



# Implementación del método de análisis de falla y análisis de causa raíz a balancín y pastilla de freno.

Ronald Yesid Orduña Ruiz

Fabián Leonardo Gómez Forero

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D.C., Colombia

2018

# Implementación del método de análisis de

# falla y análisis de causa raíz a dos componentes mecánicos

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

Director:

Magíster en Ingeniería Mecánica -Jesús Manuel Barrera.

Línea de Investigación:

Análisis de propiedades en materiales de ingeniería

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D.C., Colombia

2018

## Dedicatoria

A DIOS y a nuestros padres por el apoyo a nuestra formación que es pilar fundamental de lo que somos y seremos.

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 -  
Director de Proyecto de grado

---

Ing.  
Jurado

---

Ing.  
Jurado

---

Ing.  
Jurado

# Lista de Figuras

Ilustración 1 Pastilla de freno de carro.....	26
Ilustración 2 Balancín de motor.....	26
Ilustración 3 Detalle de la pastilla en la que se puede observar corrosión y una región de fractura .....	30
Ilustración 4 Detalle del balancín en el que se encuentra falla por fatiga.....	30
Ilustración 5 Máquina de pulido vertical (Equipo de la Fundación universitaria los libertadores). .....	31
Ilustración 6 Máquina de pulido circular (discos). (Equipo de la Fundación universitaria los libertadores).....	31
Ilustración 7 Durómetro e indicador de dureza. Artefacto de la fundación universitaria los libertadores.....	32
Ilustración 8 Indicador de dureza Ref; 61.8 HRC Artefacto de la fundación universitaria los libertadores.....	32
Ilustración 9 Medición 1) Dureza 79 HRC para el balancín.....	32
Ilustración 10 Medición 2) Dureza 87 HRC para el balancín.....	33
Ilustración 11 Medición 1) Dureza 16 HRC para la pastilla de freno.....	33
Ilustración 12 Medición 2) Dureza 46 HRC para la pastilla de freno.....	34
Tabla 1 Tabla de durezas para la pastilla de freno y balancín. ....	34
Ilustración 13 Balancín x100 .....	35
Ilustración 14 Balancín x200 .....	35
Ilustración 15 Balancín x500 .....	35
Ilustración 16 Balancín x1000 .....	36
Ilustración 17 Propiedades del acero 1030; Tomado de IAS IRAM 1030 .....	37
Ilustración 18 Pastilla de freno x100.....	37
Ilustración 19 Pastilla de freno x200.....	38
Ilustración 20 Pastilla de freno x500.....	38
Ilustración 21 Pastilla de freno x1000.....	38

# Resumen

Se determinó el fallo a causa raíz de dos componentes mecánicos con el fin de establecer por qué hubo una falla a través de una metodología fundamental; el análisis de falla en base de los factores que afectan nuestras piezas mecánicas y afectaron sus propiedades, a través del análisis se detecta el método más probable de fallo y cómo fueron afectados por factores a los que fueron expuestos que causaron finalmente la fractura en el material. Se determinaron antecedentes de las piezas tratadas y se establecieron las causas más comunes que suelen afectar a las mismas, teniendo en cuenta un procedimiento que inicia con una inspección visual seguido de un análisis fractográfico mediante un estudio microscópico seguido de un ensayo de dureza en un equipo Rockwell esto con el fin de evaluar la pieza de una manera general, continuamente se hicieron ensayos en el laboratorio que serán ilustrados en el procedimiento del proyecto. Finalmente se dio un diagnóstico que permita detectar el fallo del balancín y la pastilla de freno.

Palabras claves: falla, fractura, fatiga, corrosión.

# Abstract

The root cause of two mechanical components was determined in order to establish why there was a failure through a fundamental methodology; Failure analysis based on the factors that affect our mechanical parts and affected their properties, through analysis is detected the most likely method of failure and how they were affected by factors to which they were exposed that ultimately caused the fracture in the material. We determined antecedents of the treated pieces and established the most common causes that usually affect them, taking into account a procedure that starts with a visual inspection followed by a fractographic analysis by means of a microscopic study followed by a hardness test in a team. Bring this in order to evaluate the piece in a general way, tests were continuously made in the laboratory that will be illustrated in the project procedure. Finally, a diagnosis was made to detect the failure of the rocker arm and the brake pad.

Keywords: (failure, fracture, fatigue, corrosion.)

# Contenido.

Lista de Figuras.....	5
Resumen .....	6
Abstract.....	7
Introducción.....	10
Objetivos .....	11
Objetivo General.....	11
Objetivos Específicos .....	11
Fundamento teórico. ....	12
1. Fractura.....	12
1.2 Mecánica de la fractura .....	13
1.3 Fracturas microestructurales .....	14
1.4 La resistencia como mecanismo de defensa contra la fractura.....	15
2. Antecedentes por agrietamiento.....	16
2.1 Marcas de playa .....	17
3. Fatiga.....	17
3.1 Historia Breve.....	18
3.2 Física, fatiga, diseño.....	19
3.3 Mecánica de la fatiga. ....	20
4. CORROSIÓN.....	23
4.1 Procesos de corrosión (Pastilla de freno y balancín). ....	23
4.2 Condiciones externas que generan corrosión. ....	23
4.3 Corrosión en ambientes especializados. (Pastilla de freno y balancín). ....	24
6.2 Inspección visual .....	30
6.3 Ensayo de dureza Rockwell.....	31
6.4 Análisis metalográfico .....	34
7. Análisis de falla RCA. ....	39
7.1 Fundamentos - Análisis de Causa Raíz (RCA) .....	39
7.2 Aplicaciones en función a la productividad .....	40

8.	Análisis y resultados.....	41
9.	Conclusiones.....	42
10.	Bibliografía.....	44

# Introducción

El análisis de falla tiene como propósito determinar la causa raíz de algún modo de operación fuera de lo normal en una pieza que ha quedado parcial o completamente inservible, estableciendo medidas apropiadas para un desarrollo eficiente en un nuevo producto, con el objetivo de minimizar errores que puedan afectar una pieza, montaje o mecanismo y así mismo reducir costos mejorando su calidad y confiabilidad para evitar futuros incidentes, malos procesos y preservar la vida humana contribuyendo al acrecentamiento de la ingeniería.

El estudio óptimo de una pieza a base del análisis de falla contribuye al desarrollo de la ingeniería y los procesos de manufactura, teniendo claro el mecanismo de falla, se genera una solución o tratamiento y seguramente la vida útil de una herramienta será extensa, provechosa y contribuirá a la productividad en cualquier proceso.

La raíz de estudio se establece con la recolección de datos de fondo y un examen visual preliminar [6]. Es una de las ramas más necesarias en la ingeniería mecánica teniendo un valor muy importante en la industria automotriz, petrolera, Aeroespacial, civil y biomédica siendo relevante la termodinámica, transferencia de calor, mecánica de los materiales, metalurgia, procesos de manufactura, corrosión y fractografía.

# Objetivos

## Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a una pastilla de freno y a un balancín de un motor.

## Objetivos Específicos

- Analizar el estado del arte en bibliografía especializada acerca de estudios sobre análisis de falla relacionados con los componentes mecánicos de estudio.
- Realizar pruebas de laboratorio tales como inspección visual, análisis metalográfico y análisis de dureza, bajo normatividad vigente.
- Determinar las posibles causas de falla de los objetos de estudio mediante la aplicación de la metodología del análisis de causa raíz.

# Fundamento teórico.

## 1. Fractura.

Puede definirse como una rotura o un despiece de un elemento sólido que tenía una estructura definida. En la mayor parte de los casos de falla, la fractura de algún material suele ser intrincada y se debe a un defecto de material, de la pieza o herramienta en la que suceda o incluso en gran parte de las fallas se debe a un defecto en el diseño o alguna condición inadecuada que se ve agravado por un proceso de crecimiento de grietas hasta que se llegue a un tamaño crítico para la fractura final. El proceso de fractura ocurre lentamente a lo largo de la vida útil debido a varios crecimientos de grietas que pueden ser debido a un desgaste por movimientos cíclicos que sufra la pieza y a lo cual se le denomina fatiga.

Hay mecanismos distintos a la fatiga que producen la fractura de alguna pieza de manera recurrente tal como el agrietamiento por corrosión bajo tensión, fluencia a altas temperaturas o agrietamiento inducido por hidrógeno. Cada uno de estos casos se puede detectar mediante el análisis de falla observando ciertas características que se utilizan para determinar la causa del agrietamiento. Distintos mecanismos también influyen en una fractura de naturaleza dúctil, que se pueden denominar de esta manera a través de un análisis macroscópico o microscópico. Esta distinción es importante, porque una fractura puede ser denominada "frágil" desde una perspectiva de ingeniería (macroscópica), mientras que el subyacente metalúrgico (microscópico) mecanismo podría denominarse dúctil o frágil.

En algunos casos críticos, las fallas estructurales son de un tipo muy relevante se denominan fractura frágil ya que tienen fallas estructurales. Estas se inician con defectos de fábrica o muescas que usualmente son resultantes de un mecanizado, temple, fatiga, fragilidad por hidrógeno o metal líquido. [31] (Comportamiento de Fractura).

La fractura por fatiga suele suceder en un 50% de las fracturas por cuenta de la fabricación, la falla de fractura por medio de una falla dúctil se tiene frecuentemente como el resultado de sobrecargas en el material, en cuanto a ocasiones que pueden provocar o aumentar el riesgo es porque la pieza puede estar sometida a condiciones de carga o ambiente incorrectas. Una de las funciones que tiene el análisis de falla es modelar y comprender los tipos de fractura, para evitarlos con una investigación y práctica de ingeniería. Si se quiere modelar generar una solución de los diferentes tipos de falla se debe proporcionar información más detallada sobre los mecanismos de fractura dúctil y frágil en cuanto a las piezas utilizadas y en base a esto generar un modelo que permitan soluciones en las deficiencias del diseño, o reparar la pieza mediante tratamientos que ayuden a minimizar el riesgo de la fractura.

