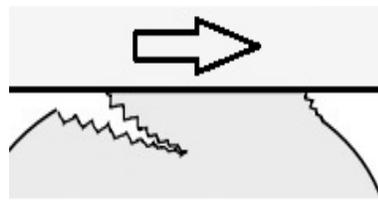
Figura 3-2: Palabras clave descriptivas del desgaste y sus interrelaciones [10].

El desgaste es el resultado de la eliminación o desplazamiento no deseado de material por separación física debido a microfrazuras, disolución química o por fusión en la interfaz de contacto causada por el roce entre una superficie y un cuerpo o una sustancia que se mueve con relación a él (sólido, líquido o gas en contacto), por ende se manifiesta básicamente en la deformación y fractura, estos pasan de una microescala y continúan hasta el punto que el daño a macroescala esté presente, por ello se aprecia cambios de aspecto del perfil de superficie [2, 10, 14, 45]. Por lo general, el desgaste es un tipo previsible de deterioro, el cual es progresivo, ya que aumenta con el uso o ha cantidades crecientes de movimiento así como proporciona información del ambiente físico que indujo al fracaso [2, 45]. Además, existen varios tipos de desgaste: adhesivo, abrasivo, fatiga y corrosivo las cuales interactúan con

otros conceptos vistos en la figura 3-2. El modo de desgaste dominante puede cambiar de uno a otro por razones que incluyen cambios en las propiedades del material superficial y respuestas de superficie dinámicas causadas por calentamiento, fricción, formación de película química y desgaste así como con interacciones entre otros modos de fallo como se observa en la figura 3-4 para el caso del desgaste [10, 37].

Desgaste Adhesivo

El desgaste adhesivo es la transferencia de metal de una superficie en contacto hacia otra. Si la interfaz de contacto entre dos superficies bajo contacto plástico tiene suficiente resistencia de adhesión para resistir el deslizamiento relativo, se introduce una gran deformación plástica provocando desprendimientos en la zona de contacto bajo compresión y cizallamiento. Como resultado de una deformación tan grande en la región de contacto, se inicia una grieta y se propaga en el modo de fractura combinada por tracción y cizallamiento. Cuando la grieta alcanza la interfaz de contacto, se forma una partícula de desgaste y se completa la transferencia adhesiva provocando microsoldadura e inmediatamente se separan las dos superficies ver figura 3-3 [10, 14, 37, 41].



Desgaste Adhesivo

Figura 3-3: Desgaste Adhesivo [10].

Mecanismos de falla por temperaturas elevadas que limitan la vida

El término fallo por sobrecalentamiento significa un fallo resultante del funcionamiento de un componente a una temperatura superior a la esperada en el diseño. El tiempo expuesto a temperatura es un factor importante, y estos tipos de fallas a menudo se denominan fallas de sobrecalentamiento a corto y largo plazo [2]. Los fallos de temperatura elevada son quizás el tipo más complejo de fallas, ya que todos los modos de fallas mencionados en la sección 3.3 pueden ocurrir a temperaturas elevadas, por lo tanto, estos fallos deben ser examinados y considerados con mucho cuidado porque muchos de los diferentes modos de falla tienden a interactuar tal como se observa en la figura 3-4 para el caso de la temperatura. Así pues los principales tipos de fallas como consecuencia de temperaturas elevadas son la fluencia, la fatiga de ciclo bajo o de ciclo alto, la fatiga térmica, la sobrecarga y combinaciones de éstas modificadas por el medio ambiente [45].

Para el caso de estudio de esta investigación se describe la falla de sobrecalentamiento a corto plazo, es aquella en la que un solo incidente o un pequeño número de incidentes exponen al componente a una temperatura excesivamente alta (cientos de grados por encima de la normal), hasta el punto en que se produce una deformación o rendición. El sobrecalentamiento resulta de condiciones anormales tales como pérdida de flujo de refrigerante y transferencia excesiva de temperatura. En general, los fallos de sobrecalentamiento a corto plazo implican una deformación considerable en forma de alargamiento de metal y reducción en área de pared o sección [2].

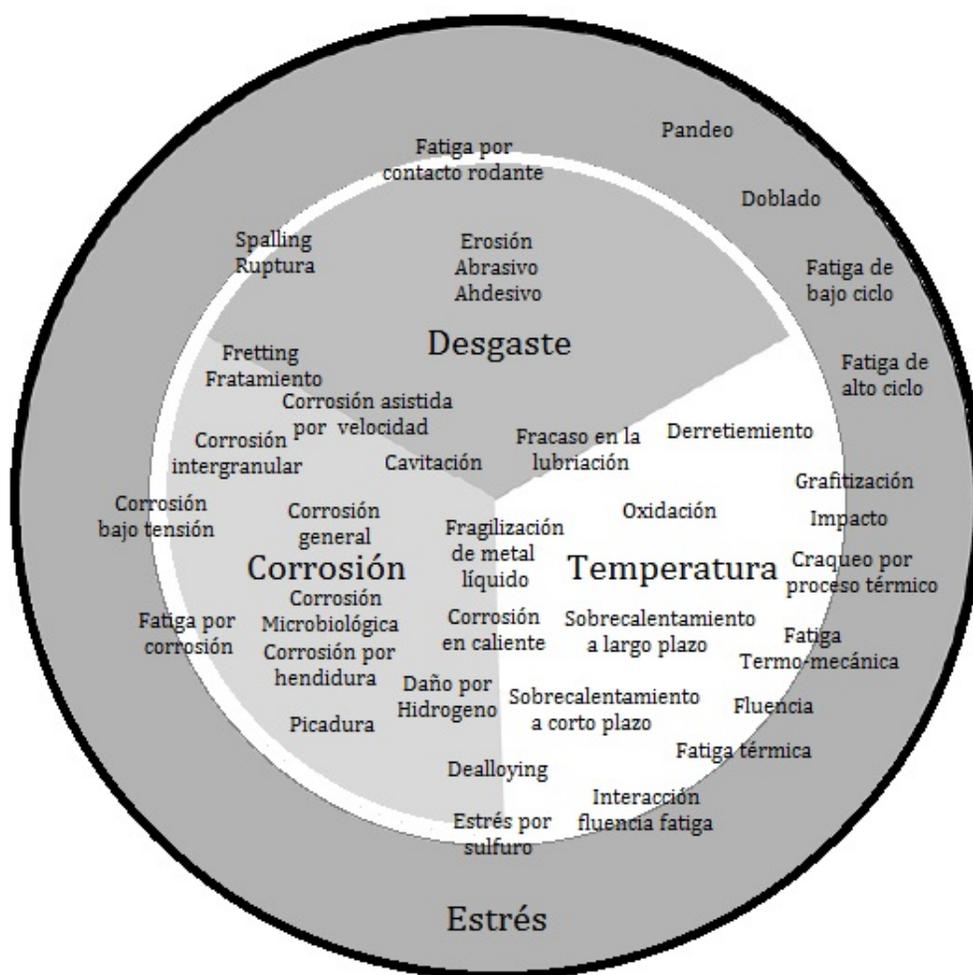


Figura 3-4: Circulo de fallos - Interacción entre algunos modos de fallos [2].

3.4. Análisis de falla

Análisis de falla es un proceso crítico que se realiza para definir las raíces físicas de los problemas que han conducido a una pérdida indeseada de funcionalidad. Su complejidad se desarrolla en la aplicación de distintas técnicas de observación, inspección y técnicas de laboratorio así como la aplicación de un sin número de conocimientos en distintas ramas de la ciencia e ingeniería, dándole una perspectiva multidisciplinar de conocimientos [2].

El origen del proceso de análisis de falla se encuentra estrechamente relacionado con el uso del método científico, un modelo investigativo para la creación de conocimiento y resolución de problemas que busca exponer y confirmar teorías de una forma práctica, refutable y comprobable. Usa de forma ordenada una secuencia de pasos encarrilada a encontrar soluciones a los objetivos planteados en el estudio [2, 44].

1. Definir el problema.
2. Proponer una hipótesis.
3. Recopilar datos.
4. Prueba de la hipótesis.
5. Desarrollar conclusiones.

Los modelos de resolución de problemas establecen un proceso continuo de mejoras, donde se resuelve un problema, seguidamente no se detienen allí sino que basado en lo aprendido se buscan soluciones a otros problemas ligados a el problema resuelto tal como se observa en la figura 3-5, buscando en esto la mejora, es decir, de los fallos se aprende, aunque se de un paso a tras se dan dos hacia adelante, siempre y cuando se piense en progresar el estudio del análisis de falla da gratos frutos a sus usuarios [2, 27].

Los pasos en la resolución de problemas están definidos como [2]:

- *Identificar*: La identificación describe la situación actual del problema, se describen todos los síntomas o indicadores que preceden el fallo, estableciendo la magnitud del impacto en el sistema, maquina, personal, factores económicos, clientes etc.
- *Determinar la causa raíz*: Analizar el problema para identificar la causa (s).
- *Desarrollar acciones correctivas*: Basado en el paso anterior y conocido las recomendaciones del análisis, se enumeran una serie de soluciones que mitiguen y prevengan la recurrencia del problema, desarrollando un plan de mitigación y nuevas alternativas en pro de sacar provecho al análisis.

- *Validar y verificar las acciones correctivas:* Se prueban las recomendaciones y las acciones correctivas, corroborando la efectividad de estas, es decir chequeando que el problema se ha corregido y la perspectiva de los trabajadores, directivos y clientes sea de satisfacción.
- *Estandarizar:* Incorporar acciones correctivas en el sistema de documentación del sistema de la empresa, organización o industria para prevenir la recurrencia en productos o sistemas similares. Monitoree los cambios para asegurar la efectividad.

Incorporar el uso de los pasos anteriores darán respuesta a [2]:

1. ¿Cuál es el problema?
2. ¿Cuál es la causa raíz del problema?
3. ¿Cuáles son las posibles soluciones?
4. ¿Cuál es la mejor solución?

Que en definitiva son las preguntas a las que se le deben dar respuesta cuando se emplea análisis de falla.

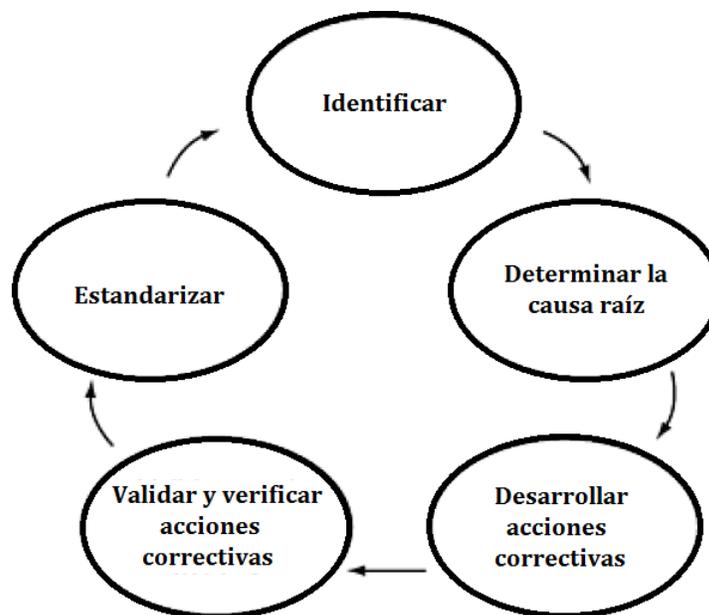


Figura 3-5: Modelo de resolución de problemas [2].

Perfil del analista de fallas

El analista de fallas se desenvuelve en un par de roles durante el desarrollo de su trabajo, el primero como Sherlock Holmes, un detective que se enfrenta a distintos casos en los cuales debe examinar y evaluar cuidadosamente todas las pruebas disponibles para luego preparar una hipótesis relatando una cadena de acontecimientos en las cuales se expliquen los hechos del “crimen”. El segundo rol del analista de falla es de forense, pero en lugar de realizar autopsias a una persona que sufrió una muerte no natural, se encarga de trabajar con piezas, maquinas o sistemas que han sufrido un deterioro antinatural o prematuro. El analista debe mantener la mente abierta al examinar y analizar la evidencia para fomentar una perspectiva clara e imparcial de la falla, siempre estar dispuestos a obtener ayuda con expertos en otras disciplinas integrando conocimientos que fomente una comprensión cuantitativa de los factores de carga e información de antecedentes sobre diseño, fabricación e historial de servicio [2, 45].

