



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de falla de un engranaje de la caja de cambios de una motocicleta

Duvian Samir Romero Lozano
Jair Antonio Giraldo Ramos

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

Análisis de falla de un engranaje de la caja de cambios de una 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

Gracias a Dios y a nuestras familias, aquí se encuentra plasmado , en algunas hojas, el compromiso, el apoyo económico y moral continuo de estas personas para contribuir a este gran sueño de ser Ingenieros mecánicos. Gracias al director de este trabajo y al Ing. Silvio, que nos mostraron un espejo de lo que deberíamos ser como ingenieros, y entre otros aspectos, nos enseñaron la importancia y el profuso camino que existe entre tener el conocimiento y entender su divulgación.

Yokoi Kenji: "La disciplina, tarde o temprano, vencerá a la inteligencia".

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.	a) Puente de contacto entre el carburo de silicio y el latón 6040.	5
2-2.	a) Transferencia del latón al acero en dos entornos de trabajo. b). Material suelto debido al desgaste en ambientes con oxígeno y argón más oxígeno. . .	8
5-1.	a) Lijas con sus distintos tamaños de grano. b). Banco de lijado. c). Dispositivo para el desbaste. d). Dispositivo para dar brillo espejo a la superficie. e). Microscopio óptico. f). Durómetro Rockwell.	26
5-2.	a) Lijas con sus distintos tamaños de grano. b). Banco de lijado. c). Dispositivo para el desbaste. d). Dispositivo para dar brillo espejo a la superficie. e). Microscopio óptico. f). Durómetro Rockwell.	28
5-3.	a) Corte metalográfico hecho al piñón. b). Prueba de dureza Rockwell tipo C aplicada al piñón.	29
5-4.	a) Mediciones de dureza realizadas b). Cálculo de la desviación estándar de las mediciones de dureza.	30
5-5.	a) Microestructura del acero del piñón observada con un lente de 100X. b). 200X. c). 500X. d). 1000X.	31
5-6.	a) Diagrama de análisis de causa raíz del engranaje estudiado.	32

Resumen

El tema “análisis de falla” empezó a tener importancia cuando la experiencia y la lógica emergen que, en un aspecto industrial, no es viable disponer de muchos elementos del mismo tipo para ser reemplazos, sino encontrar el porqué de las causas que llevan a la falla de dichos elementos. Para llegar al resultado que responde al fundamento de esta investigación, se toma como base el uso de herramientas metalográficas, equipos de dureza y la observación, para determinar la dureza y analizar la micro-estructura del material con el que está fabricado el piñón, posteriormente por medio de una inspección visual se obtuvo como resultado que la pieza analizada falla por fatiga, y que este tipo de falla se presenta en la pieza debido a las grietas generadas por los distintos mecanismos de desgaste, siendo estas grietas las que dan inicio a la fatiga sobre el diente del piñón y que termina con la fractura súbita del diente.”

Palabras clave: Análisis de falla, fatiga, metalografía, desgaste.

Abstract

The topic of “failure analysis” began to have important when experience and logic emerge that, in an industrial aspect, it is not feasible to have many elements of the same type to be replacements, but to find the reason for the causes that lead to the failure of said elements. In order to arrive at the result that responds to the basis of this research, it is based on the use of metallographic tools, hardness and observation equipment, to determine the hardness and analyze the micro-structure of the material with which the pinion is manufactured, subsequently by means of a visual inspection it was obtained as a result that the analyzed piece fails due to fatigue, and that this type of failure occurs in the piece due to the cracks generated by the different wear mechanisms, these cracks being the ones that start the fatigue on the tooth of the pinion and that ends with the sudden fracture of the tooth.

Keywords: Failure Analysis, fatigue, metallographic, wear.

Contenido

Resumen	x
1. Objetivos	2
2. Deslizamiento y Desgaste Adhesivo	3
2.1. Superficie de deslizamiento	4
2.2. Resistencia del enlace	5
2.3. Parámetros primarios en el desgaste de materiales	6
2.4. Desgaste deslizante seco en metales limpios	7
2.5. Prevención del Desgaste Adhesivo	8
3. Desgaste por Contacto Rodante	10
3.1. Señales físicas de RCW	11
3.1.1. Engranajes	12
3.1.2. Picadura inicial	12
3.1.3. Picadura destructiva	13
3.2. Mecanismos de RCW	13
4. Fricción, Lubricación y Desgaste de Engranajes	15
4.1. Fatiga Hertziana	15
4.2. Picadura	15
4.3. Micropicadura	17
4.4. Desgaste	18
4.4.1. Abrasión	18
4.5. Desgaste de pulido	20
4.5.1. Rallado	21
4.6. Lubricación elastohidrodinámica	23
4.6.1. Selección de lubricante	23
5. Procedimiento de análisis	25
5.1. Inspección Visual	25
5.2. Análisis metalográfico	26
5.2.1. Procedimiento realizado	29
5.3. Análisis microestructural	30

Contenido	1
<hr/>	
5.4. Análisis de Falla	31
5.5. Análisis de causa raíz	32
6. Conclusiones	33
Bibliografía	34

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a un engranaje de la caja de cambios de una motocicleta que presenta 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.

2 Deslizamiento y Desgaste Adhesivo

En el ámbito laboral, comúnmente el ingeniero mecánico se ve envuelto en el análisis del motivo por el cual fallan las distintas piezas de un sistema, cuando se habla del desgaste por adhesión, se hace referencia a un tipo de desgaste que se produce debido al deslizamiento de una superficie sólida a lo largo de otra superficie. Cuando se consideran otros tipos de desgaste como el desgaste debido a la erosión, la cavitación, la corrosión, el contacto por rodadura, la abrasión, la oxidación y demás tipos de desgaste, se excluyen los problemas que hacen referencia al desgaste debido al deslizamiento, a pesar de que este puede ocurrir en varios de los otros tipos de desgaste, esto quiere decir que cuando se trata un tipo de desgaste por deslizamiento, se está hablando de un tipo aparte de los demás casos de desgaste que puedan ocurrir.

El desgaste adhesivo puede ser algo confuso de definir exactamente, ya que es difícil identificar el causante de este desgaste, a pesar de que la causa del desgaste adhesivo tiene que ver directamente con el deslizamiento, hay variables de difícil medición durante el deslizamiento. En la década de 1930 se confirmó que la adherencia entre dos superficies en contacto contribuye de manera importante a la resistencia del deslizamiento de esta superficie sobre la otra, por esta razón se decidió incluirla en la mecánica, al menos como un tipo de desgaste. A pesar de ser considerado como un tipo de desgaste, para que el desgaste adhesivo sea tenido en cuenta como la razón del desgaste de una superficie-pieza en algún proceso, se deben cumplir ciertas situaciones como, que no se encuentren sustancias abrasivas implícitas en el proceso en el que se esté trabajando, que la amplitud del deslizamiento sea mayor que la de fricción, que la tasa de pérdida de material no esté siendo regida por los principios de oxidación entre otras [8].

Para observar de manera más clara el fenómeno de la adherencia, podemos enfocarnos en un sistema deslizante, como lo pueden ser un sistema pistón-camisa o más simple como la interacción de las ruedas de un automóvil con el asfalto. En estos sistemas deslizantes se puede evidenciar como la adhesión en los puntos de contacto de una superficie con la otra se ve involucrada en la aparición de excoiación (presencia de escamas sobre las superficies deslizantes que impiden el buen deslizamiento de las mismas) y del mismo desgaste, incluso cuando no haya pérdida de material en el sistema, a partir de estos ejemplos se puede ver que la adhesión no surge como consecuencia del desgaste sino como consecuencia del contacto entre las superficies, esto ocurre cuando los puntos en contacto de las superficies deslizantes

se hacen deslizar y los puntos que inicialmente se encontraban adheridos localmente se separan, durante esta separación pueden manifestarse uno o dos modos de falla mecánica de sólidos, donde uno de ellos puede ser la falla por fatiga según sea el caso [7].

El desarrollo de los estudios de los diferentes modos de desgaste a los que puede estar sometido un sistema durante un proceso, tiene como finalidad encontrar métodos por los cuales se le pueda extender la vida útil a estos sistemas, ya que cada modo de desgaste se puede atenuar de una mejor forma realizando la correcta selección de material, lubricante y método de operación de dicho sistema, infortunadamente para la fabricación de productos para sistemas con un desgaste lento se requiere de mucha experiencia por parte del diseñador, ya que en la actualidad hay muy pocos principios fundamentales para tratar la fricción y el desgaste que guíen al diseñador a tomar las mejores decisiones a la hora de seleccionar el material o de definir la mejor configuración para el sistema [2].

2.1. Superficie de deslizamiento

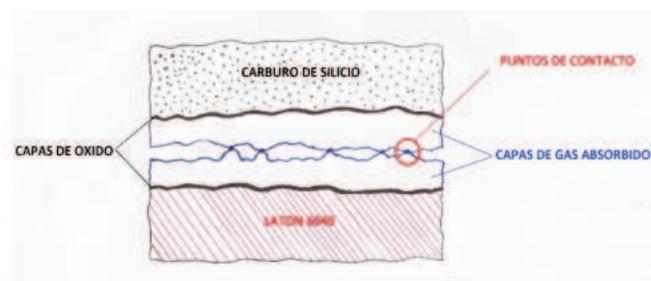
Es de saber que, dentro de la experiencia en campo del ingeniero, los sistemas a su cargo se ven expuestos a distintos entornos de trabajo y que las superficies de deslizamiento de estos sistemas nunca se van a encontrar totalmente limpias, inclusive si en determinado momento lo estuvieron, estas se contaminan debido a la atmósfera que las rodea, teniendo en cuenta lo anterior se dan unas condiciones estándar para los diferentes materiales en los que ocurra el deslizamiento [15].

