



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESTUDIO DE FALLA EN DIFERENCIALES DE BUSES
ARTICULADOS PERTENECIENTES A LA EMPRESA
DE TRANSPORTE MASIVO DEL VALLE DE ABURRÁ**

Autor

Leidy Julay Ramírez Garzón

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería de Materiales

Medellín, Colombia

2018

Estudio de Falla en Diferencial de Buses Articulados Pertenecientes a la Empresa de Transporte
Masivo del Valle de Aburrá

Leidy Julay Ramírez Garzón

Informe de práctica
como requisito para optar al título de: Ingeniero de Materiales

Asesores (a)

Edwin Alberto Bedoya Dominguez Ingeniero Electromecánico

Luisa Hernando Rios Henao Ingeniero Electromecánico

Maryory Astrid Gomez Botero Docente Ingeniería de Materiales

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Materiales .
Medellín, Colombia
2018.

*Le doy gracias a dios misericordioso por darme
tanto por darme día con día toda esa fuerza que hace
que mis sueños cada vez estén más cerca y sobre todo
por la paciencia de mi hijo por entender que a veces
no puedo dedicarle tanto tiempo por estar ocupada
luchando por un mejor futuro para los dos.*

*A mi madre gracias por su apoyo en este tiempo de
tanta lucha para finalizar mis estudios que la amo
y admiro por la mujer grandiosa que es.*

*Este trabajo se lo dedico al hombre que me enseñó
que es el verdadero amor Juan José Muñoz
Ramírez mi hijo.*



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que fueron partícipes de manera directa e indirecta de este proyecto, a las personas de los laboratorios tanto externos como internos de la universidad por ayudarme con las pruebas que necesité para este proyecto.

Al personal de mantenimiento de buses de la Empresa de transporte masivo del valle de Aburrá (P2 de mantenimiento y Operadores de patio); por darme tantas enseñanzas, tanto apoyo y sobre todo por tan maravillosa acogida que tuve en Patios Aeropuerto.

Muchas gracias al jefe de departamento Francisco Herrera por ser más que un jefe un padre para sus estudiantes de Ingeniería de Materiales.

Mil gracias a mi asesora la Profesora Mayory Astrid Gómez por aceptar guiarme en este proceso de aprendizaje en el cual ella fue parte muy importante de este logro, por escucharme tantas veces en momentos de angustia y ayudarme a lograr culminar con este trabajo

Al mi coasesor el señor Luis Hernando Ríos por su carisma, por ser un excelente jefe y sobre todo una excelente persona de la cual he aprendido mucho.

A mi asesor Por parte de la empresa Edwin Alberto Bedoya le agradezco por todo lo aprendido durante estos 6 meses de práctica.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 6 |
| INTRODUCCIÓN | 7 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 9 |
| 2. OBJETIVOS | 11 |
| 2.1 Objetivo General | 11 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 11 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 12 |
| 3.1 Ruedas dentadas cónicas hipoidales | 12 |
| 3.1.1 Materiales para engranajes | 14 |
| 3.2 Proceso de Fabricación de Ruedas dentadas o Engranajes. | 16 |
| 3.2.1 Factores que modifican las condiciones de trabajo de un engranaje. | 17 |
| 3.2.2 Desgaste y fallas en dientes de engranajes | 17 |
| 3.3 Tipos de falla de Engranajes. | 18 |
| 3.3.1 Lubricación | 22 |
| 4. METODOLOGÍA | 24 |
| 4.1 Inspección visual | 24 |
| 4.2 Caracterización del material | 24 |
| 4.4 Análisis Metalográfico | 25 |
| 4.5 Microscopia Electrónica de Barrido | 25 |
| 4.6 Ensayo de Dureza | 26 |
| 4.7 Prueba de Viscosidad. | 26 |
| 4.8 Espectroscopia de absorción Infrarroja (FTIR). | 26 |
| 4.9 Difracción de Rayos X | 27 |
| 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 28 |
| 5.1 Espectrometría de emisión óptica | 28 |
| 5.2 Clasificación de los aceros | 29 |
| 5.3 Inspección visual de la falla en los componentes. | 29 |
| 5.4 Inspección visual del lubricante | 33 |
| 5.5 Prueba de viscosidad | 34 |
| 5.6 Prueba con líquidos penetrantes | 35 |
| 5.7 Pruebas metalográficas | 37 |
| 5.8 Microscopía electrónico de Barrido | 41 |
| 5.9 Pruebas tribológicas. | 44 |
| 5.10 Espectrometría infrarroja (FTIR) realizada a los lubricantes. | 45 |
| 5.11 Difracción de rayos X | 47 |
| 5.12. Patrones de contacto de engranajes Arvi Meritor | 49 |
| 5.13 Patrón de contacto en unidades que utilizan diferencial Arvi Meritor. | 50 |



| | |
|--|----|
| 5.14 Patrones de contacto del diente ANSI-AGMA 2005 –D03 | 51 |
| 5.15 Prueba de dureza | 53 |
| 6. CONCLUSIONES | 54 |
| 7. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS. | 57 |
| 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS. | 58 |





ESTUDIO DE FALLA EN DIFERENCIALES DE BUSES ARTICULADOS PERTENECIENTES A LA EMPRESA DE TRANSPORTE MASIVO DEL VALLE DE ABURRÁ

RESUMEN

Para la realización de este proyecto se contó con la colaboración del personal de mantenimiento del área de buses, quienes fueron los encargados de proporcionar el espacio, los automotores solicitados en el estudio, la obtención de las piezas para evaluar y el historial de mantenimiento de los buses.