Objetivos del análisis de falla

Dependiendo las circunstancias del evento, el ingeniero determinará qué camino debe seguir su investigación esta dependerá del momento de vida en el que se encuentre el componente, así como se explica a continuación. El primer objetivo de la realización de un análisis de falla, debe ir encaminado en la determinación de fallos en *Prototipos*, donde el diseñador pone a prueba su creación y determina que aspectos debe mejorar o por el contrario, el componente aplica a todos los requerimientos y especificaciones de diseño, vale aclarar que la pieza mecánica aún no está disponible para el consumidor y se hace todo lo posible para que funcione sin ningún problema. Como segundo objetivo se dispone el análisis de falla en la *Mejora de un producto* el cual ya está en el mercado pero por alguna razón se debe mejorar, este puede estar generando costos adicionales al usuario o al fabricante. La tercera opción para valerse de dicho análisis es en el momento que la pieza mecánica ha fallado y se deba realizar una *Asignación de responsabilidades* en cuestiones legales como reparación de daños financieros, lesiones físicas o inclusive muertes, diagnosticar el fallo decidirá qué acciones se tomaran por algún tipo de negligencia de las partes involucradas. El último objetivo que aborda el análisis de falla es la *Prevención de recurrencias*, en esta situación se busca encontrar el o los fallos, hallar la respuesta y prevenir la ocurrencia del mismo fallo. Este proyecto se inclina al último objetivo expuesto, pero el procedimiento aplicado funciona para cada una de las finalidades nombradas [2].

3.5. Metodología del análisis de falla

El desarrollo de un correcto análisis de falla ha venido mejorando a través de los años, gracias a la experiencia que se ha ganado por parte de los ingenieros y científicos especializados en esta disciplina, tratando con los más complejos casos de estudio. Es importante que el desarrollo de una metodología de trabajo estructurada para cumplir los objetivos y alcances del análisis, contemple todas las posibles herramientas para la búsqueda de una causa raíz de fallo, abarcando conocimientos multidisciplinarios en distintas áreas de la ingeniería, apoyándose de la observación, inspección, ensayos de laboratorio, cálculos y experiencia. Los autores contemplan en sus libros determinadas cantidades de “pasos” a seguir para un acertado desenvolvimiento en la práctica de análisis de falla, dichos autores difieren de otros en determinados pasos, pero como anteriormente se menciona, se deben usar distintas herramientas que cumplan el objetivo del estudio. Cada investigación es distinta por ende cada caso tendrá un alcance distinto, por ello obviar alguno de los pasos y variar el orden de ejecución en la práctica es correcto siempre y cuando la naturaleza del estudio lo permita. A continuación se presentan dichos pasos para un correcto análisis de falla, esta metodología ha sido empleada y verificada por estándares internacionales, es usada por The Bangalore National Aerospace Laboratories (NAL) Failure Analysis Centre, pioneros en el desarrollo de análisis de falla en componentes mecánicos, así como parte importante en sentar las bases de esta metodología [2, 11, 14, 17, 23, 30, 36].

Pasos para realizar un análisis de falla:

1. Recopilación de información.
2. Inspección visual.
3. Ensayos no destructivos.
4. Selección, identificación y / o limpieza de evidencia crítica.
5. Examen y análisis macroscópico.
6. Fractografía.
7. Ensayos de dureza.
8. Determinación de propiedades mecánicas.
9. Examen metalográfico.
10. Análisis químico.
11. Rayos X.
12. Pruebas de simulación.
13. Consulta con expertos.
14. Informe de investigación.
15. Seguimiento de las recomendaciones.
16. Preservar evidencia.

Esta metodología que incluye una gran cantidad de pasos y herramientas en la búsqueda de causas raíces de fallo, se ve limitada por los recursos que pueda o no disponer el analista, algunas de las técnicas mencionadas suelen ser muy costosas, complejas o no contar con la

tecnología. Por ello es importante aclarar los alcances y limitaciones que se puedan tener en la investigación. Justificado en lo anterior se expone con algo más de profundidad algunas de las técnicas o posibles pasos de esta metodología que se emplearan en la investigación de análisis de fallo y causa raíz de los 3 componentes mecánicos debido a las limitaciones mencionadas.

Inspección visual

El examen visual o prueba (VT) es un método de inspección simple, no destructivo, accesible y de bajo costo que permite detectar discontinuidades superficiales en los componentes a estudiar [8, 20, 36]. Para ello se emplea el ojo humano que sin ayuda posee una profundidad admirable de enfoque y la capacidad de examinar grandes áreas rápidamente, detectando cambios superficiales visibles en el espectro de longitud de onda asequible para este órgano del cuerpo humano. Se recomienda que el ojo este a menos de 6 pulgadas (150 mm) de la superficie a examinar y en un ángulo no inferior a 30° respecto a la superficie a examinar como se observa en la figura 3-6 [13, 20].

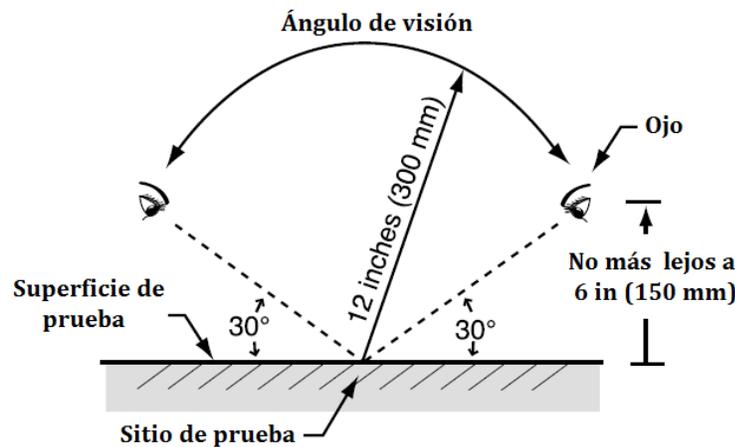


Figura 3-6: Mínimo ángulo para una inspección visual [20].

El chequeo visual revela detalles tales como [14, 20, 36, 45]:

- Localización de discontinuidades
- Cambios de color en la superficie
- Tipo de fractura
- Origen de la fractura
- Dirección del agrietamiento
- Presencia de grietas secundarias
- Fatiga
- Inclusiones

- Presencia de recubrimientos superficiales
- Soldaduras
- Residuos adheridos
- Presencia de desechos externos o productos de corrosión
- Escamas o fragilidad por hidrógeno
- Decoloración
- Presencia de marcas de desgaste en las proximidades de la fractura
- Deformación plástica anterior a la fractura
- Marcas de Chevron
- Marcas de playa
- Cambios dimensionales en el componente
- Evidencia de sobrecalentamiento
- Daño posterior a la fractura, como marcas de fricción
- Calidad de mano de obra en la fabricación

El examen visual se realiza en las siguientes etapas [13, 17]:

- a) Las piezas que han fallado, incluidos todos sus fragmentos, se someten a un examen exhaustivo del estado del cual se recibe, es decir, antes de proceder a cualquier limpieza. Con frecuencia, el suelo y los desechos encontrados en la pieza proporcionan pruebas útiles para determinar la causa del fallo o determinando la secuencia de eventos que conducen al fallo.
- b) La pieza defectuosa se limpia a fondo (si se considera necesario) con disolventes no corrosivos y se somete a un nuevo examen visual.
- c) Inspección visual.
- d) Todas las discontinuidades encontradas deben ser registradas y documentadas ya sea por escrito o evidencia fotográfica.
- e) Se debe dar la localización del defecto con respecto algún punto de referencia de la pieza.
- f) Se debe describir parámetros del defecto, su gravedad, frecuencia y área cubierta (es decir, extensión del daño).
- g) Detectar defectos relacionados cerca a las discontinuidades que puede o no haber iniciado o contribuido, directa o indirectamente a la falla.

En la tabla **3-1** se mencionan algunos modos de fallo identificables a partir de la inspección visual con algunas características posibles de detectar, también de lo que se puede observar

en una inspección microscópica [2, 14].

Método	Modos de falla instantáneos			Modos de falla progresivos		
	Sobrecarga dúctil	Sobrecarga frágil	Fatiga	Corrosión	Desgaste	Fluencia
Inspección visual, 1 a 50 X en la superficie de fractura	<ul style="list-style-type: none"> • Distorsión en la dirección coherente con las cargas aplicadas • Fractura opaca y fibrosa • Bordes cortantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Poco o nada de distorsión • Fractura plana • Textura brillante o gruesa, cristalina, granulada • Rayones o marcas de Chevron apuntan al origen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zona progresiva plana con marcas de playa • Zona de sobrecarga consistente con la dirección de carga aplicada • Marcas de Ratchet donde los orígenes se unen 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste general, rugosidad, perforación o excavación de zanja • El daño por estrés-corrosión e hidrógeno pueden crear múltiples grietas que parecen quebradizas 	<ul style="list-style-type: none"> • Corte, abrasión, pulido o erosión • Galling en la dirección del movimiento • Áreas rugosas con restos de polvo compactado (fretting) • Transiciones graduales suaves en la zona de desgaste 	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiples fisuras parciales quebradizas • La superficie externa y las fisuras internas contienen recubrimientos a escala de la reacción • Fractura después de un cambio dimensional limitado
Inspección SEM 20 a 10.000 X (superficie de fractura).	<ul style="list-style-type: none"> • Microhuecos (hoyuelos) alargados en la dirección de carga. • Fisuras simples sin ramificación. • Aparición de superficies lisas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hendidura o fractura intergranular. • El Área de origen puede contener un concentrador de imperfección o tensión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zona progresiva: aspecto desgastado, plano, puede mostrar estriaciones en aumentos por encima de 500 X. • Zona de sobrecarga: puede ser dúctil o frágil. 	<ul style="list-style-type: none"> • El camino de penetración puede ser irregular, intergranular o una fase selectiva atacada. • EDS (Espectroscopia de Energía Dispersiva) puede ayudar a identificar corroyente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los desechos de desgaste y/o abrasivos se pueden caracterizar en cuanto a morfología y composición. • La fatiga por contacto aparece como el desgaste en las primeras etapas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiples fisuras intergranulares cubiertas con una escala de reacción. • Las caras de grano pueden mostrar porosidad.

Tabla 3-1: Identificación de modos de fallo a partir de inspección visual y con la ayuda de un microscopio [2].

Ensayos de dureza

Los ensayos o pruebas de dureza son procedimientos cuyo objetivo es determinar el grado de dureza de algún material, dicho resultado se emplea en una comparativa entre el mismo material u otros, estos ensayos presentan ventajas tales como sencillez, rapidez de ejecución y en algunos casos no son destructivos [32]. Se entiende por dureza como una propiedad de los materiales no fundamental que expresa la resistencia a la penetración local permanente o al rasgado, al mecanizado o la abrasión [7, 18]. La resistencia a la penetración localizada, o dureza de indentación, es ampliamente utilizada industrialmente como medida de dureza e indirectamente como un indicador de otras propiedades deseadas en un producto manufacturado [7]. Se encuentran disponibles distintos tipos de ensayos de dureza, dentro de los más importantes y comunes de aplicación son: Método Rockwell, Brinell, Vicker y Knoop.

Método Rockwell

En el método Rockwell de ensayo de dureza, se determina la profundidad de penetración de un indentador bajo ciertas condiciones arbitrarias de ensayo. El indentador puede ser una bola de acero de algún diámetro especificado o un diamante cónico con punta esférica de 120° y radio en la punta de 0,2 mm, llamado "Brale". Se aplica primero una carga menor o precarga de 10 kg, lo que causa una penetración inicial y logra mantener el indentador en su lugar. Bajo esta condición, el dial se pone a cero y se aplica la carga principal. Los valores de estos últimos son 60, 100 o 150 kg. Al retirar la carga principal, la lectura se realiza mientras la carga menor está todavía encendida como se observa en la figura 3-7 [7].

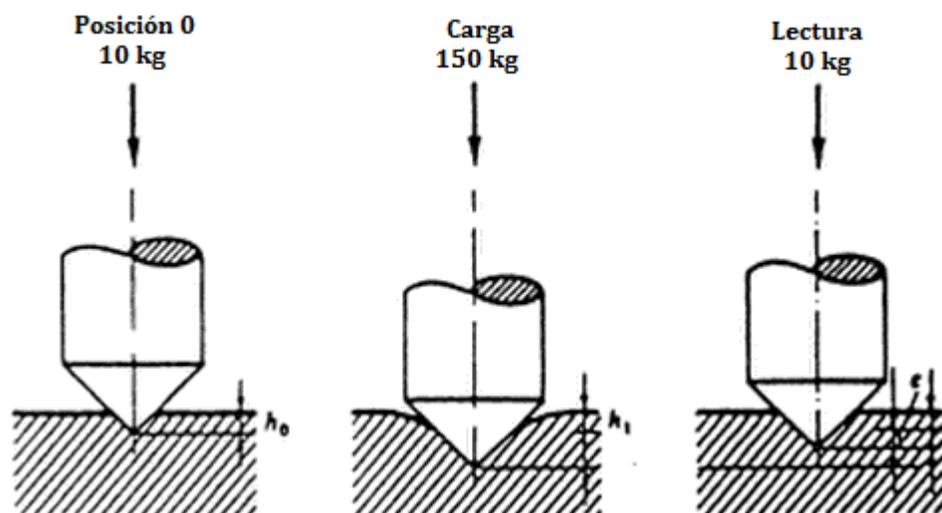


Figura 3-7: Profundidad de penetración por el método Rockwell [32].