- Metales: Para las superficies de metal, por lo general se les realiza un revestimiento con una película de óxido y a su vez esta se vuelve revestirse con una segunda película de gases e hidrocarburos.
- Polímeros: En el caso de las superficies de material de polímero, pueden contener agua y plastificantes absorbidos por la superficie, las superficies de polímeros también pueden ser preparadas mediante la aplicación de agentes de desmoldeo, gases absorbidos y aceites.
- Cerámicos: Del mismo modo que los polímeros, las superficies compuestas por material cerámico serán revestidas con aceites y gases absorbidos.

La preparación de las superficies deslizantes mediante el recubrimiento con películas de gases y aceites tiene como finalidad intervenir en la unión o adhesión de las superficies deslizantes sean de un material u otro, además de controlar las variaciones en el desgaste de las superficies, el espesor de estas capas y revestimientos absorbidos es del orden de $10\ \mu\text{m}$, estas películas no son posibles de observar a por medios ópticos, ni tampoco por técnicas

de microscopía electrónica de barrido, la verificación de estas películas se realiza por instrumentos de análisis químico sofisticados o simplemente por fe, las variaciones en el espesor y las propiedades de estas películas es una de las principales razones por las que se obtienen los datos de fricción reportados para todos los materiales [3].

La siguiente imagen muestra, como estas películas revestidas sobre los materiales de las superficies, controlan el desgaste sobre estas, para el ejemplo una superficie es de carburo de silicio y la otra de bronce.



(a)

Figura 2-1: a) Puente de contacto entre el carburo de silicio y el latón 6040.

Se puede ver en la imagen que los cinco puntos de las dos superficies que están en contacto soportan el peso del carburo de silicio y pasan por una serie de interfaces desde el carburo de silicio, pasando por una capa de dióxido de silicio, dos capas de gas adsorbido, una capa de $(\text{CuO}+\text{ZnO}_2)$ hasta finalmente llegar al latón. Al recorrido desde el carburo de silicio hasta el latón se le denomina el puente de contacto. Si en el ejemplo se iniciara el deslizamiento de una superficie de una sobre otra, inicialmente se exprimiría parte de las películas adsorbidas, lo que produciría un contacto entre las capas sólidas de dióxido de silicio y $(\text{CuO}+\text{ZnO}_2)$, si la presión es tan alta que pudiera producir una fractura en las capas sólidas, solo en ese momento estarían en contacto las superficies bases, el carburo de silicio y el bronce, de ahí la importancia de preparar los materiales de las superficies deslizantes con las capas sólidas y las películas de adsorción, todo esto para evitar un desgaste prematuro de las superficies deslizantes [1].

2.2. Resistencia del enlace

Este parámetro también depende de los materiales, dado que cuando los materiales base de las superficies deslizantes entran en contacto, la resistencia en el punto de contacto dependerá netamente de los materiales en contacto. Cuando los materiales que están en contacto son los mismos, esta unión se dará con mayor fuerza, cuando las superficies en contacto son de

distinto material esta unión tendrá menor fuerza inicialmente, pero estos enlaces de diferente material aumentan su fuerza con el transcurrir del tiempo. Para dos materiales con estructuras atómicas iónicas o covalentes idénticas, como pasa en el caso de los materiales cerámicos, la unión será fuerte si las redes atómicas están bien alineadas. En el caso de que la dimensión reticular de un material sea diferente a la del otro, la resistencia en la unión será menor. Cabe recordar que los óxidos, sulfuros y otros compuestos usados en las películas de revestimientos, también son estructuras iónicas o covalentes. Para los polímeros, las cadenas de átomos están unidas usualmente covalentemente, estas cadenas atómicas de los polímeros se unen entre sí o con las de otro material mediante enlaces más débiles de van der Waals.

En el desgaste por deslizamiento normalmente se producen esfuerzos normales en las superficies en contacto, a estos esfuerzos se le suman esfuerzos cortantes, la suma de estos esfuerzos aumenta la probabilidad de que las superficies deslizantes sufran deformaciones plásticas y posteriores fracturas en los puntos de contacto. Una vez iniciado el deslizamiento de una superficie con la otra, luego de algunos deslizamientos, habrá una capa de sustancias mezcladas turbulentamente, algunas de las cuales serán eliminadas de las superficies producto del desgaste por el deslizamiento, esta capa de sustancias mezcladas permanecerá durante los deslizamientos como una capa de transferencia. La velocidad a la que ocurrirá el desgaste de las superficies dependerá de las propiedades de los materiales que están presentes en la capa de sustancias mezcladas, como también de otros factores inherentes a los procesos por los que pase el sistema deslizante, como la forma y los modos de vibración si el sistema tiene movimientos vibratorios constantes, la temperatura de las superficies deslizantes, la posible reacción química de las superficies con el entorno de trabajo y muchos más parámetros. Queda claro que el desgaste adhesivo depende de muchos factores, muchos de los cuales no se encuentran bien definidos para así, lograr dar un concepto completo del desgaste adhesivo en la actualidad [12].

2.3. Parámetros primarios en el desgaste de materiales

En metales, polímeros y cerámicos la correcta selección de los materiales en los sistemas deslizantes, debe tener en cuenta el entorno operativo de este sistema, además del rendimiento que se requiere para las piezas en contacto. Para los metales, el desgaste varía sustancialmente con el procesamiento y el tratamiento térmico aplicado al metal seleccionado. La selección de un polímero como material para un sistema que implique deslizamiento se debe a sus características como su poca reacción a algunos productos químicos, irritación baja y sus propiedades auto lubricantes. Los materiales cerámicos se emplean cuando los procesos del sistema implican altos niveles de oxidación con altas temperaturas y también por su alta resistencia a la corrosión [13].

2.4. Desgaste deslizando seco en metales limpios

Cuando se hace referencia al término seco, no implica que no haya lubricación, lo que traduce es que la lubricación no es deliberada, en cuanto al término metales limpios, indica que no hay una escala obvia de óxido o de residuos grasos para el metal.

Mediante una serie de experimentos que realizaron A.W.J DeGee y J.H Zaat, donde se observó de cerca el desgaste adhesivo entre un latón 6040 y un acero para herramientas, se descubrió que el desgaste adhesivo se produce a partir de dos mecanismos. Estos dos mecanismos los dejaron reflejados en dos gráficas que se mostraran posteriormente. En el desarrollo de los experimentos se evidencio que una parte del latón había sido transferido al acero, donde permanecía adherido, pero otra parte se retira (desgasta). Hay que tener en cuenta que cada mecanismo por el que ocurre el desgaste dependerá del contenido de zinc en la película que reviste al latón. A continuación, se mostrará el comportamiento de la adherencia y el de las películas que revisten las superficies del latón y el acero [7].

- Adherencia local del latón al acero: No se observa la presencia de hierro en los fragmentos de desgaste, se evidencia que la superficie del acero permanece inalterada.
- Película continua: el óxido que reviste al latón es óxido de zinc, posiblemente este óxido de zinc no se lubrica bien, lo que indica un área de adhesión considerable. En cuanto al acero, la película que lo reviste, es una película de bronce, en la cual las partículas provenientes del desgaste, son de gran tamaño, pero son pocas.

En las siguientes gráficas se muestra los dos mecanismos por los que ocurre el desgaste, entre el latón 6040 y el acero para herramientas. La Gráfica **2-2-a** muestra la transferencia del latón al acero en entornos diferentes, uno con oxígeno y otro con argón más oxígeno. La Gráfica **2-2-a** evidencia la pérdida de latón del sistema debido al desgaste entre las superficies de latón y de acero en estos mismos ambientes [7].

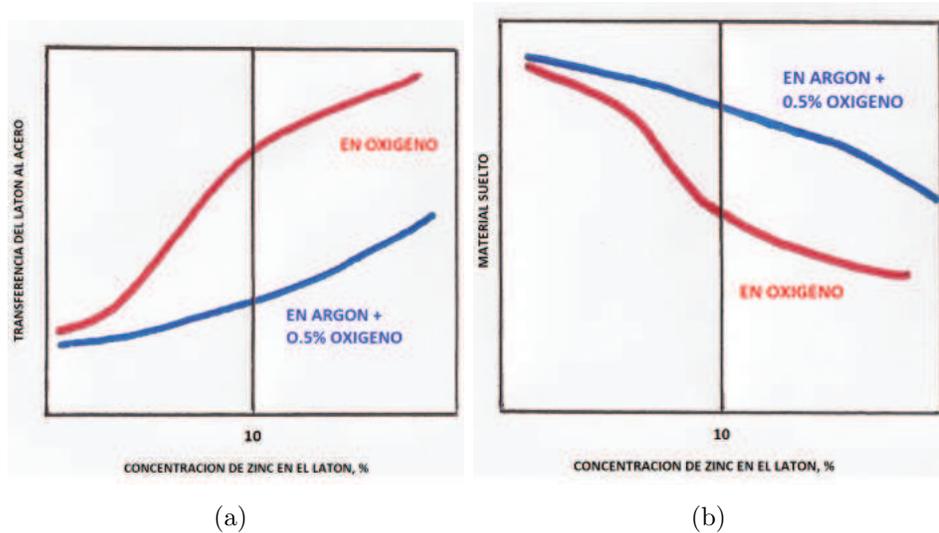


Figura 2-2: a) Transferencia del latón al acero en dos entornos de trabajo. b). Material suelto debido al desgaste en ambientes con oxígeno y argón más oxígeno.

