



**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

# Análisis de falla de sprockets de motocicleta

**German Camilo Castro Sopó**  
**Nestor Adrian Serrano Álvarez**

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



# Análisis de falla de sprockets de motocicleta

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 falla, fractografía e ingeniería de superficies

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D. C. , Colombia

2018



## Dedicatoria

A nuestras familias que nos apoyaron incondicionalmente y a sus consejos para ser mejores personas, como a los docentes que nos brindaron su colaboración para la realización del proyecto, ya que han contribuido en el objetivo de podernos graduar como grandes profesionales. (German Castro)

Inicialmente deseo dedicarle este trabajo a Dios por ser siempre ese sentimiento de alegría, tranquilidad y serenidad en cada momento de esta etapa de vida que esta próxima a culminar espero ser digno por tan valioso esfuerzo. A mi Esposa Yani, compañera incondicional, bella persona que demuestra la sencillez sin juzgar, gracias por tu cariño y apoyo factores fundamental que me brindan equilibrio. A mis padres, no hay un día en el que no le agradezca a dios el haberme colocado entre ustedes, la fortuna mas grande es tenerlos conmigo y el tesoro mas valioso son todos y cada unos de los valores que me inculcaron. (Nestor Serrano)



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

2-1. Características de la falla, tales como desgastes, fracturas, grietas o defectos.	4
2-2. Información característica de falla por fractura. . . . .	6
2-3. Vista gráfica por fractura múltiple, formación de grietas, seguimiento para origen raíz. . . . .	7
2-4. Tipos de fractura por agrietamiento intergranular. . . . .	9
3-1. Prácticas para la mitigación del problema generado por el desgaste de piezas.	16
4-1. Inspección visual con linterna. . . . .	25
4-2. Características del ensayo de dureza Rockwell. . . . .	26
4-3. Método Rockwell Profundidad de penetración. . . . .	26
4-4. Sprocket A - Deformación del sistema de transmisión. . . . .	27
4-5. Sprocket B - Desgaste y fractura del sistema de transmisión. . . . .	28
4-6. Registro bajo microscopio en zona dental superior del sprocket. . . . .	29
4-7. Sprocket C - Desgaste y fractura del sistema de transmisión. . . . .	30
4-8. Equipos y procedimientos utilizados para la medición de la dureza. . . . .	31
4-9. Toma de muestras de dureza en el cuerpo del Sprocket A. . . . .	31
4-10. Tabla de Resultados obtenidos de dureza Rockwell C del Sprocket A. . . . .	32
4-11. Toma de muestras de dureza en el cuerpo del Sprocket B. . . . .	32
4-12. Resultados obtenidos de dureza Rockwell C del Sprocket B. . . . .	33
4-13. Toma de muestras de dureza en el cuerpo del Sprocket C. . . . .	33
4-14. Resultados obtenidos de dureza Rockwell C del Sprocket C. . . . .	33
4-15. Equipos de laboratorio para ensayo metalográfico. . . . .	34
4-16.a). Sección del sprocket analizado y microestructura observada a 100X y 200X.	
b). Microestructura observada a 500X y 1000X. . . . .	35
4-17.a). Sección del sprocket analizado y microestructura observada a 100X y 200X.	
b). Microestructura observada a 500X y 1000X. . . . .	36
4-18.a). Sección del sprocket analizado y microestructura observada a 100X y 200X.	
b). Microestructura observada a 500X y 1000X. . . . .	37

## Resumen

El proyecto describe cómo se lleva a cabo el proceso de identificar, evaluar, demostrar y concluir sobre la falla de los elementos mecánicos de la motocicleta, que en la actualidad es de uso común en la movilidad. Por esta razón, el comportamiento del material se estudia en diferentes situaciones y condiciones específicas, de esa manera se puede ver una vez que las partes probadas en el laboratorio establecen las relaciones previstas. Igualmente se ilustra como se ejecutan las pruebas de dureza y microestructura donde arrojan resultados que evidencia y muestra las causas que afectan el rendimiento normal del sistema. Las pruebas realizadas y análisis que se crea, clasifican comportamientos del material que ayudan a explicar los orígenes de falla de los componentes. La presencia de los resultados más importantes da la razón por la cual los factores inician la propagación de la falla, por lo que el análisis está destinado a evitar en el mañana se presenten dichas anomalías y sean enfrentadas. Los autores de este documento argumentan que se realicen chequeos preventivos y controles de calidad más exhaustivos y planificación de mantenimientos continuos, para mejorar y evitar dichos daños y/o prolongarlos en efecto. La investigación concluye que se logran resultados muy similares en algunos elementos, pero en el análisis se logra determinar que cada elemento presenta condiciones de fallas distintas, que indica que se requiera de cada uno de ellos particularmente; como destacar la metodología del proceso que se puede percibir en el proyecto.

**Desgaste, Falla, Fractura, Dureza, Metalografía.)**

## Abstract

The project describes how the process is carried out to achieve different identification techniques for evaluate, demonstrate and conclude, about the failure through the mechanical elements of the motorcycle, in short, which is currently in common use in mobility. For this reason, the behavior of the material is studied in different situations and specific conditions, that way it can be seen once the parties are in the laboratory of the planned relationships. And like the hardness and microstructure tests, they show results that show and show the causes that affect the normal performance of the system. The tests carried out and the analysis that is created classify the behavior of the material that helps to explain the origins of the failure of the components. The presence of the most important results of the reason why the facts began in the propagation of the failure, so the analysis is intended to be avoided in the morning the anomalies are presented and are faced. The authors of this document argue that more thorough preventive checks and quality controls and continuous maintenance

planning are carried out to improve and avoid the damages and / or prolong them in effect. The investigation concludes that there are very similar results in some elements, but in the analysis it is achieved that each element is presented with different faults, which indicates that each of them is required in particular; how to highlight the methodology of the process that can be perceived in the project.

**Keywords: (Wear, Failure, Fracture, Hardness, Metallography.)**

# Contenido

<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>1. Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>3</b>
2.1. Identificación del daño . . . . .	3
2.2. Fractura . . . . .	4
2.3. Fractura superficial . . . . .	5
2.4. Comportamiento Dúctil o frágil . . . . .	7
2.5. Fractura Por fatiga . . . . .	7
2.6. Mecanismos de fractura . . . . .	8
2.7. Fractura Intergranular (IG) . . . . .	8
2.8. Mecanismos de fractura intergranular . . . . .	9
2.9. Falla por sobrecarga . . . . .	11
2.10. Modos y mecanismos de fractura . . . . .	11
2.11. Falla por sobrecarga dúctil . . . . .	12
2.12. Fallas por sobrecarga frágil . . . . .	12
<b>3. Fallas por Desgaste</b>	<b>14</b>
3.1. Tribosistema (Caracterización y examen) . . . . .	14
3.2. Desgaste de los Aceros . . . . .	15
3.3. Clases de Daños de Superficie . . . . .	15
3.4. Clases de Desgaste . . . . .	16
3.4.1. Desgaste Abrasivo . . . . .	17
3.5. Elección de Material . . . . .	18
3.6. Desgaste por Pulimiento . . . . .	18
3.6.1. Propiedades de los abrasivos . . . . .	19
3.7. Desgaste Adhesivo y Deslizamiento . . . . .	20
3.8. Desgaste por Rozamiento . . . . .	21
3.9. Prevención de Daños por Rozamiento . . . . .	21
3.10. Desgaste por Contacto de Rodadura . . . . .	22

---

<b>4. Procedimiento para el análisis de falla</b>	<b>24</b>
4.1. Inspección visual . . . . .	24
4.2. Ensayo de Dureza . . . . .	24
4.2.1. Dureza Rockwell (HRC) . . . . .	25
4.3. Análisis de la Microestructura . . . . .	26
4.4. Inspección Visual . . . . .	27
4.4.1. Sprocket A - (Deformación) . . . . .	27
4.4.2. Sprockets B/C por desgaste y fractura . . . . .	28
4.5. Ensayo de dureza Rockwell . . . . .	30
4.5.1. Dureza cuerpo del Sprocket A . . . . .	30
4.5.2. Dureza del cuerpo del sprocket B . . . . .	31
4.5.3. Dureza del cuerpo del sprocket C . . . . .	32
4.6. Reconocimiento de la microestructura . . . . .	33
4.6.1. Microestructura Sprocket A (Deformación) . . . . .	34
4.6.2. Sprocket B, (Desgaste y Fractura) . . . . .	34
4.6.3. Sprocket C, (Desgaste y Fractura) . . . . .	35
<b>5. Análisis de Falla</b>	<b>38</b>
5.1. Sprocket A . . . . .	38
5.2. Sprocket B . . . . .	38
5.3. Sprocket C . . . . .	38
<b>6. Conclusiones</b>	<b>40</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>41</b>

# 1 Objetivos

## 2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a tres sprockets del kit de arrastre de motocicletas 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 y recopilar información bibliográfica acerca de estudios sobre análisis de falla relacionados con los componentes mecánicos obtenidos.
- Realizar pruebas de laboratorio tales como inspección visual, análisis metalográfico y análisis de dureza, 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 publindex.

## 2 Introducción

El análisis de fallas es un proceso mediante el cual determina la procedencia del porqué causa el componente o estructura la falla base, teniendo en cuenta las propiedades del material que conllevan a que no pueda cumplir con su función principal. Las causas de las fallas han llevado que se realicen estudios avanzados de ingeniería mejorando los defectos y preguntando si en realidad son los materiales o es exceso de trabajo realizado. Se puede presentar defectos de fabricación que hagan que falle el componente o también deficiencia en el diseño [2].

Con el pasar del tiempo se ha visto como los ingenieros de materiales realizan trabajos más específicos para determinar las causas de un conjunto de elementos que fallen y en determinado instante. Ese momento puede ser crucial para evitar que falle y es donde se analiza la causa, factor clave del analista para realizar el trabajo, donde ir más allá de un modelo transmitido sea más profesional y de manera más eficaz. Dejando siempre la posibilidad de la duda y la participación externa como punto de vista de distintos ángulos [1].

La investigación de las fallas puede darse por muchas maneras como, por ejemplo, un tratamiento inadecuado del material al momento de la fabricación, así como un procedimiento de temple, endurecimiento defectuoso o inadecuado para el tipo de trabajo al que se va a someter. Aunque también se debe entender que el análisis no debe percibirse como unitario, sino como múltiples variables a considerar. Las condiciones naturales de falla comúnmente se pueden presentar por corrosión, fractura, desgaste o un golpe que altera su funcionalidad [9].

El propósito de analizar los elementos por falla, es determinar la causa general que establezca mediante pruebas físicas y conceptos investigativos la solución del problema aplicado a la vida del material como también el problema de manufactura, como por ejemplo, los componentes del material y la estructura, aplicado al análisis de falla.

### 2.1. Identificación del daño

Es de gran importancia en la investigación de análisis de falla física, conocer cada uno de los eventos para que estos ocurran. En este caso identificar el motivo que presenta el desgaste, donde la fractura se da en determinados casos, se requiere de conocimientos técnicos y herramientas específicas para la evaluación precisa en el análisis, gracias a una observación

detallada. Al igual que el conocimiento ingenieril requiere de la habilidad de interpretar las variables e identificar cuales aportan y las que no, de esta forma evaluar puntualmente la falla. Como lo indica el autor, hay ocho pasos para identificar: 1. Recoger datos 2. Identifica formas de daño presentes 3. Emparejar posibles formas de daño 4. Prueba real para identificar lo sucedido 5. Interpreta las relaciones de la causa 6. Conocer motivo principal 7. Comprobar causa tentativa para la causa real 8. Realizar y ejecutar trabajos correctivos [2].

El fin de quien realiza el análisis, es poder explicar la causa posible como agrupado de las posibilidades que mejoren y determinen la raíz de la causa. La principal razón es identificar el modo de daño, conociendo alguna de las características que lo presentan como se ve en la Figura 2-1 clasificado por el modo de fractura por desgaste [2].

Método	Modo de falla progresiva <sup>[a]</sup>
	Desgaste
Visual, 1 a 50 X (superficie de fractura)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Raspado, abrasión, pulido o erosión.</li> <li>▪ Agallas o almacenamiento en la dirección del movimiento.</li> <li>▪ Áreas rugosas con desechos pulverizados compactados (desgaste)</li> <li>▪ Transiciones graduales suaves en la pérdida.</li> </ul>
Microscopía electrónica de barrido, 20 a 10.000 X (superficie de fractura)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Los restos de desgaste y / o abrasivo pueden caracterizarse en cuanto a su morfología y composición.</li> <li>▪ La fatiga de contacto de rodadura aparece como desgaste en las primeras etapas.</li> </ul>
Inspección metalográfica, 50 a 1000 X (sección transversal)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Puede mostrar distorsión localizada en la superficie consistente con la dirección del movimiento.</li> <li>▪ Identificar partículas incrustadas</li> </ul>
Factores contribuyentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Para ranuras o desgaste abrasivo.</li> <li>▪ Baja efectividad de los lubricantes.</li> <li>▪ Las juntas de los filtros pueden haber fallado.</li> <li>▪ Altas velocidades o distribución de flujo desigual, cavitación.</li> <li>▪ Desprendimiento inducido por una ligera holgura en las uniones sujetadas sometidas a vibración</li> </ul>

Figura 2-1: Características de la falla, tales como desgastes, fracturas, grietas o defectos.