Examen Metalográfico

Metalografía es la disciplina científica que examina y determina la constitución y la estructura subyacente de (o las relaciones espaciales entre) los constituyentes en metales, aleaciones y materiales. El examen estructural puede realizarse en una amplia gama de escalas de longitud o niveles de ampliación, que van desde un examen visual o de baja ampliación (aprox 20 X) a un aumento de más de 1.000.000 X con microscopios electrónicos, algunos detalles de fallas se describen en la tabla **3-1** [1, 42]. La metalografía es una parte vital de una investigación de análisis de fallas pudiendo ser ejecutadas en escalas macro y micro. Puede examinar la morfología de la grieta y su relación con la microestructura presente. Ayuda a determinar el historial térmico de un componente o una región de una pieza, revela si el trabajo de endurecimiento está presente, imperfecciones superficiales, inclusiones, recalentamiento, descarburación, recolección de carbono, tratamiento térmico inadecuado, martensita blanca no templada, corrosión intergranular, oxidación y detalles microestructurales, todo ello ayuda al analista en la determinación de la causa raíz de fallo [13, 14, 17]. Debido a la naturaleza de este examen debe considerarse como uno de los procedimientos finales para la determinación de la causa raíz ya que implica la destrucción de evidencia [1].

Realizada las fotografías de microestructura del material, el siguiente paso es su interpretación. Dicha Interpretación de las microestructuras es una piedra angular de la metalografía tal como la adecuada preparación del espécimen. Al igual que la preparación de muestras, la interpretación de las microestructuras es una mezcla de arte, experiencia y ciencia. El arte de interpretar se basa en la experiencia y en el gran cuerpo de imágenes grabadas capturadas e interpretadas por muchos metalógrafos a lo largo de los años. Sin embargo, es claramente imposible llegar a ser un experto en cada microestructura posible de cada aleación posible. El uso de las micrografías existentes como herramienta de interpretación requiere una comprensión de las condiciones de la aleación y del proceso, que pueden no estar disponibles exactamente en las mismas condiciones que el espécimen de interés [1].

Informe de investigación

Los informes de análisis de fallas son, por supuesto, un medio de comunicación tangible de forma escrita, cuyo propósito es informar a la gerencia, cliente, profesor, par o a quien le interese, los hallazgos encontrados en la investigación. Un informe formal de análisis de fallas es una herramienta de enseñanza para el investigador hacia cualquier interesado respecto a su estudio [11]. Para una comunicación eficaz de los resultados del análisis de fallos, la documentación es extremadamente importante. El informe debe ser claro y contener la lógica detrás de las conclusiones. Se incluyen secciones que abarcan la siguiente información [2, 36]:

- Descripción del componente fallido.
- Antecedentes.

- Examen visual de las características físicas generales.
- Investigaciones de laboratorio incluyendo pruebas metalúrgicas, mecánicas, químicas y otras y sus resultados.
- Anomalías, si las hay.
- Discusión del mecanismo o posible mecanismo de falla y secuencia de eventos (RCA).
- Conclusiones y recomendaciones para la prevención de la recurrencia de tales fallos.
- Referencias bibliográficas relevantes.
- Resumen.

4 Fundamentos - Análisis de Causa Raíz (RCA)

Análisis de Causa Raíz

El análisis de la causa raíz (RCA por sus siglas en inglés) es un estudio investigativo el cual pretende identificar y resolver problemas que afectan el rendimiento general o particular de una planta o proceso industrial. RCA es simplemente una herramienta diseñada para ayudar a los investigadores de incidentes a describir lo sucedido durante un fallo en particular, determinar cómo paso y entender por qué sucedió [2, 25, 28].

El estudio de la evidencia física por si sola (realizado con análisis de falla) es posible que no logre el objetivo de una investigación de fallos. El alcance de un análisis de fallas puede, pero no necesariamente, conducir a una causa raíz corregible del fallo por ello RCA emplea una secuencia lógica de pasos donde el investigador aísla los hechos que rodean un evento o un fracaso. Una vez que el problema ha sido totalmente definido, el análisis determina sistemáticamente el mejor curso de acción donde resolverá el evento logrando determinar la raíz de fallo y asegurando posibles acciones correctivas [2, 28].

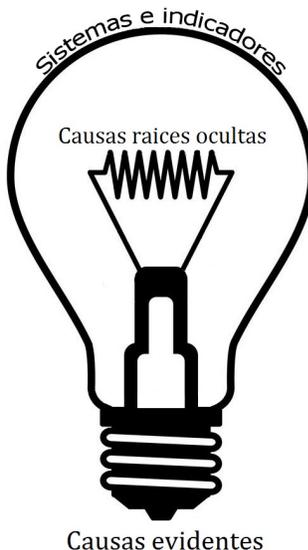


Figura 4-1: Analogía del análisis de falla.

En la figura 4-1 se observa la analogía que soporta la idea inicial en la búsqueda de una causa raíz de fallos, comparándola con los componentes de una bombilla. Los *Sistemas e indicadores* representados por el Bulbo de vidrio, son todos aquellos factores visibles en la falla como tal, es decir todo lo que puede haber producido o ya produjo un daño. Las *Causas evidentes* representadas por el casquillo, son todos aquellos factores de fallo indiscutibles, son el soporte de las causas raíz, posibles de detectar a simple vista o con un examen macroscópico y dan al investigador pautas para seguir las acciones forenses. Por último las *Causas raíz ocultas* representadas por el filamento, son el origen del fallo como tal y es a donde toda investigación de fallos y RCA debe culminar, son todos los posibles factores que llegaron a producir el fallo y es allí en estas causas donde se deben implementar acciones correctivas.

Métodos gráficos para RCA

Una representación visual de una RCA es más fácil de entender que una larga descripción narrativa. Se han desarrollado muchos métodos gráficos que facilitan la organización lógica de la información como una ayuda en la realización de un RCA [2]. La siguiente numeración presentan las técnicas disponibles para encontrar una causa raíz, seguidamente se explican tres de estos métodos que seán empleados en esta investigación [43].

1. Reunión creativa.
2. Histograma.
3. Diagrama de flujo.
4. Análisis de campo de fuerza.
5. Análisis de Pareto.
6. Técnica de grupo nominal.
7. FMEA.
8. 5 Whys.
9. Análisis de tendencia.
10. Análisis del árbol de fallos.
11. Diagrama de causa y efecto (espina de pescado).

Análisis de causa y efecto

El análisis de causa y efecto es un enfoque gráfico para el análisis de fallas. Esto también se conoce como análisis de espina de pescado, un nombre derivado del patrón en forma de pez utilizado para trazar la relación entre varios factores que contribuyen a un evento específico intentando encontrar una causa raíz. Puede construirse de la siguiente manera [2, 28].

- Describa claramente el fallo en el lado derecho del diagrama.
- Identificar las principales categorías de causas como ramas que convergen en el fracaso.
- Haga una lluvia de ideas y enumere todas las causas en cada rama.

- Analizar los datos hasta que se identifiquen las causas raíz.

En la figura 4-2 se detalla un diagrama de espina de pescado con las causas y efectos posibles, tratando de determinar una causa raíz debido a la presencia de corrosión en algún sistema, maquina o pieza.

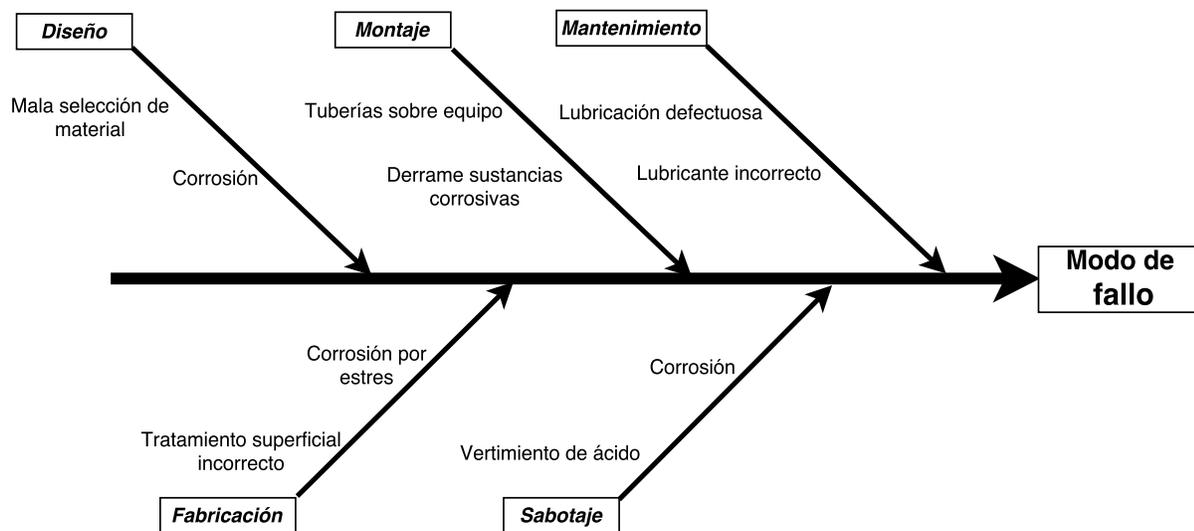


Figura 4-2: Ejemplo diagrama de espina de pescado.

The 5-Whys

The 5-Whys o *Los Cinco Por qué*, es una técnica implementada por primera vez por Saki-chi Toyoda para Toyota Industries Corporation, donde el usuario usando este simple método logra concluir a niveles más profundos la identificación de la causa raíz a determinado problema. El objetivo general es preguntar *por qué?* después de cada causa que se ha identificado hasta que se reconoce las causas raíces verdaderas. Hay tres elementos claves para el uso efectivo de la técnica: (1) declaraciones precisas y completas del problema, (2) honestidad completa en responder a las preguntas, (3) la determinación de llegar al fondo de los problemas y resolverlos. Generalmente se usan cinco niveles de pregunta, pero el método permite usar más o menos cuestionamientos [2, 39]. En la figura 4-3 se aprecia de manera jerárquica como se determina una causa raíz de fallo.

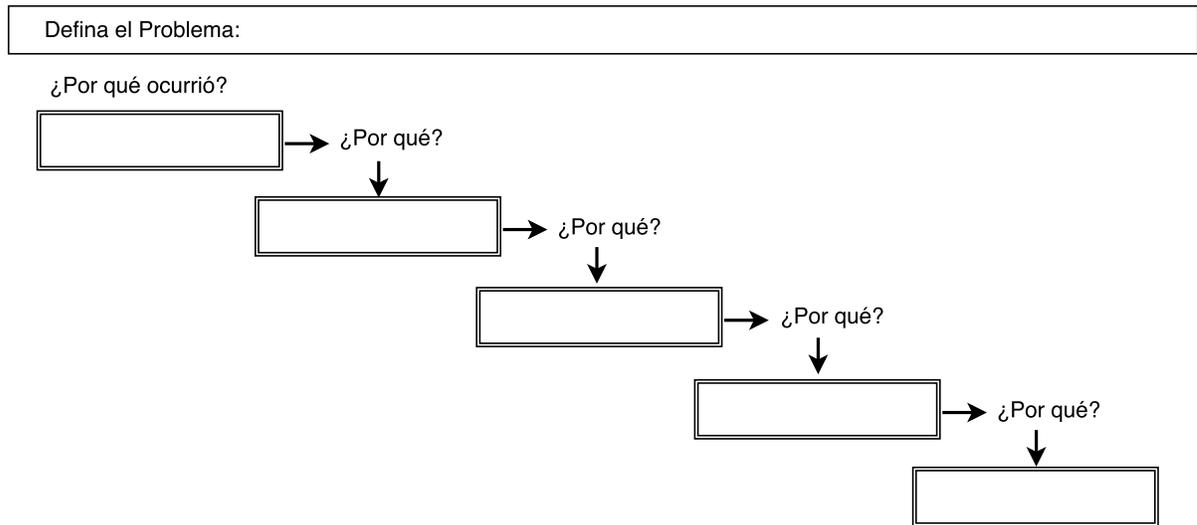


Figura 4-3: Esquema jerárquico de The 5-Whys [39].

5 Inspección Visual

El primer paso contemplado para el desarrollo de análisis de falla en los tres componentes mecánicos a estudiar, es la inspección visual. A continuación se presenta cada componente mecánico y se describe cada uno de ellos, explicando sus respectivas características desde la perspectiva visual del analista. Basado en las recomendaciones hechas en la subsección Inspección visual del capítulo 3.5 Metodología del análisis de falla. Las fotografías han sido tomadas con una cámara Nikon d610 para lograr un mayores aumentos y mejorar la precisión de inspección.