Lancaster desarrollo un estudio del efecto del desgaste entre el latón y el acero con un desplazamiento a alta velocidad, y pudo concluir lo siguiente:

- La velocidad a la que se produzca el deslizamiento, la carga aplicada sobre las superficies y la temperatura del entorno en que trabajara el sistema deslizante inferen de gran manera en que se produzca un desgaste leve o un desgaste severo en las superficies.
- Los metales blandos, no son desgastados en todos los casos por los metales duros.
- La temperatura de los materiales base, influye directamente en el proceso de desgaste.

2.5. Prevención del Desgaste Adhesivo

Al realizar el análisis del comportamiento del desgaste adhesivo sobre superficies con respecto a distintos factores, se mencionarán unas pautas para atenuar el desgaste por adhesión sobre superficies [7]:

- Dentro de los posibles no diseñar sistemas deslizantes, donde los metales de las superficies deslizantes sean iguales.
- La dureza será una propiedad deseada en los materiales de la superficie, si la fatiga debida a efectos de presión repetida no es un problema en el sistema, sin embargo, no es bueno deslizar metales duros sobre metales duros, así el sistema esté bien lubricado, esto para evitar raspaduras entre las superficies y poder acomodar los desechos provenientes del desgaste.

- La lubricación es muy importante para reducir el desgaste adhesivo, así esta se realice de manera inadecuada, se aplica la lubricación en las superficies deslizantes proporcionando una película lubricante sobre las superficies, estas producirán la reducción de la fricción entre las superficies, más que si esta película lubricante no estuviera presente.

3 Desgaste por Contacto Rodante

El desgaste por contacto rodante (RCW) resulta de la tensión mecánica cíclica sobre la superficie de un cuerpo que rueda sobre otro cuerpo.

El desgaste por contacto rodante es una de las principales causas de falla en rodamientos de elementos rodantes, dientes de engranaje, contactos de rieles en ruedas, guías de rodillos en maquinaria de producción, seguidores de rodillos de leva en motores de combustión interna y rodillos de laminación. Es una forma particularmente incidente de desgaste, debido que a veces es difícil de detectar.

En sus primeras etapas estos defectos que genera este tipo de desgaste pueden estar ocultos a la vista ya que crecen por debajo de la superficie de contacto. En el momento en que las grietas crecen lo suficiente como para emerger en la superficie y producir partículas de desgaste o delaminaciones, estas partículas pueden convertirse en grandes fragmentos o partes diminutas de material, lo que genera que la pieza pierda sus propiedades e inherentemente su eficiencia. Para predecir que existe un RCW en una pieza se encuentran ítems como [7]:

- Ruido progresivo.
- Calentamiento progresivo.
- Inicio de vibración en un rodamiento de precisión.
- Aumento rápido en el contenido de residuos de desgaste en muestras de aceite.

Después de que se presenta alguna de esas condiciones anteriores es pertinente el desmonte de las piezas involucradas en dichas señales para revisar la gravedad del daño que ha tenido la pieza. Debido a que RCW generalmente se produce por esfuerzos mecánicos repetitivos de las superficies afectadas, a menudo se lo asocia o denomina, fatiga por contacto rodante (RCF).

En este capítulo se incluye otro factor relacionado con el desgaste y es la fatiga por contacto rodante (RCF), el cual consiste en el proceso de acumulación de daño que se genera por la formación de partículas de desgaste. Es decir, RCW permite la generación de partículas de desgaste y posteriormente se genera el RCF.

La fatiga de contacto de rodadura puede continuar por cientos, miles o incluso millones de ciclos antes de que se eliminen las primeras partículas de desgaste. Además, este tipo de problemas y otros desgastes como RCW pueden actuar como sitios de nucleación para grietas de fatiga adicionales y propagar el daño a través de la superficie [8].

La magnitud de los efectos de RCW varía de un sistema a otro. A veces, un componente puede sufrir daños RCW apreciables antes de que se deteriore su función; otras veces, la pérdida de rendimiento es el resultado inmediato de la primera crisis. Por ejemplo, un rodillo de guía en un sistema de manejo de barra de metal caliente puede soportar RCW considerable, pero este desgaste puede no ser importante siempre que el componente continúe funcionando adecuadamente. Sin embargo, en el caso de los rodamientos de bolas de ultra precisión para sistemas de guiado de misiles, un espasmo muy pequeño puede hacer que el centro de masa del rodamiento que gira rápidamente cambie, dando como resultado errores de orientación significativos.

En síntesis, la magnitud de los efectos del daño se podría decir que depende de dos elementos: el mecanismo, ya que cuando aparece RCW en algunos dispositivos no es necesario cambiarlo; la aplicación, de un sistema a otro depende la importancia del desgaste [14].

El contacto de rodamiento se acompaña con frecuencia de deslizamiento. Los movimientos complejos experimentados por los componentes en muchos tipos de situaciones de contacto rodante producen al menos un pequeño porcentaje de deslizamiento. Por ejemplo, un perfil de engranajes rectos. Cuando los dientes del engranaje se tocan por primera vez, hay una medida de deslizamiento más rodadura. Cuando el punto de contacto coincide con el círculo de paso, hay una zona de contacto .^{exacta.} casi .^{exacta}” (dependiendo de la precisión de la alineación del engranaje o la vibración por los ejes, es decir la vibración lateral). Pasado este punto, el deslizamiento ocurre de nuevo entre las superficies de los dientes; alcanza su máximo contacto justo en el punto donde las superficies se separan. El deslizamiento puede provocar daños por raspado o desgaste adhesivo en las superficies de contacto si la lubricación es inadecuada. Por lo tanto, la selección adecuada de lubricante y tratamiento de superficie es importante para minimizar los efectos nocivos del deslizamiento en muchos tipos de disposiciones de contacto de laminación.

3.1. Señales físicas de RCW

Los engranajes y los cojinetes son los componentes más comúnmente sujetos a RCF y RCW. Los rodillos de laminación también experimentan con frecuencia RCW. El endurecimiento superficial, el acabado o el recubrimiento duro a veces se utilizan para atacar el problema. El desgaste del contacto con la rodadura a menudo se manifiesta por defectos en el producto laminado que reproducen las partes desgastadas de las superficies de los rodillos.

3.1.1. Engranajes

Como se mencionó anteriormente, los modos de desgaste experimentados por los engranajes generalmente implican rodadura y deslizamiento. Dudley describió el desgaste de los dientes del engranaje, señalando que la cantidad relativa de deslizamiento aumenta a medida que aumenta el número de dientes. Además, el desgaste no es generalmente una función de la velocidad de deslizamiento relativo, a lo largo de la cara de un diente; sin embargo, a velocidades muy altas, puede producirse un rayado, y las pérdidas por fricción en los juegos de engranajes se ven fuertemente afectadas por el deslizamiento.

Los engranajes hipoides, engranajes helicoidales y engranajes espiroidales pueden funcionar relativamente bien incluso cuando se usan de forma apreciable; en consecuencia, los diseñadores de engranajes no siempre usan el desgaste como un parámetro de diseño crítico. Las principales consideraciones en el diseño de engranajes son [7]:

- El esfuerzo del diente del engranaje no excede ningún valor crítico para la vida prevista.
- Los materiales del engranaje son del tipo y calidad adecuados.
- La forma y el acabado son adecuados.
- El lubricante y el sistema de lubricación son adecuados.
- El sistema está adecuadamente protegido del óxido y contaminantes.
- Vida de fatiga por picadura versus tensión de contacto y condiciones de lubricación elastohidrodinámica.

Sin embargo, la determinación del tamaño de la unidad de engranajes, es decir, el diámetro de paso, la relación de engranaje y el ancho de cara, a menudo debe incluir consideraciones de las condiciones hertzianas necesarias para evitar fallas de picadura de la cara del engranaje dentro de la vida útil del diseño. Se reconocen varios tipos de picaduras con respecto a las fallas de fatiga de la superficie del engranaje:

3.1.2. Picadura inicial

Fatiga superficial que generalmente ocurre como una banda estrecha justo debajo o en la línea de cabeceo al comienzo de la operación del componente y que se detiene después de que las asperezas se hayan ensanchado lo suficiente (desgastado) para llevar la carga adecuadamente.

3.1.3. Picadura destructiva

Por lo general, comienza debajo de la línea de lanzamiento y se extiende en cantidad y tamaño de hoyos hasta que la forma del engranaje queda inutilizable. Se ha usado otra terminología para describir el daño superficial en los engranajes. Los términos incluyen micropicaduras, picaduras de origen superficial, descascarillado de origen subsuperficial, raspado y límite plástico.

El descascarado es otro tipo de desgaste que se produce en RCW de dientes de engranaje. El descascarado ocurre esporádicamente. Las partículas relativamente grandes, producidas por el desprendimiento de la superficie pueden causar daños si se incrustan en la superficie de contacto o se abren paso en partes críticas de los engranajes o cojinetes.

Se afirma, según Dubley que tanto las picaduras destructivas como las rupturas rara vez ocurren a menos de 10.000 ciclos, pero observa que el límite plástico (principalmente en engranajes metálicos o poliméricos) puede ocurrir a un número relativamente bajo de ciclos si hay una sobrecarga en la superficie de contacto. En resumen, generalmente hay tres tipos de desgaste de engranajes: (1) desgaste normal o pulido, (2) desgaste moderado que no es necesariamente destructivo para la vida útil del engranaje, y (3) desgaste destructivo [2].

3.2. Mecanismos de RCW

Dowson dice que algunos de los primeros estudios sobre los mecanismos de fatiga de los rodamientos y el desgaste que realizó Goodman a fines del siglo XIX y principios del siglo XX. Goodman introdujo los términos picadura, descascarado, raspado al vocabulario de análisis de fallas de desgaste, y en un artículo de revisión de 1912 introdujo el concepto de fatiga superficial de este modo: "El efecto de velocidad en las bolas posiblemente tiene alguna relación con el conocido efecto de reversiones muy rápidas de estrés" [9].