## 2.2. Fractura

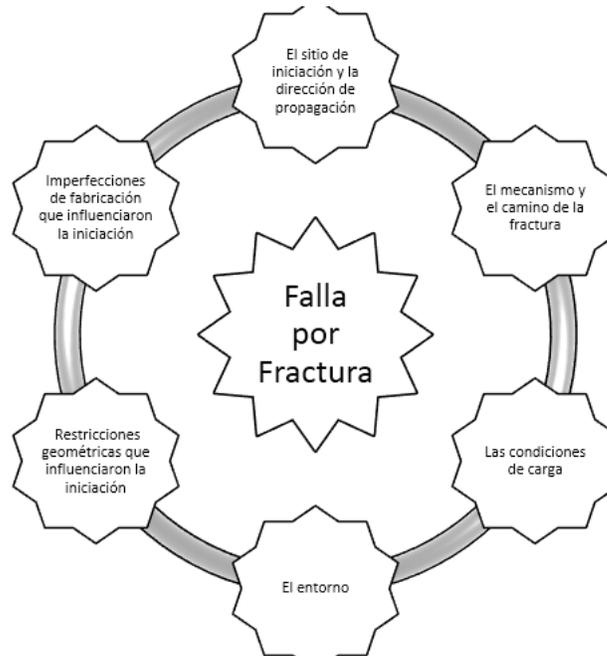
El fallo es ciertamente la falta de cumplir con su propósito de funcionalidad, se dan en varias formas, y no siempre se presenta la fractura. Otros tipos de fallas se podrán ver dentro del artículo en donde no hay fractura; en esta sección se hablará la falla por fractura. Se debe entender que la falla no fracturada, en algún instante consigue darse a una fractura. Como por ejemplo el desgaste llega a la fractura por rozamiento o fatiga por fricción. Otra muestra, es la presencia de comienzo de grietas por fatiga, picadura por corrosión, cargas cíclicas en ambientes corrosivos y pandeo elástico. Este último, provoca que entren en contactos las

partes de un sistema rotativo y genere un pandeo elástico formando la reacción de fractura. A través de la fractografía se analiza las fallas, entendiéndose como fractografía la ciencia que halla las características que causan la fractura del material y que lo induce, examinado tridimensionalmente para hallar el origen de la ruptura y entender como las grietas se crean y van creciendo microscópicamente para fundar una mayor fractura es demostrativo de la fractografía. El estudio específico de la fractura superficial se debe interpretar a micro-escala y macro-escala, ya que es de gran importancia explicar las posibles fallas que intervienen en la secuencia que produce la fractura. Asimismo, no hay que dejar de lado los componentes adyacentes que son característicos del examen. La particularidad final del análisis por falla por medio del fractografía, es determinar el modo de falla conclusiva, que se puede proporcionar por las condiciones de operación como, por ejemplo, deficiente mantenimiento, inadecuadas reparaciones, mal diseño e incluso uso incorrecto y posible unión de estas. En el diseño se puede desarrollar variables que determinen procesos como un material no apropiado, aleaciones inadecuadas al trabajo a realizar, esfuerzos mecánicos/térmicos incorrectos, como también prevención a entornos cambiantes. Mediante la fractografía proporciona las herramientas que encaminan a determinar las posibles fallas [6].

### 2.3. Fractura superficial

Un análisis preciso de fallas se requiere ser crítico basado a las características fractográficas, para determinar de manera eficaz la raíz técnica de falla. Se debe tener precaución, se pueden malinterpretar las tipologías de la fractura superficial y se debe entender que no es característico que se presente una causa, con una sola falla fractográfica explícita. Se requiere de toda la información necesaria posible para llegar a la conclusión del análisis origen raíz. Tampoco se puede llegar a un resultado satisfactorio por si solo con un examen macroscópico, ya que se requiere de un conjunto de observaciones que la determinen la falla propia. Así mismo, con el examen micro-escala y viceversa, pueden determinar las conclusiones adecuadas de la fractura [6]. La fractura superficial visto a micro y macro escala presenta una descripción de cómo puede ocurrir la fractura, de forma que se establecen características para el reconocimiento de la falla, las cuales pueden presentar los rasgos que se ilustran en la Figura 2-2.

Se debe tener en cuenta estos pasos para el análisis de falla, pero en el caso puntual de fractura por la fabricación o defecto de los componentes, se caracterizan por imperfecciones geométrica, materiales inadecuados que es crucial para determinar el origen de la causa. Se consigue formar mediante indagación específica el análisis para establecer si es o no, un defecto o la causa de origen. Se debe considerar que en la fractura superficial nos muestra la propagación con la que ocurre. Y no nos revela la iniciación, ni la secuencia. Es por lo que se requiere de más información, por ejemplo, gracias a la inspección visual se puede identificar el inicio de la fractura, deformación que se visualiza en un cambio de forma. Es de gran importancia el estudio metalográfico del material ya que provee información de cambio en

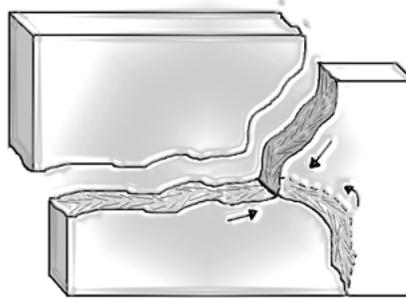


**Figura 2-2:** Información característica de falla por fractura.

la forma del grano, en la microestructura, muestra las cargas, deformaciones causadas por temperatura, entre otros. Llevando esto a un mejor estudio para la causa de la falla. En el caso de los detalles macroscópicos, muestran la ubicación de inicio de la grieta y la dirección de expansión [2].

El sentido en la superficie del fallo. Entendiéndose que las cargas como el diseño pueden mostrar el lugar inicio de la fractura. En ocasiones se presenta en diversas piezas donde se registra la fractura superficial; se realiza una ramificación de grietas (cruce) (Fig 2-3), donde se determina las condiciones de la falla en donde hubo cargas aplicadas, puntos específicos en la geometría del componente, aquellas consideraciones que arrojen variaciones ya sea en su sección transversal en el caso macroscópicamente. Y a través de una veta o forja a microescala [3].

La propagación de grietas muestra como la reflectividad óptica, como la rugosidad superficial se presenta a través de señales; la superficie en tono mate indica a micro-escala una fractura dúctil. De otra manera, para una superficie brillante indica una fractura intergranular o grieta que se puede ver mediante una lente de mano en aquellos materiales de grano grande con apariencia rocosa. El cambio de rugosidad en la superficie cambia a medida que aumenta la distancia de la fractura, la resistencia del material y la velocidad con la que suceda. De esta manera, para la velocidad y magnitud de carga en la expansión de la fisura se dan como, baja/alta carga (velocidad) - alta/baja tenacidad, mayor carga (velocidad) - alta/baja tenacidad. Que se pueden entender de acuerdo con el comportamiento de la grieta, de otra manera para identificar el inicio de la grieta se debe identificar las marcas radiales en la



**Figura 2-3:** Vista gráfica por fractura múltiple, formación de grietas, seguimiento para origen raíz.

superficie, ya que también muestran un color claro y oscuro que proporciona información fuerte del inicio de la fractura [11].

## 2.4. Comportamiento Dúctil o frágil

Un análisis de falla requiere establecer si la fractura es frágil o dúctil, ya que con estos determinan la deformación plástica que se describe mediante la micro-escala. En particularidad, la fractura frágil es de mayor peligro ya que en ocasiones no requiere de grande energía asociada y su velocidad de propagación es alta, producida por la tensión elástica. Además, no se consigue anticipar a la grieta puesto que no presenta cambios visibles antes de fallar. Para la macro-escala en la fractura dúctil hay un gasto excesivo de energía y se presenta deformación plástica y formación de microhuecos. Por otra parte, la fractura frágil a micro-escala requiere de menos uso de energía, no presenta deformación plástica macro, pero su propagación de grietas es más veloz que la fractura dúctil. El mecanismo de fractura para la micro-escala es definido por la macro-escala de la ductilidad. Se debe tener precaución al comportamiento del material, ya que se puede precisar mal para establecer la acción de la escala macro de si es frágil o dúctil. Por otra parte, las condiciones de carga para el comportamiento de un material frágil al dúctil, se crea por la geometría de la pieza y al ambiente de operación, gracias a la tensión en su estado interno, ya sea por sustancias químicas o por temperatura extrema, de igual importancia por inadecuados procedimientos e inadecuados tratamientos térmicos como, por ejemplo, envejecido, temple, endurecido, en otros que pueden inferir drásticamente [5].

## 2.5. Fractura Por fatiga

A macro-escala es una fractura frágil, enlazada con una de micro-escala para fractura dúctil. Para un límite de elasticidad donde hay grieta herméticamente sellada, indica una falla por

fatiga de larga duración debido a una carga. En las que se pueden asociar a tres zonas para identificar el comienzo de las grietas en la superficie, la presencia de sobre carga ultima, aumento de grietas. En el caso transgranular, se da típicamente la fractura por fatiga e intergranular, ocurre en ocasiones en el que hay ciclos bajos de tensión. Donde la trayectoria de la falla hay variación en la micro estructura. En las fracturas donde hay marcas dentadas en la superficie en planos semejantes angostos, hay presencia escalonada a raíz de la unión, a medida que se propagan las grietas. Aunque las marcas dentadas también se pueden dar por cargas redundantes, que son menos probables que ocurran en menor número y frecuencia. De la misma manera, se utilizan estas marcas para identificar el tipo de carga cíclica en los costados opuestos del inicio de la grieta, debido a una flexión inversa y a la variación de tensión máxima. Las marcas dentadas se propagan en zonas de mayor estrés [10].

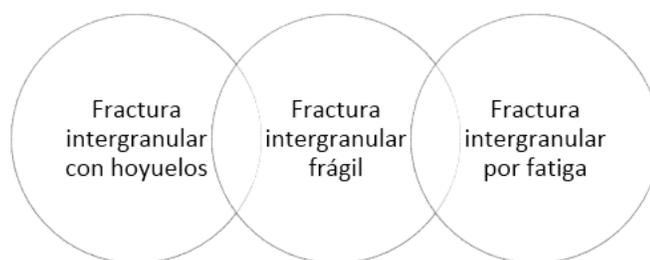
## 2.6. Mecanismos de fractura

Los mecanismos armonizan dependiendo del material con el que operan, la velocidad de carga, temperatura y grado de limitación. Una fractura dúctil en un material ideal muestra una reducción del área dado por desplazamiento y posible simetría. De otra manera, en un plano la ruptura da en la división del grano fuera en superficies lisas. Este resultado es difícil de encontrar en materiales de ingeniería debido a su composición y modificación en partículas, por ejemplo, cambios en el límite del grano. En lo que involucra en la reacción de la fractura como el proceso de evolución [1].