5.1. Pieza A

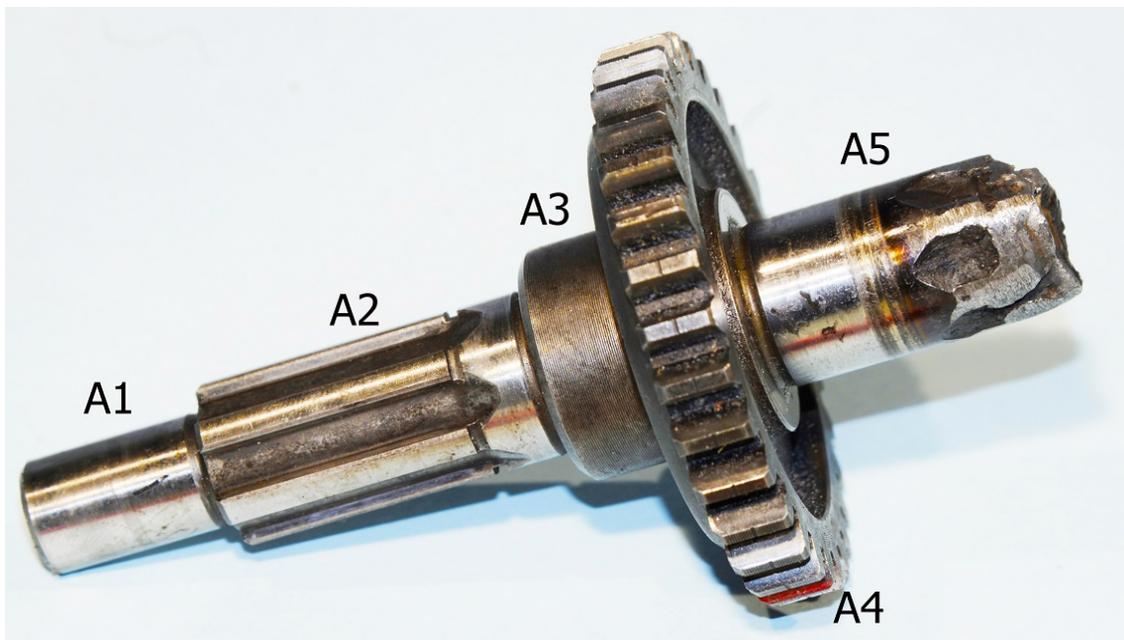


Figura 5-1: Pieza A - Eje de Piñón de reversa.

La pieza A hace referencia al piñón de reversa de un vehículo (no se conoce cuál), para ser descrito con claridad se ha dividido en 5 secciones como se observa en la figura 5-1. La sección A1 de izquierda a derecha posee un diámetro de $\varnothing 1.2 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ con una longitud de $1.8 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ posee una coloración uniforme y brillante. La sección A2 se caracteriza

por tener 6 dientes de engrane con un diámetro externo de $\varnothing 1.7 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y $5.0 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ de largo no se observan discontinuidades o defectos, su color es uniforme en toda su circunferencia, los engranes no presentan desgaste alguno. La sección A3 posee un diámetro de $\varnothing 2.4 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y $1.0 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ de largo, su superficie es algo más rugosa que la del resto de la pieza y su color es un gris más oscuro respecto a todo el conjunto, no se observa ningún defecto. A4 hace referencia a la localización del piñón, posee 31 dientes y un diámetro externo de $\varnothing 5.75 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$, ninguno de los dientes presenta algún desgaste macroscópico y la coloración de todo el conjunto es igual.

Por último la sección A5 es aquella donde se presenta la falla, posee un diámetro de $\varnothing 1.7 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y $2.5 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ de largo, como se observa en la figura 5-2 se notan 4 distintos tipos de coloración en esta sección del eje las cuales se describen de izquierda a derecha como:

- A5.1: Se observa un color gris brillante que seguramente era el color original de la pieza con una superficie muy lisa.
- A5.2: Se detallan unas líneas en forma de ralladuras que rodean toda la circunferencia, posee un color gris más oscuro y opaco que el de la sección A5.1.
- A5.3: Se observa una coloración gris brillante con quemaduras, debido a un cambio brusco de composición microestructural debido a la exposición a altas temperaturas.

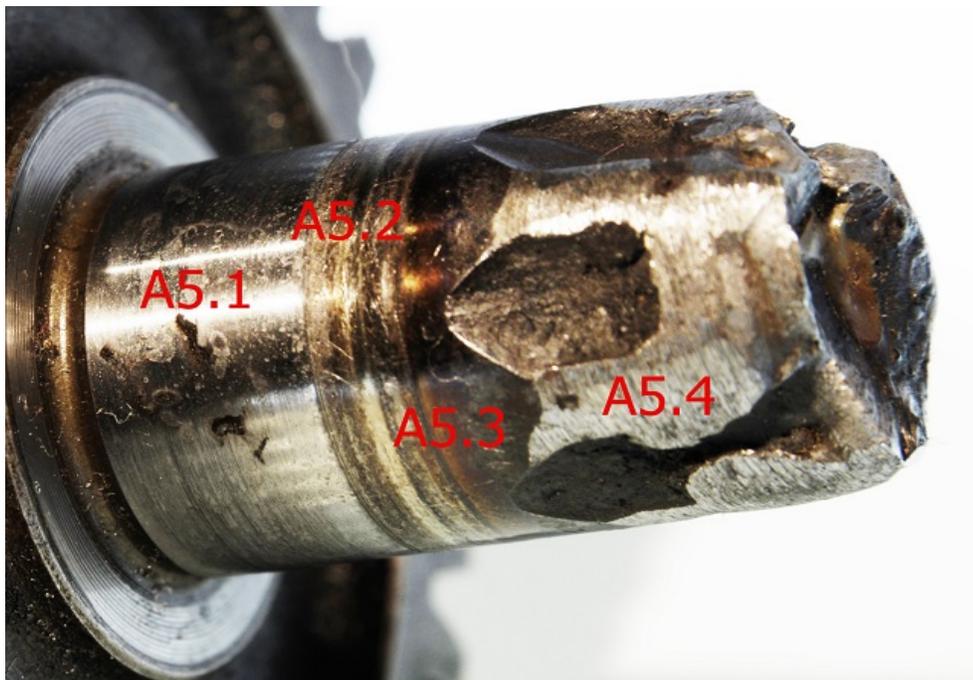


Figura 5-2: Sección A5 - Falla.

- A5.4: Se examina una superficie bastante maltratada con distintos cráteres alrededor de esta zona por algún tipo de unión, la superficie más externa presenta un color gris más claro que cualquier otro en toda la pieza. Los cráteres presentan coloraciones opacas y rugosas. En la figura 5-3 se aprecia la falla del eje de forma frontal, como antes, se observan zonas donde predomina el color gris claro y brillante de manera externa (A5.41), en el interior se contempla coloraciones más oscuras y rugosas (A5.42), algunas marcas de playa apuntando al centro del eje (A5.43), y una incrustación central de color café claro que no se logra identificar, parece ser algún materia distinto al de la pieza original (A5.44), posiblemente evidencia de rastros por soldadura.

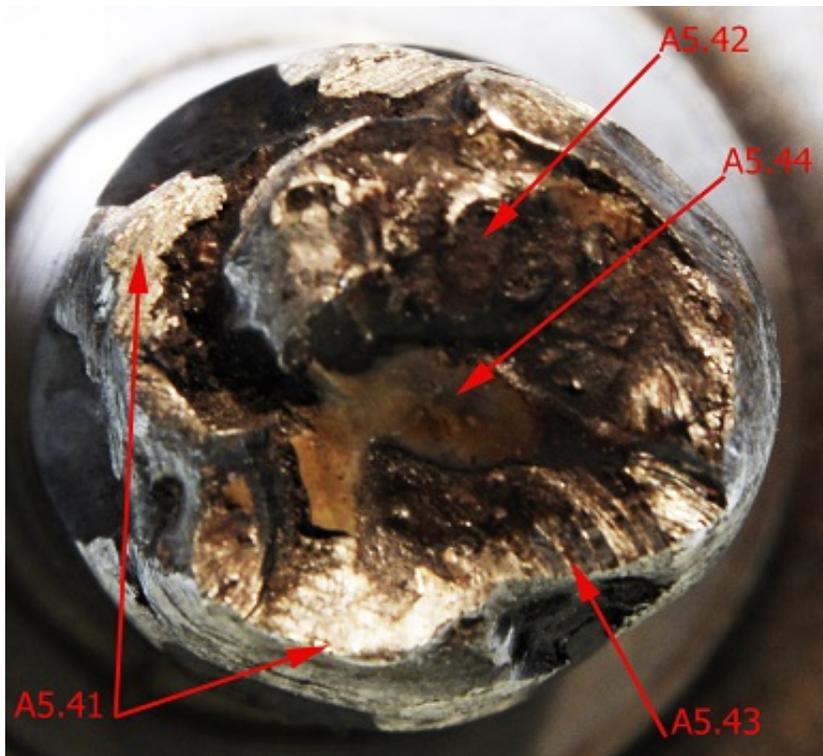


Figura 5-3: Sección A5.4 - Falla.

5.2. Pieza B

La pieza B como se aprecia en la figura 5-4 es una flecha o eje empleado en la salida de una caja de cambios de un vehículo que se desconoce a cual haya pertenecido, a continuación se describe cada parte de este componente.

De izquierda a derecha, en B1 encontramos dos secciones con estriaciones de diámetro $\varnothing 1.2$ cm $\pm 0,1$ mm y 2.9 cm $\pm 0,1$ mm de largo, donde no se aprecian imperfecciones o señales de fallo pero si una tonalidad azul dentro del color normal de este acero. La sección B2 tiene un diámetro de $\varnothing 1.5$ cm $\pm 0,1$ mm y se extiende en el eje 8.4 cm $\pm 0,1$ mm, no se observa ninguna discontinuidad en él. B3 posee un diámetro de 1.8 cm $\pm 0,1$ mm con una extensión en el eje de 3.0 cm $\pm 0,1$ mm también se localiza un rodamiento de diámetro exterior de $\varnothing 2.3$ cm $\pm 0,1$ mm, así como un reten para el control de lubricante bastante afectado, su coloración es algo azul, no se visualiza presencia de falla o ruptura alguna.

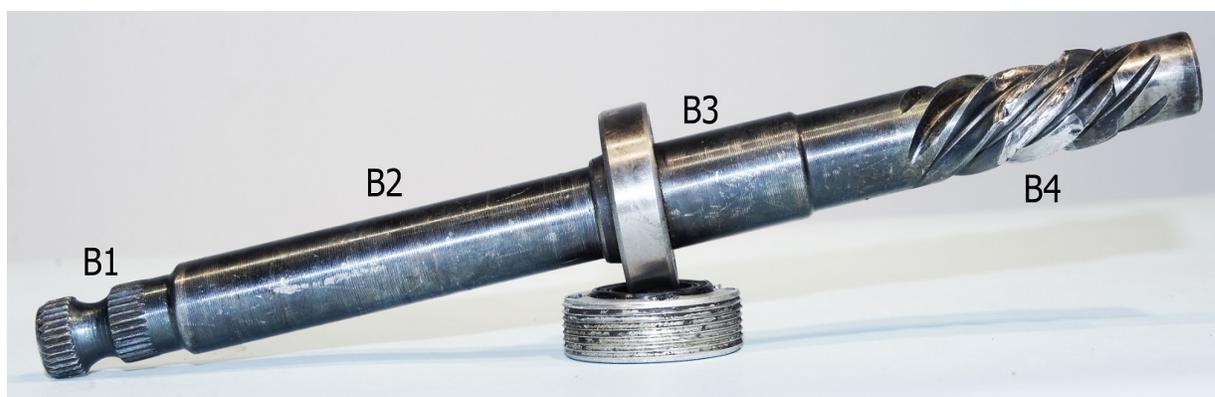


Figura 5-4: Pieza B - Eje salida caja de cambios.

B4 tiene un diámetro de $\varnothing 1.5$ cm $\pm 0,1$ mm y se extiende 7.5 cm $\pm 0,1$ mm, se caracteriza por poseer una sección con engrane hipoidal, para detallar más la descripción se secciona esta parte del eje como se aprecia en la figura 5-5. B4.1 y B4.3 por inspección presenta coloraciones similares de gris opaco, dichas secciones no tienen rastros de algún defecto o desgaste macroscópico.

Macroscópicamente se observa que la sección B4.2 presenta la falla del componente, su diámetro es de 1.45 cm $\pm 0,1$ mm color es un gris más brillante en comparación al resto del eje, debido a un posible pulido, no presenta coloraciones debidas a cambios bruscos de temperatura, los dientes hipoidales se observan desgastados y maltratados con distintas abolladuras o desprendimientos superficiales, tal como se observa con mayor precisión en la figura 5-6.



Figura 5-5: Pieza B - Sección B4.