Hershey describe la historia de la comprensión de los mecanismos de la fatiga subsuperficial, comenzando con trabajos innovadores a mediados y finales de la década de 1930 que establecieron la forma en que las grietas de fatiga subsuperficiales formaban hoyos superficiales en elementos rodantes. Ahora se sabe que los mecanismos de desgaste por contacto rodante implican mucho más que la fatiga subsuperficial. El desgaste por contacto con rodadura puede implicar una abrasión leve de los contaminantes en los lubricantes, puede verse afectado por agua o ácidos en los lubricantes, puede verse agravado por la transferencia de material de la jaula y, además, la combinación de mecanismos puede cambiar con el tiempo [10].

Gran parte de la investigación realizada sobre los mecanismos de RCF y RCW se ha basado en metales y aleaciones; en consecuencia, se sabe relativamente poco sobre el comportamien-

to detallado de la cerámica y los materiales compuestos en situaciones similares. Cuando los nuevos componentes de laminado de metal se ponen en marcha por primera vez, normalmente se produce un proceso de acondicionamiento de la superficie. En este proceso, se producen cambios sutiles tanto en la rugosidad de la superficie como en las microestructuras subsuperficial para alcanzar el estado de funcionamiento estable. Inicialmente, el material de la superficie puede estresarse más allá de su límite elástico, causando cierta deformación plástica. A medida que se produce un contacto de rodadura repetido, finalmente puede alcanzarse una condición en la que no se produce ninguna deformación plástica adicional. Este proceso se llama shakedown y ha sido analizado en detalle por Johnson [11].

Los procesos de RCF y RCW generalmente implican los siguientes pasos:

- 1. Acumulación de dislocaciones causadas por estrés repetitivo de la microestructura subsuperficial; una estructura de celda de dislocación puede formarse.
- 2. Nucleación de huecos o micro grietas en regiones de estrés hertziano máximo o discontinuidades cercanas en la microestructura, como límites de grano, porosidad preexistente o interfaces de inclusión / matriz.
- 3. Propagación de micro grietas en el subsuelo.
- 4. Enlace de las grietas y movimiento de la punta de la grieta hacia la superficie libre.
- 5. Creación de escamas, hoyos y/o cascaras.
- 6. Extensión del daño a porciones contiguas de la superficie.
- 7. Iniciación de grietas de fatiga mayores por defectos superficiales o subsuperficiales, a veces causando fracturas catastróficas

Con frecuencia, se considera que un componente de rodamiento o rodamiento ha "fallado" en la primera aparición de una rotura (paso 5). En algunos sistemas, RCW pasará desapercibido hasta el paso 7. Como se mencionó anteriormente, los lubricantes pueden acelerar el paso 3 ayudando a que se abran las grietas de cuña. La industria de los rodamientos cerámicos ha realizado una importante inversión en el desarrollo de materiales para mejorar la resistencia a la fractura de sus materiales y reducir la propensión a fallas catastróficas. Los materiales compuestos se están considerando porque contienen tapones internos de grietas o interfaces internas de disipación de energía con ramificación de grietas [7].

Los procesos de daños asociados se derivan del movimiento de las partículas de desgaste desprendidas de la superficie de elementos rodantes fatigados o sus contracaras. Las partículas pueden incrustarse en las superficies de los rodillos, marcar las superficies de acoplamiento o actuar como abrasivos de terceros cuerpos para alterar la rugosidad de la superficie y, por lo tanto, las características de flujo del lubricante en la interfaz [2].

4 Fricción, Lubricación y Desgaste de Engranajes

En este capítulo se abordarán las fallas que respectan a los engranajes dentados debido a la fricción, la lubricación y el desgaste. Las picaduras o desgaste pueden hacer que los dientes del engranaje se deterioren y generen fuerzas dinámicas, que a su vez causan que los dientes del engranaje fallen al superponerse la fatiga. En estos casos, la falla de flexión es secundaria y no está directamente relacionada con la lubricación, mientras que las picaduras o desgaste, son los modos de falla principales, y ambos están directamente influenciados por la lubricación. El diseñador que tiene como función analizar las fallas, debe diferenciar entre los modos de falla primarios y secundarios porque es probable que la acción correctiva no apropiada sea diagnosticada si un modo de falla secundario se confunde con el modo de falla primaria. Por ejemplo, aumentar el tamaño de los dientes del engranaje para evitar la frecuente falla de flexión mencionada anteriormente, dicha acción correcta inapropiada solo empeorarían la situación al bajar la resistencia a picaduras y raspado [2].

4.1. Fatiga Hertziana

Las picaduras y micropicaduras son dos modos de falla en los dientes de engranajes relacionados con la lubricación y que son causados por la fatiga hertziana. Las picaduras son un modo de falla común para los dientes de los engranajes porque están sujetos a altos esfuerzos de contacto hertzianos y a muchos ciclos de tensión. Por ejemplo, los engranajes endurecidos a fondo están diseñados típicamente para soportar tensiones de aproximadamente 700 MPa (100 ksi), mientras que las tensiones de contacto en engranajes pueden alcanzar 2100 MPa (300 ksi). Además, un diente en un piñón que gira a 3600 rev/min acumula más de 5×10^6 ciclos de esfuerzo cada 24 h [7].

4.2. Picadura

Las picaduras son un fenómeno de la fatiga que tiene incidencia cuando se inicia una fisura en la superficie del diente del engranaje o a una pequeña profundidad debajo de la superficie. La grieta generalmente se propaga por una corta distancia en una dirección más o menos paralela a la superficie del diente antes de pasar en distintas direcciones desde el punto donde

se manifestó a la superficie (ramificarse). Cuando las grietas han crecido en la medida en que separan una parte del material de la superficie, se forma un hoyo. Si varios hoyos crecen juntos, el pozo más grande resultante a menudo se conoce como cascajo.” No existe un límite de resistencia para la fatiga hertziana, y se producen picaduras incluso con poco estrés o tensión si se utilizan durante mucho tiempo. Debido a que no hay límite de resistencia, los dientes del engranaje deben diseñarse para una vida útil finita adecuada. Para extender la vida útil de las picaduras de un conjunto de engranajes, el diseñador debe mantener baja la tensión de contacto, la resistencia del material y espesor de la película específica del lubricante. Hay algunas variables geométricas, como el diámetro, el ancho de la cara, el número de dientes, ángulo de presión, etc., que se pueden optimizar para reducir el estrés o tensión por contacto. Las aleaciones de materiales y el tratamiento térmico son seleccionados para obtener superficies de dientes duros con alta resistencia. La resistencia máxima a las picaduras se obtiene con dientes cementados porque tienen superficies duras, y la carburación induce tensiones residuales compresivas beneficiosas que efectivamente disminuyen las tensiones de carga. Los inconvenientes de usar dientes de engranajes carburizados es que son relativamente caros de producir [5].

Las recomendaciones generales son utilizar un suministro adecuado de lubricante frío, limpio y seco que tenga una viscosidad adecuada y un coeficiente de alta presión-viscosidad. Las picaduras pueden iniciarse en la superficie o en su defecto subsuperficie. En los dientes del engranaje, los hoyos suelen ser en la superficie porque el grosor de la película de lubricante suele ser bajo, lo que produce un contacto metal-metal relativamente alto. La interacción entre asperezas o contactos en defectos, como mellas o surcos, crea inicialmente grietas en la superficie, en lugar de iniciarse en la subsuperficie. Para engranajes de alta velocidad con acabados de superficie lisos, el espesor de la película es mayor y pueden predominar las picaduras iniciadas por debajo de la superficie, en lugar de iniciar en la superficie. En estos casos, las picaduras generalmente comienzan en una inclusión subsuperficial, que actúa como un punto de concentración de estrés o tensión. Los aceros más limpios, como los producidos por fusión en vacío, prolongan la vida útil de las picaduras al reducir el número de inclusiones metálicas [3].

Se cree que la contaminación del agua en el lubricante promueve las picaduras debido a la fragilización del metal por el hidrógeno, y las partículas abrasivas en el lubricante causan picaduras al aplicar indentaciones en las superficies del diente, causando concentraciones de tensión y alterando la película del lubricante. En la actualidad, la influencia de los aditivos de lubricantes en las picaduras no está resuelta. Las siguientes recomendaciones sirven como pautas para prevenir la aparición de picaduras en conjuntos de engranajes [1]:

- Reduzca las tensiones de contacto al reducir cargas u optimizar la geometría del engranaje.

- Use acero limpio, tratado térmicamente de manera adecuada para una alta dureza, preferiblemente mediante cementación.
- Use superficies dentadas lisas producidas por un esmerilado o rectificado cuidadoso.
- Use una cantidad adecuada de lubricante fresco, limpio, seco y de viscosidad adecuada.

4.3. Micropicadura

En superficies de dientes de engranaje relativamente suaves, como las de engranajes endurecidos a fondo, la fatiga hertziana forma hoyos grandes con dimensiones del orden de milímetros. Con los engranajes endurecidos en superficie (por ejemplo, carburizados, nitrurados, endurecidos por inducción y endurecidos a llama), las picaduras pueden ocurrir a una escala mucho más pequeña, normalmente de solo 10 micras (400 micras de pulgadas) de profundidad. A simple vista, las áreas donde ha ocurrido la micropicadura aparecen heladas, y "frosting,"^{es} un término popular para la micropicadura. Se han referido al modo de falla como "manchado gris" porque las propiedades de dispersión de la luz de la micropicadura dan a los dientes del engranaje una apariencia gris. Con el microscopio electrónico de barrido (SEM), es inmediatamente evidente que el micropicadura procede por el mismo proceso de fatiga que la picadura clásica, a excepción que los hoyos son extremadamente pequeños. En muchos casos, la micropicadura no es destructiva para la superficie del diente del engranaje. A veces ocurre solo en parches y puede detenerse después de que las condiciones tribológicas hayan sido mejoradas al momento adecuado. Los micro-hoyos pueden en realidad eliminarse mediante un ligero desgaste de pulido durante el rodaje inicial, en cuyo caso se dice que la micropicadura se puede reparar. Aunque en algunos casos estas micropicaduras se manifiestan en gran escala convirtiéndose en picadura que le generan grandes daños a los dientes [2].