El diseño es una parte fundamental en las partes que complementan un equipo mecánico o estructural, este debe tener una geometría precisa debido que si hay fallas desde el diseño, la ejecución y la utilización de una herramienta o pieza necesaria fallara y eso suele suceder teniendo un desenlace en la fractura que puede comprometer todo el equipo mecánico; esto sucedió en la década de 1800's en Estados Unidos, puentes cayeron por fallas en el diseño estructural y la ingeniería mecánica se vio comprometida de manera crítica. [8] Los accidentes ferroviarios fueron continuos por la fatiga en las vías. [20] También se vio comprometida la industria aeronáutica por la fractura que se presentó en los barcos Liberty construidos en la segunda guerra mundial tuvieron una caída abismal ya que en su fabricación fueron soldados cuando necesitaban ser remachados en algunas partes críticas; de 4694 barcos que habían en promedio muchos fallaron entre esos 24 por factura completa y 12 se partieron en dos. [31] Por esos eventos catastróficos se estableció el estudio de la mecánica de la fractura teniendo como principal estudio; aparición de las fracturas y de qué manera se propagan.

## 1.2 Mecánica de la fractura.

La mecánica de fractura por lo general se debe a la propagación de grietas por fatiga, pero se diferencia en factores externos que pueden acelerar la fisura en el material debido a que cada acero tiene ciertas especificaciones que componen una estructura más resistente o más frágil, por lo general las irregularidades superficiales se componen por un gran factor que da la fatiga. La resistencia en los aceros hace parte de una protección a la fractura esto se puede dar con tratamiento térmicos y aleaciones en la mayoría de los aceros teniendo en cuenta que los aceros de ultra resistencia deben ser expuestos a condiciones expuestas para así propagar un acrecentamiento de grietas que puedan causar una fractura o, por otro lado, una causa puede ser un mal tratamiento térmico, esto se puede esclarecer con un análisis de falla. En la mecánica de la fractura, se dispone a hacer un listado de datos para en longar la vida útil de varios materiales, en este caso el acero ya que es común que las piezas tomadas mediante el análisis de falla sean aceros.

Cualquier fractura pasa por etapas como: la propagación de grietas, los gradientes de fuerza por cargas en el material, el estrés en su microestructura (ocurre mucho en los aceros carburizados); una serie de microscopía electrónica después de un análisis fractográfico revela el tipo de fractura que tiene la microestructura. En el caso del acero carburizado, se puede ver un agrietamiento intergranular en los límites del grano y establecer un modo de fractura que hace posible la caracterización cuantitativa del tamaño. La fractura inestable se identifica por una línea puenteada, ya que es la continuación de grietas iniciadas por tensiones aplicadas que excedieron los límites de resistencia. Es por esto, que la fractura y la fatiga son partes fundamentales de un análisis de falla debido que la fatiga genera en algún momento la fractura en cualquier tipo de material teniendo en cuenta que por fuerzas o entornos exteriores también

se puede dar a falla. Es importante tener claro estos conceptos para realizar un análisis de falla eficaz. [31] (fractura intergranular).

## 1.3 Fracturas Microestructurales.

Las fracturas a nivel micro se presentan como grietas que pueden ser de naturaleza intergranular o transgranular. El crecimiento en las fracturas microestructurales por impactos cíclicos se le denomina fatiga. La fatiga se origina sobre la superficie del material por impactos cíclicos, inicialmente originadas por el diseño o los acabados superficiales de las piezas. Empiezan por una propagación de microfracturas que se extienden de manera continua seguido de esto, la propagación deja de crecer y empieza a aumentar en dirección perpendicular es decir a profundizar el material y así mismo se extiende lo ancho de la cizalladura hasta que es tan crítica que causa la fractura, se identifica por medio de estrías en la pieza denominadas arcos de playa. Es por esto que su comportamiento, depende del funcionamiento de la pieza en gran medida a una fractura microestructural por otro lado también hay mecanismos de fortalecimiento con el propósito de preservar más la pieza por ejemplo se puede hacer aleaciones que prolonguen más la vida útil de un material.

Todas las grietas que se puedan presentar en una fractura microestructural no son del mismo tipo ya que tienen mecanismos diferentes que dependen de la configuración estructural del material. Por lo tanto, antes deben tener un tratamiento analítico que permitan generar una solución dependiendo de la fractura posible. Se consideran tres tipos: Microestructural mente pequeñas, mecánicamente pequeñas y químicamente pequeño. También, se requieren las dimensiones físicas tales como la longitud de la grieta y su profundidad, que se debe tener en cuenta ya que es posible que después se convertirá en grieta. El tipo fractura microestructural mente pequeñas es considerado cuando el tamaño de la grieta no excede el tamaño de un grano pero tiene el peligro de extenderse afectando el material, las fracturas mecánicamente pequeñas se considerarán cuando su tamaño no excede las dimensiones características; La región de plasticidad mecánica se puede comprender como la zona plástica del material; esta propiedad está determinada en cada material. Las fracturas químicamente pequeñas que se dan en su gran mayoría en aceros ferríticos en ambiente acuosos con cloruro porque padecen de condiciones tales como fatiga por corrosión y hacen que grietas pequeñas se hagan significativamente grandes en poco tiempo por su debilitamiento químico en un ambiente agresivo. Procesos que pueden evitar este tipo de fisuras se controlan mediante una mezcla convectiva; (partes mínimas del material se mezclan y hay intercambio de materia a través de la convección), difusión iónica o superficie de reacciones electroquímicas. [31] (tipos de grietas microestructurales).

## 1.4 La resistencia como mecanismo de defensa contra la fractura.

La resistencia de un material es tan importante como las medidas de preservación del material. Es por esto por lo que en las fracturas también se debe tener en cuenta otro factor muy importante como la carga a la cual será sometido el material. Por lo general, el problema adicional que presentan las piezas fracturadas por carga debido a la mala distribución de esfuerzos con respecto al punto de inflexión dado que si esta no es asimétrica el material fallará en algún momento. Para evitar esto, se puede consultar funciones de transformación para estimar la probabilidad de falla. [31] (Evaluación del rango de resistencia finita).

Un mecanismo común para que haya algún tipo de fractura es por corrosión, teniendo claro que depende de factores exteriores e interiores como la estructura molecular del material, el tipo de ambiente al que esté expuesto. Se han propuesto modelos que simulen este comportamiento y cómo evitarlo; este modelo trata de una disolución anódica que incluye el camino intergranular de la rotura y determina la diferencia en la aleación y composición en el límite del grano. [6] La velocidad de la grieta se puede describir por la ecuación de Faraday:

$$DA / DT = IAM / ZF$$

Ecuación de Faraday. Velocidad de grieta. 1

Donde;

IA es la densidad de corriente anódica.

M es el peso atómico.

Z Electrones de valencia.

F es la constante de Faraday.

Actualmente, se han encontrado detección de grietas que puedan causar fracturas intergranulares y transgranulares que reflejan el modelo de túnel de corrosión, el modelo de plasticidad de absorción mejorada, el modelo de ruptura de deslustre, la división inducida por la película. [31] (moldeo de ruptura).

## 2. Antecedentes por agrietamiento.

El análisis de falla tiene muchos beneficios en cualquier campo ingenieril y contribuye al acrecentamiento de la ingeniería, antecedentes acreditan el análisis de falla y se ha enfocado a evitar desastres teniendo en cuenta los pasados para prevenir los futuros; en una planta petroquímica donde se presentaba un comportamiento anormal en una válvula corredera ya que los tornillos cabeza de acero que formaban parte del conjunto de la válvula corredera fueron expuestos a esfuerzo y reaccionaron de manera adecuada, pero en la costa del golfo donde su temperatura varía normalmente, los tornillos fallaron durante la carga inicial. El analista llegó a la conclusión que dado a que no tenían un tratamiento térmico adecuado a las condiciones que iban a ser expuestos tomaban otra forma y no resisten el esfuerzo de la válvula. [17]. Es común ver fallos por las condiciones a las que serán expuestas las piezas o por los tratamientos a los que fueron sometidos los materiales, o en este caso para esta válvula. [5]

En Estados Unidos, se halló una válvula con 4% de aluminio en su aleación de cobre con un proceso de anodizado, el cual estaba fallando, se realizó un micro examen y reveló deterioro en forma de agrietamiento por mucho calor.[6] Después se supo que la temperatura del horno del cual hacía parte la válvula era más alta que la que podía soportar la válvula, normalmente el sobrecalentamiento se da en forma de ampollas o deterioro estructural en el volumen,[1] lo inusual en este caso fue el agrietamiento que se presentaba en la válvula así que se hizo el respectivo análisis de falla y después se determinó que la causa de los defectos inusuales se dio por la alta densidad de corriente durante la anodización en presencia de constituyentes fundidos en el fallo de la aleación de aluminio fundido en el cuerpo de la válvula.[1][6]

La falla suele presentarse por distintas condiciones es por esto es importante determinar una descripción de la pieza tanto en el tratamiento térmico como en los distintos tipos; sea por fallos de sobrecarga que implica al diseño, como fallos de distorsión, fatiga, corrosión y lo más importante identificar las propiedades del material tratado y su composición química.[10] anteriores conceptos, ayudaron en el análisis de falla de un avión de combate que se estrelló y de los escombros encontrados, los investigadores recogieron una raíz rota del ala y un accesorio central agrietado perteneciente al conjunto de cola, según los detalles vistos en estas piezas, ambas partes fueron forjadas y tratadas térmicamente con una aleación de aluminio de alta resistencia de manera inadecuada por lo cual se determina que esa catástrofe ocurrió por la falta de un análisis de falla previo.[6]

El análisis de falla fue necesario desde hace mucho tiempo. Leonardo DaVinci fue el primero en determinar la carga de alambres de acero con el fin de evitar el fallo, [5] Galileo Galilei

que se convirtió el primero en determinar la carga de fractura de una barra en tensión y determinó que es directamente proporcional al área de su sección transversal e independiente de su longitud, [3] evitar la falla fue su propósito y fue uno de los pioneros en el análisis actualmente empleado. En el presente, la falla puede evitarse en condiciones de servicio simuladas y controladas en el laboratorio, de este modo se puede aprender acerca de cómo el fracaso realmente ocurrió. [21] Pues la principal función este estudio es evitar accidentes y procesos inadecuados en materiales de ingeniería, preservando la vida humana y mejorando los procesos industriales. [13]

## 2.1 Marcas de playa.

Una de las evidencias con mayor notoriedad sobre la superficie de la falla son las marcas de playa, estas marcas se forman por cambio de circunstancias durante el agrietamiento, como la amplitud de las cargas o cambios de ambientes, es por esto que es son valiosas en el análisis de falla debido a que se reconocen fácilmente a simple inspección de la pieza, estas para reconstruir la secuencia de la falla. Las marcas de playa indican la posición del frente de la grieta durante la etapa de fatiga, el progresivo avance de este fenómeno. Llega al punto que produce que el material restante falle por rotura catastrófica según las propiedades frágiles o dúctiles. Este indicativo son señales productoras a la fractura por fatiga, ya que se forman durante la etapa de propagación en el inicio de la grieta, en este punto de la formación de la grieta y el cambio de circunstancias genera un concentrador de tensiones causando que el material se deforme plásticamente dando a ilusión nuevas estrías. [3] Las direcciones de las estrías generalmente son perpendiculares al punto de torsión o tensión al que está sometida la pieza.