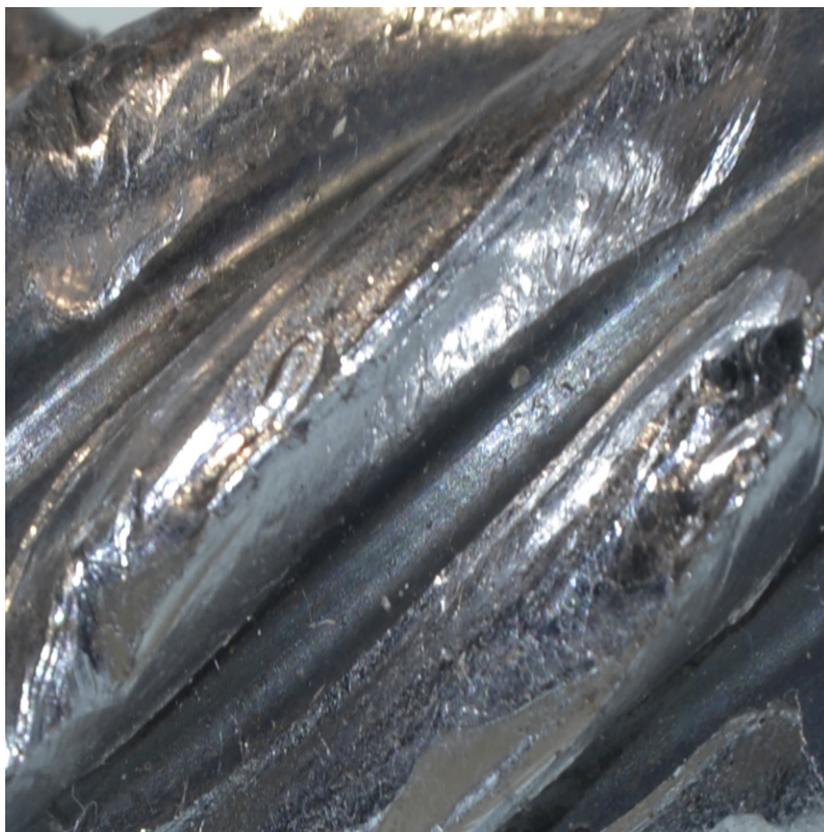


Figura 5-6: Sección B4.2 - Se observan algunos de los defectos superficiales.

5.3. Pieza C

La pieza C corresponde a una flecha o eje usado en la caja de dirección de tipo cremallera de algún vehículo (Rack shaft steering gear) el cual se desconoce, dicha pieza no presenta signos de fractura o deformación alguna por ende se puede decir que no fallo, pero presenta signos de inicio hacia una falla futura “*La falla no siempre implica fractura o ruptura*” [2]. Se describe el componente de izquierda a derecha tal como se observa en la figura 5-7.

C1 es una sección de rosca con 9 hilos muy delgados cuyo diámetro externo es de $\varnothing 1.2 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y una extensión de $1.8 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$, su color es un gris opaco sin ningún tipo de daño superficial. C2 corresponde a la parte del eje sin presencia de daños que ayuda a la comparación con la falla, su diámetro es de $\varnothing 2.0 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y su coloración original se extiende hasta $25.7 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$, no se observan ningún tipo de desgaste o grieta alguna. C4 es otra sección roscada de 9 hilos de diámetro externo $\varnothing 1.2 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y $1.8 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ de largo, donde no se detallan fallos.



Figura 5-7: Pieza C - Eje cremallera de la caja de dirección.

Por ultimo C3 a comparación de C2 presenta una coloración muy distinta, esta es más oscura y con rastros de un calentamiento excesivo aplicado a la flecha, su diámetro es igual al de la sección C2, es decir no luce algún tipo de adelgazamiento, presenta una cremallera para engrane de 28 dientes con case helicoidal recubierto con una muy fina capa de grasa lubricante, su extensión es de $16.0 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$, la coloración se extiende $19.3 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$ desde su origen hasta el final, figura 5-8, dicha coloración se esparce aproximadamente $3/4$ de la circunferencia total del eje como se observa en la figura 5-8 creando la posibilidad que la falla se debió al sobrecalentamiento localizado en un período de tiempo relativamente corto [35]. Se interpreta que esta falla se debe a un sobrecalentamiento, por ende no se define con exactitud que modo de falla podría haberse desencadenado durante un tiempo prolongado de uso en este eje, la detección temprana de este fallo logro evitar otro tipo desastre para el sistema al cual perteneció este elemento, pero los factores de exposición afrontados por este componente afectaron su vida de operación.

En la figura 5-9 se aprecia más de cerca cómo se da el cambio de color en la superficie de fallo, presentando distintas tonalidades sobre el área del elemento.



Figura 5-8: Sección C3 - Inicio y final de la falla.

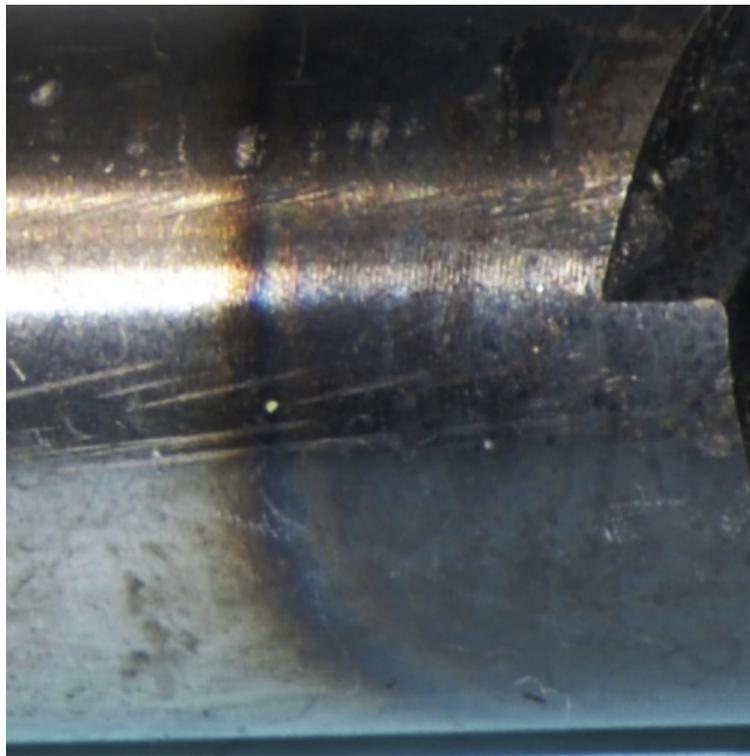


Figura 5-9: Sección C3 - Cambios de coloración superficial en la falla.

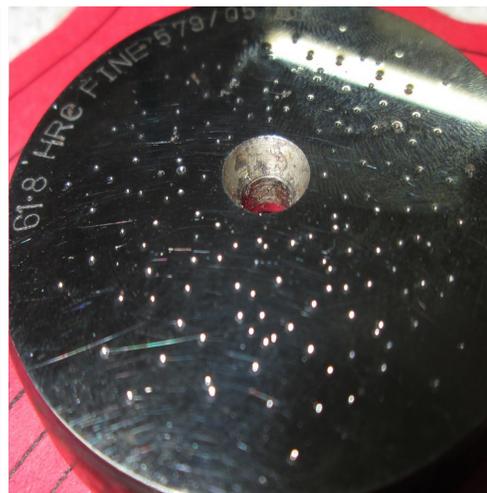
6 Ensayos de dureza Rockwell

La ejecución de los ensayos de dureza Rockwell en los componentes mecánicos para el análisis de falla, tiene como fin determinar si los fallos han causado cambios en las durezas superficiales en distintas zonas internas y externas de cada elemento, así interpreta la posible propagación del fallo y como estos cambios han afectado la resistencia del material a los esfuerzos sometidos bajo operación, por ende la provocación del fallo total o parcial del elemento.

Los ensayos han sido realizados con el durómetro marca Brooks Inspection Equipment con una carga principal 150 kg, posee el número de activo fijo 16500 (23580) del laboratorio de ensayo de materiales de la Fundación Universitaria Los Libertadores figura 6-1(a). Dicho instrumento antes de ser usado en cada prueba, se ha verificado su calibración usando el patrón base de 61,8 HRC figura 6-1 (b) para ello se corrobora resultados al medir su respectiva dureza como se aprecia en la figura 6-1 (c), basado en ello, se concluye que los resultados obtenidos durante todo su uso son correctos y verificables en cualquier momento. La práctica internacional recomendada para el procedimiento de las pruebas de dureza en la cual se apoyo este estudio fue ASTM E 18-15 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials [4].



(a) Durómetro Rockwell.



(b) Patrón base de 61,8 HRC.



(c) Lectura en el durómetro de 61,8 HRC en la dureza del patrón.

Figura 6-1: Durómetro y resultado de su calibración.

6.1. Pieza A

Para realizar las pruebas de dureza, primero se ha realizado un corte transversal en el lugar de la falla (sección A5 - ver figura 5-1), con ayuda de una tronzadora como se observa en la figura 6-2 (a), con el fin de obtener la probeta figura 6-2 (b), en la cual se realizara las penetraciones y obtener mediciones de dureza.



(a) Corte de la probeta. (b) Probeta pieza A. (c) Indentaciones en distintos puntos de la probeta.

Figura 6-2: Obtención y ensayo de dureza en probeta de la pieza A.

Realizado los ensayos de dureza en 7 puntos distintos de la probeta, como se observa en la figura 6-2(c), en la cual se indica también el orden de ejecución de las penetraciones, se ha limado la punta de la probeta para no tener problemas en mediciones, los resultados obtenidos se registran en la tabla 6-1.

Punto de penetración		1	2	3	4	5	6	7
Dureza (HRC) ± 1	Probeta pieza A	20	20	20	28	26	26	26

Tabla 6-1: Mediciones de dureza probeta pieza A.

6.2. Pieza B

Para realizar las pruebas de dureza, primero se ha realizado un corte transversal en el lugar de la falla con ayuda de una tronzadora como se observa en la figura 6-3 (a), con el fin de obtener la probeta figura 6-3 (b, c), en la cual se realizara las penetraciones y obtener mediciones de dureza para esta sección de la pieza B.



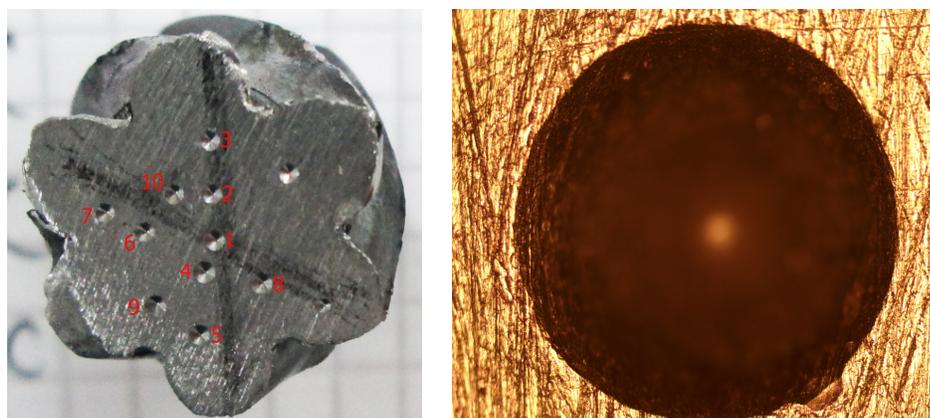
(a) Corte de la probeta.

(b) Vista frontal del corte probeta A.

(c) Vista superior del corte.

Figura 6-3: Obtención de la probeta para análisis de dureza en la pieza B.

Una vez realizado los ensayos de dureza en 10 puntos distintos de la probeta A, como se observa en la figura 6-4 (a), en la cual se indica también el orden de ejecución de las penetraciones, los resultados obtenidos se registran en la tabla 6-2. Adicional se realiza una fotografía a 10X de la primer medición para identificar como se debe observar una correcta indentación del durómetro figura 6-4 (b).



(a) Indentaciones en distintos puntos de la probeta A.

(b) Huella de primer penetración vista a 10X.

Figura 6-4: Probeta pieza B después del análisis de dureza.

El objetivo es comparar las durezas anteriormente encontradas contra las durezas cerca de la superficie del fallo, es decir muy cerca de la cresta del contacto hipoidal, para ello se realiza un corte longitudinal aproximadamente en la mitad de la probeta A figura 6-5 (a, b), con el fin de registrar lecturas correctas en el durómetro, se hace un limado superficial del contacto hipoidal y se toman datos de dureza en esta cara obteniendo la probeta B figura 6-5(c), las cifras encontradas se describen en la tabla 6-2. Comparando los resultados de las mediciones de dureza hechas en el primer corte, cambiaron respecto a las tomadas en el segundo, la primera superficie presenta durezas fluctuantes en valores de 19 a 25 HRC, mientras que las durezas cerca a la superficie de contacto de falla, revela durezas de 14 a 15 HRC. Posiblemente este cambio en las durezas se deba a la relación entre el desgaste y el sobrecalentamiento.

Punto de penetración		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dureza (HRC) ± 1	Probeta A	19	19	19	25	22	22	20	20	21	28
	Probeta B	14	15	15	14	14	14	-	-	-	-

Tabla 6-2: Mediciones de dureza probetas pieza B.



(a) Vista frontal del segundo corte.



(b) Vista superior del segundo corte.