Los buses articulados del Metro de Medellín tienen dentro de sus componentes una diferencial, debido a la alta frecuencia de falla de esta pieza se seleccionó para el presente estudio. Estos componentes fueron caracterizados por medio de ensayos de composición química, metalografía, dureza Rockwell C, pruebas de ficción y microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX). Al lubricante se le realizaron pruebas de viscosidad y FTIR con el fin de encontrar si existían posibles alteraciones originadas en el tiempo de trabajo. Además, se realizó un seguimiento a las muestras de laboratorio que fueron extraídas durante el proceso de operación, proporcionadas por los encargados de mantenimiento, además, se realizó un seguimiento en laboratorio a las muestras que fueron extraídas con el fin de evaluar el estado de los materiales utilizados. Todo esto se realizó para lograr la caracterización del material y observar el comportamiento del lubricante durante su funcionamiento en la operación de estos automotores. Los resultados del análisis de falla dieron como resultado que el lubricante no obtuvo deterioro significativo, además sugiere que posiblemente una de las causas de falla fue la posible transformación de la austenita retenida generando agrietamiento en la pieza y ocasionando falla por fatiga.

INTRODUCCIÓN

En el sistema de transmisión de automotores existe un componente importante llamado diferencial que tiene como finalidad transmitir las órdenes provenientes del motor a cada una de las ruedas traseras, esto se da por un sistema de engranaje llamado speed que transmite movimiento a una corona dentada; estos dos engranajes son conocidos como “par cónico de reducción”. Los planetarios y satélites también hacen parte de este conjunto, éstos tienen como objetivo hacer que las ruedas sean independientes en su movimiento y adecúan la velocidad de arco de curva. Ver figura 1.

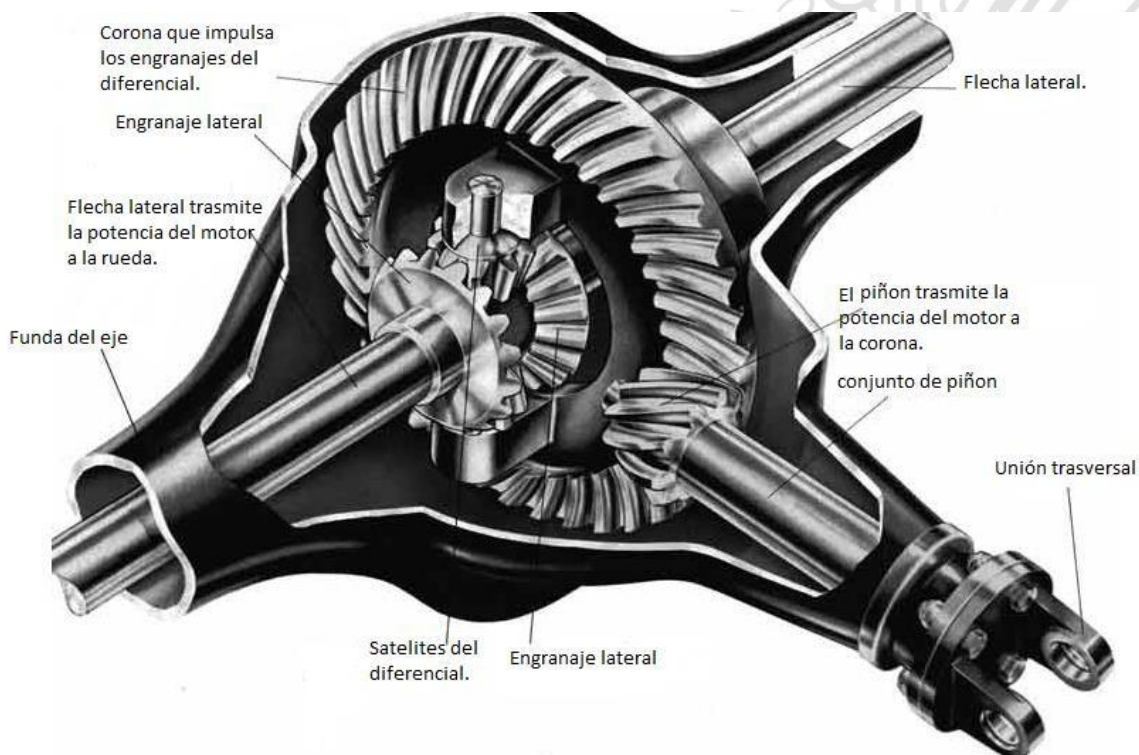


Figura 1: Imagen del diferencial y sus partes. [1]

El material utilizado para la fabricación de este tipo de engranajes es decisión ingenieril, ya que depende de la operación que se desee realizar. La escala de dureza está estipulada según su aplicación, si se evalúa el trabajo realizado por éste y se encuentra que está sometido a altos trabajos de fricción y desgaste, es recomendable realizar un tratamiento térmico de cementación con el fin de



elevant la dureza superficial, además se debe tener en cuenta los aleantes que fueron utilizados durante el proceso de fabricación ya que éstos mejorarán su desempeño en la operación.