## 3. Fatiga.

La fatiga es para un ser vivo un cansancio o molestia presentado después de un, más o menos prolongado e intenso esfuerzo físico o mental, de igual forma para los materiales se presentan este tipo de muestras de "cansancio" y si bien está claro que no se presentará con las mismas características que en un sistema orgánico se puede observar que es un fenómeno donde el cambio estructural permanente es progresivo y localizado, es dependiente del tiempo o más exactamente usando la definición standard dada para nosotros los ingenieros refiriéndonos a la ASTM E1150. "*Definiciones de términos relacionados con la fatiga*" donde dice; "*fatiga (Nota 1): El proceso de cambio estructural permanente localizado progresivo ocurriendo en un material sujeto a condiciones que producen tensiones fluctuantes y deformaciones en un punto o puntos y que puede culminar en grietas o fracturas completas después de un suficiente*

*número de fluctuaciones, las fluctuaciones pueden ocurrir tanto como con carga en determinado tiempo o como el caso de las “vibraciones aleatorias.”*; esto es debido a que toda pieza en el mundo real se encuentra afectada por cargas que varían constantemente tanto de magnitud como de punto de aplicación entre otros factores repitiéndose una y otra vez.

La fatiga en un material tiene un sistema de cambio en su estructura permanentemente y continuamente es una falla que termina en una discontinuidad del material y es de cierta manera predecible que de una u otra forma dependiendo del material presentará una muestra de recorte de su vida útil en un punto específico. La fatiga es por la misma razón la mayor causante de fallas en cualquier tipo de sistema, como por ejemplo en los constante girar de los engranes de una caja de cambios de un automóvil, en el conectar y desconectar el plug de los audífonos, quitar y poner una tapa de un smartphone, el constante cambio de temperatura de un caucho de una olla a presión, entre otros tantos cambios presentes en nuestra vida cotidiana que hacen evidencia de ello.

### 3.1 Historia Breve.

La tribología afectaba las piezas de manera perjudicial debido a la falta de lubricantes. La ciencia de estudio conocida como tribología, encargada del estudio de la fricción entre superficies que contribuye a la fatiga en una pieza; La fatiga ha sido un fenómeno bastante estudiado desde tiempos anteriores a la revolución industrial, hay una en donde se alcanza a estudiar en parte el desgaste por fatiga, concepto que ya Leonardo Da Vinci había considerado para el año 1493 según algunos de sus documentos encontrados. Sin embargo, empieza a estudiarse hasta mediados del siglo XIX, una vez que el Poncelet usa el término fatiga en el año 1839, para describir las fallas causadas por este tipo de situaciones.

En los Años 1800's, se registraron los primeros estudios por parte de Wilhelm August Julius Albert (24 enero 1787 – 4 Julio 1846) quien, aunque no lo denominó fatiga sabía claramente que era una falla por carga repetidas, observó que las cadenas transportadoras utilizadas a menudo se rompían después de una operación prolongada. Este fenómeno, la fatiga del material, se explicó entonces como daño por sobrecarga. Así que Albert construyó una máquina en la que expuso una cadena a una carga frecuentemente repetida. Descubrió que, además de la carga, la frecuencia del estrés por fatiga es decisiva.

Años más tarde, William John Macquorn Rankine (5 de julio de 1820 - 24 de diciembre de 1872) es quien en la década de 1840 ya hacía análisis sobre varios ejes rotos, especialmente después del gran accidente de Versailles (1842) en el que la fractura súbita de un eje provocó la muerte de más de 50 pasajeros. William demostró que la falla se presentó en el eje gracias a una grieta que fue creciendo hasta el punto en que la pieza se desprendió.

Consideraron durante mucho tiempo que las fallas se producían debido a algún tipo de cristalización en el material punto que Rankine también analizó a profundidad, cosa que se

aclaró tiempo más tarde cuando August Wöhler (22 Junio 1819 – 21 Marzo 1914), ingeniero ferroviario recordado por su sistemático método de investigación en fatiga de metales, quien de acuerdo a sus investigaciones se dio cuenta que estas fallas se debían a los constantes cambios en las tensiones que soportaba el material. Su trabajo sobre la fatiga marca la primera investigación sistemática de Curvas S/N, conocidas también como curvas de Wöhler, para caracterizar el comportamiento a la fatiga de los materiales. Dichas curvas se pueden usar para minimizar el problema de la fatiga al reducir el estrés en puntos críticos de un componente. Wöhler demostró claramente que la fatiga ocurre por el crecimiento de grietas por defectos en la superficie hasta que el producto ya no puede soportar la carga aplicada. Además de esto, desarrolló una máquina para probar las cargas cíclicas de ejes ferroviarios, principalmente porque muchos accidentes fueron causados por una fractura repentina a causa de la fatiga del material. Por último, fue el ingeniero Poncelet quien acuñó el término de Fatiga para describir dicho fenómeno. [31](Fractura intergranular).

## 3.2 Física, fatiga, diseño.

Ahora bien, ya que las fallas por fatiga son generadas por cargas cíclicas es necesario definir inicialmente qué tipos de carga se pueden aplicar a una pieza dentro de los cuales encontramos inicialmente las fuerzas centrífugas, tensiones generadas por cambios térmicos, esfuerzos pulsantes tensión - tensión o bien esfuerzos tensión - compresión, flexión unidireccional, torsión e incluso por las tensiones internas obtenidas por el trabajo del material. Para cada una de estas fuerzas, hay una ecuación característica que se encarga de aproximar lo más posible el ciclo de falla para la pieza puesto que en la fatiga, a diferencia de los demás tipos de análisis en sistemas dinámicos, no es posible establecer una ecuación que se encargue de predecir el esfuerzo de falla de una pieza determinada, sino que esto se obtiene gracias a un cálculo probabilístico obtenido por medio de la experimentación en elementos con propiedades de carga similares.

La falla por fatiga es tan importante que una parte del diseño está enfocado a las fallas por fatiga, en donde se tienen dos consideraciones principales:

- El material es libre de defectos.
- El material es ideal, pero poseerá una carga que puede o no ser considerada un defecto.

Este método de diseño (Fatiga/vida) se caracteriza por poder definir una pieza con un tiempo de vida finito (definido por el fabricante) o una vida infinita para la pieza diseñada. La vida de un material se suele denominar fatiga de bajo ciclaje cuando la pieza falla entre un ciclo y  $10^3$  ciclos. De igual forma, se considera fatiga de alto ciclaje si la falla se presenta una vez se

han superado los  $10^3$  ciclos. Dentro de este método se maneja tres modelos de Falla, donde encontramos:

*Esfuerzo/Vida:* Método en el cual se pretende que el diseño dure más de  $10^3$  ciclos. Se busca obtener un punto llamado límite de resistencia, el cual será mucho más preciso si las cargas fluctuantes son pronosticables y bastante estables (no cambian drásticamente).

*Deformación/Vida:* Es el método más avanzado y preciso. En este se define la deformación como la adición entre la deformación plástica y elástica.

*Mecánica de Fractura Lineal Estática:* Es quizá el método más específico puesto que se puede aplicar a cada una de las fallas.

### 3.3 Mecánica de la fatiga.

Al momento de analizar la fatiga en piezas metálicas, específicamente las compuestas por materiales ferrosos es necesario entender el proceso que se lleva a cabo en este tipo de materiales para producirse dicha falla, la cual tiene básicamente 5 pasos. El primero es la preparación del material a la deformación plástica por culpa de las cargas cíclicas, paso que puede llegar a ser omitido para algunas de las aleaciones ferrosas en donde la resistencia a la deformación plástica por fatiga no está localizada específicamente y por tanto es mayor. Dentro de este paso hay un mecanismo conocido con el nombre de Cottrell-Hull, que explica en cierta forma los procesos presentes en el momento en que se deforma una pieza, estos procesos son conocidos como intrusión y extrusión, si bien el mecanismo no es realmente preciso es bastante útil para hacer una idea general de lo que se presenta en dicha pieza al ser sometida a las cargas correspondientes, creando lo que hoy en día se conoce con el término de banda de deslizamiento persistente, término que se encarga de definir a una zona de deformación plástica en la que los diferentes ciclos han generado una serie de bandas en las que se presentan valles y cimas microscópicas que proporcionan a la superficie del material una sensación de aspereza superior a la del resto del material.