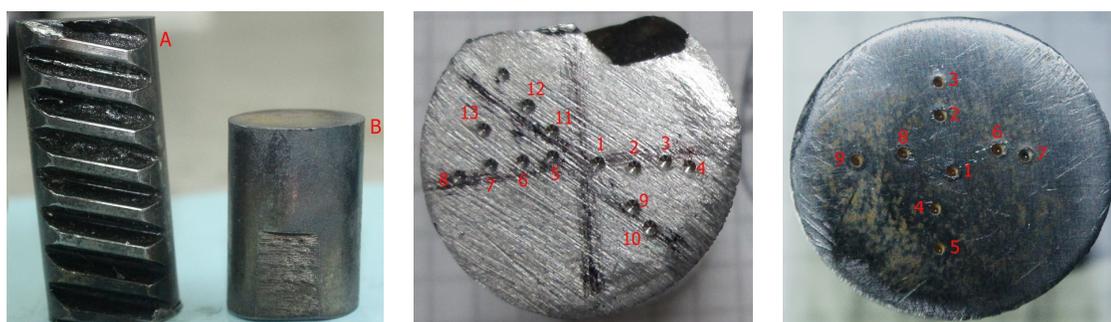


(c) A la izquierda probeta B y mediciones de dureza cerca a la cresta de los dientes.

Figura 6-5: Vista del modo de corte en la probeta A, para obtener la probeta B.

6.3. Pieza C

Para la pieza C se realizaron cortes con la tronzadora, obteniendo de la pieza original 2 probetas figura 6-6 (a). La probeta A es parte de la cremallera que se extrae de la sección C3 del eje (ver figura 5-7), donde se ve afectado en su totalidad por la falla, en una de las caras de esta probeta se hace mediciones de dureza en las zonas afectadas por la extraña coloración, con el fin de definir si estas difieren o no a las que se puedan medir en la probeta B, perteneciente a la sección C1 no afectada (ver figura 5-7).



(a) Probetas pieza C.

(b) Mediciones de dureza Probeta A zona afectada por la falla.

(c) Mediciones de dureza Probeta B zona no afectada por la falla.

Figura 6-6: Probetas pieza C.

En la cara más próxima al inicio de la falla de la probeta A, se realizan 13 mediciones de dureza en el orden que se especifica en la figura 6-6 (b), de estos se obtienen los resultados presentados en la tabla 6-3 donde se aprecian durezas homogéneas en los puntos de medición de 19 a 22 HRC. De la probeta B se realizan 9 mediciones en el orden que se aprecia en al figura 6-6 (c), cuyos datos se aprecian en la tabla 6-3 se analiza que las mediciones más externas (puntos 3, 5, 9) posee los datos con mayores durezas de allí decrecen estos resultados hacia al centro de la probeta.

Punto de penetración		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Dureza (HRC) ± 1	Probeta A	15	19	22	19	19	22	21	21	17	20	21	18	18
	Probeta B	22	19	27	20	28	20	22	22	26	-	-	-	-

Tabla 6-3: Mediciones de dureza probetas pieza C.

7 Análisis Metalográfico

La elaboración del análisis microscópico o metalográfico en los componentes mecánicos para el análisis de falla, tiene como fin observar cambios de composición y microestructura en distintas zonas internas de cada elemento, con ello se interpreta los cambios y como estos han afectado la resistencia del material, por ende la provocación del fallo total o parcial del elemento. La elaboración de este análisis se apoyado en normatividad internacional ASTM E 3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens [3] y ASTM E 340-00 Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys [6].

Los ensayos han sido efectuados con ayuda de distintos instrumentos y materiales los cuales fueron usados y suministrados por el laboratorio de ensayo de materiales de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Los instrumentos y materiales usados fueron: Microscopio metalográfico invertido OLYMPUS GX 41 con número de activo 16498-16 **7-1** (a), máquina de pulido / lacado metalográfico con número de activo 25143 **7-1** (c), alumina u oxido de aluminio, lijas con tamaño de grano 240, 280, 400, 600 y 1000, paños de pulido y ácido nítrico al 3%. En el registro de los análisis en las piezas, se implementa unas marcas enumeradas sobre la superficie no pulida a espejo de las probetas, esto se realiza para tener una noción de los puntos estudiados, se hacen las marca en la zona no pulida ya que los lentes del microscopio se encuentran en la parte inferior de este figura **7-1** (b), por ello se pone la probeta de forma que la superficie pulida repose sobre la base el mismo.



(a) Microscopio OLYMPUS GX 41.



(b) Lente del microscopio, señalización del punto de observación de las probetas.



(c) Máquina de pulido.

Figura 7-1: Instrumentos metalográficos.

7.1. Pieza A

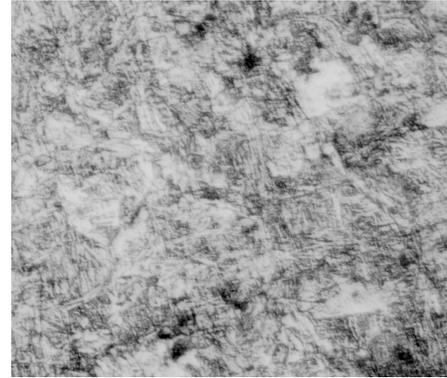
Metalografía pieza A



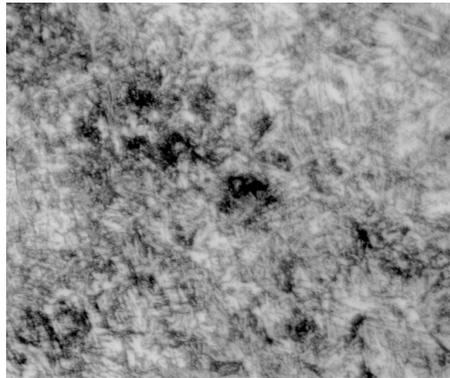
(a) Superficie pulida a espejo pieza A.



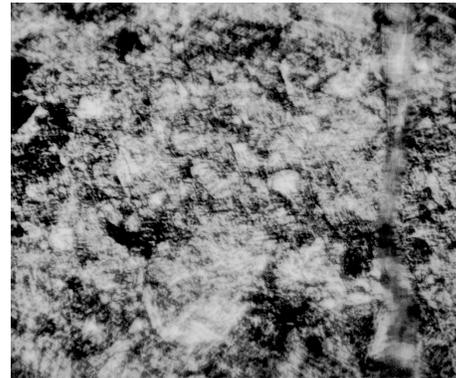
(b) Puntos de observación al reverso de la probeta.



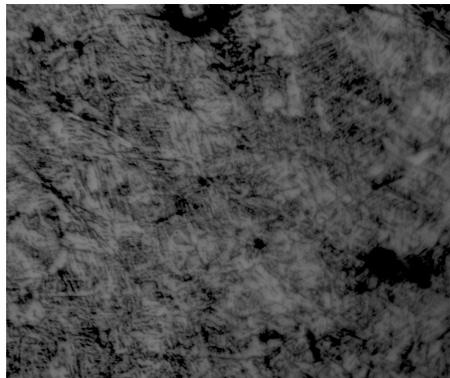
(c) 1.



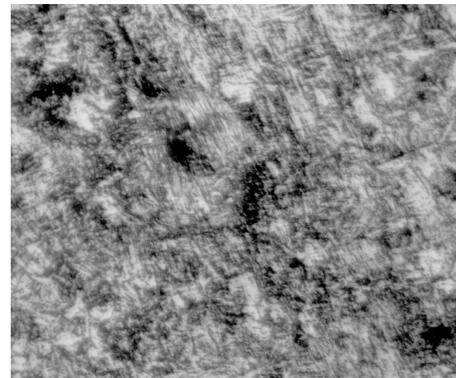
(d) 2.



(e) 3.



(f) 4.



(g) 5.

Figura 7-2: Estructura de la superficie de falla pieza A vista a 100X.

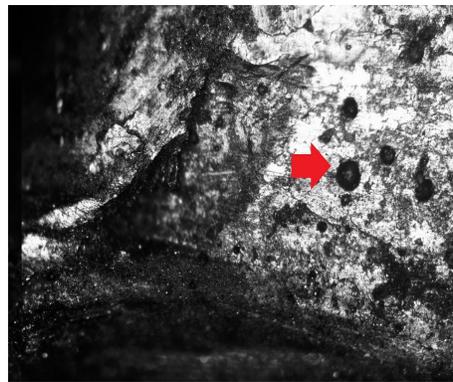
7.2. Pieza B

Fractografía de la superficie pieza B

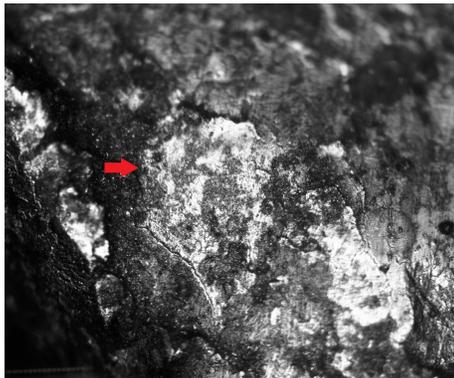
Inspeccionando visualmente se indicó que la falla en el componente B se debió al desgaste, por ello se decide observar la superficie afectada en una de las probetas cortadas (ver figura 6-5 (a)), este análisis fractográfico evidencia fenómenos de desprendimiento, pulido y varias irregularidades superficiales típicas de este modo de fallo, tal como se observa en las figuras 7-3 [15].



(a) Posición de probeta para visualización.



(b) Desprendimientos estructurales encontrados.



(c) Pulido superficial.



(d) Superficies irregulares provocan desenfoces ópticos.

Figura 7-3: Estructura de la superficie de falla pieza B vista a 10X.

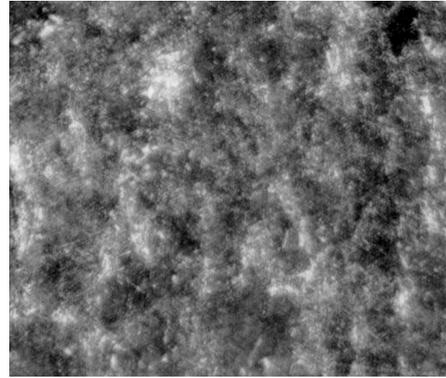
Metalografía pieza B



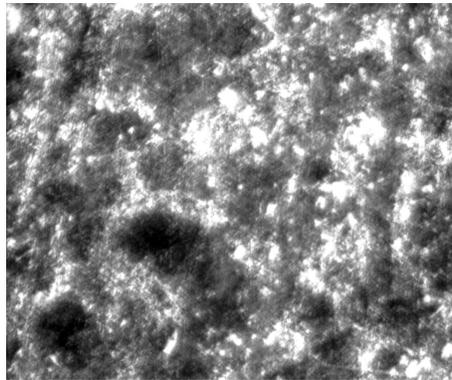
(a) Superficie pulida a espejo pieza B.



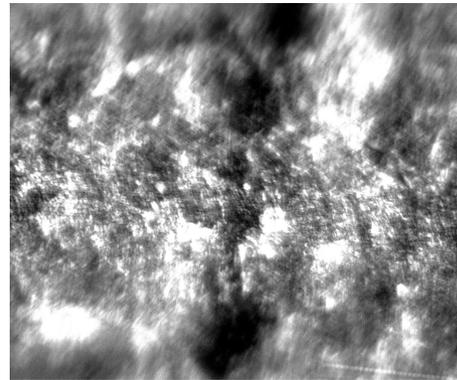
(b) Puntos de observación al reverso de la probeta.



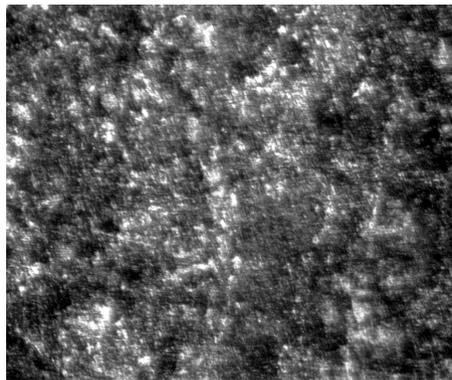
(c) 1.



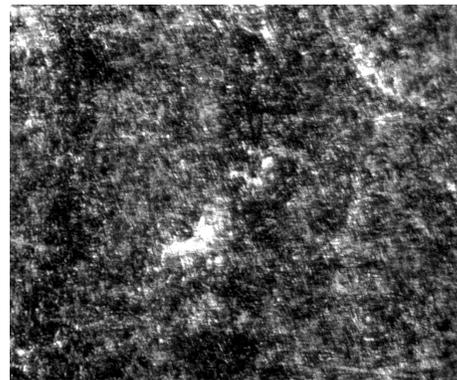
(d) 2.



(e) 3.



(f) 4.

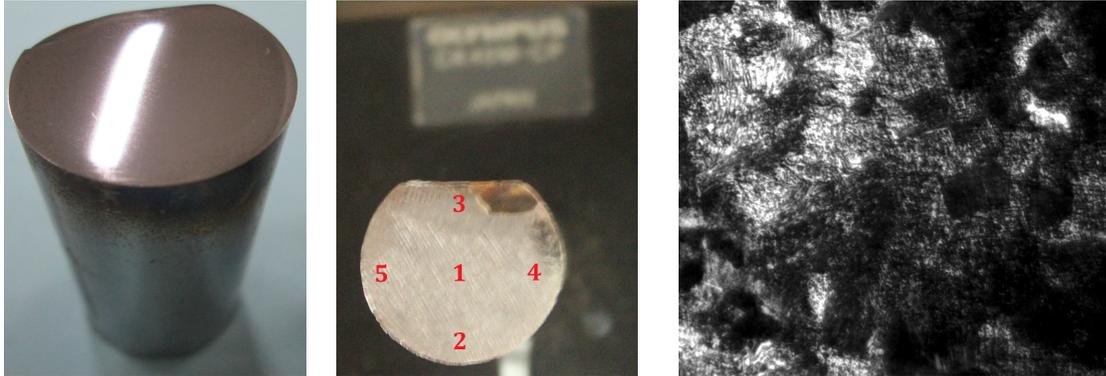


(g) 5.