## 2.7. Fractura Intergranular (IG)

Es la que ocurre en el límite del grano debido a una falla de cohesión. Para los materiales que han sido procesados bajo temperaturas de regímenes de fluencia de grano individual, son menos fuertes que los de material de grano policristalinos. Donde, en la red cristalina el límite del grano individual es interrumpida, y genere separaciones producidos por el movimiento en la cual no se involucre el aumento de fluencias gracias a la temperatura. Por otra parte, hay mejor resistencia en límite del grano para aleaciones donde el grano es fino, también en la disminución de la dimensión y mayor número de grano distribuido arbitrariamente, de este modo el material tiene mejor forma de moverse y mejorar la ductilidad. Gracias a la optimización del grano, aumenta la resistencia como la tenacidad. Por otra parte, se presentan fallas en el límite del grano igualmente vacíos y separaciones dado al desorden atómico referente. Sea casualmente el límite del grano, la reunión y rechazo de impurezas. Debida a las altas temperaturas el límite del grano también se fractura por presencia intergranular, a la vez, se presentan fracturas transgranulares por altas temperaturas, llevando a esto clasificar la temperatura de cohesión uniforme, en el cual el grano y su límite presenta la misma resistencia. Pero por encima de la temperatura cohesión uniforme para un grano grueso, la

resistencia es más alta que para la de grano fino debido a su menor superficie de borde. La falla por fractura de tipo intergranular se conoce por la ruptura o creación de microhuecos, en dirección límite del grano a lo largo y del ángulo más alto de la partícula coincidente. Para una superficie de fractura facetada la distribución del grano es equiaxial, en el cual si el grano es grueso puede ser vista con aumento de un lente de mano. Eventualmente se puede reconocer este tipo de fallo. Ya que la fractura intergranular en un material muy trabajado no presenta en el grano grandes rasgos, ni muestras de rugosidades [2]. Entre tanto, la fractura intergranular se presenta por componentes ambientales o metalúrgicas en el límite del grano, influyendo en su debilitamiento, de esta manera se catalogan y son nombradas como:



**Figura 2-4:** Tipos de fractura por agrietamiento intergranular.

En condiciones donde el límite del grano esta en coalescencia de microhuecos o adyacente a este, debido a nucleación de vacío o cavitación de fluencia en el borde del grano, describiendo a la fractura IG con hoyuelos. Por el contrario, la fractura IG frágil no hay presencia de unión de microhuecos y no hay presencia de hoyuelos en la superficie o también denominada ruptura decohesiva en algunos casos específicos, dado por temperaturas elevadas se muestra perdida de cohesión en el límite del grano. Para las fracturas IG con hoyuelos y frágil, se utilizan para entender el límite del grano en mecanismos por fisura dúctil y frágil. De este modo se puede identificar la causa y realizar un trabajo correctivo [12].

## 2.8. Mecanismos de fractura intergranular

El crecimiento de grietas se puede presentar debido o por unión de, descohesión: átomos separados por tracción, dislocación en salida o ingreso debido a los átomos en movimiento de cizallamiento y por difusión y disolución en átomos eliminados o agregados. Estos fenómenos se manifiestan a lo amplio del límite del grano debido a: especies en el entorno que son absorbidas en zonas del límite del grano, propagación rápida de los elementos a lo extenso del límite del grano que en los interiores del grano, fragilización en el límite del grano por separación de elementos e incremento de precipitados y nucleación más rápida que en el interior del grano. Conjuntamente, otro mecanismo intergranular difícil es el agrietamiento por temple, debido al debilitamiento del límite del grano, su tamaño y expansión volumétrica

por medio de las temperaturas extremas de enfriamiento y por el proceso endurecimiento [2].

La identificación de la causa de una fractura intergranular es compleja, aunque es fácil localizar. A diferencia de una fractura transgranular que es menos variada, sus mecanismos forman coalición de microhuecos por fractura dúctil o agrietamiento frágil por división (fatiga). No obstante, la fractura IG debido a condiciones como la temperatura, tiempo, difusión, pueden ser parte de varios procesos para el agrietamiento en el límite del grano. En consecuencia, de efectos tales como el ambiente, estrés continuado, son condiciones dependientes de una fractura de crecimiento lento. Consiguente, el límite de grano en grietas transgranulares en distancias cortas, pueden ser condiciones para seguir el camino a causa de debilitamientos en la segregación.

Las causas de la fractura IG frágil pueden tener en el límite del grano, partículas frágiles de segunda fase, separación del átomo debido a impurezas y por fragilidad ambientalmente provocada. Una fractura ambiental puede darse por el medio o en temperaturas elevadas, por lo tanto contendrá fragilidad de hidrogeno, metal liquido/solido, oxidación, radiación en el límite del grano, de esta manera es fácil identificar la posible causa en el inicio del agrietamiento debido a que es limitada la fractura IG. A diferencia de los materiales apropiadamente procesados que fallan bajo fractura por tensión, ya que no es usual. En condiciones específicas alguno de estos es: microestructura perlítica en acero con alto contenido en carbón, agrietamiento por estrés, Fragilización por temple en aceros tratados térmicamente, sensibilización de aceros inoxidable por precipitación de carburo, descomposición de molibdeno, a veces agrietamiento por corrosión bajo tensión, fragilización inducida en metal liquido/Solido (LMIE / SMIE) [4].

Los mecanismos que causan la fractura intergranular en aceros, por la presencia de precipitados en el límite grano en segunda fase, puede ocurrir en la presencia de inserciones al inicio de la solidificación o después de una solución improcedente y alteración después del recocido. Estos tipos de mecanismos por fractura IG, en los que la temperatura es pobre genera que en los procesos el límite del grano sea en partículas y no en continuo. La verificación se puede hacer a través de metalografía para una identificación y mejora específica. En la que se puede ver los precipitados en el límite del grano, una cavidad alrededor del grano. Estas se unen y crecen haciendo progresar la grieta a lo largo del límite del grano. La causa en la presencia de elementos vagabundos para aleaciones en el límite del grano, hace que la resistencia cohesiva se reduzca realizando cambios en el trayecto de la fractura frágil, dependiendo de la microestructura, tamaño del grano y límite de elasticidad [1].

## 2.9. Falla por sobrecarga

Es usual creer que la falla por sobrecarga solo se presenta cuando se aplican tensiones más haya que el margen de diseño, pero se debe entender que la falla en los materiales se refiere a fracturas frágil o dúctil, cuando se excede la tensión de carga que puede soportar, ya sea por degradación, esfuerzos aplicados excesivos, entre otros. De esta manera, la carga por fractura normal se provoca en fallas por fragilización entre otras causas que generen. En el análisis de fallas se debe tener cuidado en identificar si se presento por sobrecarga y cuál fue su causa [9].

Es por eso, que a partir de la práctica de la falla se logre evidenciar las características de fabricación, y el material puesto que se pueden analizar en su combinación o por separado. Algunos tipos de fallas como se pueden clasificar son fallos por sobrecarga debido al material con insuficiente resistencia y al sub-diseño, defectos y concentración de tensión y alteración. Aunque no es precisamente exhaustivas para la identificación del material y diseño, son de utilidad para reducir la posibilidad de una fractura por sobrecarga. Ciertamente, es complejo cuando hay alteraciones en el material debido a cambios en las propiedades en relación con la microestructura, fragilidad o esfuerzos mecánicos o la coalición de estos u otros simultáneamente [6].

## 2.10. Modos y mecanismos de fractura

En el análisis de falla el origen que presenta una fractura y los modos de propagación de grietas, se identifican por los tipos de fractura de un metal, de los cuales la falla por sobrecarga, fatiga y fluencia. Además, se pueden identificar mediante aspectos visuales y microscópicos, dado que una fractura por sobrecarga es más rápida durante su propagación, se denomina también instantánea. De igual manera, estos modos pueden unirse como la fatiga o grieta progresando en el tiempo y generando una fractura rápida a través de una sobrecarga por agrietamiento dúctil - frágil [1].

Algunos de los métodos que se pueden aplicar en la identificación, están los instantáneos en el modo de falla (frágil y dúctil) y los progresivos de modo de fractura (fatiga y fluencia). Estos métodos son la visualización de 1 a 50x para una fractura superficial, microscopía electrónica de barrido de 20-10.000x en la superficie de fractura, Inspección metalográfica de 50-1000x en la sección transversal y los factores contribuyentes de la falla. En el agrietamiento frágil y dúctil se pueden visualizar sus características a diferentes escalas de 1x a mayor de 10.000x para observar su propagación en la que en este caso ocurre la falla por sobrecarga, de acuerdo con su escala de observación sus características de comportamiento de frágil vs dúctil pueden ser por ingeniería estructural, por ojo a 1x, macro-escala a menor de 50x, macroscopia electrónica por barrido de 100-10.000x, y macroscopia electrónica por transmisión mayores a 10.000x. En general, estos mecanismos de fractura causados por fallas

de sobrecarga establecen el inicio y propagación de agrietamientos incluyendo la combinación de algunas de estos mecanismos. Por ejemplo, micro-proceso frágil, intergranular o encisión y un micro-proceso dúctil, coalescencia por microhuecos [15].

## 2.11. Falla por sobrecarga dúctil

La falla por sobrecarga es aquella que se determina cuando la deformación plástica macroscópica es significativamente visible, se presentan a través de una fuente externa mediante tensión y energía que genere la fractura. En la ausencia de energía las tensiones se reducen haciendo que las grietas dúctiles se rompan y detengan. De esa forma, en los materiales dúctiles la energía absorbida y la caída de deformación en la punta de la grieta, sean no críticas tras el paso del tiempo. Para el tipo de fallas por sobrecarga se es más crítico para el tipo dúctil que, para el frágil, debido a la muestra de deformaciones en los materiales dúctiles y que también son más tolerantes [17].

La falla se puede evitar cuando el material muestra fluencia distribuyendo su carga estructural antes de la fractura. Debido a la naturaleza la falla por sobrecarga dúctil se presenta en servicio temprano en la fabricación, dado a esto se indica un subdiseño, el cual se busca razones como mal cálculo de tensiones, uso inadecuado del servicio, fabricación, mal selección del material, entre otras causas. Por lo que se debe ser muy contundente para llegar a la falla raíz, sin análisis engañosos que pueden llegar a una mala acción correctiva [4].

Los modos en los que ocurren fractura dúctil por una carga de tensión en las que hay crecimiento de vacíos y coalescencia, se presentan en fractura de deformación plana en el eje de carga de tensión en donde la grieta crea vacíos y desgarros fibrosos, y con aspecto opaco. Por otro lado, el modo por esfuerzo plano, la carga de tensión se produce cerca al centro donde se forman microhuecos, debido a tensiones hidrostáticas y la unión de varias grietas y incremento hacia afuera del eje de carga. De la misma forma que el modo de deformación plana, pero cuando la grieta llega a la superficie externa de la fractura ya se convierte en tensión plana, en donde las tensiones máximas se ocasionan a lo largo del plano de cizalladura. La fractura dúctil se caracteriza por su esfuerzo de tensión máxima perpendicular y plano dependiendo del material y las condiciones de carga [14].

## 2.12. Fallas por sobrecarga frágil

Se caracteriza la falla por sobrecarga frágil cuando es pequeña o nula, vista macroscópicamente la deformación plástica, es básicamente elástico hasta el momento que falla. Las grietas en la superficie que se forman a través de la energía que es absorbida, por consiguiente, la falla frágil presenta separaciones de los fragmentos y algunas grietas a diferencia

de la sobrecarga dúctil que no son habituales. Este tipo de fallas es difícil de detectar antes de la fractura, asimismo que pueden ser peligrosas al momento de liberar la energía pueden explotar [16].

Además, particularmente la rapidez con que se crean las grietas se denomina inestable o crítico por la conducción de la fractura última. Es con frecuencia establecer defectos del material o errores de proceso, aunque no involucra necesariamente la fragilidad, el modo de falla de sobrecarga frágil es regularmente el esperado. Por otra parte, los materiales en los que se sacrifica sus características para encontrar resultados de resistencia y deformación máximas, como el cambio de condiciones del comportamiento en el que el material tendría una sobrecarga dúctil y se impone una fractura frágil. De la misma manera, se consigue identificar la falla por sobrecarga frágil en la presencia de una grieta primaria ocasionada intergranular o trasgranular, es decir alrededor o a través de los granos [13].

## 3 Fallas por Desgaste

En ingeniería el desgaste es una condición que se presenta en muchas aplicaciones en las que se refleja, de índole tanto técnico como económico, los costos de abrasión por desgaste se ven reflejados hasta en el 4% en la industria. En la maquinaria se muestra la limitación que el desgaste hace que el componente dure menos. Se reconoce el desgaste debido a la apariencia y contorno de superficie; los resultados se deben al contacto entre superficies en movimiento en relación con un cuerpo. Además, el uso progresivo y el aumento del movimiento hace que se pierda material de una superficie como también el intercambio de material de las superficies. Las fallas se presentan en los cambios que se dan en el material o en el sistema, geometría, dimensiones, espesor residual de recubrimiento, que hace que se produzca la falla. Asimismo, la falla se puede presentar debido al cambio del medio o aspecto que causa el desgaste. La falla no tiene un mecanismo que lo defina universal gracias a las diversidades, de esa manera se debe conocer las condiciones específicas para resolver y corregir las fallas de desgaste. Hay condiciones generales que pueden establecer la causa de la falla para solucionar o evitar el desgaste. Los problemas de desgaste se consiguen corregir mediante unos tipos de acciones, en el sistema tribológico (analizar y caracterizar), en el proceso de desgaste (caracterización y modelado), datos de desgaste para (obtención y evaluación) y para la solución (evaluar y verificar). En la practica se puede seguir el orden haciendo que sean iterativo, generando unas condiciones que influyen en el examen de tribosistema o en la adición de nuevos análisis [7].