Luego, se encuentra el inicio de la discontinuidad en el material, la que comúnmente se genera en el punto donde se haya producido una sobrecarga, inicialmente es muy difícil de identificar debido a que se presenta a una escala microscópica fracturando una pequeña porción del material, puesto que la falla por fatiga requiere menor esfuerzo para ser generada por ser un esfuerzo dinámico y que no superará el del límite elástico lo que generaría una ruptura considerable en el material. Aunque esto no siempre es así. En muchas ocasiones, estas microfracturas son producto de las operaciones de fabricación del material, para estas grietas también hay procesos que pueden corregirlos en la misma línea de producción, aunque no

siempre son empleados. Estas fallas inicialmente van creciendo lentamente, y presentan un cambio de orientación a lo largo de su crecimiento en tamaños entre los 0.05 mm y 2 mm. La etapa en la que cambia de velocidad de crecimiento (es más rápida) y se convierte en la “rama” principal de la cual se desprenden las subsiguientes grietas.

Seguidamente se hablaría de lo que es la coalescencia de las microfracturas para formar el primer “brote” de donde saldrá la fractura principal; aunque no se especifica un tamaño de estas microfracturas se puede establecer que dependiendo del equipo de medición puede decidirse qué dimensión será la que se tomará como medida de comparación para este momento de la falla. Esta parte del proceso de creación de la falla por fatiga no tiene mucho por aclarar, puesto que como su nombre indica es una coalición de las microfracturas es decir la unión de estas por medio de la creación de otras microfracturas, sin embargo, en lo que a esto respecta se ha podido observar de esta creación depende en gran medida de la medida en que se aplique el esfuerzo o la amplitud de la deformación plástica.

La propagación de la fractura, en este punto es cuando se extenderá la grieta de manera perpendicular a mayor esfuerzo, una vez pasa esto la zona cercana a la grieta toma una propiedad plástica, y continuando la grieta de una forma apenas perceptible (almacenando el material unas tensiones por la discontinuidad de la pieza). Misma grieta que al momento de liberar el material de la carga no será visible por la deformación plástica, pues retoma su posición, más sin embargo es existente a una escala de grano del metal.

El hecho de aplicar una carga menor a la de los esfuerzos residuales en el material, no va a abrir la grieta ni a propagarse, por consiguiente, la operación contraria si, a este tipo de falla ocasionada por el esfuerzo cíclico del material es denominado “Estriación por fatiga”. Varios factores afectan el crecimiento de las grietas y la disposición entre ellas, dentro de los más obvios está la carga aplicada, y la frecuencia de ciclo de la carga, pero también se encuentra el tamaño del grano del metal y la corrosión presente en la zona de falla. Por último, la fractura en el material se da una vez el esfuerzo de intensidad es igual o mayor a la resistencia de fractura del material, lo que ocasiona que la grieta se propague de forma aleatoria (es decir sin un camino específico de fractura) factor que depende de lo dúctil del material.

Llegados a este punto podemos llegar a entender la historia de este campo de estudio. La fatiga en cada aspecto (su origen, su comportamiento y su conclusión), de igual manera el método de diseño que en esta se basa, la presentación de estos temas es muy importante al momento de realizar un estudio como el que pretendemos llevar a cabo y por ende su comprensión es de vital importancia.

Los procesos que son más comunes se deben a un leve crecimiento en grietas y se asocian a la generación de bandas de deslizamiento, lo cual da un exceso en la fatiga y se puede denominar como un tipo de fatiga multiaxial que se puede presentar en monocristales dúctiles o poli cristales de grano grueso, que también se ve asociado a una micro fisuración en el material debido a la fragilidad que presente el mismo, se rige por el grado de desorientación en el grano del material y está asociado con un modo mixto de fractura transcristalina -

intercristalina. El principal motivo es determinar un método para hacer cada vez más dominante las vidas muy largas en los materiales guiándose del principal estudio del análisis de falla; lo cual también podría denominarse como un objetivo. El crecimiento de las pequeñas grietas en la fatiga se denomina un problema de nucleación, se sufre a través la propagación entre ellas y antes de que se llegue a la nucleación hay un aspecto iniciación de la fisura que puede establecerse con este término si cumple el orden de 1 mm, ya que el problema puede causar una grieta por fatiga de llegar a ser de 1 a 500 m de longitud. Los comportamientos en estas grietas se denominan con un nivel K. Por otro lado, las microestructuralmente pequeñas se denominan con un comportamiento anómalo.

Las grietas que pueden causar una fractura en el nivel K son sometidas a bajas amplitudes de esfuerzo para preservar la vida útil del material dado que si las amplitudes son suficientemente bajas las pequeñas grietas pueden ser detenidas, relativamente los estudios previos de este tipo de grietas promueven una protección mejorada contra las mismas evitando futura fractura. Actualmente los modelos que consideran la interacción con barreras microestructurales periódicas mejoran el material haciendo que las grietas se limiten a un comportamiento uniaxial, cuando las cargas en determinados materiales aumentan, forman condiciones de cargas multiaxial.

La fractura de esta manera se da en algunos tipos de sujetadores que transfieren carga en los lados de los agujeros en las capas unidas. Lo ideal es que no se presentara, pero se pueden manifestar en uniones atornilladas, agujeros de perno en la fila superior donde la transferencia es máxima, en alguna concentración de estrés geométrico o alguna concentración de tensión. Este tipo de condiciones se dan mucho en el campo automotriz o aeronáutico dado que las piezas tienen un comportamiento cíclico lo cual causan fatiga; produciendo una transferencia de cizalla lo cual causa un desgaste más predominante. Citando un caso específico como un remache, podemos ver que la fatiga aumenta con relación al diámetro del remache y con el espesor de la lámina. Si se quiere aumentar la resistencia a la fatiga en este caso, se debe hacer una unión doble de lámina en el remache ya que tendría más influencia en la resistencia a la fatiga. Las uniones con remaches empotrados generalmente tienen una resistencia a la fatiga menor que las que tienen cabezas salientes dado que el factor de concentración de tensión en un orificio circular es más alto y se expande plásticamente. El método más eficaz para reducir la fatiga es tensionar el sujetador utilizado y garantizar que la carga transferida sea la misma en cualquier punto ya que también evitan el desgaste de la pieza y con esto, tratar de evitar un desenlace inadecuado en la pieza lo cual genera la fractura. [31] (tipos de grietas microestructurales).

## 4. CORROSIÓN.

### 4.1 Procesos de corrosión (Pastilla de freno y balancín).

Los procesos de corrosión son bastantes complejos de analizar y más en una pieza específica. El balancín y la pastilla de freno son dos componentes mecánicos automotrices y tienen factores externos que pueden acelerar la corrosión. En este tipo de piezas, la corrosión es fundamental en el análisis de falla dado que los procesos que hacen en su operación cotidiana tienen contacto con fluidos como el agua, aire, lubricantes, entre otros; que son factores que puedan alterar o aumentar la falla en el material. Los procesos de corrosión de un metal o aleación pueden afectar el material y causar fallos en las reacciones de transferencia de carga. En el caso específico sobre la pastilla de freno en el análisis, la corrosión es parte fundamental en el fallo de la pieza, la corrosión tendría mucha responsabilidad frente a la fatiga para deteriorar la estructura de la pastilla de freno junto a la fatiga que también hace mella a la fractura que pueda sufrir la pieza. [30] Actualmente, se están desarrollando productos que reaccionen previniendo la corrosión. Esto se logra a través del reforzamiento a nivel atómico y molecular, teniendo en cuenta los principales detalles en el mejoramiento de piezas utilizadas en los procesos macroscópicos de química, los artefactos o máquinas de producción, las máquinas de construcción o maquinaria pesada. Estos tipos de artefactos sufren mucha exposición a la corrosión debido a que sus piezas están en un medio ambiente húmedo y sucio. [1] En el caso de los artefactos electrónicos, piezas de procesamiento de alimentos, minería y en la tecnología médica es muy importante ya que se debe evitar por la generación de contaminación y daño molecular. Dependiendo el área donde se quiera evitar la corrosión, se deben utilizar productos químicos, bioquímicos o procesos mecánicos que eviten la misma. [21]

### 4.2 Condiciones externas que generan corrosión.

Los procesos productivos, tecnológicos y mecánicos a menudo implican ambientes que varían mucho provocando un déficit en la protección a la corrosión, en el rendimiento a la corrosión y en el control a la corrosión. [30].

Los entornos juegan un papel muy importante en la operación o proceso de la pieza típicamente está ligado a la temperatura y a la presión. Si bien, los entornos con más dificultad

para una pieza se presentan en un ambiente húmedo y en una temperatura elevada, es común notar la corrosión en medios industriales, en ambientes en que la pieza está en contacto en el agua dulce, en ambientes marinos, en ambientes subterráneos, en tecnología médica e informática y también, se presentan en los sistemas de armas militares ya que muchas veces son expuestas a condiciones anteriormente mencionadas. [15]

La corrosión en entornos de agua dulce generalmente es precipitada y generan partes mínimas de metal, generalmente contienen menos de mil miligramos sueltos sólidos por litro.

La corrosión en el hierro dúctil se ve favorecida por la red de agua mientras que el cobre es la opción menos apropiada si se quiere evitar la corrosión, es por esto por lo que se busca el uso de los polímeros reemplazando a los materiales anteriormente mencionados, el agua cruda no potable, estancada o en condiciones en que solo varía la temperatura. Este tipo de aguas residuales tienden a favorecer la corrosión más rápida en la pieza.

### 4.3 Corrosión en ambientes especializados. (Pastilla de freno y balancín).

La corrosión en el análisis del balancín y en la pastilla de freno se puede analizar en diferentes entornos dado que la corrosión no afecta de la misma manera a las piezas del análisis, aunque al pasar del tiempo es casi inevitable evitarla se puede prevenir.

El tipo de agua supercrítica es vapor a 364 °C a 22 MPa pueden deteriorar de manera rápida, también puede estar en condiciones ultra supercríticas a 565 °C a 22 MPa, en cuanto a la producción de energía.

La corrosión en climas fríos desafía a condiciones típicamente abordadas en la atmósfera y la calefacción solar puede concentrar surcos corrosivos, lo que causa condiciones climáticas extremas y reparaciones difíciles, aun puede que la pieza falle al poco tiempo de un mantenimiento si es afectada por este tipo de corrosión en cuanto se quiera.