Figura 7-4: Estructura de la superficie de falla pieza B vista a 100X.

7.3. Pieza C

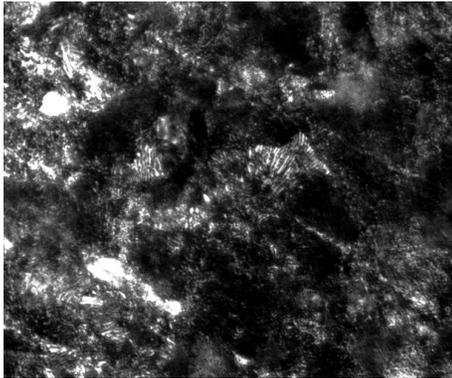
Metalografía probeta A - zona de fallo



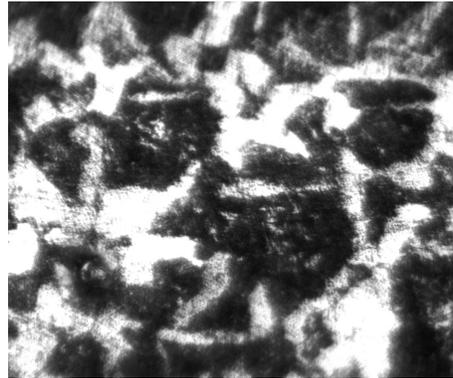
(a) Superficie pulida a espejo probeta con falla pieza C.

(b) Puntos de observación al reverso de la probeta.

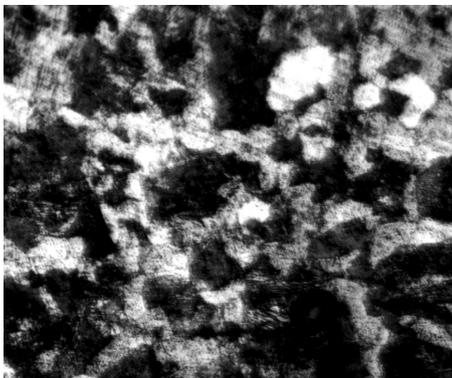
(c) 1.



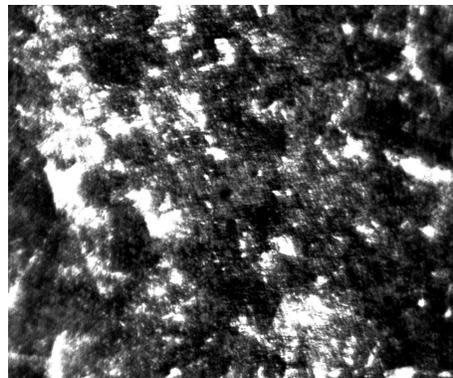
(d) 2.



(e) 3.



(f) 4.



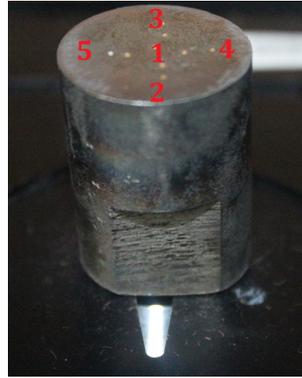
(g) 5.

Figura 7-5: Estructura de la superficie con fallas pieza C vista a 100X.

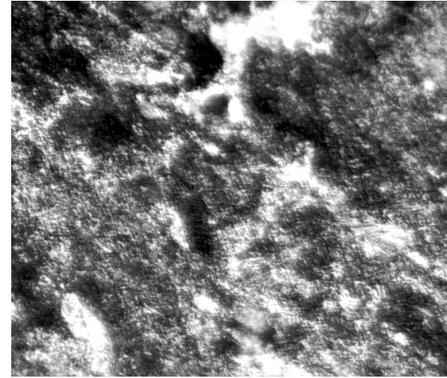
Metalografía probeta B - zona sin falla



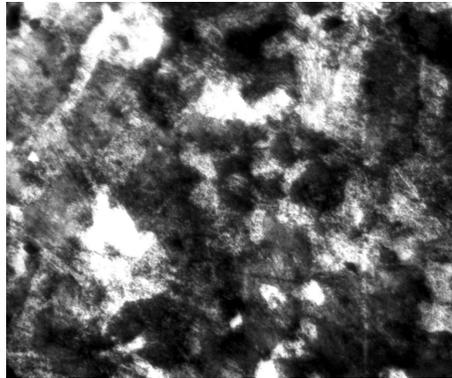
(a) Superficie pulida a espejo probeta sin falla pieza C.



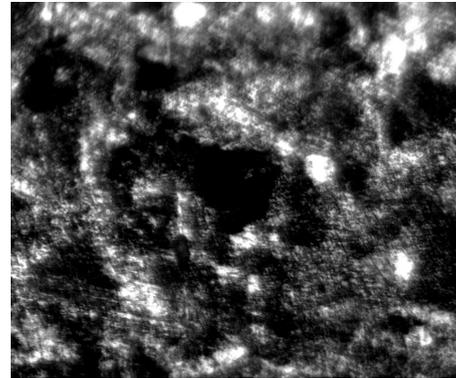
(b) Puntos de observación al reverso de la probeta.



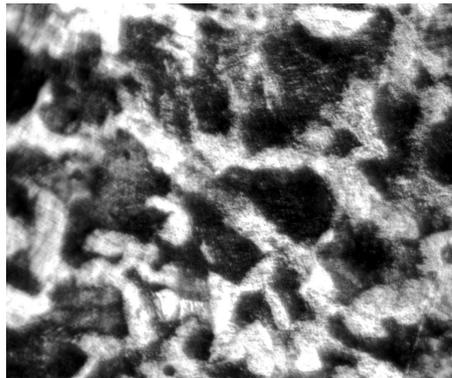
(c) 1.



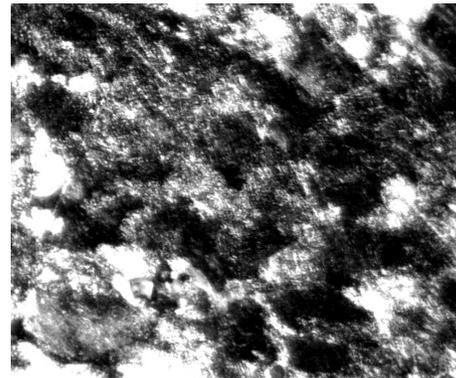
(d) 2.



(e) 3.



(f) 4.



(g) 5.

Figura 7-6: Estructura de la superficie sin fallas pieza C vista a 100X.

8 Análisis de falla - RCA

Análisis de falla - RCA

Se presenta a continuación todas las conclusiones del análisis de falla y RCA de los tres componentes mecánicos estudiados, basado en lo encontrado durante la realización de la inspección visual, análisis de dureza y análisis metalográfico, también se da un concepto técnico de lo que pudo haber ocurrido durante el fallo emitiendo una probable causa raíz, así como unas recomendaciones para evitar que un fallo similar se presente. Debido a que solo se conoce como tal las piezas y no se dispuso del sistema total al cual pertenecieron, se emite un concepto basado en la evidencia tangible que se obtuvo de la pieza.

Pieza A

La microestructura observada en el centro de la probeta (figura 7-2 (c)), presenta una ordenación más homogénea, mientras los puntos exteriores denominados 2, 3, 4 y 5 figura 7-2 (d, e, f, g), presentan martensita revenida (estructura acicular) menos homogénea. Esto es coherente con la observación del cambio de coloración en la periferia del eje figura 5-2 - A5.3, en la cual incluso se encuentra material de aporte, producto de la unión por soldadura al cual fue sometido. En general se observa que la zona afectada por el calor, se distribuyó sobre la circunferencia del eje, mientras que el núcleo permaneció estable. Este calentamiento a corto plazo indujo a la migración de carbono hacia las zonas periféricas, generando una estructura martensítica más dura pero más frágil, lo cual incitó la falla superficial que concluyó con la ruptura total del eje. En resumen es complejo determinar la falla primaria por la cual la persona encargada de reparar este elemento empleó soldadura para solucionarlo, pero el calentamiento generado durante este proceso empeoró la situación de la pieza e indujo a la falla total del eje.

Recomendaciones

Debido a que la causa raíz del fallo en este eje fue provocada por el sobrecalentamiento inducido por un proceso de soldadura aplicado sobre la pieza previo a otro fallo, se recomienda no utilizar este tipo de proceso de unión de piezas para este componente ya que los esfuerzos aplicados en la soldadura durante el funcionamiento de la pieza no pueden ser soportables por la unión, desencadenando un fallo más grave. Por ello se debe reemplazar el elemento y no reutilizarlo.

Pieza B

En el análisis de la microestructura de la pieza B, se observa una distribución de grano fino en las fotografías concernientes a la periferia (puntos 4 y 5 ver figura 7-4 (f, g)), lo cual va acorde con las mayores mediciones de dureza encontradas en las zonas exteriores de la sección transversal. Así mismo, la presencia de grano fino indica el desarrollo de deformación plástica en caliente en las localidades cercanas a la porción de dientes desgastados, lo cual es consecuente con el desgaste observado en dichas locaciones. La inspección visual indica un desgaste de tipo adhesivo el cual se encuentra normalmente acompañado de calentamiento y desvanecimiento del desgaste hacia las zonas longitudinales más externas de los dientes. En resumen esta pieza fue sometida a calentamiento lo cual genero el desgaste de tipo adhesivo en la zona B4.2 detallada en la figura 5-5. El motivo de este calentamiento probablemente es producto de falta de lubricación y el contacto entre metales durante el funcionamiento de la pieza lo cual es evidente en el cambio de coloración azul de la superficie del acero; esta coloración también es encontrada durante el maquinado a velocidades altas de aceros hipoeutectoides. El análisis de la causa raíz puede haber ocurrido por las razones argumentadas en el diagrama de los cinco porque? empleada en la figura 8-1.

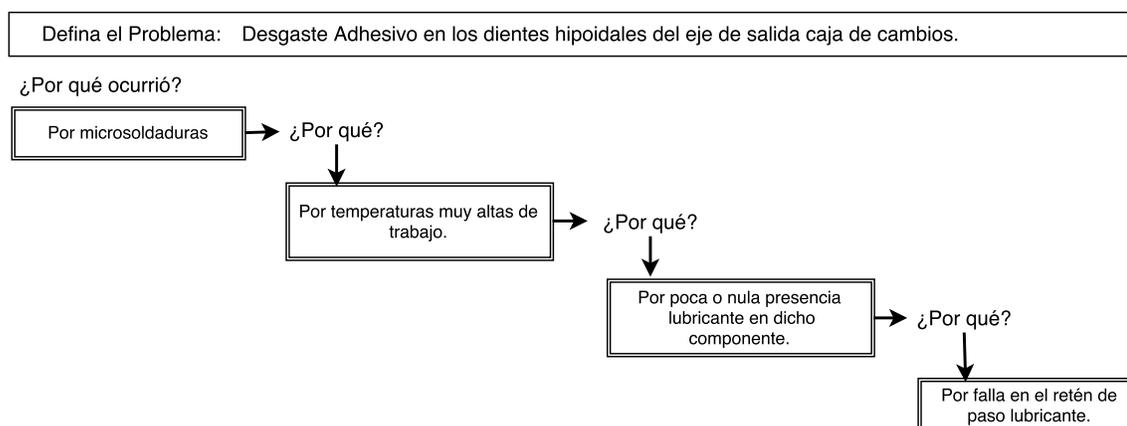


Figura 8-1: Análisis de causa raíz para la pieza B.

Recomendaciones

Debido a que la causa raíz del fallo en este eje fue provocada por la falta de lubricación por falla del retén que controla el paso del lubricante, se recomienda prestar la debida atención en los montajes de estas piezas, también la calidad del lubricante, recomendando el uso de lubricantes con aditivos EP que reducen la posibilidad de desgaste adhesivo y una correcta aplicación del mismo previo al ensamble [26, 34].