El diferencial hace parte de un juego de engranaje, éste a su vez está en contacto con un aceite que se encarga de lubricar y disipar el calor debido a la fricción que se genera entre los componentes durante su proceso de operación.

Para el presente trabajo se tendrán en cuenta las partes como son: corona dentada, piñón y lubricante, se realizará el estudio técnico de esta falla además de las posibles causas que puedan estar generándola.

El mecanismo diferencial en los buses (Articulados) de primera generación (001-020), ha venido presentando falla en el sistema diferencial, en algunas ocasiones se fractura la corona (Dientes y bordes) y en otras el piñón ocasionando pérdidas económicas significativas para esta empresa de transporte ya que sus vehículos deben ser inmovilizados para la intervención de dicha falla, esta labor representa un alto costo en facturación de repuestos, mano de obra, además de generar afectación en la prestación del servicio a la comunidad del Valle de Aburrá. Por tal motivo se hizo necesario realizar. Un estudio de materiales como se presenta en este informe.

Para el desarrollo de este estudio, se realizó toma de registro fotográfico de las fallas presentes y se eligió como material de estudio la unidad 020 para realizar la extracción de una muestra de cada componente en este caso (corona y piñón) y se caracterizaron químicamente por espectrometría de emisión óptica, se realizó metalografía, líquidos penetrantes, se realizó prueba de viscosidad e infrarrojo al lubricante para comparar el lubricante nuevo y el usado, difracción de rayos x , microscopia electrónica de barrido (SEM), por último se realizaron pruebas tribológicas. Con la obtención de estos resultados se procedió a elaborar un informe en el cual se especifica las posibles causas de falla en los componentes y se da una serie de sugerencias que pueden ayudar a mitigar esta falla.



1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La diferencial en buses articulados ha venido presentada falla en un periodo de tiempo que es considerado muy corto según la experiencia de los encargados del área de mantenimiento, el tiempo estipulado de funcionamiento se calcula más o menos entre 1 o 2 años. La falla que presentan estos autopartes son: fractura en la corona dentada y/o fractura del piñón perdiendo su geometría, la flota cuenta con 20 articulados de primera generación de los cuales se extrajo una diferencial para el presente estudio. Según un estudio realizado a las fallas que se han presentado nos arrojaron datos que indican que en 19 de ellos ha tenido origen la falla, se estipula un kilometraje aproximado de 170.000 a 180.000 Km, esto equivale de 12 a 14 meses aproximadamente, los principales componentes de esta diferencial son corona dentada, piñón, satélites y planetarios; éstos son los encargados de transmitir potencia mecánica y movimiento circular mediante el contacto entre ruedas de manera tal que una de las ruedas está conectada por la fuente de energía y es conocido como engranaje motor y la otra está conectada al eje que debe recibir el movimiento del eje motor y se denomina engranaje conducido [2].

El fabricante Arvi Meritor proporciona en su base de datos especificaciones técnicas del housing, donde se puede encontrar la siguiente información: toneladas que carga cada eje, diámetro del círculo, además de proporcionar un manual de mantenimiento de este componente [3].

Debido a la problemática anteriormente mencionada de estas fallas, se ha decidido realizar un estudio mediante el cual se pueda evidenciar las posibles causas de origen de dicha falla en el diferencial; ya que la solución que se tiene hasta el momento es cambiar este componente y realizar mantenimiento preventivo como lo es el cambio de aceite a determinados kilómetros recorridos, además que la intervención de estas fallas genera para la empresa grandes pérdidas económicas y sobre todo una gran inversión de tiempo para su intervención. Con el fin de contribuir a la prevención de esta falla se realizará una serie de pruebas como son: metalográfica, composición química, dureza, viscosidad para el lubricante además de prueba de infrarrojo y propiedades



tribológicas (pruebas de desgaste, fricción con y sin lubricación) en muestra extraída de la diferencial para verificar si los materiales cumplen con las especificaciones técnicas para la construcción de las autopartes y así de este modo poder dilucidar la causa del problema y sugerir de qué forma se debe proceder para eliminar esta falla.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General:

- Realizar la caracterización química, análisis metalográfico, medidas de dureza y pruebas de fricción a coronas dentadas y piñón de diferencial que presentaron falla durante su desempeño.

2.2. Objetivos Específicos:

- Analizar la microestructura en coronas dentadas y piñón en zonas de falla y zonas donde no se presentó falla con el fin de determinar la influencia de la microestructura en las fallas.
- Evaluar la composición química, dureza, viscosidad, prueba de infrarrojo del lubricante y propiedades tribológicas (desgaste y fricción), en zonas con y sin falla para establecer su comportamiento y realizar comparaciones.
- Estudiar mediante microscopía óptica la microestructura del material con el fin de descartar posibles irregularidades en el material.
- Establecer las posibles causas que están provocando las fallas y sugerir la forma de prevenirlas.