### 3.1. Tribosistema (Caracterización y examen)

El desgaste es un proceso que ocurre de manera diferente, se caracteriza de acuerdo con el material ya que el desgaste no es propio del material. En situaciones distintas el material se desgasta de otra manera, el mismo trabajo con un material distinto presenta condiciones diferentes, que se caracterizan y se examinan a través de los fenómenos y el sistema. Conociendo los parámetros, no solo de la parte desgastada sino también los elementos que influyen en el proceso del tribosistema tales como el material de contacto, geometría, movimiento relativo, carga, tipo de lubricación, ambiente, puede llegarse a describir el comportamiento del sistema. El Numero de Aspecto Tribologico (TAN) es la caracterización para determinar el desgaste a través de términos de velocidad, área, presión y ángulo de contacto para valorar los datos del sistema. Para identificación del tribosistema es necesario interpretar los parámetros del desgaste mediante el contacto durante el servicio, encontrando una solución

aceptable. Así mismo, incluir los rastros de desgastes mediante la inspección y medición en el proceso es de gran importancia para la obtención del desgaste en términos de profundidad y magnitud. En el análisis de la solución mediante los métodos para examinar se encuentran los procedimientos visual y óptico de baja potencia [8].

## 3.2. Desgaste de los Aceros

Para poder hablar de desgaste es necesario aclarar tres conceptos muy importantes que aclararan errores que tenemos al momento de hablar de *Wear*, *Fretting* y *Friction*. Cuando utilizamos la palabra *Fretting* nos referimos a un de desgaste que sucede entre dos superficies que tienen un movimiento relativo entre ellas de una pequeña amplitud, donde este término se refiere solo a la naturaleza del movimiento sin tener en cuenta el desgaste, corrosión o daño que ocurra. Cuando utilizamos el concepto de *Friction* nos referimos a la fuerza de resistencia tangencial cuando dos cuerpos están en contacto o tienden a moverse sobre la superficie del otro. Cuando usamos el término *Wear* nos referimos al daño ocasionado a una superficie sólida, donde hay pérdida de material debido al contacto entre ellas. Entre estas definiciones encontramos adicionalmente dos conceptos: *Scuffing* o *Galling* los cuales no son considerados *Wear* ya que no hay pérdida de material [7].

## 3.3. Clases de Daños de Superficie

Cuando se refieren daños en la superficie podemos definir tres tipos de daños generales que se pueden encontrar en diferentes combinaciones en un solo componente: 1. Daños de Superficie sin Intercambio de Material: a. Cambio Estructural: básicamente pueden ser causadas por tratamientos térmicos. b. Deformación Plástica: causada por cambio de forma, deformación de capas. c. Rajadura de Superficie: causada por ciclos de carga causando esfuerzos. 2. Daños de Superficie Con Pérdida de Material: a. Wear- desgaste. 3. Daños de Superficie Con Ganancia de Material: a. Recolecta material perdido de otras piezas lo que puede generar corrosión por diferencia de materiales [3].

El proceso de desgaste se evidencia entre dos superficies que están en contacto, sometidas a una carga. Adicionalmente, existe un ligero movimiento entre ellas que puede ser causado por alguna otra fuerza o vibraciones en un sistema. Cuando hay algún tipo de desgaste en dos piezas de un sistema, podemos observar que puede ser que una de las dos piezas presenta desprendimiento de material y la otra presenta adhesión de material; cuando el material se desprende de la pieza, ésta puede quedar sin algún tipo de material protector y queda expuesta a aire o ambientes corrosivos que puede causar efectos perjudiciales a su constitución como son picaduras y surcos. Se evidencia que en superficies que han sufrido desgaste, la resistencia a la fatiga se reduce a un 50-70 %, llegando a estar por debajo de las

condiciones normales del límite de resistencia a la fatiga en una pieza sin desgaste. Como prevención del desgaste por rozamiento en el proceso de diseño, debe ser eliminado o reducido a su mínima cantidad entre dos piezas y así poder reducir el inicio de las micro rajaduras que reducen el tiempo de vida útil de un componente. Es de anotar que estas micro rajaduras son muy difíciles de visualizar y que por el contacto de las piezas se pueden ocultar siendo así más difíciles de detectar ayudando así a su propagación con el incremento de ciclos. Se determina que las rajaduras por desgaste son producidas por una alta fricción y la dirección de crecimiento de estas rajaduras son en sentido de las tensiones de contacto, tomando lugar en dirección perpendicular al máximo esfuerzo principal en el área de fricción. Como es sabido, el conocimiento de técnicas o modelos de predicción del comienzo de rajaduras está limitado, lo que si se puede hacer es proveer técnicas que permitirán que estas rajaduras se generen o reduzcan su generación al mínimo [7]. En la Tabla 3-1 se han establecido las mejores prácticas para la mitigación del problema generado por el desgaste de piezas:

MITIGACION	METODO PRACTICO
REDUCCION DE FUERZAS DE CORTE EN LA SUPERFICIE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de fuerzas normales en la superficie.</li> <li>• Reducción del coeficiente de fricción con recubrimientos o capas de lubricantes.</li> </ul>
REDUCCION/ELIMINACION DE CONCENTRACION DE ESFUERZOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandes radios.</li> <li>• Remoción de material.</li> <li>• Espaciadores.</li> </ul>
INTRODUCCION DE ESFUERZOS COMPRESIVOS DE SUPERFICIE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Granallado.</li> <li>• Ajuste de interferencia.</li> <li>• Tratamiento térmico.</li> </ul>
ELIMINACION DE MOVIMIENTO RELATIVO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento en la carga normal de superficie.</li> <li>• Incremento en el coeficiente de fricción.</li> </ul>
SEPARACION DE SUPERFICIES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espaciadores rígidos.</li> <li>• Recubrimientos.</li> <li>• Compilación de espaciadores.</li> </ul>
ELIMINACION DE CONDICIONES DE DESGASTE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rodamientos oscilatorios.</li> <li>• Remoción de material de la zona de contacto.</li> <li>• Separación de superficies.</li> </ul>
MEJORAS EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Endurecimiento de las superficies.</li> <li>• Implantación de iones.</li> <li>• Recubrimientos suaves.</li> <li>• Recubrimientos resbalosos.</li> </ul>
REDUCCION DE LA CORROSION	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sellantes anaeróbicos.</li> <li>• Recubrimientos anódicos o suaves.</li> </ul>

Figura 3-1: Prácticas para la mitigación del problema generado por el desgaste de piezas.

### 3.4. Clases de Desgaste

Dentro de los daños ocasionados a la superficie por pérdida de material se denotan varios tipos de desgaste los cuales se definirán a continuación: a. Desgaste Abrasivo. b.) Desgaste por Pulimiento. c.) Desgaste Adhesivo y deslizamiento. d.) Desgaste por Rozamiento. e. Desgaste por Contacto de Rodamiento. f. Desgaste de Impacto.

### 3.4.1. Desgaste Abrasivo

Este tipo de desgaste se evidencia principalmente en los trabajos de movimientos de tierra: minería, agricultura. Este desgaste es debido al movimiento de partículas de alta dureza o elevadas protuberancias que son puestas contra una superficie solida que dependiendo de factores tales como velocidad de contacto, condiciones ambientales, características de la superficie y el tipo de abrasivo, la cantidad de material removido será influenciado [7].

La dureza del abrasivo tiene mucho que ver con el daño que pueda causar a la superficie del material. Si la dureza del abrasivo es mayor a la del otro material en contacto, causa que el abrasivo penetre, corte o remueva material sin importar la forma del borde del abrasivo (redondeado o recto). Para este efecto podemos basarnos en las propiedades de los materiales específicamente en la tabla de durezas por rayadura (*scratching*) de los materiales en los que encontramos encabezando la mayor dureza el Diamante con 10 Mohs y el Talco con 1 Mohs. La forma del grano del abrasivo es importante y se ve reflejado en el surco que deja en la superficie y en la fuerza de contacto que se transmite donde un grano redondeado es menos abrasivo que un grano con bordes agudos.

Igualmente, la tenacidad es un factor importante en la decisión de un abrasivo; se ha demostrado por ejemplo que el Esquisto y la Sílice tienen la misma dureza en la escala de dureza de los materiales (7 Mohs) pero el Esquisto tiene mayor tenacidad lo que causa de dos a tres veces mayor desgaste que la Sílice [6].

Asimismo, los cambios de temperatura no influyen en un proceso abrasivo; esto se debe a que durante la abrasión las áreas pequeñas son calentadas adiabáticamente. A temperaturas iniciales mayores el esfuerzo del material metálico es reducido, lo que genera una mayor razón de remoción del material durante la abrasión. De igual forma, la velocidad de contacto durante el desgaste abrasivo se ve incrementado de manera muy pequeña con el incremento de la velocidad de contacto ya que se incrementa la temperatura friccional. La carga aplicada es directamente proporcional al desgaste abrasivo; si la carga aplicada es mayor y hace que los granos del abrasivo se partan y generen un grano más puntudo, el material se desgastará en mayor manera. Por su parte la humedad no es un factor cuya influencia sea muy clara para definir si incrementa o disminuye la abrasividad. Se han realizado experimentos en donde al incrementar la humedad directamente se incrementa la abrasión en ciertos materiales. Pero adicionalmente se han seguido las pruebas y han determinado que la humedad ha disminuido la abrasividad. Por ejemplo, en los hierros disminuye la abrasividad, en el titanio permanece igual e incrementa para el cobre. Con esta contrariedad de resultados no es muy claro el efecto o el cambio del desgaste bajo los cambios de humedad [3].

En cuanto a los efectos corrosivos, el desgaste se ve incrementado con los efectos corrosivos,

más que todo en bajos pH (Ácido). En estudios de elementos mecánicos de molinos, se evidenció que si se adicionaba agua de desechos ácida incrementaba hasta dos veces el desgaste que si se usara agua potable.

### 3.5. Elección de Material

Algunos de los materiales mencionados a continuación se caracterizan por ser materiales típicamente duros los cuales pueden resistir ralladuras en su superficie: las cerámicas, materiales de carburo, aleaciones de hierro fundido, aleaciones de acero endurecidas y plásticos. En este trabajo nos enfocaremos en los metales ya que hacen parte del material el cual está constituido las probetas de prueba.

Los metales son usados en gran amplitud por su habilidad de resistir al desgaste abrasivo debido a su dureza y debido a que una alta dureza es requerida. Al adicionar carbono tienden a aumentar la resistencia a la abrasión y mejor aún cuando existe una relación con el tamaño del grano abrasivo. En el caso de las aleaciones de hierro fundido aleado, éstas aleaciones son las más resistentes a la abrasión pero desafortunadamente tienen limitaciones en la industria ya que no son soldables y son difíciles de maquinarse; lo que hace que su utilidad disminuya. Las familias de los hierros blancos incluye hierros blancos de alto contenido de cromo, cromo-molibdeno, níquel-cromo y perlítico. Por su parte, en el caso de los aceros, para aceros de baja aleación, básicamente la resistencia a la abrasión se determina por la adición de carbono en la aleación. Como ejemplos tenemos los aceros de herramientas de series M, T, D y parte de la A que a menudo forman carburos en la estructura para alcanzar mayor resistencia a la abrasión [7].

### 3.6. Desgaste por Pulimiento

Para poder definir que tan *pulido* está un material, se define que un material está más pulido que otro, si su acabado es lo más cercano a la superficie de un espejo (el reflejo sobre ella es idéntico al real). Este efecto se da por lo menos entre dos materiales que entran en contacto entre ellas y remueven material una de otra mientras se va produciendo un acabado pulido.

La causa más común es la acción de un abrasivo que en ocasiones es intencionalmente usado para generar una condición de acabado de espejo para requerimiento metalográfico. Los abrasivos son materiales duros en forma de polvo que poseen una forma irregular con bordes afilados y puntudos. Dependiendo de estas características, los bordes agudos son los que penetran y remueven el material de una pieza; solo esta parte del abrasivo es la que hace efecto de pulimiento en la pieza; dependiendo de la forma de estos bordes y puntas así será el

tipo de pulimiento que se efectuará, el resto del grano hace parte del soporte de contacto del abrasivo. El único requisito para un abrasivo es que su esfuerzo elástico sea lo suficientemente grande relacionado con la pieza de trabajo, para hacer marca sobre la pieza de trabajo sin que el abrasivo se deforme significativamente [3].

### 3.6.1. Propiedades de los abrasivos

El *valor de dureza de penetración* es muy importante ya que el abrasivo tiene que ser de dos a tres veces más duro que la dureza de la pieza de trabajo para que el abrasivo no se deforme notablemente durante la penetración. Si el grano del abrasivo se deforma durante la penetración del material, este llega a producir desgaste pero en un grado inferior de eficiencia. Según investigaciones realizadas, se sugiere que la dureza del abrasivo sea ligeramente mayor que la pieza de trabajo para poder producir un desgaste abrasivo [1].