Pieza C

En las mediciones de dureza para la pieza C, se encuentra que la probeta A, presenta calentamiento superficial, lo que generó durezas homogéneas que sugieren un calentamiento uniforme y prolongado de la pieza durante el servicio. Por su parte la probeta B presenta valores de dureza mayores en localidades cercanas a la periferia (puntos 3, 5, 9 ver figura 6-6(c)), lo que indica que el calentamiento alejado de la zona dentada fue sujeto a una menor razón de calentamiento. Además el análisis metalográfico indica una distribución homogénea en la probeta A, de granos perlíticos en una matriz ferrítica (ver figura 7-5(c, e, f)), consecuente con los valores de dureza. A su vez la probeta B sin falla presenta diferenciación en la microestructura encontrada en la periferia respecto al núcleo del eje, esto es un indicio de que el núcleo de la pieza alejada del calentamiento permaneció en su estado original figura 7-6(c), es decir la pieza presenta un endurecimiento superficial con el fin de disminuir el desgaste durante el servicio. En resumen esta pieza fue sujeta a calentamiento a corto plazo en la zona dentada y una distribución no homogénea de la transferencia de calor a lo largo de la pieza lo cual motivó a un cambio en la microestructura en la zona afectada. Este calentamiento puede ser producto de la reducción o ausencia de una capa lubricante que produjo un mayor contacto entre metales durante el funcionamiento lo cual se evidencia con la coloración. El análisis de la causa raíz puede haber ocurrido por las razones argumentadas en la espina de pescado empleada en la figura 8-2.

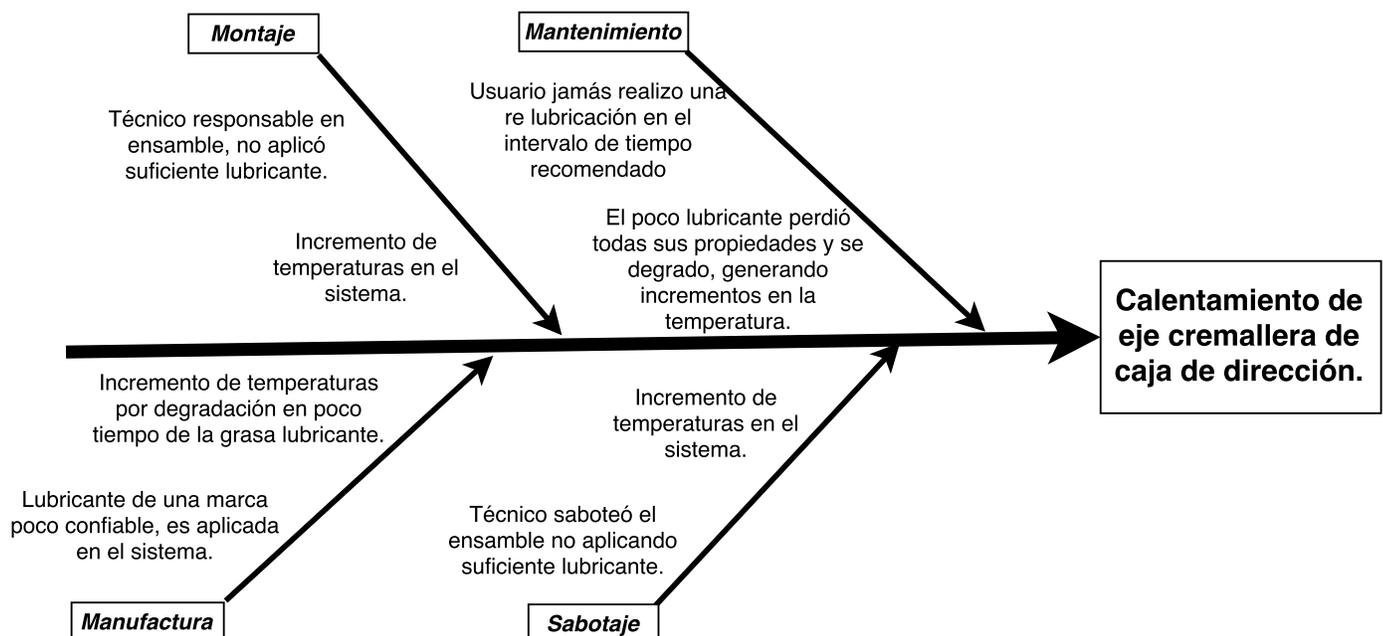


Figura 8-2: Análisis de causa raíz para la pieza C.

Recomendaciones

Durante el montaje de esta pieza mecánica se debe aplicar una correcta cantidad de grasa o aceite dependiendo a las recomendaciones del fabricante que evite el contacto metal a metal entre la cremallera (ver figura 5-7) y el piñón helicoidal en la válvula de la caja de dirección [21, 22, 38]. ASTM D4950 Classification and Specifications for Automotive Service Greases recomienda para componentes de chasis en automóviles de pasajeros, camiones y otros vehículos de uso leve (clasificación LA) y uso severo (clasificación LB) usar grasas de clasificación NLGI 2, por ende se sugiere usar grasas semi-sólidas de base de litio muy aceptables como producto multiusos para requisitos de automoción, cuyo régimen de lubricación soporta altas temperaturas de trabajo así como otros requerimientos, también recomienda intervalos de re lubricación de 3200 km ya que en este periodo de tiempo la grasa puede perder sus propiedades y conllevar a su degradación [5, 12, 24].

9 Conclusiones

- El análisis de falla permite comprender las condiciones de trabajo a las cuales fueron sometidos componentes mecánicos con fallas y como la composición, el procesamiento, la estructura y las propiedades definen el rendimiento de los materiales ocasionando que estos no cumplan los requerimientos previamente esperados. A su vez es una herramienta de análisis que busca mejoras en aspectos tales como selección de materiales, diseño, manufactura, mantenimientos y montajes. Casos particulares de estudio llevados a laboratorio (como los tratados en este proyecto y muchos otros previamente documentados en libros y revistas especializadas), logran conclusiones y recomendaciones para que sistemas similares reduzcan la posibilidad de fallos.
- El análisis de falla es una disciplina investigativa que proporciona herramientas para la obtención de conocimientos, que a través de organizaciones internacionales tales como ASTM (American Society for Testing and Materials), ASME (American Society of Mechanical Engineers) y ASM (American Society for Metals) durante muchos años de trabajo e investigación lograron estándares de trabajo, los cuales permiten a personas que inician en el análisis de falla, adquirir una basta información acerca del comportamiento de los materiales e incentivando a la búsqueda de soluciones del Por qué? y el Cómo? de las fallas mecánicas, mediante el uso de razonamiento lógico por medio de lo encontrado en el laboratorio y la bibliografía aportada.
- Los resultados obtenidos en esta investigación se lograron con el uso de los equipos dispuestos por la Fundación Universitaria Los Libertadores, pero como se menciona en el capítulo 3.5 existen muchos tipos de exámenes que le permiten al analista conocer con mayor profundidad o ratificar los resultados, por ello un análisis visual, de durezas y microestructura puede en algunos casos no ser suficiente, el uso de un microscopio electrónico de barrido (SEM) o un espectrómetro de masas sería una ayuda fundamental para la mejora de los análisis de falla.

Bibliografía

- [1] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, George F.: *ASM handbook*. Vol. 9: *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004
- [2] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, W.T. ; SHIPLEY, R.J.: *ASM handbook*. Vol. 11: *Failure Analysis and Prevention*. ASM International, 2002
- [3] ASTM, E: ASTM E3-01 - Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2001)
- [4] ASTM, E: ASTM E18-15 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2003)
- [5] ASTM, E: ASTM D4950-01 - Classification and Specifications for Automotive Service Greases. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2004)
- [6] ASTM, E: ASTM E340-00 - Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2013)
- [7] AVALLONE, Ugene. ; BAUMEISTER III, Heodore. ; SADEGH, Lim: *Standard Handbook or Mechanical Engineers*. 11th Edition. McGraw-Hill, 1987
- [8] AWS, Committee: *AWS B1.11:2000 Guide for the Visual Inspection of Welds*. American Welding Society, 2000
- [9] BHATTACHARYA, Joymalya: Root Cause Analysis A Practice to Understanding and Control the Failure Management in Manufacturing Industry. En: *International Journal of Pharmaceutical Science Invention*. (2014), p. 12–20
- [10] BHUSHAN, Bharat: *Modern tribology handbook, two volume set*. CRC press, 2000
- [11] BLOCH, Heinz P. ; GEITNER, Fred K.: *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: Practical Machinery Management for Process Plants*. Vol. 2. Butterworth-Heinemann, 2012
- [12] BOOSER, E R.: *CRC Handbook of Lubrication and Tribology: Theory and Practice of Tribology*. CRC PRESS, 1993

-
- [13] CAMPBELL, Flake C.: *Fatigue and fracture: understanding the basics*. ASM International, 2012
- [14] CANALE, Lauralice de Campos F. ; TOTTEN, George E. ; MESQUITA, Rafael A.: *Failure analysis of heat treated steel components*. ASM international, 2008
- [15] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987
- [16] COMMITTEE, ASTM: *ASTM dictionary of engineering science & technology*. Tenth Edition. ASTM International, 2005
- [17] DAS, Amiya K.: *Metallurgy of failure analysis*. Vol. 132. McGraw-Hill New York, NY, 1997
- [18] GROOVER, Mikell P.: *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997
- [19] GROUP, Mechanical Failures P. ; SHIVES, T.R. ; WILLARD, W.A. ; FOR MATERIALS RESEARCH (U.S.), Institute ; FOR MATERIALS RESEARCH. METALLURGY DIVISION, Institute: *Mechanical failure, definition of the problem: proceedings of the 20th meeting of the Mechanical Failures Prevention Group, held at the National Bureau of Standards, Washington, D.C., May 8-10, 1974*. U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards : for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off, 1976 (NBS special publication)
- [20] HELLIER, Charles: *Handbook of nondestructive evaluation*. McGraw-Hill, 2001
- [21] HILLIER, Victor Albert W. ; COOMBES, Peter: *Hillier's fundamentals of motor vehicle technology*. Nelson Thornes, 2004
- [22] KNOWLES, Don: *Automotive Suspension and Steering Systems*. Cengage Learning, 2002
- [23] KUTZ, Myer: *Handbook of materials selection*. John Wiley & Sons, 2002
- [24] LAFARGUE-PÉREZ, Francisco ; REYES-SEMANAT, Díaz-Velásquez M. ; DE ASSUNÇÃO-NASCIMENTO, Juliano-Chitue: Physicochemical and tribological properties of graphite grease based on Jatropha curcas L oil and lithium soap. En: *Ingeniería Mecánica* 17 (2014), Nr. 3, p. 255–263
- [25] LIVINGSTON, AD ; JACKSON, G ; PRIESTLEY, K: Root causes analysis: Literature review. En: *HSE Contract Research Report* (2001)
- [26] LOSADA, Carlos ; OM, Neyda ; RODRÍGUEZ, José: Tribología y lubricación en ensayo de banco. En: *CIENCIA ergo-sum* 8 (2015), Nr. 2, p. 184–190

-
- [27] MCEVILY, Arthur J.: *Metal failures: mechanisms, analysis, prevention*. John Wiley & Sons, 2002
- [28] MOBLEY, R K.: *Root cause failure analysis*. Butterworth-Heinemann, 1999
- [29] NASA: *Reliability centered maintenace guide for facilities and collateral equipment*. 2008 (National aeronautical and space administration)
- [30] NISHIDA, Shin-ichi: *Failure analysis in engineering applications*. Butterworth-Heinemann, 1992
- [31] NOON, Randall K.: *Forensic engineering investigation*. CRC Press., 2000
- [32] OLIVARES, María Dolores B.: *Prácticas de ciencia de materiales: fundamento y desarrollo*. Vol. 25. EDITUM, 1992
- [33] PARADIES, Mark. ; BUSCH, David.: Root cause analysis at the SAVANNAH River Plant. En: *IEEE Fourth Conference on Human Factors and Power Plants*. (1988)
- [34] PIEKOSZEWSKI, W ; SZCZEREK, M ; TUSZYNSKI, W: The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester. En: *Wear* 249 (2001), Nr. 3, p. 188–193
- [35] PURBOLAKSONO, J ; AHMAD, J ; BENG, LC ; RASHID, AZ ; KHINANI, A ; ALI, AA: Failure analysis on a primary superheater tube of a power plant. En: *Engineering Failure Analysis* 17 (2010), Nr. 1, p. 158–167
- [36] RAMACHANDRAN, V: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005
- [37] SCHMID, Steven R.: *Manufactura, ingenieria y tecnologia*. Pearson Educación, 2002
- [38] SCHNUBEL, Mark: *Today's Technician: Automotive Suspension & Steering Classroom Manual and Shop Manual*. Cengage Learning, 2014
- [39] SERRAT, Olivier: The five whys technique. (2009)
- [40] STEPHENS, Ralph I. ; FATEMI, Ali ; STEPHENS, Robert R. ; FUCHS, Henry O.: *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons, 2000
- [41] VANDER VOORT, George F.: *Metallography, principles and practice*. ASM International, 1984
- [42] VANDER VOORT, George F.: Visual examination and light microscopy. En: *ASM handbook metallography and microstructures. Materials Park (OH): ASM International* (1991), p. 91–165

- [43] VILLACOURT, M ; GOVIL, P: Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System. En: *SEMATECH, Inc* (1994)
- [44] WILSON, Paul F.: *Root cause analysis: A tool for total quality management*. ASQ Quality Press, 1993
- [45] WULPI, Donald J.: *Understanding how components fail*. ASM international, 2013