3. MARCO TEÓRICO

Los engranajes hipoidales hacen parte de un conjunto formado por piñón y corona; generalmente son cónicos, su función es transmitir movimiento de un eje a otro, normalmente se encuentran situados a 90° , la particularidad que tienen estos engranajes que los hacen diferentes a los cónicos normales, es la excentricidad entre los ejes del piñón y la corona que hace que se crucen y no se corten.

3.1 Ruedas dentadas cónicas hipoidales

Los dientes de este tipo de ruedas van inclinados respecto a su eje de rotación, los ejes pueden ir formando cualquier ángulo generalmente de 90° , aunque muchas veces no son concurrentes los vértices de sus conos.

Estas ruedas dentadas están constituidas por un engranaje pequeño que se llama piñón y por otro de mayor diámetro que es la corona. Se usa principalmente en la diferencial de los vehículos con el objetivo de colocar el árbol de transmisión lo más bajo posible, se encargan de transmitir velocidades elevadas y se caracterizan porque su funcionamiento es silencioso, representación de ejes no concurrentes (ver figura 2).

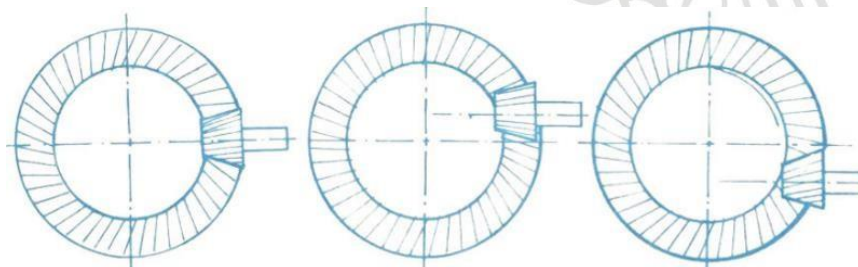


Figura 2. Ejes no concurrentes [4].

En el Manual de Diseño para engranajes cónicos ANSI /AGMA 2005-D03, se encontró que el piñón puede colocarse en diferente posición. En la Figura 3, se presenta dos casos de la ubicación del piñón con respecto a la corona.

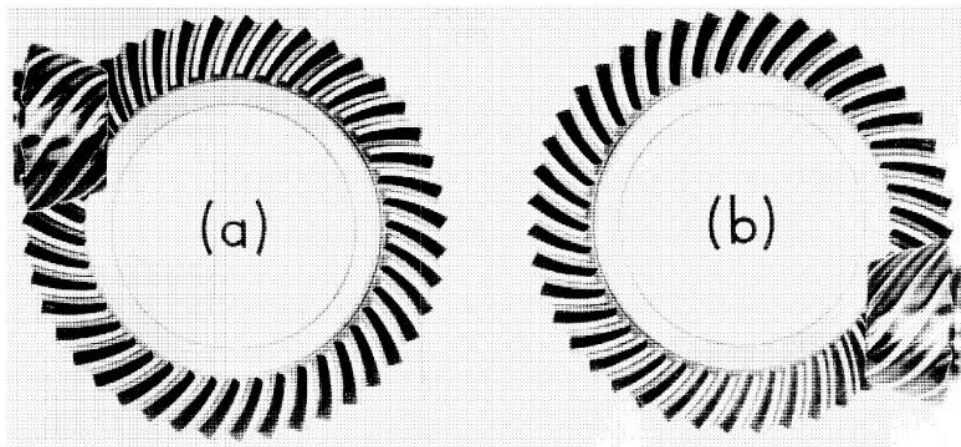


Figura 3. a) Engranaje derecho, b) piñón abajo del centro lado izquierdo [5].

Cabe mencionar que durante el periodo de operación de estos engranajes se producen deslizamientos, además de cargas axiales, es necesario emplear un lubricante específico para condiciones de alta presión. No siendo así los dientes de estos engranajes sufrirán un desgaste progresivo [6].

Los materiales utilizados para la fabricación de engranajes son: aceros, hierros fundidos y maleables, hierros nodulares y bronce, éstas son las elecciones más comunes que pueden presentarse, para realizar dicha elección deben tenerse en cuenta las condiciones de trabajo a las cuales será sometido el material [7].

3.1.1 Materiales para engranajes

Materiales de metalurgia de polvo, aleación ferrosa y materiales no metálicos se utilizan en la fabricación de engranajes y debido a su bajo costo son los más ampliamente utilizados.

En los aceros con endurecimiento se utilizan 1040, 1060, 4140 y 4340 los cuales también pueden ser endurecidos por calentamiento por inducción.

En este caso si el acero es cementado, el objetivo de la cementación es proporcionar una capa en la superficie de la pieza rica en carbono, la cual le otorgará propiedades como son la resistencia mecánica y resistencia al desgaste, estos aceros tienen en su composición química comúnmente entre 0,25% de carbono como máximo. Los contenidos máximos obtenidos en la superficie están en rangos de 0,70 y 1,10%, de ellos 0,80% es el más utilizado. Este proceso se logra llevando el material hasta la temperatura de austenización, además, éste debe estar en contacto con el agente cementante permitiendo la difusión de la superficie al centro del material disminuyendo en este mismo orden su contenido de carbono, el agente cementante en este caso puede ser un baño en sales, un sólido o un gas.