## 5. METODOLOGÍA DE UN ANÁLISIS DE FALLA GENERAL.

La metodología que se usará para la realización del análisis de falla y análisis de causa raíz consta de 13 pasos en los cuales se busca dar respuesta a las causas de falla del elemento mecánico a estudiar, esta metodología es planteada en la bibliografía especializada [21], donde el autor sugiere que estos deben ser los pasos para un correcto análisis de falla. [1] Dichos pasos son:

1. Recopilación de datos y antecedentes - Selección de muestras.
2. Examen previo de la pieza dañada (examen visual y conservación registro).
3. Ensayos mecánicos (incluyendo la dureza y la tenacidad de pruebas).
4. Selección, identificación, conservación y / o la limpieza de las muestras (y la comparación con las piezas que no han fallado).
5. Examen y análisis y documentación fotográfica macroscópica (Superficies de fractura, grietas secundarias, y otros fenómenos de superficie).
6. Examen y análisis de las muestras metalográficas.
7. Determinación del mecanismo de fallo.
8. Análisis Químico (a granel, locales, productos de corrosión superficial, depósitos o recubrimientos, y el análisis de microsonda).
9. Análisis de la mecánica de la fractura.
10. Análisis y observaciones para la correcta determinación de causa raíz de las fallas.

### 5.1 Descripción del caso.

A continuación, se establecen las generalidades de las piezas, los antecedentes y continuamente se desarrolla la metodología, [1] excepto el paso 8 por falta de equipos en la institución y continuamente se desarrolla acorde al análisis del caso de estudio. Se finaliza con las conclusiones en las piezas a analizar.

## 6. ANALISIS Y DESARROLLO.

En el procedimiento ejecutado se adecua al desarrollo de acuerdo a la metodología general:

### 6.1 Recopilación de datos y antecedentes - Selección de muestras.

Realizar una selección de muestras y recopilar los datos y antecedentes posibles de cada una con el fin de comprender la causa, se busca que las piezas a estudiar sean aceros puesto que por los equipos disponibles solo es posible un análisis en este material específico.



*Ilustración 1 Pastilla de freno de carro*



*Ilustración 2 Balancín de motor*

Imagen 1 y 2. Pastilla de freno de carro y Balancín de motor (Modelos generales).

## 6.1.1 Generalidades de las piezas.

### 1. Balancín.

Es un elemento oscilante que permite transformar el movimiento circular en uno alternativo rectilíneo o viceversa, dependiendo de la maquinaria a la que componga. Inicialmente los balancines eran barras fuertes e inflexibles de hierro usadas en máquinas de vapor, en la actualidad son elementos muy usados en distintos tipos de máquinas sin embargo su desarrollo principal se ha enfocado a el motor de combustión interna de pistón, en donde en conjunto con el árbol de levas y las válvulas es el encargado de la apertura y cierre de la admisión y escape y los tiempos que a estos procesos corresponden.

En diseño, es básicamente una barra o palanca con un punto de fulcro o de apoyo en el que pivota. Los datos importantes aquí son las distancias entre las puntas, el fulcro (que en algunos casos puede ser la misma y en otros se encuentra más cerca del fulcro) y el diámetro del eje pasante el cual suele poseer un cojinete que reduce la fricción o un rodamiento de agujas el que debe estar siendo lubricado constantemente con aceite. En producción, son piezas generalmente hechas en hierro, acero y aluminio. [26]

Para su fabricación se usa fundición para el acero, forja en el caso del hierro y aluminio o mecanizadas por un CNC (ya en casos muy específicos) sujetadas por un pin pasante conocido como eje de basculantes, poseen otros detalles como un tornillo o tuerca de calibración en uno de sus extremos.

### 2. Pastilla de freno.

Es una pieza diseñada con el objetivo de que al aplicarse una fuerza en el sentido correcto haga contacto con una superficie que se encuentra en rotación y desacelera o lo detenga por medio de la fricción generada entre ambas piezas.

Las primeras piezas de este tipo fueron usadas para detener carretas haladas por caballo que solían ser accionadas manualmente por una palanca que movía una zapata, que hacía contacto con la rueda generando la fricción necesaria para reducir su velocidad o detenerlo por completo.

Los primeros frenos de este tipo eran fibras naturales como algodón y cabello animal, trenzadas de tal forma que aumente su resistencia a la fricción. Durante años, sirvió este mecanismo hasta un punto en el que las velocidades de los vehículos y su masa ya no podían ser detenidos por los mismos, momento en el que se procedió a desarrollar materiales que soportan más altas temperaturas, fricción y otras tantas características adicionales, llegando a usa así a las fibras de amianto, material que marcó precedentes en el desarrollo de este tipo de elemento pues a día de hoy es uno de los materiales más usado en la industria y que es conocido como asbesto.[25] Luego, se introducirán materiales como alambre de latón y viruta de carbón que aporta mejoras en ciertas propiedades.

Sin embargo, la parte que soporta la pastilla de freno que es conocida como zapata. Estas han tenido modificaciones de material tanto como de forma, siendo estas inicialmente de madera para algunos carruajes y pioneros vehículos automotores pasó a ser de metales en especial acero.

## 6.1.2 Antecedentes.

### 1. Estructura Pastilla de freno.

Usualmente las pastillas de freno, hacen un contacto brusco en el momento que se causa el contacto deslizante directo de la guarnición del rotor lo cual genera un chillido debido a que la temperatura de esta es muy baja, durante frenadas comunes la fuerza de presión es aproximadamente de 5 Kilo Newton (KN), si se analiza la frenada brusca genera una presión de 30 Kilo Newton (KN), si se analiza la almohadilla de freno ubicada en la parte superior de la pastilla su presión está por encima de 1,2 MPa y en una situación de una frenada “brusca” la presión aumenta hasta 10 MPa.[29] El aumento en cuanto a la presión de la pastilla en general es de seis veces el nominal que debería experimentar y en cuanto a la almohadilla es de nueve veces, esto genera fricción en la pieza y causa desgaste en la misma, aunque la duración normal según los fabricantes (Coéxito, Bosch, Brembo) es de 25.000 kms, la pastilla al sufrir fatiga de manera cíclica puede finalmente generar fractura debido a la fatiga[8], posiblemente hay factores externos que la pueda dañar como la corrosión que depende de las condiciones de humedad que experimente el automotor, comúnmente la las condiciones de un frenado dependiente de la velocidad, que no generen tanta presión en la pastilla están en un rango (0 - 25 Km/h) a una temperatura de (20-25 °C) también es necesario.

Esto significa que los frenos solo han estado expuestos al frenado en condiciones de velocidades relativamente bajas (0-25 km/h); estas pruebas son realizadas en el laboratorio con la humedad ambiente y temperatura casi constante (20-25 °C). En el transporte de mayores cargas en los vehículos se verán influenciados los componentes resistentes al desgaste en el

coeficiente de fricción que se genera por su fracción de volumen. Por lo tanto, a pesar de los materiales que componen la estructura del disco de freno y de la pastilla, siempre se verá un desgaste debido a la función mecánica que realizan, los diferentes tipos metálicos o tengan un compuesto orgánico asimismo llegarán al fallo, saber por qué dará herramientas para evitar someterlos a malas condiciones todo con el fin de preservar lo mayor posible el tiempo de funcionamiento de la herramienta. [29]

## 2. Estructura del balancín.

Los balancines tienen como función empujar las válvulas de admisión y de escape para generar la apertura y cierre en el tiempo adecuado, facilitando la sincronización de los tiempos en motores de combustión interna; Este dispositivo es accionado por el árbol de levas que se encuentra al interior del motor (este transmite el movimiento secuencial de las levas a los balancines). los materiales más utilizados para producir estas piezas mecánicas, es el hierro colado por fundición (hierro gris), El hierro gris es uno de los metales más ferrosos en la industria, dicha aleaciones de hierro y carbono tienen porcentaje en peso que varían entre 2% y 4%, además contienen un 2% de silicio y manganeso. Formando así una matriz ferrítica estructural con alto porcentaje de carbono. Esta matriz aumenta la resistencia al desgaste por rozamiento y a los cambios en las magnitudes de las fuerzas de torsión y tracción. [26]

Los balancines en su estructura poseen dos brazos, uno de ellos se une al empujador y el otro se apoya al final del eje de la válvula. Las dimensiones de los brazos del balancín por lo general no son similares ya que tiene que ejercer una fuerza de empuje para la apertura, el eje de los balancines suelen ser huecos y cerrados en sus extremos, además se perforan una serie de orificios sobre los brazos que coinciden con los cojinetes o rodamiento por los cuales pasa el lubricante. Debido al cambio de temperaturas dentro del motor, estas válvulas tienden a deformar su elongación con respecto al balancín, así mismo a las piezas ancladas al balancín es por esto que la fabricación de estas piezas se hace no la norma reguladora ASTM de procesos de producción de hierro forjado.[27] En conclusión el balancín se encuentra sometido a fluctuaciones de temperatura, fuerzas externas y rozamiento, que hace que estas piezas estén expuestas a muchos aspectos de degradación en su estructura.

## 6.2 Inspección visual

Examinar previamente la pieza dañada (hacer un examen visual y la conservación del registro correspondiente). Se observa el balancín y se pueden encontrar signos de fatiga por la fricción que posiblemente experimento en la vida útil. La pastilla de freno presenta signos de corrosión en la región de la fractura y una pequeña zona de la cual se puede suponer que la fractura fue antes que la corrosión.



*Ilustración 3*Detalle de la pastilla en la que se puede observar corrosión y una región de fractura



*Ilustración 4*Detalle del balancín en el que se encuentra falla por fatiga.

Continuamente se empieza con el pulido de las piezas en los para la eliminación de rayas de las superficies en las cuales se realiza el corte, el propósito es que la superficie de la pieza llegue a un brillo espejo, se busca a través del pulido con las lijas calibre; 60, 100, 240, 320, 600 y 1000, después de este procedimiento se limpia con un paño suave con el propósito de obtener el brillo espejo.