El grosor específico de la película es el parámetro más importante que influye en el micropicadura. El daño parece ocurrir más fácilmente en los dientes del engranaje con superficies rugosas, especialmente cuando están lubricados con lubricantes de baja viscosidad. Los engranajes terminados con muelas abrasivas especiales hasta un acabado similar a un espejo han eliminado efectivamente la micropicadura. Los engranajes de baja velocidad son propensos a micropicadura porque su espesor de película es bajo.

Para evitar el micropicadura, el grosor específico de la película debe maximizarse mediante el uso de superficies dentadas lisas, lubricantes de alta viscosidad y altas velocidades. Los experimentos han demostrado que los engranajes endurecidos a llama y endurecidos por inducción tienen menos resistencia a la micropicadura que los engranajes carburizados de la misma dureza. Esto es probablemente debido al menor contenido de carbono de las capas superficiales de los engranajes endurecidos por la llama y endurecidos por inducción [7].

Las siguientes recomendaciones sirven de guía para prevenir la aparición de micropicaduras en el conjunto de engranajes:

- Use superficies dentadas lisas producidas por un esmerilado o rectificado cuidadoso.
- Use una cantidad adecuada de lubricante fresco, limpio y seco de la mayor viscosidad permisible.
- Usar altas velocidades si es posible.
- Utilice acero carburado con el contenido de carbono adecuado en las capas superficiales.

4.4. Desgaste

Los juegos de engranajes son susceptibles al desgaste causado por la adhesión, la abrasión y el pulido.

4.4.1. Abrasión

El desgaste abrasivo en los dientes del engranaje generalmente es causado por la contaminación del lubricante por partículas duras de bordes filosos. La contaminación entra en las cajas de engranajes al ser puesta en marcha, por partículas generadas internamente, a través de respiraderos y sellos, o debido a una mala manipulación a través de los mantenimientos.

Muchos fabricantes de engranajes no aprecian por completo la importancia del ensamblaje limpio; no es raro encontrar arena, virutas de maquinado, polvo de lijado, salpicadura de soldadura u otros desechos en cajas de engranajes nuevas. Para eliminar la contaminación agregada externamente, el lubricante de la caja de cambios debe drenarse y enjuagarse antes de la puesta en marcha y nuevamente después de las primeras 50 h de operación, rellenarse con el lubricante recomendado, y se debe instalar un nuevo filtro de aceite [7].

Las partículas generadas internamente generalmente son restos de desgaste de engranajes o cojinetes debido a picaduras de fatiga hertziana o desgaste adhesivo y abrasivo. Las partículas de desgaste son especialmente abrasivas porque se endurecen cuando quedan atrapadas entre los dientes del engranaje. Los desechos de desgaste generados internamente se pueden minimizar utilizando dientes de engranajes endurecidos en superficie (con alta resistencia a las picaduras), superficies lisas y lubricantes de alta viscosidad.

Los respiraderos se usan en cajas de engranajes para ventilar la presión interna, que puede ocurrir cuando el aire ingresa a través de sellos, o cuando el aire dentro de la caja de engranajes se expande (o contrae) durante el calentamiento y enfriamiento normal de la unidad de

engranajes. La ventilación del respiradero debe ubicarse en un área limpia, sin presión y debe tener un filtro para evitar la entrada de contaminantes en el aire. En entornos especialmente duros, la caja de engranajes puede sellarse completamente, y la variación de presión puede ser acomodada por una cámara de expansión con un diafragma flexible [4].

Todos los procedimientos de mantenimiento que involucran la apertura de cualquier parte de la caja de engranajes o sistema de lubricación se deben realizar cuidadosamente para evitar la contaminación del sistema de la caja de cambios.

El desgaste abrasivo debido a contaminantes extraños, como arena o desechos de desgaste generados internamente, se denomina abrasión de tres cuerpos y ocurre frecuentemente. La abrasión de dos cuerpos también ocurre cuando las partículas duras o asperezas en un diente de engranaje desgastan la superficie opuesta del diente. A menos que las superficies de los dientes de un engranaje endurecido en la superficie estén suavemente terminadas, actuarán como limas si el engranaje de secundario tiene una terminación mucho más detallada. Esta es la razón por la que un piñón helicoidal se pule después de la molienda antes de que se ejecute con una rueda de gusano de bronce. Los fabricantes de unidades de disco de computadora han descubierto que los piñones de acero inoxidable acoplados con bastidores de aluminio anodizado tienen tasas de desgaste excesivamente altas. La capa anodizada del estante de aluminio es extremadamente delgada y quebradiza, y se rompe e impregna el piñón de acero inoxidable relativamente blando. Las partículas de óxido de aluminio actúan como papel de lija y desgastan los dientes del piñón muy rápidamente [6].

El sistema de lubricación debe mantenerse y supervisarse cuidadosamente para garantizar que los engranajes reciban una cantidad adecuada de lubricante fresco, limpio y seco. Para los sistemas de circulación de aceite, la filtración fina elimina la contaminación. Filtros tan finos como $3 \mu\text{m}$ ($120 \mu\text{in}$) han aumentado significativamente la vida útil del engranaje. Para cajas de engranajes de baño de aceite, el lubricante debe cambiarse frecuentemente para eliminar la contaminación. En condiciones de funcionamiento normales, el lubricante debe cambiarse al menos cada 2500 h de operación o cada seis meses, lo que ocurra primero. Para cajas de engranajes críticas, un programa regular de monitoreo de lubricantes puede ayudar a prevenir fallas de engranajes al mostrar cuándo se requiere mantenimiento. El monitoreo del lubricante debe incluir análisis espectrográfico y ferrográfico de la contaminación, junto con el análisis del índice de acidez, la viscosidad y el contenido de agua [7].

En resumen, se deben observar las siguientes pautas para evitar el desgaste abrasivo en los conjuntos de engranajes:

- Elimine la contaminación ingresada de las nuevas cajas de engranajes drenando y enjuagando el lubricante antes del arranque y nuevamente después de las primeras 50 h de operación. Rellene con el lubricante recomendado e instale un nuevo filtro.

- Reduzca al mínimo las partículas de desgaste generadas internamente mediante el uso de dientes de engranajes endurecidos en superficie, superficies lisas de los dientes y lubricantes de alta viscosidad.
- Minimice la contaminación ingerida mediante el mantenimiento de sellos herméticos y el uso de filtros ubicados en áreas limpias, no presurizadas.
- Minimice la contaminación que se agrega durante el mantenimiento mediante el uso de buenos procedimientos de limpieza.
- Para sistemas de circulación de aceite, use filtración fina.
- Para sistemas de baño de aceite, cambie el lubricante al menos cada 2500 h o cada seis meses.
- Controle el lubricante con análisis espectrográfico y ferrográfico junto con el análisis del índice de acidez, la viscosidad y el contenido de agua.

4.5. Desgaste de pulido

Si los aditivos antidesgaste de extrema presión (EP) en el lubricante son demasiado reactivos químicamente, pueden causar el pulido de las superficies de los dientes del engranaje hasta que alcancen un acabado brillante. Aunque los dientes del engranaje pulidos pueden verse bien, el desgaste del pulido es indeseable porque generalmente reduce la precisión del engranaje al desgastar los perfiles del diente cambiando la geometría de diseño que sería lo ideal.

El desgaste del pulido se puede prevenir mediante el uso de menos aditivos químicamente activos. Como alternativa a los aditivos de azufre y fósforo, los lubricantes antidesgaste están disponibles con dispersiones de borato de potasio que depositan películas EP sin reaccionar químicamente con el metal. Es útil eliminar los abrasivos en el lubricante usando una filtración fina o cambios de aceite frecuentes.

En resumen, se deben observar las siguientes pautas para evitar el desgaste de pulido en el conjunto de engranajes [7]:

- Usar menos aditivos antiespumantes químicamente activos (por ejemplo, borato).
- Elimine los abrasivos del lubricante mediante filtración fina o cambios frecuentes de aceite.

4.5.1. Rallado

El desgaste se define como el daño causado por la unión de dos superficies sólidas deslizantes. Va acompañado de la transferencia de metal de una superficie a otra debido a la unión. Puede ocurrir en cualquier deslizamiento y contacto rodante donde la película de aceite no es lo suficientemente gruesa como para separar las superficies. Los síntomas de rallado son microscópicamente superficies ásperas. El análisis de superficie que muestra la transferencia de metal de una superficie a otra es una prueba de raspado. Se pueden producir marcas en los dientes de los engranajes cuando operan en el régimen de lubricación límite. Si la película lubricante es insuficiente para evitar el contacto significativo de metal con metal, las capas de óxido que normalmente protegen las superficies de los dientes del engranaje pueden romperse, y las superficies de metal desnudas pueden unir los engranajes. El deslizamiento que ocurre entre los dientes del engranaje resulta en desgarramiento de las uniones, la transferencia de metal y finalmente en un daño absoluto del engranaje.