Posteriormente se procede a templar rápidamente el material con la finalidad de alcanzar una dureza superficial alta y su núcleo será tenaz. El contenido de carbono en la superficie es clave para obtener la dureza después de realizar el temple.

Un contenido alto de carbono en la superficie no necesariamente determina la dureza después del temple. Cada acero tiene un porcentaje óptimo de carbono en la superficie para obtener la máxima dureza.

Un contenido excesivamente alto de carbono no producirá necesariamente la máxima dureza, debido a la austenita retenida [8].

Influencia de los elementos de aleación en la microestructura presente en los componentes es:

C: el carbono es el elemento endurecedor principal; es decir, con cada incremento del contenido de carbono aumenta la dureza y la resistencia mecánica del acero en estado normalizado, la dureza máxima de la martensita, al templara, también aumenta con el contenido de carbono de otro lado la ductilidad y soldabilidad disminuyen al aumenta el carbono. Sin embargo, la maquinabilidad aumenta con el contenido de éste.

Mn: el manganeso es un elemento gamageno γ y esto quiere decir que promueve la formación de austenita. El manganeso disminuye las velocidades críticas de enfriamiento durante el temple; con más 3% Mn el enfriamiento al aire produce estructuras bainíticas y si el contenido es mayor produce martensita, en los aceros a cementar se alea hasta en un 1,5% para aumentar la resistencia mecánica.

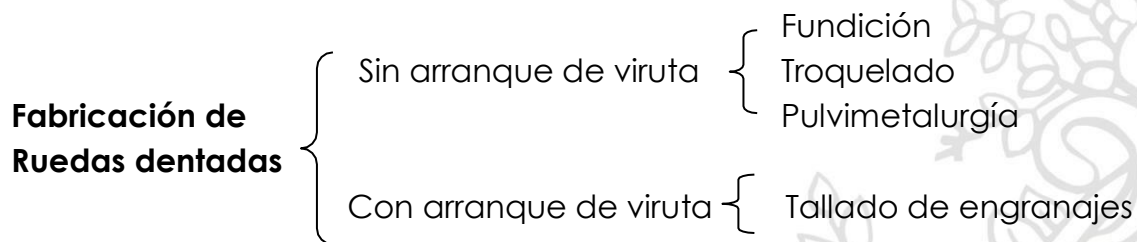
Ni: el níquel es un elemento gamageno γ , su solubilidad en la austenita es ilimitada, además desplaza el punto eutéctico a temperaturas más bajas y contenidos y contenidos menores de carbono. Al disminuir las temperaturas críticas amplía el intervalo para el temple y revenido y retarda la descomposición de la austenita.

Cr: es un elemento alfégeno, tiene solubilidad ilimitada en la ferrita es un potente estabilizador de carburos y estrecha la región gamagena γ , si el cromo es disuelto suficientemente en la austenita promueve mayor profundidad de dureza en el temple.

Mo: es un elemento alfégeno, forma solución sólida con la ferrita, es un potente formador de carburos, el molibdeno tiene un gran efecto sobre la templabilidad, los aceros al molibdeno templados requieren de temperaturas más altas durante el revenido. [9]

3.2 Proceso de Fabricación de Ruedas dentadas o Engranajes.

Las técnicas de fabricación de engranajes se dividen en dos:



Fundición: la fundición o vaciado en arena es una forma económica de obtener dientes de engranaje de baja calidad en cantidades pequeñas, los dientes se funden en diversos metales. Su ventaja es el bajo costo, ya que la forma del diente está incorporada en el molde. Después de realizada la fundición puede o no llevarse a cabo un proceso de maquinado con el fin de dar precisión a la geometría de este.

Sinterizado: Metales en polvo (PM) se conforman a presión en un molde de metal en forma de engrane, se retiran y se les da un tratamiento térmico (sinterizan) para aumentar su resistencia. Esta técnica se destina a engranajes de pequeñas dimensiones.

Procedimiento de talla por generación: permite aprovechar las propiedades de la envolvente, “generar el perfil del diente de un engranaje”, los dientes se pueden tallar de forma sencilla y muy exacta empleando herramientas de perfil rectilíneo. La herramienta de corte avanza a medida que la rueda gira en su centro, esta forma de fabricación tiene ventajas como lo es la alta precisión en la talla de este tipo de componentes sin importar la cantidad dando un correcto funcionamiento en engranajes de altas velocidades [10].

El proceso de talla por generación pudo haber sido el utilizado para fabricar los componentes estudiados. La figura 4, nos presenta una imagen de la fabricación de la rueda dentada.



Figura 4. Generación de corona dentada [11].

3.2.1 Factores que modifican las condiciones de trabajo de un engranaje.

Cuando se estudia el comportamiento de los materiales para engranajes se deben de tener en cuenta factores que modifican con cada caso las condiciones de trabajo de un engranaje, como son:

- la viscosidad y la pureza del lubricante ya que éste influye en el desgaste, si se tiene baja viscosidad y alto grado de impurezas de carácter abrasivo en suspensión ocasionan un rápido desgaste.
- El porcentaje de carbono presente en el acero influye en el aumento de la resistencia al desgaste hasta un límite de 1%, el máximo porcentaje de carbono permitido en aceros para engranajes, téngase en cuenta que este valor es solo para la capa superficial cementada y no a toda la masa del engranaje [12].