Por su parte la *tenacidad a la Fractura* de los abrasivos es normalmente baja. Lo más importante de esta característica, es que el abrasivo al entrar en contacto con la superficie a ser pulida bajo presión ejercida sobre él, hace que el abrasivo se fracture antes que se fracture la superficie de la pieza de trabajo. De igual forma, los *mecanismos de remoción de material* involucran el mecanizado de viruta, cuya importancia de este mecanismo depende de la forma del grano que esta actuando como abrasivo para pulir. Este grado de incidencia en el material es determinante por la forma de los bordes del grano del abrasivo y así mismo el material puede eliminar tanta viruta que se puede considerar un desgaste abrasivo sin necesidad de ser requerido solo para pulir [2].

De otra parte, la *delaminación* es totalmente diferente al mecanizado de viruta. En este mecanismo se usa un grano abrasivo de muy pequeño tamaño (menores a una micra) lo que hace que se produzcan superficies muy brillantes conservando el desgaste por surcos paralelos. El material es levantado de la superficie a manera de pequeñas delaminaciones y es típico en todos los procesos de mecanizado abrasivo desde el rectificado hasta el pulido. Sin embargo, este proceso de delaminación se ve opacado por el proceso de mecanizado por viruta ya que el desgaste es más basto, pero en ciertos momentos de un trabajo de pulido, el mecanizado de viruta ya no es requerido y entramos a usar la delaminación por su fineza en el acabado. Asimismo existe el desgaste de múltiples pasos, el cual es muy importante si se esta manejando un abrasivo suave y que requiere ser pasado por la pieza de trabajo varias veces para así producir desgaste. Anteriormente se ha mencionado el paso único del grano por la superficie en donde se generan surcos pero con el paso de múltiples sesiones del abrasivo se puede mejorar la calidad del mecanismo de delaminación y de procesos secundarios [6].

Mecanismos de *Erosión*: ocurre cuando en una solución líquida encontramos suspendida algún tipo de abrasivo que al entrar en contacto con la superficie, se adhiere en la pieza de

trabajo y genera remoción de material. El *pulimiento sin abrasivos* permite hacer un pulido sin necesidad de hacer remoción de material con abrasivos, en este caso podemos determinar dos mecanismos.

El primer mecanismo se conoce como *flujo de superficie* y es utilizado por los joyeros en donde utilizan otras herramientas para poder darle un acabado brillante a la pieza de trabajo. Usando un material más fuerte que el de la pieza de trabajo podemos reducir las asperezas aplastándolas y en ocasiones con ayuda de calentamiento de las piezas se puede obtener un acabado reflectante. El segundo mecanismo implica la utilización de procesos *mecánico-químicos* incluyendo una relación simbiótica entre elementos químicos y mecánicos. Este mecanismo funciona de la siguiente manera: la capa protectora de los metales es removida por un solido durante la fricción. Esta capa luego se renueva consumiendo una delgada capa del material metálico. Así repetitivamente se van reduciendo las asperezas de la superficie sin necesidad del uso de un abrasivo. Solo una pequeña tasa de desgaste es esperado, pero típicamente se produce un alto pulido [8].

### 3.7. Desgaste Adhesivo y Deslizamiento

Este tipo de desgaste se considera cuando entre dos materiales existe un contacto entre ellos a través del deslizamiento entre las superficies y el alojamiento de residuo durante el deslizamiento. Para poder definir el desgaste adhesivo tenemos que determinar que existe un desgaste por adhesión cuando no hay residuos de un abrasivo de por medio, cuando la pérdida del material no es gobernada por la oxidación y la amplitud del deslizamiento es mayor que la del roce entre las piezas. Adicionalmente en este tipo de desgaste es complicado determinar el agente que genera el desgaste entre las piezas en contacto. Existen muchas similitudes entre el desgaste adhesivo y deslizamiento pero no pueden ser considerados sinónimos. Este tipo de desgaste es considerado más como un daño de superficie que un desgaste, ya que se da cuando hay falla entre los materiales en adhesión y como consecuencia de su desprendimiento refleja sus efectos. Este tipo de daño se puede mitigar mejorando la selección de materiales, el método de operación y el tipo de lubricación. En la literatura encontramos varias fórmulas para poder determinar el desgastes de un material, pero no son efectivas en la practica. Esta solo son una guía para aproximarse a un valor real, se dice que los diseñadores necesitan un valor de coeficiente de alta efectividad en un rango de +-20 % o mejor para poder aplicar en un sistema aceptable. A continuación se expresara una formula de Volumen de Desgaste que se emplea para una aproximación teórica [7].

$$V = \alpha\beta \frac{WL}{H_v} \quad (3-1)$$

Donde  $W$  es la carga,  $L$  la distancia de deslizamiento,  $\alpha$  el factor de forma,  $\beta$  el grado de penetración del abrasivo y  $H$  es la dureza del material. En resumen, muchos factores intervienen al momento de un desgaste por deslizamiento y adherencia, entre ellos encontramos el factor de carga, el grado del desgaste (severo-leve) el cual depende de la velocidad de deslizamiento, la temperatura ambiente, la rapidez de formación de la capa de óxido en la superficie, determinada por la velocidad de deslizamiento, la compatibilidad de materiales, la lubricación y limpieza de las superficies, el coeficiente de fricción y la resistencia de contacto eléctrico.

### 3.8. Desgaste por Rozamiento

Este tipo de desgaste es muy similar al desgaste por deslizamiento y lo que hace diferencia entre estos dos es que el desgaste por rozamiento tiene una amplitud de oscilación muy pequeña comparada con el desgaste por deslizamiento. Adicionalmente dos superficies permanecen en reposo, permanecen sujetas a algún punto o presionadas entre ellas. Con la aplicación de otros factores tales como la carga y las vibraciones de un agente externo genera pequeñas limallas que hacen incrementar el desgaste entre las piezas y si a estas se le suman las condiciones ambientales puede generar óxido y corrosión por rozamiento. Luego de este proceso podemos encontrar en ciertas situaciones la formación de un desgaste por abrasivo el cual es formado por sus propias limallas y estas a su vez van generando picaduras en las superficies del elemento más débil. Con la acumulación de ciclos pueden llegar a la formación de rajaduras del material. Un ejemplo típico se encuentra en la estructura de los aviones. En este tipo de construcciones se encuentran muchas uniones remachadas en las que el desgaste por rozamiento se da en tres partes típicas de este tipo de uniones: la primera se da en la parte avellanada de la cabeza de los remaches y la segunda se da en los agujeros donde se instalan los remaches y la tercera entre las láminas que están sujetando estos remaches. En estas dos partes que se encuentran en contacto, bajo carga de esfuerzos y sometida a vibraciones cumpliendo así con los requisitos para que se de un desgaste [3].

Previamente se ha determinado que las rajaduras comienzan en la región de desgaste de la superficie, para esto se han determinado algunos factores que influyen con la severidad del desgaste en el material e incrementan las condiciones de generar rajaduras, dentro de los que se encuentran la *Carga de contacto*, *Amplitud*, *Frecuencia*, *Numero de ciclos*, *Humedad relativa*, *Temperatura* y *Acabado de las superficies*.

### 3.9. Prevención de Daños por Rozamiento

Para poder prevenir este tipo de desgaste tenemos que tener claro el desplazamiento que va a realizar las piezas implicadas, a esto se le llama *Desplazamiento Controlado*. Dado este

conocimiento podemos incrementar o disminuir ciertas condiciones a las que están sujetas las superficies para así reducir y controlar el deslizamiento. Existen muchos factores que deberán ser tenidos en cuenta para controlar ese deslizamiento tales como el *diseño* lo cual consiste en eliminar el movimiento entre las superficies y desde allí se pueden evitar los daños, incrementar la *presión normal* reduciendo el área de contacto ó incrementando la carga normal reduciendo el área de deslizamiento. De otro lado, el *acabado de superficie* establece que las superficies rugosas son menos afectadas por el rozamiento ya que pudieron ser sometidas a tratamiento de endurecimiento de superficie como el Shot Peening. Además, los *recubrimientos* consisten en tratamientos de superficie que cambian la composición química del material, como la nitruración, cromado, cementación, implantación de iones, oxidación, anodizado, fosfatado, electro deposición, pulverizado de plasma, recubrimiento de iones, entre otros. Estos recubrimientos son más duros y hacen que las superficies se vuelvan frágiles generando más adelante daños por abrasión. La carburación y nitruración están bien desarrollados para los aceros evitando los efectos por desgaste de rozamiento. Igualmente los insertos consisten en el uso de diferentes materiales entre las superficies de contacto permitiendo aprovechar sus propiedades físicas. Es posible el uso de metales suaves o polímeros para hacer estas separaciones o puntos de apoyo donde se puede ver castigado uno de los materiales sin afectar componentes importantes dentro de un sistema o una estructura [7].

Finalmente, los lubricantes permiten hacer limpieza de las limallas liberadas durante el rozamiento. Lubricantes sólidos aplicados a las superficies reducen el coeficiente de fricción, pero en la mayoría de los casos es imposible mantener esas capas protectoras constantes en las superficies.

### 3.10. Desgaste por Contacto de Rodadura

El desgaste por rodadura está acompañado por algo de deslizamiento, el cual es tenido en cuenta cuando se diseñan engranajes; cuando la componente de la fuerza de contacto normal se transmite, ésta se transfiere pero con un movimiento tangencial que genera a su vez esfuerzo de cizalladura. La holgura (*Backlash*) es un espacio dejado entre el contacto de los dientes de un engranaje para permitir el libre movimiento entre los dientes de los diferentes engranajes y así mismo permitir la lubricación. Al existir este espacio se genera un impacto cuando entre en contacto un diente con otro generando daños en la superficie de los dientes tales como picaduras, formación de cráteres debido a la fatiga del material. El desgaste por rodadura es generado por estrés mecánico repetitivo generalmente. Algunos signos de presencia de desgaste por rodadura incluyen *ruidos extraños* y *altas temperaturas* en los rodamientos, así como, *vibraciones* en los rodamientos y la presencia de *limallas* en el sistema de lubricación [8].

El equipo más usado para hacer pruebas de rodadura es el *Probador de Cuatro-Cinco Bolas*

el cual consta de 5 bolas, 4 en la parte inferior y una en la parte superior en forma de pirámide. Las cuatro esferas inferiores giran libremente cada una ubicada a  $90^\circ$  de la otra y simulan la cinemática de un rodamiento de empuje-cargado. El ángulo de contacto puede ser variado, además posee un sensor de vibración y se pueden hacer cambios de temperaturas.

Durante varios experimentos se han evidenciado daños en las superficies dentro de los cuales se encuentran *Micro-picaduras*, *Picaduras*, *Desprendimiento (spallings)*, *Fatiga de sub-capa*, *Raspaduras* y *fluencia plástica*. El desprendimiento (*spalling*), está muy relacionado con los daños en los rodamientos y en los engranajes. Se puede definir como un desprendimiento en forma de hojuelas que resulta de la fatiga de la sub-superficie y también como resultado del impacto entre las superficies.

Por su parte, el desgaste por impacto es un desgaste que sufre una superficie sólida que es sometida a una percusión continuada por otro sólido. Existen factores que influyen en el estudio del desgaste por impacto tales como los *Cambios de la superficie* que implican deformaciones permanentes y plasticidad, *Estado del Esfuerzo* (materiales laminados, anisotropía, in-homogeneidad, visco-elasticidad, fricción, cargas microscópicas, lubricación), *Cambios en el material y mecanismos de desgaste* dentro de los cuales se encuentran efectos tales como efectos térmicos, químicos y ambientales. En el análisis para determinar el desgaste por impacto ciertas condiciones tienen que ser conocidas para poder determinar el tipo de desgaste generado. La instrumentación experimental incluye dispositivos para medir la fuerza calibrada versus la velocidad. Con el uso de un martillo o de un proyectil se debe conocer el material que se está impactando a una velocidad conocida y con el uso de programas de simulación se establecen los resultados que luego serán comparados con la teoría de contacto de Hertz [3].

# 4 Procedimiento para el análisis de falla

## 4.1. Inspección visual

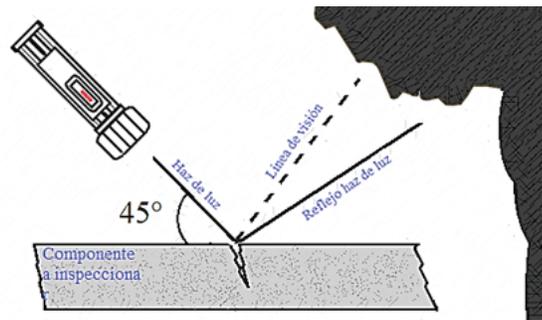
La inspección visual es un procedimiento que se examina mirando, el cual se evalúa un mecanismo, pieza, componente a través de la vista del ojo humano, puede ser sola o con ayuda de alguna herramienta, con la que se busca identificar la anomalía, se puede usar una luz brillante, lupa y espejo. En ocasiones es fácil determinar los defectos que no se requieren métodos adicionales, aunque eso no significa que no requiera una inspección adicional, debido que hay fallas muy pequeñas que el ojo humano no puede ver con ayuda de una lupa, como también que no se presentan superficialmente.