*Ilustración 5 Máquina de pulido vertical (Equipo de la Fundación universitaria los libertadores).*



*Ilustración 6 Máquina de pulido circular (discos). (Equipo de la Fundación universitaria los libertadores).*

Si el pulido brillo espejo esta realizado adecuadamente se continua con el análisis metalográfico con los artefactos suministrado por la fundación universitaria los libertadores en los cuales se toma la dureza de las piezas.

## 6.3 Ensayo de dureza Rockwell.

La Dureza Rockwell es más precisamente un método de prueba para determinar la dureza de un material. Suele ser el método de prueba más usado para determinar esta propiedad debido a lo simple que resulta pues no requiere la adquisición de conocimientos específicos para llevarla a cabo.

Es un método que permite la aplicación de distintas escalas, realizando una adecuada combinación de cargas y penetradores, permitiendo así realizar pruebas en una gran variedad de materiales lo que incluye incluso hasta materiales que no pueden ser sometidos a pruebas de dureza por otros métodos.



*Ilustración 7 Durómetro e indicador de dureza. Artefacto de la fundación universitaria los libertadores.*



*Ilustración 8 Indicador de dureza Ref.; 61.8 HRC Artefacto de la fundación universitaria los libertadores*

La Prueba está diseñada para aplicarse sobre una superficie plana que se ubica en una base plana de la máquina, donde se le aplica una precarga menor a 10 Kg. Con el fin de eliminar errores de medidas por la deformación elástica presente en la mayoría de materiales, luego se aplica una fuerza que varía entre 60 a 150 N a lo largo de unos 15 segundos aproximadamente, resultados que son visibles por medio de un durómetro Rockwell que suele presentar varias unidades de las escalas que puede medirse.

Continuamente se realizan dos mediciones en cada pieza a analizar (Balancín y pastilla de freno), para tener una mayor exactitud en la medición, las mediciones de dureza (HRC) se realiza en la parte superficial de la pieza. La prueba tiene un rango de carga entre 15 Kgf – 150 Kgf. A continuación, se muestran las mediciones de las piezas.



*Ilustración 9 Medición 1) Dureza 79 HRC para el balancín.*



*Ilustración 10 Medición 2) Dureza 87 HRC para el balancín.*

La medición durante el ensayo de dureza da como resultado una discrepancia de 8 HRC entre las mediciones, debido al error humano se toman dos mediciones con el fin de obtener la menor discrepancia.



*Ilustración 11 Medición 1) Dureza 16 HRC para la pastilla de freno.*



*Ilustración 12 Medición 2) Dureza 46 HRC para la pastilla de freno.*

La discrepancia tan extensa entre las ediciones debido a que se midieron en los dos extremos de la pastilla de freno (*Ilustración 1*), probablemente es por el ataque corrosivo que tiene uno de los extremos y por eso su dureza cambia de un extremo a otro.

*Tabla 1 Durezas pastilla de freno y balancín.*

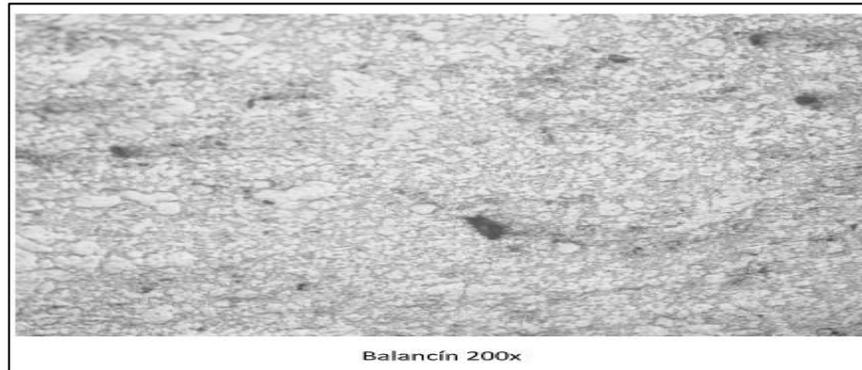
TABLA DE DUREZA		
	Pastilla de freno [HRC]	Balancín [HRC]
Medición 1	16	79
Medición 2	46	87

Teniendo las mediciones de dureza, se continua con el análisis metalográfico y se somete la pieza a un análisis microscópico, continuamente se tiene en cuenta el análisis de falla (RCA) [12], Finalizando con las conclusiones y prevenciones.

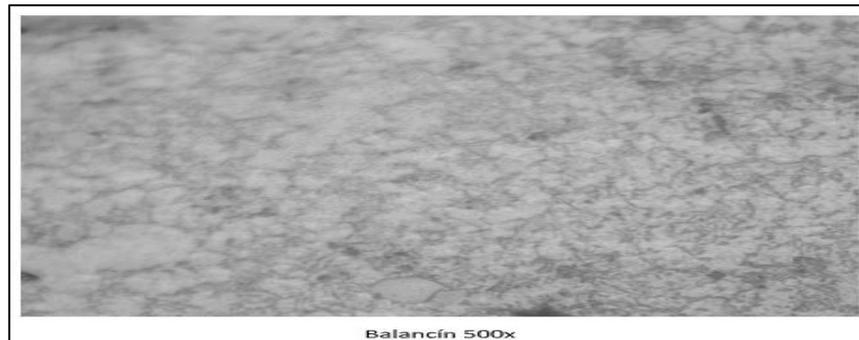
## 6.4 Análisis metalográfico.



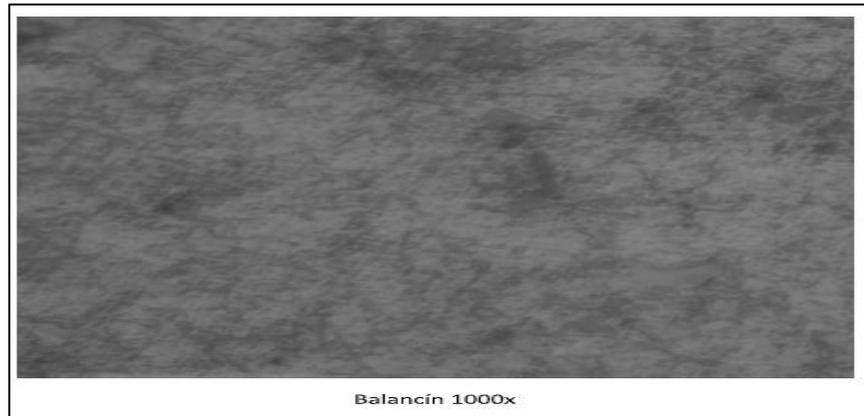
*Ilustración 13 Balancín x100*



*Ilustración 14 Balancín x200*



*Ilustración 15 Balancín x500*



*Ilustración 16 Balancín x1000*

Como la matriz ferrítica hace referencia al alto porcentaje de carbono que estructura el material, al balancín se le realizan estudios de análisis de falla y nos arrojan que esta tiene un alto grado de carbono junto con grafito. Con un revenido de 150 °C A 200 °C se evidencia que posee tratamientos térmicos; contiene una estructura perlítica está compuesta por un 0,8% de carbono, esta cantidad ubica al material en las fundiciones grises en estado ligado, es decir, la aleación carbono-perlita forma cementita y la cantidad restante se encuentra en estado libre en forma de grafito.

Para hacer referencia a la matriz ferrítica [ACERO 1030] tenemos que hacer énfasis en las fundiciones grises laminares, en la industria estas fundiciones son las más comunes, debido al bajo costo de producción y la maleabilidad de fabricar piezas sin acepción alguna. Los principales constituyentes metalográficos de las fundiciones grises son ferrita, perlita y grafito, la base metálica deseada se obtiene mediante la modificación de la velocidad de enfriamiento desde la región austenítica. Este material es más conocido como hierro gris. [6]

Debido a esto se formaron cavidades en el interior del material generando puntos de concentración a la tensión y torsión, fenómenos que a la variación de las magnitudes provocan grietas, este concentrador de esfuerzos (grieta) se expande dentro de la pieza formando marcas de playa dichas marcas en forma de ondas, en el recorrido de propagación se encuentra en las cavidades de grafito que propagando la grieta dentro del material hasta que nuestro balancín fallo, como lo observamos en la imágenes.

Carbono	Manganeso	Silicio	Azufre	Fósforo	Cromo	Níquel	Molibdeno
0,28 - 0,34	0,60 - 0,90	0,15 - 0,30	0,050 máx	0,040 máx			

Composición Química (Colada) en %

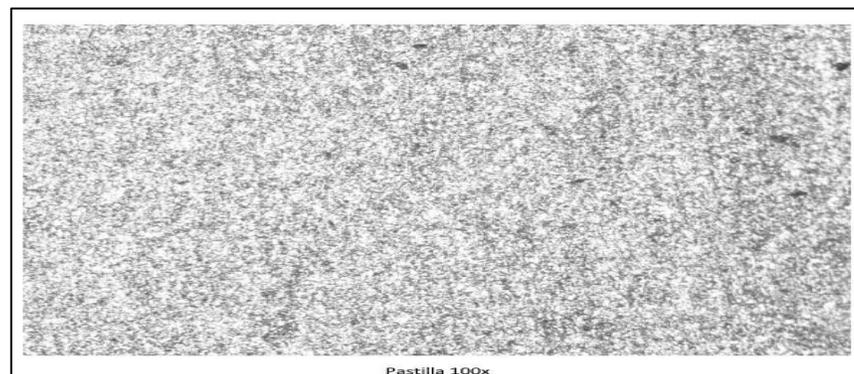
  

Forja	Normalizado	Recocido Hipercrítico	Recocido Subcrítico	Cementado	Carbonitrurado
1000 - 1260	870 - 920	850 - 900	540 - 720	900 - 930	790 - 900
Templado de la capa cementada	Enfriado	Revenido	Templado	Enfriado	Revenido
760 - 800	Agua - Aceite	150 - 200	840 - 870	Agua	Según características requeridas