3.2.2 Desgaste y fallas en dientes de engranajes

Engranajes debidamente diseñados pueden fallar si mediante instalación o el funcionamiento se presentan:

- Una distancia incorrecta entre centros (el círculo de paso de la corona y del piñón deben de tener una tangente común) para evitar un juego insuficiente en la raíz del diente o un juego excesivo entre dientes.
- Des alineamiento; de flexión excesiva en el eje; cojinetes desgastados, piezas defectuosas, etc.
- Lubricación incorrecta o insuficiente.
- Cuerpos extraños en el lubricante (partículas metálicas).
- Temperaturas excesivas
- Cargas excesivas o cargas de impacto.
- Vibración
- Velocidades excesivas

Estas condiciones de trabajo pueden producir como consecuencia un desgaste excesivo o fallas en el sistema de engranajes, sin permitir la identificación del estado actual del diente. A continuación, se presentan los tipos de falla que se pueden presentar en engranajes.

3.3 Tipos de falla de Engranajes.

El tipo de falla y la apariencia de ésta es consecuencia directa del material y de las condiciones de operación. Al realizar el estudio de una falla se debe recopilar la mayor información posible desde qué material es hasta la operación que dicha pieza realiza, con esta información se puede dar una orientación a las posibles causas de falla.



Figura 5. Mapa conceptual falla de engranajes.

Picado destructivo:

Cuando se deja progresar el picado inicial se presentan cráteres en el diente de diferente morfología y tamaño, esto resulta de sobrecargas superficiales que no se alivian con el picado inicial, este picado destruye el perfil del diente originando grietas de fatiga por flexión que conducen a la fractura del diente [16]. Ver figura 6.



Figura 6. Picado Destructivo [13].

Abrasión:

se conoce como un desgaste en la parte superficial del diente, generalmente ocasionado por presencia de materia extraña como suciedad que puede

quedar atrapada entre los dientes del engranaje; Ejemplo partículas metálicas, polvo del medio ambiente [14]. Ver figura 7.

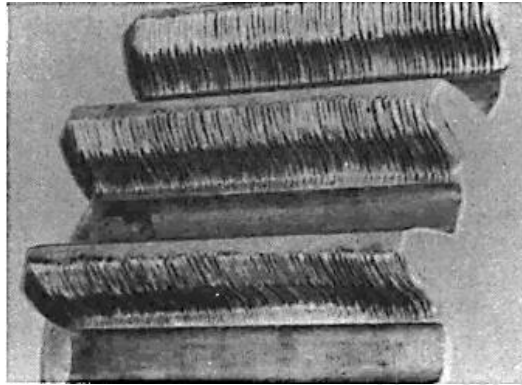


Figura 7. Desgaste por abrasión [15].

Rotura de dientes:

esta falla resulta de sobre cargas o por ciclos de esfuerzo de los dientes más allá del límite de endurencia del material. Cuando un diente se rompe por fatiga debe haber evidencia de un punto focal donde comienza la fractura. A veces una raya o una entalla en la raíz puede coincidir con ese punto, se debe suponer que, al menos en parte, es la causa de la falla. [16]. Ver figura 8.



Figura 8. Fatiga y sobrecarga [16].

Fractura por Fatiga de flexión: La geometría del diente es parecida a una viga en cantiléver soportada en un extremo, dando lugar a esfuerzos máximos en la raíz y soportando carga en la punta del diente. Normalmente se caracteriza por la formación de grietas en los sitios donde el engranaje soporta los mayores esfuerzos, los cuales se extienden progresivamente en áreas y profundidad hasta producir la falla [16]. Ver figura 9.

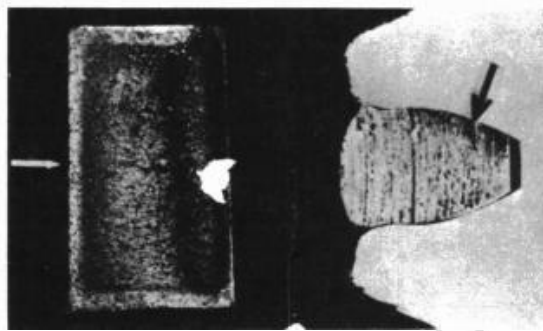


Figura 9. Fractura por fatiga [16].

Fractura por impacto: Los engranajes que presentan este tipo de falla se caracterizan por presentar ondulaciones en el punto donde fue comprimido, esto se origina por una deformación plástica severa, la apariencia de la fractura en la superficie es fibrosa sin mostrar signos de daño progresivo [17]. Ver figura 10.



Figura 10. Fractura por impacto [17].

Macropitting: Macropitting también puede afectar tanto engranajes y cojinetes. El Macropitting ocurre cuando la tensión de contacto en el engranaje o cojinete excede la resistencia a la fatiga del material. Los engranajes y cojinetes se dimensionan para una vida determinada y el Macropitting que ocurre antes del final de la vida de diseño es una indicación de que uno o más supuestos de

diseño, tales como estrés de contacto, propiedades del material, estado del lubricante o carga aplicada no se cumplieron. Los resultados de Macropitting son cráteres en el diente de engranaje o anillo de rodamiento (o rodillo) en la superficie. Las marcas de la playa debido a la presencia de la corrosión y del lubricante en la grieta están a veces presentes e indican un proceso de la progresión de la fatiga. Las fallas de Macropitting se pueden prevenir reduciendo las cargas, mejorando el engranaje y los perfiles del cojinete para reducir la tensión, usando acero más limpio, o aumentando la fuerza material, a través de la selección de la aleación o de un proceso de tratamiento térmico.