Mediante esta técnica se pueden identificar las imperfecciones que son visibles como algunos tipos de corrosión, desgaste, grietas, deformación, etc., así como revisión dimensional. Este método es muy usado en la actualidad para el control calidad en la fabricación, para asegurar la eficacia y mejorar las especificaciones del producto con el fin de usarse para la variación del análisis y detección del proceso conclusivo. Como también cuando el componente-pieza está en servicio de operación. Usualmente en la inspección visual en la búsqueda de anomalía superficial con linterna, la posición del haz de luz a un ángulo de 5 a 45 grados con respecto de la superficie de inspección a la cara, y el ojo a una distancia de 6 pulgadas (15 centímetros), se puede usar para mejorar el ángulo de visión un espejo, (Figura 4-1).

Gracias a la visión humana posee algunas ventajas que se presenta por el método de inspección visual, como la muestra de resultados inmediatos, bajo costo, preparación mínima de la pieza, capacitación mínima, entre otras., por otro lado, se presentan desventajas severas que proporcionan rendimientos demasiado lentos en algunos casos, fatigoso, subjetivo, laborioso, entre otras que pueden hacer que el análisis de la inspección arroje resultados parciales. De manera general, se pueden interpretar resultados bajo la observación determinar si se presenta anomalías.

## 4.2. Ensayo de Dureza

En un material la dureza es la resistencia que se opone a la penetración o rayado debido a su deformación plástica superficial. En otras palabras, la dureza de un material es la propiedad



**Figura 4-1:** Inspección visual con linterna.

de resistir la deformación elástica por contacto local de otro cuerpo de mayor dureza y se evalúa de acuerdo con la carga del penetrador, tiempo y duración de la carga específica, como la geometría del penetrador. El ensayo de dureza principalmente busca identificar la capacidad del metal como el tratamiento puntual en cual fue sometido.

El ensayo de dureza por penetración se realiza al material dependiendo de la microestructura, de forma representativa para estudiar los diferentes contribuyentes, se debe tener en cuenta la homogeneidad y heterogeneidad del material, precisión del resultado, como la cantidad de muestras que se requieren del ensayo y tipo de material. Existen varios métodos para la identificación de durezas dependiendo del tipo de material y con las que se busca comparar con relación a otros.

Hay factores que influyen en los resultados para los ensayos de dureza debido a contaminantes elementos como la suciedad, humedad, temperatura, entre otros., como también que se cumpla con la normatividad del instrumento y lograr una precisión adecuada en el ensayo. Como también es necesario la preparación de la pieza para la toma de la muestra ya que se requiere de una superficie libre de imperfecciones, gracias a lo anterior se puede determinar la calidad de una buena muestra.

### 4.2.1. Dureza Rockwell (HRC)

El método de dureza Rockwell es seguramente una de las pruebas más utilizadas y extensas gracias a que es simple e independiente y que puede ser tomado para todas las tipologías de materiales con la herramienta llamada durómetro. La toma de la muestra se calcula por la profundidad de penetración bajo la aplicación de una carga determinada con resultados de lectura directa. Las cargas deberían ser medidas en Newton (N), pero históricamente son medidas en Kilogramo-Fuerza (Kgf), bajo la normatividad ISO y ASTM se representan como se muestra en la Figura 4-2.

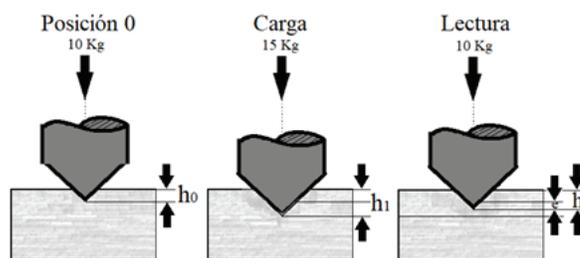
El ensayo Rockwell es usado como ensayo rápido, en laboratorios como en estudios más desa-

Método prueba de dureza	Norma	Rango de carga	
Rockwell (HR)	ISO 6508	147.1 – 1471 N	15Kgf – 150 Kgf
	ASTM E18	147.1 – 1471 N	15Kgf – 150 Kgf

\*ASTM E384 es para pruebas de dureza de materiales.

**Figura 4-2:** Características del ensayo de dureza Rockwell.

rrollados. Los números de dureza Rockwell se establecen en la profundidad de penetración (Figura 4-3).



**Figura 4-3:** Método Rockwell Profundidad de penetración.

### 4.3. Análisis de la Microestructura

En aplicaciones de ingeniería se determinan la composición de materiales en su estructura. La microestructura se define como el conjunto de cambios que determinan el material, gracias a equipos adecuados, se puede diagnosticar mediante técnicas los fallos los defectos específicos y la realización de un análisis fractográfico. A través de las propiedades se puede identificar la conducta o la reacción al servicio efectuado, con el análisis se puede determinar el tamaño promedio del grano, la distribución y orientación del tamaño las fases de aleación que comprende con las que se puede identificar en el material su fuerza mecánica.

Bajo pruebas se pueden concebir si el material era el adecuado bajo el trabajo que realizaba o si las características propias del material correspondían al servicio, de esta manera se puede obtener análisis que lleven a la causa. Es de gran importancia interpretar adecuadamente los resultados de la microestructura del material, como entender que la preparación preliminar del componente en la superficie a investigar fue realizada con el proceso de pulido fino, ataque químico, para luego visualizar en el microscopio y observar de manera correcta los resultados.

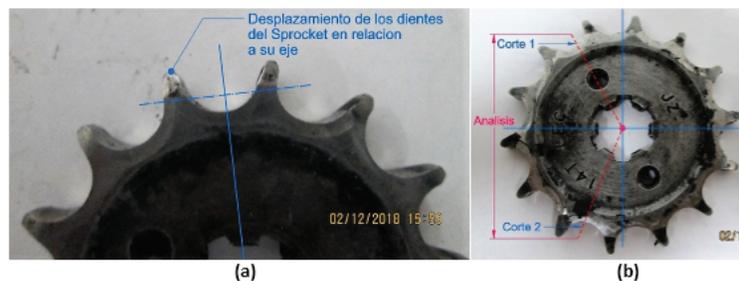
## 4.4. Inspección Visual

### 4.4.1. Sprocket A - (Deformación)

La deformación de los materiales se presenta por acciones en el cambio de sus propiedades por las que fue creado, presentando en ocasiones en su estructura deformación respecto a su eje, a causa de que los dientes del sprocket no ajustan adecuadamente y bajo el trabajo sigue propagando el daño hasta su totalidad. De la misma manera, la deformación del metal en el punto directo del diente por el alto contacto a raíz del estrés desarrollado presenta ese tipo de daño que bajo observación se logra detectar. Como también el material en la superficie muestra que hubo desprendimiento de material en forma de canales en dirección del movimiento, haciendo que se borrara el vértice del diente del sprocket.

También se puede establecer que, a causa de la temperatura en la operación, se presentaron cambios en las propiedades mecánicas como, por ejemplo, el módulo de elasticidad. Por otra parte, se puede considerar que por aplicación de fuerzas en el material tuvo desplazamiento en las dislocaciones originando deformación plástica.

Se puede especular que por falta de ajustes adecuados en la alineación paralela con respecto al eje y sobre tensión causo la deformación lineal extrema presentando el fallo total de la operación. Se puede percibir en la Figura 4-4 (a), como mediante la inspección visual se puede observar el desplazamiento de la cresta del diente del sprocket se deformato. Para mejor detalle se efectúan unas pruebas de dureza y exploración de microestructura y así analizar la causa que produjo el fallo del material en la sección mayormente afectada.



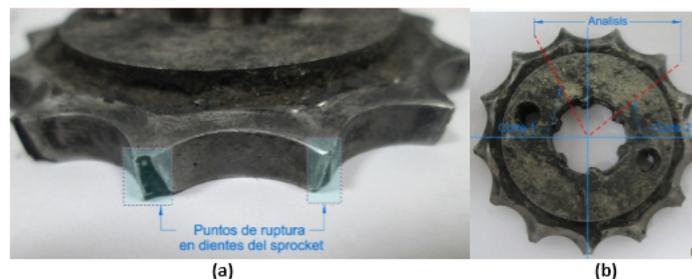
**Figura 4-4:** Sprocket A - Deformación del sistema de transmisión.

En la Figura 4-4-(b), se puede contemplar la sección la cual se efectuará el análisis a dos cortes, en la que se consigue visualizar el daño más significativo para luego se pueda hacer su respectivo estudio e identificar su causa de falla.

#### 4.4.2. Sprockets B/C por desgaste y fractura

Los fallos se presentan debido a causas indeseadas de un componente, pieza que no lleva a cabo con su funcionalidad de operación mecánica. El sprocket presenta en su superficie dental un deterioro el cual llevo a que fallara, se pueden presentar a diferentes tipos de causa, que se pueden establecer si fue el diseño, o si también el tipo de material no era el adecuado para el trabajo a realizar. Por otra parte, se puede pensar que pudo haber abuso o un defecto en el tratamiento o en la fabricación, generando el desgaste que se presentó bajo el iterativo estrés que pudo ser inferior a la fuerza de tensión del material. Se logra localizar que tuvo fatiga, ya que se identifica la presencia de grietas y también fractura en la zona dental. Las grietas en el sprocket pudieron ser ocasionadas por diferentes aspectos como el estrés térmico, mecánico o por la acción de un dobladura que forjaron que el material fallara, como también se puede precisar que la fractura ocasiono desgarrres en los dientes del sprocket. Como se marca en la Figura 4-5 (a), inicialmente empezó como una grieta que fue creciendo hasta el instante que el material restante no resistió la carga, cabe precisar que el desgaste se produce desde el comienzo del uso del sprocket.

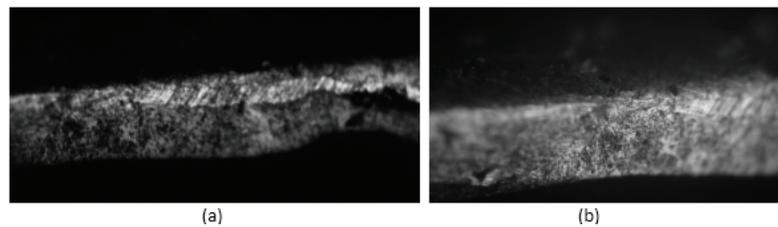
Se relaciona que el desgaste producido en los dientes también fue fortificado a causa de presencia de partículas diminutas y duras en el cuerpo del componente, llegando a pensar que provocaron rayones en los dientes del sprocket en la acción del contacto, cuando operaba con la cadena. Por las condiciones de operación se puede pensar que fue por contaminación del ambiente y/o lubricante contaminado. Aunque para mayor detalle de la causa se induce el uso de microscopio para lograr ver imágenes complementarias que ayuden a determina que causo el ciclo de fallas.



**Figura 4-5:** Sprocket B - Desgaste y fractura del sistema de transmisión.

De la misma manera que en el caso anterior, en la Figura 4-5 (b), se visualiza la sección a dos cortes que se requieren para llevar el análisis del fallo, se determinó esa área específica porque presentaba el punto más crítico visible de todo el cuerpo, aunque en su totalidad se consigue ver el sumario de fallos. Es importante evidenciar la fractura en todos los dientes del sprocket. A parte de ello, se tomaron dos imágenes para observar a más detalle el

comportamiento de uno de los dientes bajo observación, pero con ayuda del microscopio, como se ve en la Figura 4-6 (a) y (b), en la que se muestra la superficie del diente donde está la falla vista superior a la zona de la cresta y se logra ver de forma más clara uno de los agrietamientos que provocaron luego la fractura.



**Figura 4-6:** Registro bajo microscopio en zona dental superior del sprocket.

La figura (b) nos deja contrastar como mayor resolución el fallo, que respecto a la figura (a) que está más alejada pero que igualmente proporciona la ubicación del posible inicio de falla. Durante la vida de servicio del componente es de importancia realizar un diagnóstico al mecanismo y a las posibles causas que generen daños, de forma que se pueda proporcionar un detalle posible de la falla, como la deformación periódica por ciclo a raíz de estrés normal presentándose inadvertido e incuantificable, donde normalmente produce fractura a causa inicial de grietas. La pérdida de material en la superficie dental del sprocket como se muestra en la Figura 4-7-a, donde la falla resultante pudo ser del estrés superficial o subsuperficial extralimitando el endurecimiento del material. Produciendo que el rendimiento de la pieza por los deterioros alterase su estructura, la presencia de aspecto fibroso en el área es también señal que presento un golpe imprevisto que genero la fractura, causando que se rompieran los dientes próximos posiblemente por desgaste, debido que siguió trabajando bajo torque el sprocket, hizo que rompiera otros dientes adicionales. Revisando los dientes fracturados se puede entender que donde está la apariencia lisa fue originada por fatiga y los que presentan aspecto fibroso fallaron después por sobrecarga.