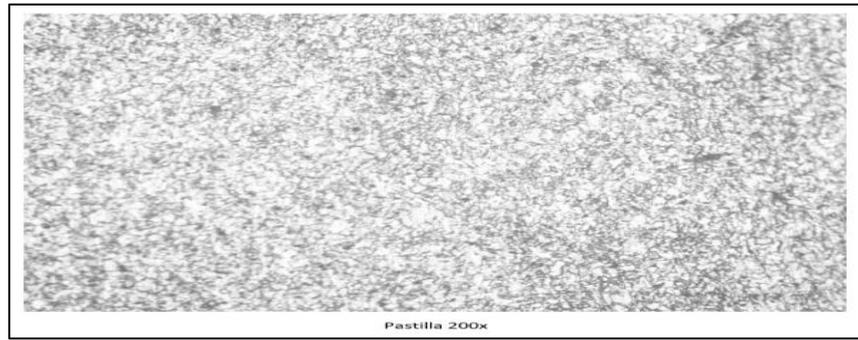
Tratamiento: Temperatura en °C y Medios de Enfriamiento

*Ilustración 17 Propiedades del acero 1030; Tomado de IAS IRAM 1030*

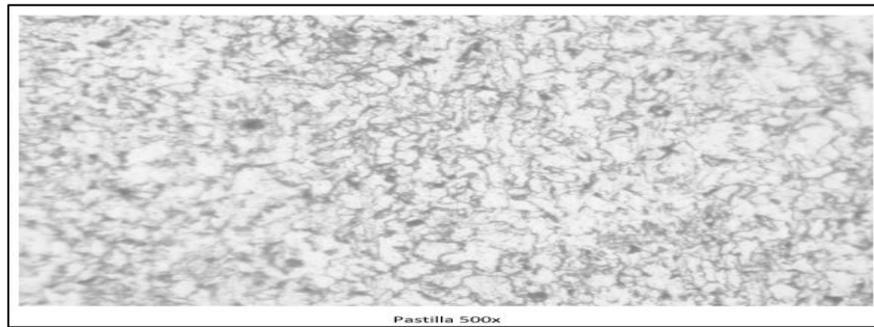
El ACERO 1030 es uno de los metales más ferrosos en la industria, dicha alecciones de hierro y carbono cuyo porcentaje en peso varían entre 2 y 4% , además contienen un 2% de silicio y manganeso, dependiendo de la microestructura que se desee obtener, una característica distintiva es que el carbono se encuentra como grafito, este formando cavidades irregulares en forma de hojuelas, dándole al material una coloración gris al acabado de la pieza; en los inicios de la utilización de este proceso. Según su resistencia podemos denominar que tipo de matriz estructura el material, es decir en la industria entontáramos tres tipos de matrices (perlítica, ferrítica, y ferrito-perlítica).



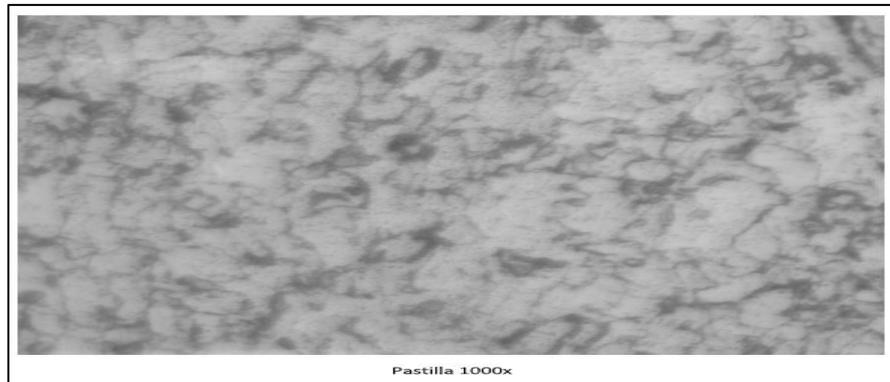
*Ilustración 18 Pastilla de freno x100*



*Ilustración 19 Pastilla de freno x200*



*Ilustración 20 Pastilla de freno x500*



*Ilustración 21 Pastilla de freno x1000*

Haciendo una comparación visual entre la micrografía a 500x de la pastilla de freno podemos considerar que esta pieza es bastante parecida al acero 4140 austenitizado 1 hora a aproximados 845 °C e incluso también llega a parecerse demasiado a el acero 1052 forjado, y austenitizado a un tiempo de 1 hora y una temperatura igual al anterior. [33][34]

## 7. Análisis de falla RCA.

El análisis de causa raíz (o RCA, por sus siglas en inglés) detecta los principales motivos de la falla y como este afecta la confiabilidad operacional. Tiene como principal objetivo, analizar distintos factores que pudieron haber afectado la pieza, factores externos e internos de la misma.

El análisis debe ser aplicado teniendo en cuenta la cantidad de fallas y en qué manera se presentan en el mecanismo (balancín y pastilla de freno). El RCA es implementado como parte fundamental en un plan de mantenimiento RCM ya que tiene como pilar fundamental mantener la confiabilidad, encontrar la raíz del problema, generando mantenibilidad en el equipo de manera más eficiente sin perjudicar la confiabilidad del proceso analizando factores externos se encuentran muchas de las fallas que puedan tener ya que la externas contribuyen a que las fallas internas aparezcan de manera más constante en la pieza. El análisis causa raíz contribuye también a la seguridad y salud en el trabajo estableciendo un tiempo acumulado entre las fallas existentes TMEF (tiempo medio entre fallas), identificando causas como: sobrecarga, uso inadecuado, error en el diseño, material insuficiente y demás factores contraproducentes en la pieza.

### 7.1 Fundamentos - Análisis de Causa Raíz (RCA).

Este análisis es un método creado para la resolución de problemas, especialmente dirigido a la identificación de sus causas o acontecimientos de provocación de fallas. Para ellos las RCA son diseñadas para emplear métodos de detección de la causa raíz del problema que, esto para dirigir la atención a la raíz del problema en vez de simplemente tratar los síntomas evidentes de la falla. En primer lugar, las RCA tienen como objetivo identificar, analizar y prevenir los problemas, no obstante, no solo tenemos una única metodología de estudio definida, sino que al contrario encontramos diferentes métodos de detección de falla.

En este caso emplearemos el método de RCA basado en la falla, el cual tiene como objetivo principal en analizar la falla y así proceder a la detección de la causa. Esto nos permite hacer un análisis exhaustivo a la pieza con el fin de determinar factores evidenciados en la ruptura de la pieza como grietas, desperfectos en la fabricación o marcas contundentes que permiten diagnosticar síntomas de raíz que causó el problema. [12]

## 7.2 Aplicaciones en función a la productividad.

El análisis de falla en piezas complejas o equipos únicos que tengan como función una tarea repetitiva o labor con una productividad elevada, debe ir enfocado a mejorar la vida útil del conjunto de elementos que con ella operan.

El análisis de falla en torno a las técnicas CBM (Mantenimiento Basado en Condición) también conocido como mantenimiento predictivo; debe buscar el método de extender la productividad sin el cambio de la pieza, esto en caso de que la falla sea recurrente (elementos consumibles). Para el caso contrario en que la pieza no está diseñada para fallar sino hasta cada cierta cantidad de tiempo se debe saber cuándo ocurre la factura y cómo corregirla para tener un plan de mantenimiento claro y organizado gracias al análisis de falla. [12]

Es necesario y determinante para la pieza una intervención adecuada gracias al análisis de falla, hay que tener en cuenta las malas aplicaciones, los errores humanos en cuanto al funcionamiento de la pieza y condiciones incorrectas pues son factores que se pueden dar en el proceso de diseño y en la aplicación de las mismas, y todas son características que juntas nos dan el tiempo adecuado de intervención.

Los Análisis de modo de falla más comunes y efectos constantes al sistema (FMEA) [plan de mantenimiento RCM], son parte importante de estos análisis.

La productividad de una planta va acorde a la productividad de los operarios y las condiciones en las cuales generan el proceso adecuado, en caso de que una pieza falle puede ocasionar un accidente laboral o aún peor una fatalidad en una planta, en un vuelo, en un sistema y en muchos sistemas utilizados por el ser humano, es por esto que el análisis de falla como mayor objetivo tiene el cuidado de nosotros mismos.

## 7.3 Importancia del análisis causa raíz.

Este tipo de estudio de causa raíz en cuanto a su uso óptimo en el análisis de falla se aplica a problemas complejos y fallas repetitivas en un sistema. Lo más probable de una falla cíclica es el mal diseño en su fabricación. Los problemas de diseño suelen ser repetitivos en la industria y afectan la confiabilidad, por lo tanto, esto afecta la productividad. Por esta razón la falta de interés por un análisis de falla previo puede ser perjudicial para una planta. [24] La mala operación es factor fundamental en la ruptura de un mecanismo o pieza, y afecta directamente a la confiabilidad operacional y la confiabilidad humana. Es recomendable y en la medida de lo posible que el fabricante tome un análisis de falla en condiciones probables o (aún mejor) en condiciones más desfavorables para la misma y pueda garantizar una confiabilidad alta a sus clientes, en la medida que la información del fabricante sea clara de acuerdo a su utilización, riesgos, estructura y demás información técnica necesaria, menos

será la probabilidad de que falle el elemento bajo unas condiciones previamente establecidas y de fallar se conocerá su tiempo de vida con anterioridad. El análisis causa raíz propone evaluar e implementar soluciones en base de la confiabilidad e implementa acciones preventivas y correctivas, generalmente se establece un tiempo determinado para las fallas en el punto que no se pueden prevenir si se quiere tener un control de gestión, de esta forma normalmente se analiza la falla en un periodo mensual y se establecen indicadores a partir de cada mes con el fin de generar mayor confiabilidad al pasar de los meses y del seguimiento que se hace a la pieza.

## 8. Análisis y resultados.

### 8.1 Balancín.

Nuestro primer caso trata de un balancín que presentaba fallas en el momento de la operación en el motor en que se encontraba montado, observándose unas zonas de desgaste por contacto, con otra pieza. Se trataba de un balancín de un motor de cuatro tiempos a gasolina, se desconoce el resto de los aspectos de dicho motor, no obstante, se conoce la razón del cambio de la pieza y es con esta con la cual se realiza los estudios correspondientes.