3.3.1 Lubricación

La función principal del lubricante es mantener la separación de las superficies sólidas evitando el contacto entre éstas y como consecuencia la fricción y el desgaste. La segunda función que cumple es transportar el calor generado por dos superficies deslizantes bajo presión de contacto y la tercera función del líquido lubricante es enjuagar la suciedad y desgaste fuera de la zona de contacto para luego ser retiradas por filtración. Teniendo en cuenta que los lubricantes líquidos disipan el calor mejor que el sólido o semilíquido [18], [19], [20].

Factores que afectan la lubricación

- Velocidad.
- Carga.
- Temperatura.

Velocidad: Cuando la velocidad es alta se sugiere utilizar un lubricante de baja viscosidad el cual ayude a la acción de bombeo y la formación de la cuna de aceite, si por el contrario la velocidad es baja debe ser compensada la deficiencia en la formación de la cuna de aceite con una alta viscosidad.

Carga: Un aceite de con una alta viscosidad está diseñado para soportar de forma satisfactoria cargas altas evitando el contacto metal-metal entre dos



superficies, si la carga es baja un aceite delgado será suficiente para separarlas superficies y reducir las pérdidas de potencia por fricción.

Temperatura: Ésta afecta de forma inversamente proporcional la viscosidad, cuando se genera calor por fricción el aceite se calienta y disminuye la viscosidad y cuando se enfría se espesa a un punto que no fluye, por esto a la hora de seleccionar el tipo de lubricante a utilizar se debe tener claro la temperatura ambiente o la de funcionamiento del mecanismo.





4. METODOLOGÍA

Para la realización de este estudio se seleccionó la unidad 020 que hace parte de la flota de buses articulados de la empresa de transporte masivo del Valle de Aburrá. Las especificaciones técnicas son: Dimensiones largo 18m, capacidad de pasajeros 154, peso bruto vehicular de 19 toneladas, eje delantero capacidad de carga de 7 toneladas, eje medio 13 toneladas, eje trasero 13 toneladas, todos los ejes son marca Arvi Meritor.

4.1 Inspección visual

Se efectuó la inspección visual en la corona y piñón con el fin de conocer de primera mano el aspecto de las fallas, si es general en la pieza o muy puntual y poder tratar de dilucidar las causas de la misma, además de mostrar las marcas características de fallas por fatiga que se evidenciaron en dicha fractura para su observación se utilizó lupa y estereoscopio.

4.2 Caracterización del material

El análisis de composición química se realizó por Espectrometría de Emisión óptica Marca Foundry Máster Pro, las muestras fueron comparadas con estándares, con el fin de obtener la composición química.

4.3 Ensayo de Líquidos penetrantes

Se realizaron las pruebas con el Kit de líquidos penetrantes marca Spotcheck®; SKL-SP2 de Spotcheck líquido penetrante, sugieren se utilice a temperatura de (4°C a 52°C) y líquido revelador SKD-S2 de Spotcheck®, se practicó bajo lineamientos de la norma ASTM E165 Practica estándar para líquidos penetrantes. Este ensayo se realizó en una sección extraída de la corona, la cual no revelaba falla en un diente a simple vista y se quería verificar si existía o no algún tipo de discontinuidad o grieta que no se podía observar a imple vista.

4.4 Análisis Metalográfico

Se realizó una serie de cortes mediante la técnica de electro erosión con hilo de molibdeno a la corona y el piñon, con el fin de obtener una muestra de cada uno; luego cada muestra fue encapsulada en baquelita para posteriormente proceder con el proceso de lijado, las lijas utilizadas fueron las series 250, 320, 400, 600, 100, 1200, 1500 y 2000. Cuando se terminó de pasar por la lija 2000 se procedió a pulir la muestra en paño con abrasivo de alúmina de $3\mu\text{m}$; cuando se obtuvo la parte superficial de la muestra con acabado espejo se procedió al ataque de esta superficie con Vilella para revelar límites de grano de la austenita y la martensita en aceros templados, revenidos [21]. Se observó la microestructura en un microscopio metalográfico Olympus Marca PME-3. A continuación se presenta una imagen como ilustración de la zona donde se realizaron las metalografías después de un corte trasversal de los dientes.

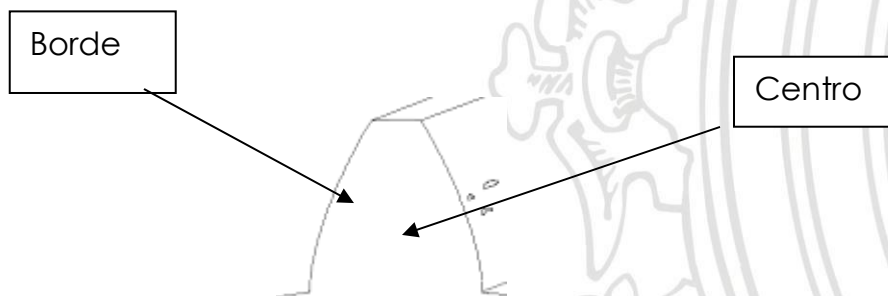


Figura 11. ilustración de zonas metalográficas.