A diferencia de la fatiga por picado y flexión, que solo ocurre después de un período de tiempo de funcionamiento, el rallado puede producirse inmediatamente después de poner en uso el engranaje. De hecho, los engranajes son más vulnerables a las raspaduras o rallado cuando son nuevos y sus superficies de los dientes del engranaje aún no han sido suavizadas por el uso. Por esta razón, es aconsejable colocar los engranajes (cuando estén nuevos) a mitad de carga/marcha durante al menos 10 h para reducir la rugosidad de la superficie de los dientes antes de aplicar la carga/marcha completa. Los dientes del engranaje se pueden recubrir con hierro manganeso fosfato o chapado con cobre o plata para protegerlos de raspaduras o rallado durante el período crítico que es el nombrado anteriormente [15].

El mecanismo básico de rallado no se puede entender o aclarar de forma natural o evidente, sin embargo, se considera que es causado por un alto calentamiento por fricción generado por la combinación de una alta velocidad de deslizamiento y una fuerte presión superficial. La teoría de la temperatura crítica de Blok se cree que es el mejor criterio para predecir raspados o rallados. Establece que puede producir las raspaduras en los dientes del engranaje que se deslizan bajo las condiciones de lubricación limitada cuando la temperatura máxima de contacto de los dientes del engranaje alcanza una magnitud crítica. Para los aceites minerales sin aditivos de EP, cada combinación de aceite y materiales de fricción tiene una temperatura de trabajo crítica que es constante, independientemente de las condiciones de operación. Las temperaturas de desgaste no son constantes para los lubricantes tradicionales y lubricantes sintéticos con aditivos anti desgaste; ellos deben ser seleccionados de manera tal que las condiciones de funcionamiento de los engranajes no varíen en función del aceite/lubricante [7].

Las películas antidesgaste ayudan a prevenir las raspaduras formando películas sólidas en

las superficies de los dientes del engranaje e inhibiendo el verdadero contacto de metal con metal. Las películas de sulfuro de hierro y el fosfato de hierro tiene puntos de fusión altos, lo que les permite permanecer como sólidos en las superficies de los dientes del engranaje, incluso con un alto contacto temperaturas la velocidad de reacción de los aditivos antidesgaste es mayor cuando las temperaturas de contacto del diente del engranaje es más alto debido a la acción de fricción de los dientes del engranaje, las películas de superficie se raspan y se reforman repetidamente. En efecto, el desgaste se evita al sustituir la corrosión leve en su lugar. Para los aceites minerales sin aditivos antidesgaste, la temperatura crítica de desgaste aumenta con el aumento de la viscosidad y oscila entre 150 y 300°C (300 a 570°F). Se cree que la mayor resistencia al rayado de los lubricantes de alta viscosidad es debido a diferencias en la composición química en lugar de aumentos en la viscosidad. Sin embargo, un aumento de la viscosidad también ayuda a que reduzca el riesgo de raspado al aumentar el espesor de la película de lubricante y reducir la temperatura de contacto generada por el contacto de metal con metal.

Los materiales de los engranajes se deben elegir teniendo en cuenta su resistencia al rayado. Los aceros nitrurados, como el Nitralloy 135M, generalmente tienen la mayor resistencia al desgaste, mientras que los aceros inoxidable son propensos a desgastarse incluso bajo cargas cercanas a cero. La delgada capa de óxido en el acero inoxidable es dura y quebradiza y se rompe fácilmente bajo cargas de deslizamiento, exponiendo el metal sin capa de óxido y promoviendo así las raspaduras. Al igual que el acero inoxidable, el aluminio anodizado tiene una baja resistencia al rayado. La dureza no parece ser una indicación confiable de resistencia al rayado. En resumen, se deben observar las siguientes pautas para evitar raspaduras en el conjunto de engranajes [7]:

- Use lubricantes de alta viscosidad con aditivos anti suciedad, como azufre, fósforo o borato.
- Enfríe los dientes del engranaje suministrando una cantidad adecuada de lubricante frío.
- Para sistemas de circulación de aceite, use un intercambiador de calor para enfriar el lubricante.
- Optimizar la geometría de los dientes del engranaje mediante el uso de dientes pequeños, y la modificación del perfil.
- Use dientes de engranaje precisos, montajes de engranajes rígidos y buena alineación helicoidal Use aceros nitrurados para una máxima resistencia al rayado.
- No use acero inoxidable o aluminio para engranajes ya que existe el riesgo de desgaste.

4.6. Lubricación elastohidrodinámica

Los dientes de un engranaje están sometidos a enormes presiones de contacto del orden de la máxima resistencia a la tracción del acero endurecido, aunque se lubrican satisfactoriamente con películas de aceite de $<1 \mu\text{m}$ ($<40 \mu\text{in}$) de grosor. Esto es posible porque los lubricantes tienen una propiedad que hace que su viscosidad aumente dramáticamente con el aumento de la presión. La adsorción molecular del lubricante en las superficies de los dientes del engranaje hace que sea arrastrado a la región de entrada del contacto, donde su presión aumenta debido a la geometría convergente de las superficies del diente. El aumento de viscosidad del lubricante causado por la presión creciente ayuda a desplazar el lubricante a la zona de contacto. Una vez que está dentro de la región hertziana a alta presión del contacto, el lubricante no puede escapar porque su viscosidad se ha incrementado en la medida en que el lubricante es prácticamente un sólido rígido lo cual se asume en esta condición debido a que el fluido ya no es compresible en mayor medida y se comporta de tal manera.

4.6.1. Selección de lubricante

La elección del lubricante depende del tipo de engranaje, velocidad, carga de operación, temperatura ambiente y método de aplicación de lubricante.

El aceite es el lubricante más utilizado porque se distribuye fácilmente a engranajes, cojinetes y tiene buenas propiedades de enfriamiento. Además, la contaminación puede eliminarse fácilmente filtrando periódicamente o drenando y reemplazando el aceite, sin embargo, requiere un recinto hermético provisto de sellos adecuados para así garantizar la hermeticidad. Los lubricantes sintéticos se utilizan para aplicaciones (por ejemplo, turbinas de gas de aeronaves) donde el aceite debe operar sobre un amplio rango de temperatura y buena estabilidad a la oxidación a alta temperatura. Lubricantes sintéticos de éster e hidrocarburos tienen índices de alta viscosidad, lo que les da una buena fluidez o baja viscosidad a temperaturas muy bajas y aceptable viscosidad a altas temperaturas. La volatilidad de los ésteres es menor que la de los aceites minerales de la misma viscosidad, por lo tanto reduciendo la pérdida de aceite a alta temperatura. A pesar de su larga vida útil, el costo adicional de los lubricantes sintéticos generalmente no puede estar justificado para los sistemas de baño de aceite a menos que existan temperaturas extremas, porque el aceite debe cambiarse con frecuencia para eliminar la contaminación.

La grasa es adecuada solo para aplicaciones de baja velocidad y baja carga porque no circula bien, y es relativamente pobre refrigerante. Los engranajes lubricados con grasa generalmente están lubricados en el límite porque la grasa se aparta o se tira de los dientes del engranaje. La contaminación por partículas de desgaste u otros desechos generalmente queda atrapada

en la grasa y requiere un costoso mantenimiento para retirar el exceso, limpiar y proceder con la aplicación de nueva grasa. Se usa a menudo para evitar fugas de recintos que no son herméticos a diferencia del aceite. Sin embargo, si todos estos factores se consideran, generalmente se encuentra que un lubricante de aceite es más económico y confiable que un lubricante de grasa para el caso de engranajes [7].

5 Procedimiento de análisis

5.1. Inspección Visual

Dentro del contexto del análisis de fallas, es de vital importancia que el desarrollo de la inspección visual se haga de manera detenida y detallada, ya que de esta inspección se obtendrá la información necesaria para la deducción del tipo de falla a la que se vio sometida la pieza analizada, con la elaboración de esta inspección se obtendrán datos acerca de la fabricación, instalación y del uso dado a la pieza. Al someter el piñón a una inspección visual, se puede ver a una primera vista que el piñón tiene muchas picaduras debido al desgaste en cada uno de sus dientes, lo que indica la presencia de varios tipos de desgaste en él.

Cabe aclarar que el desgaste va ligado a la lubricación suministrada a la pieza, lo que indica una posible deficiencia en el sistema de lubricación de la caja de cambios, además de que las picaduras sobre las superficies del diente, con el paso del trabajo se convierten en las grietas que inician la fatiga. En la zona donde fallo el diente del piñón se puede observar claramente la zona de propagación de la grieta y la zona de fractura súbita del diente.

Una vez realizada la inspección visual al piñón, se pudo deducir que el piñón había sufrido mucho desgaste en los dientes, esto se podría deber a un sobrepaso en su vida útil o a las malas condiciones de trabajo al que fue expuesto, como por ejemplo, la mala lubricación del sistema, además de determinar que la fractura en el diente se debía a una falla por fatiga, y que esta fatiga se inicia con las picaduras debido a los diferentes tipos de desgaste a los que está sometido el piñón, lo que luego se convertiría en la grieta que inicia la fatiga en el diente.



Figura 5-1: a) Lijas con sus distintos tamaños de grano. b). Banco de lijado. c). Dispositivo para el desbaste. d). Dispositivo para dar brillo espejo a la superficie. e). Microscopio óptico. f). Durómetro Rockwell.

5.2. Análisis metalográfico

En el análisis de falla se debe realizar un contraste entre la teoría y la práctica, para lo cual se analizará y describirá una prueba que ha sido una herramienta fundamental de la metalurgia, para desarrollos científicos experimentales o revisar la calidad del material, llamado micro-ataque, realizándole varios procesos a pieza como el pulido a espejo, que consiste en realizar desbaste grueso, desbaste fino y brillo a espejo con paño de pulido, luego, se realiza un ataque con ácido nítrico (nital, para finalmente hacer una inspección en el microscopio de la estructura del material para posteriormente determinar su posible falla.