#### **Emisión de concepto de falla.**

En las micrografías realizadas para el balancín no se observa modificaciones de consideración en la estructura del material, no obstante, podemos destacar de esta matriz una notoria presencia de fractura por fricción en la parte superior del balancín dado por la falta de lubricación que tenía en contacto a los demás elementos mecánicos en cuanto a su funcionamiento.

Si bien en cada pieza participa un número de aspectos importantes en el desarrollo de la falla, en el balancín es muy probable que la falla haya sido debido a la falta de lubricación que es bastante común en motores a los cuales no se les realiza los procedimientos de mantenimiento en los tiempos y con los productos lubricantes adecuados.

#### **Recomendaciones para la prevención de la falla**

La mejor forma de evitar fallas en las piezas de un motor de combustión interna es realizar los mantenimientos preventivos de la manera adecuada, en muchas ocasiones es común que utilicen herramientas y repuestos inadecuados, causando por medio de estos inconvenientes en el sistema de lubricación. En este caso la falla se presenta por falta de lubricación y falta de mantenimiento debido a las características de la fatiga que se notaba [ilustración 1].

## 8.2 Pastilla de freno.

Para el segundo objeto de estudio se tiene una pastilla de freno que presenta una fractura de la cual no se tiene la otra pieza, si bien se desconoce el modelo del vehículo al cual perteneció a juzgar por sus características podríamos considerar que es de un vehículo de tracción delantera. Tipo cerámica a un carro con bastante humedad en el ambiente y por falta de mantenimiento y el desconocimiento de la vida útil del artefacto.

### **Emisión de concepto de falla.**

De las observaciones realizadas en la pastilla podemos destacar un notado desgaste producido por el contacto entre la parte metálica de esta y el rotor del freno, también conocido como Disco de freno. Probablemente excedió su vida útil y la falla fue acelerada por la corrosión que presenta. [Ilustración 2] Es muy probable que la fractura de la pieza haya sido producida por el contacto directo de la superficie soportante de la pastilla de freno la cual muy posiblemente recalentó el material cambiando su estructura y facilitando el proceso de fractura por medio de la fricción con el rotor dado que ya no tenía recubrimiento y estaba expuesto a gran humedad y la corrosión aceleró la propagación de microfracturas.

### **Recomendaciones para la prevención de la falla**

Lo más probable por el tipo de pastilla de frenado es de tipo cerámica dado que en general los vehículos manejan este tipo de pastillas por su poco ruido y su durabilidad, se debe consultar al fabricante la vida útil del artefacto utilizado sea cual sea y más en este caso ya que es un accesorio de tipo rotatorio en un vehículo y su daño puede generar una falla total en el rotor generando más gastos en la mantenimiento del vehículo y este tipo de falla claramente se presenta por descuido dado que la pastilla tenía mucho desgaste y estaba muy oxidada, es recomendable lavar el carro de manera general también teniendo en cuenta una buena limpieza en el chasis, los amortiguadores, los ejes y detectar el mugre en el rotor dado que este acorta la vida útil de las pastillas de freno

## 9. Conclusiones.

- Se observa que la comparación visual entre micrografías al Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a nuestras piezas es un método algo impreciso y complica el proceso de selección entre uno u otro acero, siendo esta selección de material algo que queda a criterio y experticia de la persona encargada del estudio.
- La imagen de la micrografía de la pastilla de freno no es muy clara es bastante probable que el acero haya sufrido una transformación en su estructura debido a los constantes cambios térmicos presentes en su uso una pastilla de frenos de un automóvil.
- En el cambio de aceite inadecuado ya sea por uno de alta viscosidad (que impide el flujo adecuado entre las piezas del motor causando taponamiento en ductos de diámetro reducido y rozamiento entre piezas pues le queda más complicado alcanzar sectores con pasos más estrechos impidiendo la lubricación adecuada.), o de elevada viscosidad (que al ser tan fluidos no tienen la capacidad de adherirse a las superficies que se desean lubricar permitiendo que se generen recalentamientos en las zonas de contacto entre ambas partes permitiendo el desgaste de las superficies). Afectando directamente el balancín.
- Los tiempos inadecuados de servicio de mantenimiento al sistema de aceite, es común que se excedan los tiempos periódicos de cambio del lubricante ocasionando que esté presente alteraciones en su viscosidad debido a sus constantes cambios térmicos e incluso se pueden presentar formaciones grumosas tras largos tiempos de operación, situación que suele obstruir conductos importantes de la lubricación. Es necesario tener presente que el aceite es un indicador de fallas pues si se puede observar material brillante en este al exponerlo a contraluz es posible que alguna de las piezas presentes este sufriendo un desgaste al permitir recircular dicho aceite puede llegar a hacer el mismo efecto de desgaste que realiza la alúmina sobre la superficie de un metal en los equipos de pulido, que al haber un contacto directo de un metal con otro metal puede convertirse en un problema que vaya en aumento.

## 10. Bibliografía

- [1] ASM Metals Handbook. (2002). *Failure Analysis and Prevention* (Vol. 11).
- [2] Barbosa, C., Souza, S. d., R.O. Centeno, I. A., & Ferraz, O. (2006). Failure analysis of pipes used in a hydrodesulfurization system of a petrochemical plant. *Engineering failure analysis journal*, 1076–1091.
- [3] Balankin, Dr. Alexander. (2000) *Mecánica de la fractura pasado presente y futuro*.
- [4] Bejarano Restrepo, L., Coronado Marín, J. J., & León Gómez, A. (2006). Análisis de falla del eje de un motor eléctrico de una fábrica harinera. *Tecnura*, 9, 10-18.
- [5] Canale, L., Mesquita, R., & Totten, G. (2008). *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*. Ohio: ASM International.
- [6] Das, A. K. (1997). *Metallurgy of failure analysis*. McGraw-Hill.
- [7] García Garrido, S. (2009-2012). *Análisis de causa raíz-Ingeniería del mantenimiento*. RENOVETEC.
- [8] Han, H.-S. (2014). Analysis of fatigue failure on the keyway of the reduction gear input shaft connecting a diesel engine caused by torsional vibration. *Engineering failure analysis journal*, 285-298.
- [9] Hernández A, H. (s.f.). Avance de estudios en mecánica de fractura y análisis de falla realizados en los laboratorios de metalurgia del Instituto de Ensayos e Investigación de la Universidad Nacional de Colombia. *Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia*, 20-24.
- [10] Khattak, M., N.Zareen, Mukhtar, A., S.Kazi, Jalil, A., Ahmed, Z., & Jan, M. M. (2016). Root cause analysis (RCA) of fractured ASTM A53 carbon steel pipe at oil & gas company. *Engineering failure analysis journal*, 1-8.
- [11] Neri, M., Carreño, C., & Martínez-Villafañe, A. (Noviembre de 2010). Análisis de falla de una cabeza de bomba de combustible, agrietada internamente.
- [12] Ossa, E., & Paniagua, M. A. (Octubre de 2005). Análisis de falla en cable de acero. *Ingeniería y Ciencia*, 93-107.
- [13] Porras, E. G., Rodríguez P, S., & Coronado, J. (2010). Análisis de la fractura de una biela de compresor de refrigeración. *Ingeniería e investigación*, 130-135.

- [15] Ramachandran, V., Raghuram, A., Krishnan, R., & Bhaumik, S. (2005). *Failure Analysis of Engineering Structures Methodology and Case Histories*. Ohio: ASM International.
- [16] Rojas Cruz, M. (2007). Análisis de Falla: Un Viaje a la Raíz del Problema y la Solución. *Metal Actual*, 42-48.
- [17] Santamaría de la Cruz, H. (Julio de 2007). Análisis de falla en perno de sujeción de unidad de bombeo mecánico Lufkin a640d – 427 – 144. *Revista Prospectiva*, 36-41.
- [18] Schulz, B. (Julio de 2003). Análisis de falla en servicio de una hélice de cuatro palas de barco pesquero. *Re Metalica*, 36-42.
- [19] Scott MacKenzie, H. I. (2008). Overview of the mechanisms of failure in heat treated steel components. *ASM International*, 43-86.
- [20] Tovar, G. (1999). Análisis de falla en componentes de ingeniería. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes*, 75-83.
- [21] Wulpi, D. J. (1999). *Understanding How Components Fail*. Ohio: ASM International. 2013.
- [22] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. (2008) Diseño en ingeniería mecánica de Shigley,
- [23] Edwin Alberto Medina Silva, Raúl Andrés Castellanos López. (2015), *Análisis Fractográfico De Un Acero Al Carbono SAE 1045 Sometido A Cargas De Tensión, Flexión E Impacto*. Universidad Francisco Jose de Caldas.
- [24] ASM International. Handbook Committee, George F.: ASM Handbook. Vol. 9: *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004.
- [25] M.S. Jójavaj y G.S. Máslov. *Motores de automóvil*. Traducido por Ing. Antonio Molina García; editado por Editorial Pueblo y Educación, 1985. 497 – 498 p.
- [26] Carl f. bachel, Assignator to continental aviation and engineering corporation of virginia. 1951 *Rocker arm construction*. United states patent office.
- [27] Motohashi, Nobutsuna (Tokyo, JP), Assignator to continental aviation and engineering corporation of virginia. 1951 *Manufacturing method of rocker arm*. United states patent office.
- [28] *Análisis de falla y el diseño de máquinas*. (2014). Repositorio Universidad Nacional de Colombia.

- [29] Ricardo Andrés García León, María Angélica Acosta Pérez, Eder Flórez Solano (2014). *Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión*. Universidad Francisco José de Caldas.
- [30] *Corrosion Handbook, hilti*. (2015), Volume 1 of HILTI Handbook
- [31] (Fatigue and Fracture (1996), Volume 19 of ASM Handbook.)
- [32] Mecánica de fractura y análisis de falla, (2002) Hector Hernandez Albañil., primera edición pág. 111
- [33] ASM Handbook vol. 4 heat and treatment... pág. 332 fig.148
- [34] ASM Handbook vol. 4 heat and treatment... pág. 337 fig.164