El análisis de la Figura 4-7-b, representa la sección a dos cortes que se establece para estudiar más a detalle el comportamiento de la pieza que nos indique que hizo que fallara, específicamente en esa área que fue más afectada. Entendiendo también que puede presentarse fallas combinadas, ya que estas no ocurren de manera explícita, si no que se presentan factores de dos o más fallas que hace que el componente fracturado, desgastado quede inservible. Por la cadena de procesos que se desatan de la causa raíz, el sprocket de la figura 4-7, puede ser un ejemplo de esa variedad de fallas.

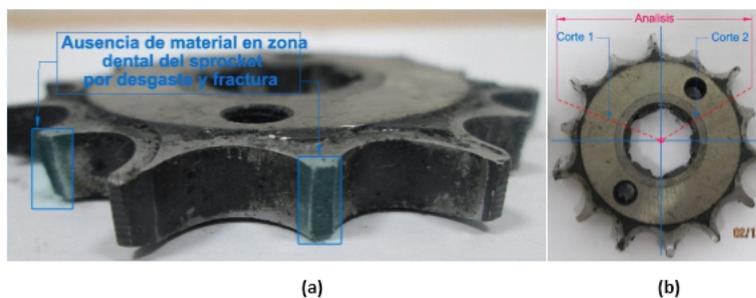


Figura 4-7: Sprocket C - Desgaste y fractura del sistema de transmisión.

## 4.5. Ensayo de dureza Rockwell

El ensayo Rockwell es uno de los más usados para evaluar la dureza de los materiales, en el cual es usado ampliamente en elementos mecánicos, cumple con la función de determinar con la variación de dureza, así identificando los cambios que se presentan y que en ocasiones se convierten en falla. De esa manera, se evalúan los resultados que arrojan las muestras del material, en las distintas zonas que puedan presentar los cambios y cohabite en su resistencia. Debido también a agentes externos, como propios del material, que originen las condiciones de falla del componente parcial o general.

Para la medición de durezas, se efectuó en el laboratorio de metales de la Fundación Universitaria Los Libertadores, para los componentes se utilizó el durómetro de la marca Brooks Inspection Equipment (Figura 4-8-a), con el número de registro 16500 / 23580. Se le efectuó la principal carga con 150 kilogramos estableciendo que es un ensayo HRC, donde su indentador fue de tipo cono de diamante, para así realizar la comparación bajo el patrón base de 68.8 HRC (Figura 4-8-b), en forma que sea verificado en el indicador del durómetro (Figura 4-8-c), para corroborar la buena lectura de cada una de las pruebas, con el fin de obtener resultados de dureza de cada elemento óptimamente. De esa manera, poder también establecer si las medidas son correctas o en cualquier momento poder verificar si es requerido. En las figuras se pueden observar el ensayo de dureza Rockwell C con el durómetro, en la prueba de patrón de 61.8 HRC y la verificación en el indicador de caratula. Para así posteriormente, realizar las pruebas de cada uno de los componentes.

### 4.5.1. Dureza cuerpo del Sprocket A

En la realización del proceso de análisis del ensayo de dureza para la pieza (Sprocket A), se requirió de una buena preparación, que no mostrara irregularidades en la superficie. Por lo que se le eliminó rebaba presente en la sección del corte, de forma que se procedió a limar los bordes, como también se hizo la verificación que no existiera escoria, viruta adherida a la



**Figura 4-8:** Equipos y procedimientos utilizados para la medición de la dureza.

superficie del análisis. Se comprobó que las condiciones del área para las muestras estaban totalmente planas y así obteniendo los siguientes resultados de dureza Rockwell C para el sprocket A, como se indican a continuación en la Figura 4-9.



**Figura 4-9:** Toma de muestras de dureza en el cuerpo del Sprocket A.

Se observa que en el cuerpo del sprocket se mantiene estable los valores de dureza tomados, por lo contrario, se logra visualizar que, en la zona dentada, en el área deformada hay un cambio del valor, ya que en ese punto se genera gran parte del contacto que hace la cadena con el sprocket. constituyendo que en el rozamiento se aumente la temperatura como también la pérdida-disminución del material, logrando en ese punto disminución de las propiedades y cambio en su composición. En la siguiente Figura 4-10, se registran los resultados alcanzados. Los resultados obtenidos muestran lo esperado, ya que se mantienen los valores de dureza, a acepto en la punta del diente afectado, por las condiciones de operación que hicieron variar su estructura.

#### 4.5.2. Dureza del cuerpo del sprocket B

En la realización del ensayo de dureza para el sprocket B, el cual presenta fractura y desgaste en la sección dental, debido a la operación de contacto con la cadena para transmitir la

Ensayo de dureza		
Anotación	Descripción	Dureza Sprocket A en HRC
#1	Zona inferior del radio	65
#2	Zona inferior centro del radio	65
#3	Zona inferior centro del radio	64
#4	Zona centro del radio	64
#5	Zona superior centro del radio	65
#6	Zona en el límite exterior de contacto con cadena	65
#7	Zona de contacto del diente	64
#8	Zona en el límite exterior de contacto con cadena	64
#9	Zona directa afectada	61
#10	Zona en el límite exterior de contacto con cadena	64
#11	Zona centro del radio	65

**Figura 4-10:** Tabla de Resultados obtenidos de dureza Rockwell C del Sprocket A.

potencia. Se obtuvieron las muestras en la superficie central, donde no hay contacto puntual a la falla como se observa en la Figura 4-11. Por motivos de diseño del sprocket B, que presenta un realce con respecto a la zona dental, se tomó una sola dureza en el extremo del componente, ya que el durómetro necesita una superficie estable para la prueba. De manera que se consiguieron los resultados que se ven en la Figura 4-12.



**Figura 4-11:** Toma de muestras de dureza en el cuerpo del Sprocket B.

Se puede observar que en el ensayo del sprocket B, hay variación en la parte de apoyo del eje, evidenciado una disminución en la dureza. Mientras que permanece estable de la zona central hacia el extremo.

#### 4.5.3. Dureza del cuerpo del sprocket C

El ensayo de dureza para el sprocket C, que presenta falla de fractura y desgaste durante el servicio, en la transmisión de potencia, a través del análisis se quiere reconocer que pudo causar el deterioro. De forma que se tomaron las muestras de dureza en varias zonas del componente como se ve en la Figura 4-13, estableciendo los resultados obtenidos bajo la prueba de dureza rockwell C del durómetro como se ven en la Figura 4-14.

Ensayo de dureza		
Anotación	Descripción	Dureza Sprocket B en HRC
#1	Zona Interior del radio	55
#2	Zona central Interior del radio	64
#3	Zona central exterior del radio	64
#4	Zona exterior del radio	65
#5	Zona Interior del radio	48
#6	Zona central Interior del radio	61
#7	Zona central exterior del radio	65
#8	Zona Exterior del radio	65
#9	Zona dental afectada	65

**Figura 4-12:** Resultados obtenidos de dureza Rockwell C del Sprocket B.



**Figura 4-13:** Toma de muestras de dureza en el cuerpo del Sprocket C.

Los resultados para este sprocket C, presento variación en cada una de las muestras obtenidas, con lo que se puede establecer que fue sometido a diversos factores en la operación logrando que la pieza fallara y tuviera el comportamiento que del desgaste produjera una fractura.

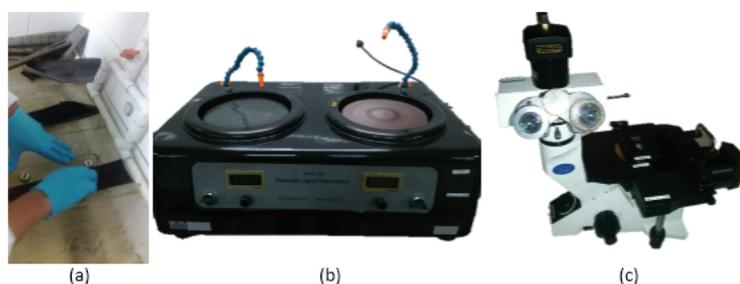
## 4.6. Reconocimiento de la microestructura

El ensayo de microestructura o microscópico, es un método que nos refleja características del comportamiento mecánico del material, el cual es parte importante en el análisis de falla, observando los cambios en aquellas zonas donde se presentan las modificaciones internas. El desarrollo de laboratorio fue apoyado bajo la norma internacional ASTM. Las pruebas

Ensayo de dureza		
Anotación	Descripción	Dureza Sprocket C en HRC
#1	Zona interior del radio	50
#2	Zona central interior del radio	44
#3	Zona interior del radio	53
#4	Zona central interior del radio	51
#5	Zona central exterior del radio	46
#6	Zona exterior del radio	46

**Figura 4-14:** Resultados obtenidos de dureza Rockwell C del Sprocket C.

fueron realizadas bajo instrumentación y procedimientos adecuados para poder establecer las propiedades que identifiquen el comportamiento del material, los equipos con lo que se realizaron los ensayos fueron proporcionados por el laboratorio materiales de la Fundación universitaria los libertadores, se hizo uso de banco de lijado con las que se realizaron el pulido de las piezas con papel de lija grano número: 100, 240, 320, 600 y 1000 (a). Máquina de pulido modelo UNIPOL-820 de numero interno 25143 con paños de pulido para la etapa metalográfica con uso de agua y alumina (oxido de aluminio) (b), y el dispositivo microscópico metalográfico de marca OLYMPUS GX41, con numero interno 16498-16 (c). Y el uso de ácido nítrico al 10 %, para ataque químico. Para poder efectuar un buen análisis, se deben realizar de manera efectiva cada uno de los procedimientos como el pulido a espejo del área a estudiar del componente, y lograr ver con el microscopio la metalografía de las piezas a escalas de 100x, 200x, 500x y 1000x.



**Figura 4-15:** Equipos de laboratorio para ensayo metalográfico.

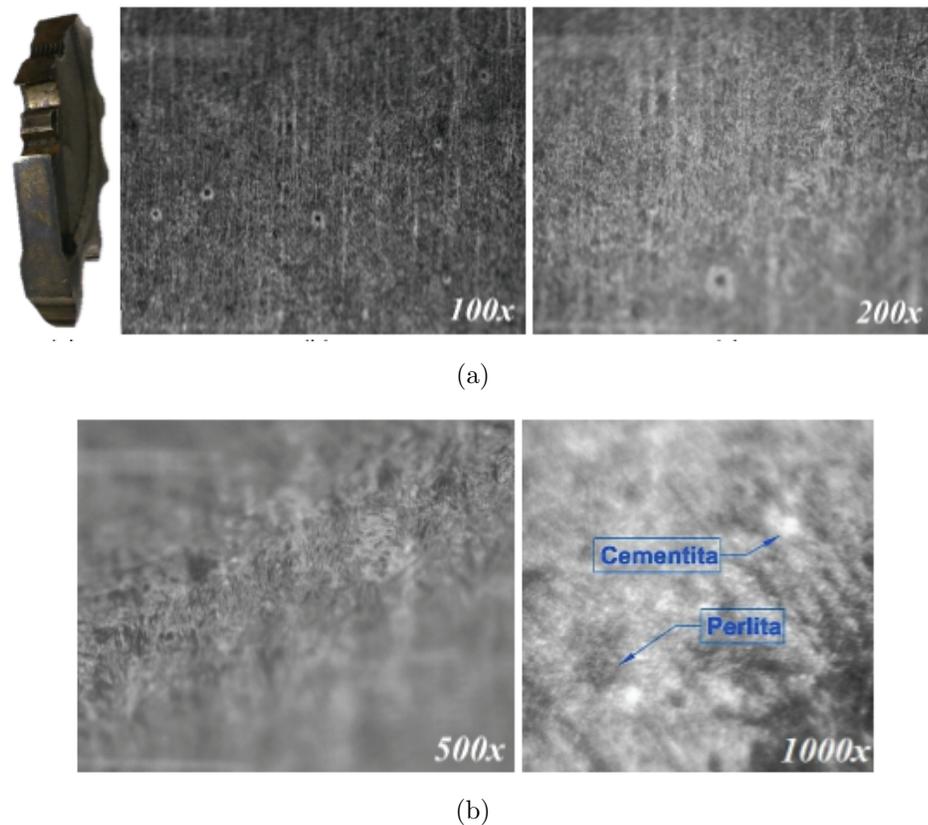
#### 4.6.1. Microestructura Sprocket A (Deformación)

La probeta metalográfica del sprocket A, Figura 4-16, conseguimos observar presencia cristalina de martensita revenida; la cual se puede identificar la Cementita observada de color claro y Perlita en forma alargada de color oscuro. Al comparar los datos obtenidos del sprocket A, las durezas tomadas vistas en la Figura 4-10, estuvieron en el rango (61-65HRC), podemos definir que este acero corresponde a un acero con contenido de Carbono por encima de 0.8 %, formando un acero Hipereutectoide, grado 1080 aproximadamente (Acero Templado).