El desarrollo de prueba de micro-ataque al piñón, tiene como finalidad determinar el caso de falla en la aleación de aceros empleados en los procesos de manufactura del piñón de la caja de cambios de una motocicleta. Para este fin se requiere que se cumplan a cabalidad las siguientes operaciones:

- a) Realizar un correcto corte metalográfico a las secciones transversales del piñón, dejando las superficies listas para el proceso de pulido de la parte del piñón a analizar.
- b) Emplear una buena técnica en el pulido de la superficie donde se va a atacar el piñón.
- c) Preparar el nital con sus debidas concentraciones de alcohol etílico y ácido nítrico.
- d) Atacar la superficie del piñón donde se va a observar la microestructura del acero.
- e) Usando el microscopio observar la microestructura de la superficie atacada.

- f) Determinar el tipo de acero implementado en los procesos productivos del piñón.
- g) Analizar el caso de falla presentado en el piñón.

En el transcurso de la evolución de los aceros, los análisis metalográficos se convirtieron en una herramienta fundamental para determinar las características estructurales presentadas por los materiales, tales como la estructura que forma el grano, el tipo de tratamiento térmico usado en el acero, la calidad de soldadura empleada en una junta entre otras características que presenta el acero. Generalmente realizar un análisis metalográfico brinda la información necesaria del acero para poder determinar un posible caso de falla presentado por la pieza analizada. Para el desarrollo de la prueba de micro ataque, se propuso el siguiente marco teórico:

- a) Análisis metalográfico: es un análisis que se desarrolla para, identificar las características estructurales de del acero como el tipo de tratamiento térmico usado, el tamaño del grano, conteo de fases etc. Esta información que suministra el análisis usualmente es usada para observar un eventual caso de falla de alguna aleación de aceros.
- b) Micro ataque: El micro ataque es una prueba metalográfica que usa un microscopio para ver las características de la microestructura de un material. Esta prueba se realiza siguiendo un debido procedimiento de preparación de las superficies, que va desde el corte hasta el análisis de la información obtenida del acero que se va a observar en el microscopio, uno de los resultados de este análisis, es poder identificar el caso de falla presentada en el material, también se puede usar en los sistemas de control de calidad en la producción de aceros entre otras funciones.
- c) Análisis de falla: El análisis de falla se emplea para poder determinar el posible caso de falla de una pieza sometida a distintas cargas y demás variables dentro de su entorno de trabajo, lo que probablemente finaliza en la fractura y daño de la pieza.

La prueba del micro ataque se realizó en el laboratorio 403 de la sede caldas de la Fundación universitaria los libertadores utilizando los siguientes materiales y equipos:

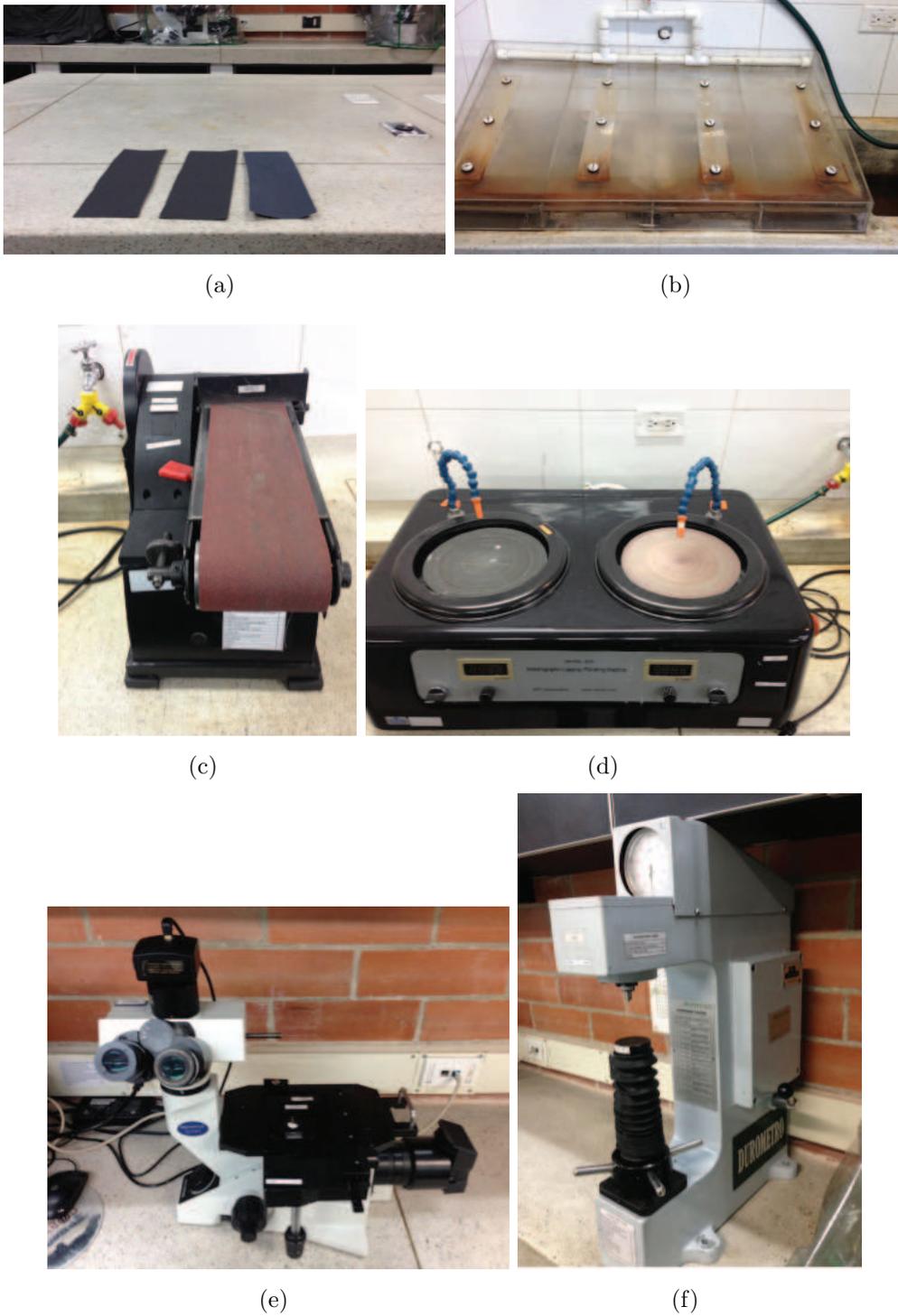


Figura 5-2: a) Lijas con sus distintos tamaños de grano. b). Banco de lijado. c). Dispositivo para el desbaste. d). Dispositivo para dar brillo espejo a la superficie. e). Microscopio óptico. f). Durómetro Rockwell.

5.2.1. Procedimiento realizado

Durante la prueba de micro-ataque es de vital importancia que los diferentes procesos de pulido de la superficie de la pieza, sean llevados a cabo de la manera más correcta y perfecta posible, esto con el fin de que en dicha superficie no se evidencien rayas que interfieran con la visualización de la micro-estructura del piñón en el microscopio y así poder dar un dictamen más certero acerca de la posible aleación de la que está compuesto el piñón, para garantizar que la prueba de micro-ataque se realizara buscando lo anteriormente mencionado se desarrolló el siguiente montaje para la prueba:

- a). Corte metalográfico En esta parte de la prueba se realiza un corte en la sección transversal al piñón, preparando así la superficie a ser analizada (Figura 5-3-a).



Figura 5-3: a) Corte metalográfico hecho al piñón. b). Prueba de dureza Rockwell tipo C aplicada al piñón.

El Pulido es la una parte de la prueba de micro-ataque donde se realiza la preparación en sí de la superficie que va a ser atacada con el ácido nítrico, esta parte se desarrolla en tres pasos:

- a). Desbaste: El desbaste se ejecuta luego de realizar el corte metalográfico, con este se busca eliminar las imperfecciones más grandes sobre la superficie a analizar, para este procedimiento se utiliza el dispositivo de desbaste que se encuentra en el laboratorio, en el se encuentra montada una tira de lija del grano grueso.
- Pulido fino: El pulido fino de la superficie se desarrolla mediante lijado manual al igual que el paso de desbaste, pero implementando lijas de grano mucho más fino, como las lijas 80, 100, 320, 400, 600 y 1000.
- Brillo espejo: Para el paso final de la preparación de la superficie antes de realizar el ataque con el ácido, se hace necesario el uso de un paño de terciopelo y un fluido abrasivo llamado alúmina, en este paso se quiere borrar cualquier tipo de raya dejada

por los anteriores pasos del pulido, y así asegurar una superficie limpia para observarla en el microscopio.

Para el ataque a la superficie con el ácido nítrico se debe, en primera parte, preparar el reactivo que reaccionara con la superficie a la que se le realizó la debida preparación, este reactivo llamado Nital que está compuesto con 98 % de alcohol etílico y 2 % de ácido nítrico, con estos porcentajes en la composición del reactivo se garantizara que la superficie quede bien atacada y no se queme, en segunda parte se procede a aplicar la preparación del Nital en la superficie a analizar, por último en el paso del ataque se debe limpiar bien la superficie. La inspección de la superficie en el microscopio y análisis es donde se observa la superficie atacada con el nital en el microscopio, se realiza la visualización empleando diferentes lentes de aumento, dentro de la prueba se usaron lentes de 100x, 200x, 500x y 1000x, esto para luego tomar las fotografías a diferentes aumentos, todo esto para lograr identificar las concentraciones de hierro-carbono en el acero del piñón y lograr dar un veredicto aproximado acerca de la aleación empleada en el piñón y de los posibles tratamientos térmicos a los que pudo ser sometido el acero empleado en el proceso de producción del piñón.

Para complementar la información suministrada por la prueba de micro-ataque, se realizó un ensayo de dureza Rockwell-C (Figura 5-3-b) al acero del piñón, dando como resultado una dureza HRC de 53, valores que evidencian la acción de los tratamientos térmicos en el acero 4140. La Tabla 5-4 muestra los valores de las durezas medidas en la cara frontal del engranaje, adicionalmente, se muestra la desviación estándar de las mediciones realizadas.

		Desviación estandar	
		x	(x-media) ²
		48	25
		54	1
		56	9
		54	1
		Sumatoria (distancia ala media al cuadrado)	36
		Desviación estandar	3
		Datos en HRC	
# de pruebas	Dureza HRC		
1	48		
2	54		
3	56		
4	54		
Promedio	53		

(a)

(b)

Figura 5-4: a) Mediciones de dureza realizadas b). Cálculo de la desviación estándar de las mediciones de dureza.

5.3. Análisis microestructural

Luego de obtener las fotografías de la visualización en el microscopio de la superficie del piñón debidamente preparada y atacada, esto realizado usando diferentes lentes de aumento, se pudo determinar la composición de acero aleado del que fue hecho el piñón, siendo este

un acero 4140 con un tratamiento térmico bonificado de templado y revenido, que busca mejorar la dureza del acero luego del proceso de temple. Se llega a esta deducción luego de observar las imágenes de la estructura del grano del acero, mostrando esta imagen, las colonias o matriz ferrítica del acero, y concordando con una aproximación a la estructura del grano del acero 4140 con los tratamientos térmicos mencionados. A continuación, se mostrará las imágenes de la estructura del grano del material del piñón usando diferentes lentes de aproximación montados en el microscopio del laboratorio.

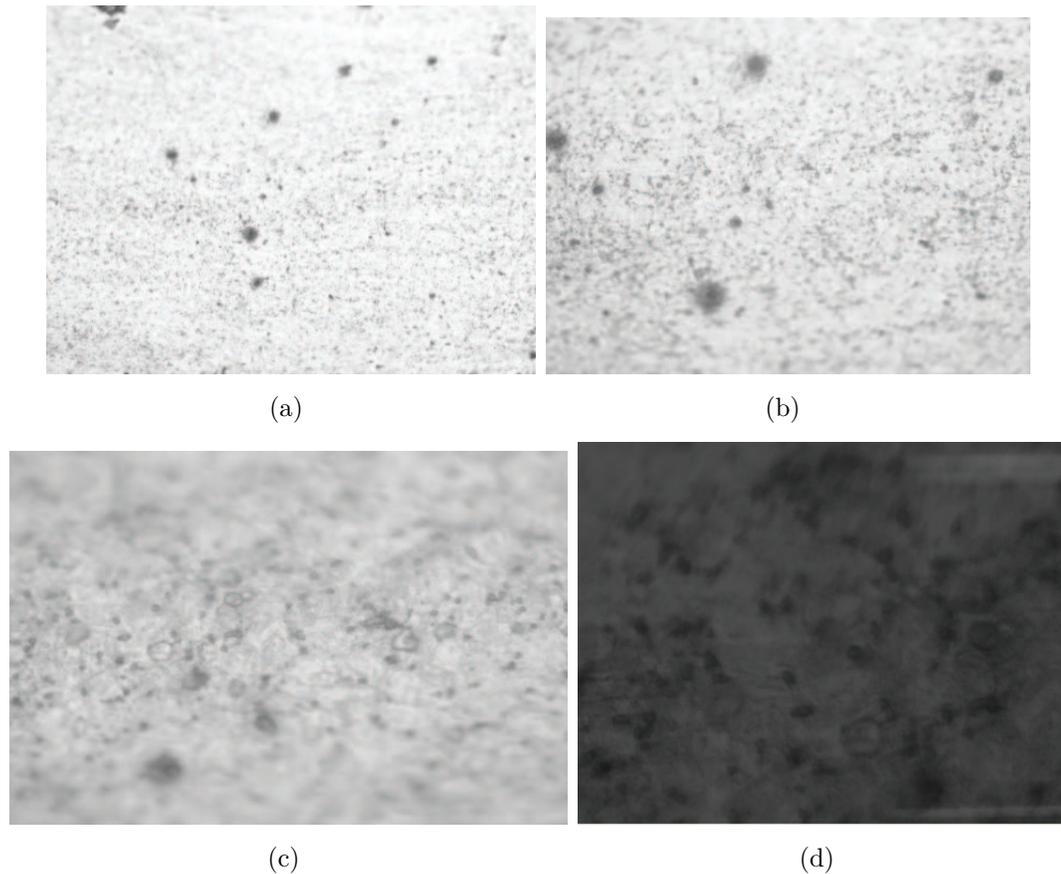


Figura 5-5: a) Microestructura del acero del piñón observada con un lente de 100X. b). 200X. c). 500X. d). 1000X.

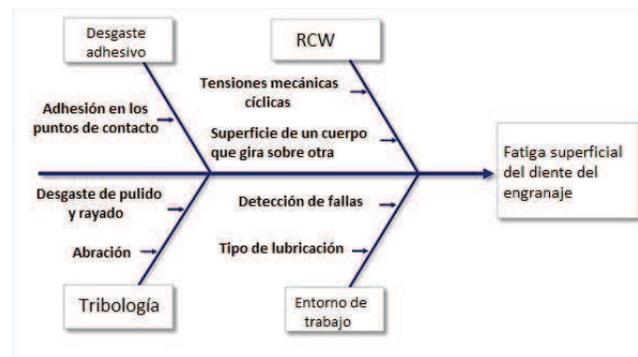
5.4. Análisis de Falla

Basados en el proceso donde el análisis se realizó a partir de la bibliografía y las pruebas de laboratorio se encontraron que los mecanismos de falla son, el desgaste adhesivo como primer factor, que consiste en unión/adhesión de dos superficies las cuales contribuyen al desgaste en consecuencia de la resistencia que opone al movimiento dicho mecanismo que afecta el engranaje. Como segundo factor está el desgaste que sufre el elemento debido al contacto

rodante, el cual se produce por la tensión mecánica entre la superficie de un elemento que gira sobre otra; esta es la causa que más afectan a un conjunto de engranajes, porque a partir de este desgaste se generan "micropicaduras", posteriormente las grietas y ocurre la fractura de la pieza. Finalmente, un factor que involucra, en general, cualquier tipo de desgaste en un sentido de prevención para evitar los mecanismos nombrados anteriormente y otras (la fricción), es necesario tener en cuenta la tribología. Específicamente el uso correcto del lubricante ayuda a largar la vida de cualquier elemento que se encuentre bajo condiciones de desgaste, lo cual también pudo haber afectado la vida útil del piñón y fracturarse.

5.5. Análisis de causa raíz

En la Figura 5-6 se muestra el análisis de causa raíz del engranaje estudiado, mediante un diagrama de Ishikawa o de espina de pescado.



(a)

Figura 5-6: a) Diagrama de análisis de causa raíz del engranaje estudiado.

6 Conclusiones

- La ingeniería mecánica en un amplio campo se encarga del análisis, diseño, fabricación y montaje de distintos sistemas que ayudan a la evolución del hombre y la industria mediante la herramienta física y matemática, (porque es allí, en esa frontera donde se mueven los ingenieros mecánicos). Por medio de esa evolución continua esta disciplina de la ingeniería se ha visto en la necesidad de buscar nuevas formas de avanzar y estar en congruencia con la tecnología y las diferentes épocas, por ello, en el caso específico del diseño de elementos como el analizado en este trabajo nace el "análisis de falla" para determinar el porqué de la falla de este y muchos otros dispositivos, partiendo que la industria a demandado cada más más un sistema de componentes más complejos y no es trivial el hecho de reemplazar el dispositivo que falla por uno nuevo. Gracias al surgimiento del tema mencionado, se pueden realizar estudios, que en casos críticos llevan a contemplar una modificación sobre el diseño actual para alargar la vida útil del piñón, en este caso.
- A lo largo del aprendizaje en el proceso de pregrado hemos visto que la rama del diseño es imprescindible en la ingeniería mecánica, y con la realización de esta investigación comprendimos la importancia del análisis de falla, teniendo en cuenta el elemento analizado en este trabajo que es el componente de una máquina, que involucra aspectos económicos los cuales en un futuro y con estudios más detallados, podríamos llegar a inferir sobre un diseño, solucionar y cumplir la función de un ingeniero mecánico sobre esta área.

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] CAMPBELL, F.C.: *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*. ASM International, 2012 (Ingeniería e ingeniería civil). – ISBN 9781615039760
- [4] CANALE, Lauralice de Campos F. ; TOTTEN, George E. ; MESQUITA, Rafael A.: *Failure analysis of heat treated steel components*. ASM international, 2008
- [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] DOWSON, D.: *History of Tribology*. Wiley, 1998. – ISBN 9781860580703
- [10] HERSEY, M.D.: *Theory and research in lubrication: foundations for future developments*. Wiley, 1966 (Foundations for future developments)
- [11] JOHNSON, K.L. ; JOHNSON, K.L.: *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1987. – ISBN 9780521347969
- [12] RAMACHANDRAN, V.: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005
- [13] SCHIJVE, J.: *Fatigue of Structures and Materials*. Springer Netherlands, 2008. – ISBN 9781402068089

- [14] WILSON, Paul F.: *Root cause analysis: A tool for total quality management*. ASQ Quality Press, 1993
- [15] WULPI, Donald J.: *Understanding how components fail*. ASM international, 2013