En la Figura 4-16, se presenta la pieza que se preparó superficialmente para estudiar, y la microestructura vista a 100X, 200X, 500X y finalmente a 1000X, con la que se pudo interpretar su microestructura percibiendo presencia de cementita y perlita.

#### 4.6.2. Sprocket B, (Desgaste y Fractura)

La probeta metalográfica del sprocket B, Figura 4-17, podemos observar la presencia cristalina de martensita revenida, en donde podemos identificar el cementita de color blanco

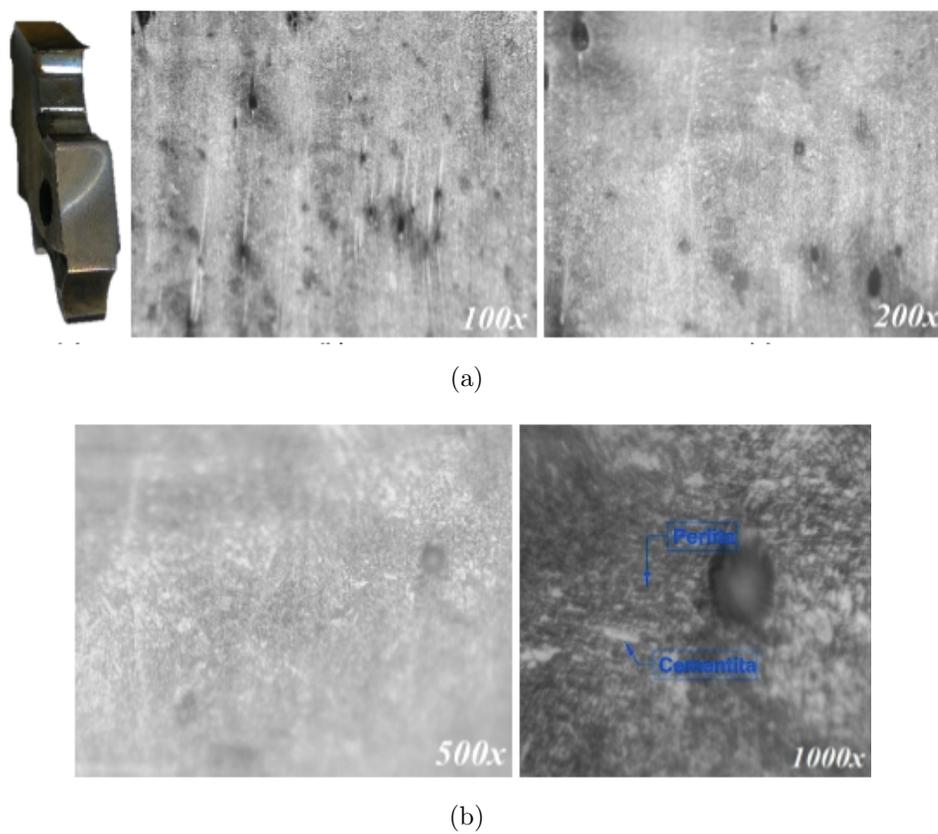


**Figura 4-16:** a). Sección del sprocket analizado y microestructura observada a 100X y 200X.  
b). Microestructura observada a 500X y 1000X.

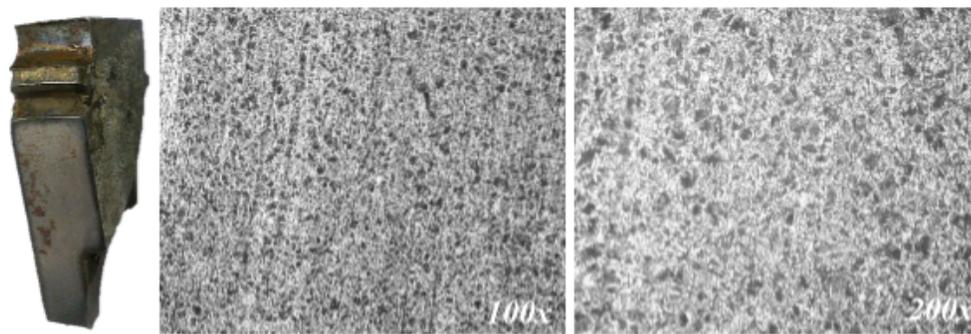
y la Perlita de forma lineal. Comparando los valores obtenidos de la Figura 4-12, en los ensayos de dureza se visualiza que el rango está en (61-65HRC), obtuvimos unos valores muy similares a los de la probeta anterior sprocket A, indicándonos que el acero analizado es un Acero Hipereutectoide con contenido de Carbono por encima del 0.8%.

### 4.6.3. Sprocket C, (Desgaste y Fractura)

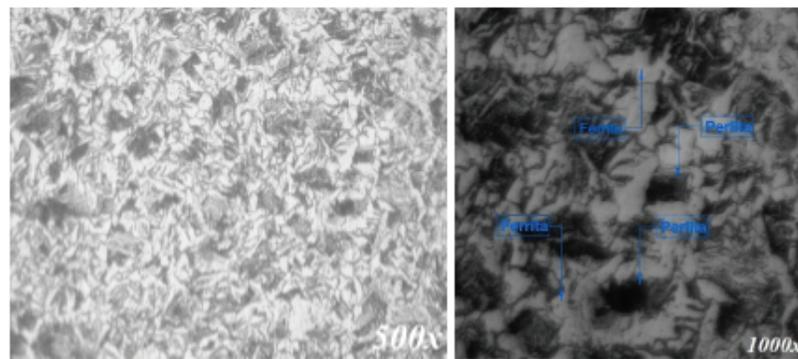
La probeta metalográfica del sprocket C, Figura 4-18, conseguimos observar una estructura cristalina de manera distribuida, identificando la Ferrita no coloreada y la perlita en forma de huella dactilar, con las durezas obtenidas como se ve en la Figura 4-14, que nos muestra intervalos de (46-53HRC) podemos suponer un acero 1040 o 1045, siendo un acero Hipoeutectoide sin presencia de carburos de hierro. La Ferrita y la perlita aparentemente producida por tratamiento térmico de normalizado.



**Figura 4-17:** a). Sección del sprocket analizado y microestructura observada a 100X y 200X.  
b). Microestructura observada a 500X y 1000X.



(a)



(b)

**Figura 4-18:** a). Sección del sprocket analizado y microestructura observada a 100X y 200X.  
b). Microestructura observada a 500X y 1000X.

# 5 Análisis de Falla

Considerando los requerimientos para establecer las raíces que provocaron las anomalías en los sprocket, a continuación, estableceremos el análisis de fallo y posible causa raíz. Con relación a los tres elementos mecánicos examinados. Apoyados en los resultados que se obtuvieron bajo la inspección visual, los ensayos de dureza y el análisis metalográfico de cada uno y con ayuda de conceptos técnicos, se consigue exponer los conceptos que llevaron que resultara en una falla. Estableciendo que no se conoce la procedencia de como sucedió el fallo, ni en qué condiciones se presentaron las fallas que las causaron en su totalidad, nos apoyamos mediante las percepciones de evidencia apreciables de los sprockets A, B y C ensayados.

## 5.1. Sprocket A

Al observar el sprocket A y con los datos obtenidos en el laboratorio, se determina que la pieza posee una alta dureza posiblemente de un tratamiento térmico superficial en los dientes y al ser sometida a la fuerza aplicada por la cadena, los dientes se deformaron a la sobrecarga aplicada cambiando su posición simétrica respecto al eje radial.

## 5.2. Sprocket B

Con los datos obtenidos de dureza en el laboratorio y lo observado en las imágenes podemos analizar que el sprocket B, al ser sometido a las cargas cíclicas de la cadena de potencia, generó un agrietamiento superficial con concentración de esfuerzos que fue incrementando al punto de terminar en la pérdida de algunos dientes como producto del efecto continuado de la fatiga al interior del diente.

## 5.3. Sprocket C

De acuerdo con los datos de dureza y a las imágenes obtenidas, se evidencia que al ser sometido el sprocket C, a cargas cíclicas de la cadena de potencia, se fueron generando grietas superficiales que se extendieron a través de la raíz del diente, acumulando esfuerzos y llegando a la pérdida de los dientes. En general, en las dos últimas piezas analizadas (Sprocket B - Sprocket C) sufrieron un posible desgaste por fatiga que, con el ciclaje de los sprockets, fue generando rajaduras en la superficie y que sumado a esto las condiciones de

---

trabajo (humedad, contaminación, concentración de esfuerzos y altas cargas alternantes), fueron incrementando las rajaduras hasta llegar a la fatiga de los dientes. Para el sprocket A, que presenta dureza alta, se evidencia la eficacia del tratamiento térmico en la zona de contacto entre cadena-diente que, al ser llevada a ciertos ciclos de uso, se denota su deformación. Evitando así la pérdida del diente, soportando más cargas que los dos sprockets mencionados inicialmente.

## 6 Conclusiones

- El estudio del análisis de falla permite que el ingeniero pueda inspeccionar, verificar y evaluar a través de procedimientos de los elementos mecánicos sometidos a trabajo en operaciones en la industria como de la vida cotidiana, estableciendo condiciones que cuentan con técnicas para identificar causas y en que situaciones se dan las fallas y como a través de antecedentes podemos predecir las anomalías que se dan en el material metálico. Así mismo, se establece que el procedimiento fue satisfactorio para realizar el análisis y que en el futuro las características obtenidas previamente se usaran para la prevención, en el mantenimiento, como para el diseño y selección de material entre otras vicisitudes importantes. Se espera que gracias este tipo de análisis pueda aportar en el tiempo, para formar un consolidado más profundo que desarrolle temas que complementen y robustecen en calidad de mejora y se logren optimizar aquellas anomalías en la manufactura como en prevención en la operación.
- El área de análisis de fallas manifiesta que la normatividad establecida para lograr un buen énfasis en la conducta de los materiales y cómo podemos abarcar esos métodos para reconocer y valorar la investigación del proceso a través de pruebas que se obtienen en el laboratorio y asimismo con apoyo de instrumentación que ayuda para el reconocimiento particular de las posibles fallas que son presentadas en manuales internacionales, que durante muchos años han estudiado los comportamientos del material y que es base de apoyo para generar el informe de resultados obtenidos. Es preciso mencionar que los procedimientos en el análisis de falla pueden ser más profundos y detallados gracias a equipos y técnicas más sofisticadas para la obtención de resultados, sin embargo, con los equipos trabajados de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se tomaron muestras que revelan aspectos importantes en el 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] BHUSHAN, Bharat: *Modern tribology handbook, two volume set*. CRC press, 2000
- [4] CAMPBELL, Flake C.: *Fatigue and fracture: understanding the basics*. ASM International, 2012
- [5] CARLSON, Carl S.: Understanding and applying the fundamentals of FMEAs. En: *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2014
- [6] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987
- [7] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM Handbook-Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, 1992 (ASM Handbook v. 18). – ISBN 9780871703804
- [8] CZICHOS, H.: *Tribology: a systems approach to the science and technology of friction, lubrication, and wear*. Elsevier Science, 2009 (Tribology series). – ISBN 9780080875651
- [9] DAS, Amiya K.: *Metallurgy of failure analysis*. Vol. 132. McGraw-Hill New York, NY, 1997
- [10] GROOVER, Mikell P.: *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997
- [11] MCEVILY, Arthur J.: *Metal failures: mechanisms, analysis, prevention*. John Wiley & Sons, 2002
- [12] MOBLEY, R K.: *Root cause failure analysis*. Butterworth-Heinemann, 1999
- [13] RAMACHANDRAN, V: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005

- [14] STEPHENS, Ralph I. ; FATEMI, Ali ; STEPHENS, Robert R. ; FUCHS, Henry O.: *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons, 2000
- [15] VANDER VOORT, George F.: *Metallography, principles and practice*. ASM International, 1984
- [16] WILSON, Paul F.: *Root cause analysis: A tool for total quality management*. ASQ Quality Press, 1993
- [17] WULPI, Donald J.: *Understanding how components fail*. ASM international, 2013