4.5 Microscopia Electrónica de Barrido

La Microscopia Electrónica de Barrido se realizó para observar la microestructura de las dos muestras (corona y speed) y sobre todo para tener una imagen más cercana de la austenita retenida que se encuentra presente en el speed, el equipo utilizado para esta prueba fue JEOL JSM 6490 LV que se encuentra en el laboratorio de CIDEMAT ubicado en La Sede de Investigación Universitaria.



4.6 Ensayo de Dureza

Se realizó ensayo de dureza a la corona y piñón, dichas piezas presentan tratamiento térmico superficial de cementación. El método utilizado fue Rockwell hardness y el equipo utilizado fue HR-150^o Rockwell Hardness Tester, bajo una carga de 150 Kilos, a una temperatura de 20°C y 50% de humedad relativa, se aclara que la dureza fue medida en el núcleo de la probeta.

4.7 Prueba de Viscosidad.

La viscosidad es una prueba que se utilizó para este estudio, ya que con esta podemos comparar las viscosidades medidas de la muestra sin usar y la muestra que ha sido sometida a un determinado tiempo de operación, el equipo que se utilizó para dicho procedimiento fue viscosímetro marca BROOKFIELD, las condiciones para procesar las muestras fueron temperatura de 57°C y 100 RPM.

4.8 Espectroscopia de absorción Infrarroja (FTIR).

La espectroscopia de absorción infrarroja se realizó en el equipo Shimadzu IRtracer-100 suministrado por el centro de investigación de CIDEMAT (Centro de investigación, innovación y desarrollo de materiales) de la universidad de Antioquia. Esta técnica proporciona un espectro de reflexión de las bandas de los grupos funcionales de las sustancias inorgánicas y orgánicas para detectar posibles contaminantes comunes subproductos de la degradación del aceite y aditivos, los resultados de los dos espectros se compararon con el fin de evaluar que tan diferentes son las bandas de absorción en los resultados obtenidos de las muestras de lubricante sin usar y la muestra extraída del proceso de operación, El lubricante de estudio es 85W 140 de la marca Gulf.

4.9 Difracción de Rayos X

Durante el análisis metalográfico se evidencio una microestructura de martensita para ambas muestras, pero en la microestructura del speed hay posibilidades de que contenga austenita retenida; por tal motivo se decide realizar prueba de Difracción de rayos x a las muestras con el fin de poder evaluar los resultados y determinar si la fase cristalina de austenita retenida se encuentra presente en piñon y nos apoya la evidencia obtenida durante la evaluación metalográfica. Para la realización de esta prueba se utilizó el equipo PANalytical de referencia EMPYREAN del laboratorio de catalizadores y adsorbentes de la Universidad de Antioquia, este equipo tiene una fuente de radiación de cobre ($\text{Co K}\alpha$, $\lambda = 1.7929 \text{ \AA}$); operando a 40 Kv y 40 mA; el barrido angular (2θ) fue desde 4° a 100° , a una velocidad de $0,02^\circ/\text{s}$. La identificación de las fases cristalinas se realizó utilizando el software "X'pert HighScore", el cual utiliza difractograma de patrones adscritos a las bases de datos PDF y COD.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Espectrometría de emisión óptica: La tabla 1 presenta la composición química elemental de la corona y del piñón, además del contenido de carbono en la capa cementada del piñón determinada por espectrometría de emisión óptica.

Tabla 1. Composición química de la corona, piñón y la capa cementada.

| <i>Corona</i> | | <i>piñón</i> | |
|---------------|-------------|--------------|---------------|
| Elemento | Composición | Elemento | Composición |
| C | 0,384±0,007 | C | 0,292±0,004 |
| Si | 0,400±0,035 | Si | 0,250±0,003 |
| Mn | 1,11±0,018 | Mn | 0,603±0,006 |
| P | 0,013±0,001 | P | 0,008±0,0004 |
| S | 0,037±0,001 | S | 0,023±0,0017 |
| Cr | 0,557±0,014 | Cr | 0,540±0,004 |
| Mo | 0,514±0,060 | Mo | 0,288±0,006 |
| Ni | 0,722±0,008 | Ni | 1,923±0,014 |
| Al | 0,055±0,002 | Al | 0,031±0,00058 |
| Cu | 0,249±0,006 | Cu | 0,199±0,022 |

| <i>capa cementada</i> | |
|-----------------------|------|
| <i>corona</i> | 0,98 |
| <i>piñón</i> | 1,03 |

Se realizó cálculo de M_s para el piñón utilizando la ecuación de Payson and Savage [6].

$$M_s (^{\circ}C) = 499 - 308C - 32,4Mn - 27Cr - 16,2Ni - 10,8Si - 10,8W + (10Co)$$



Para la Superficie el $M_s = 110,68^\circ\text{C}$

Para el centro el $M_s = 338,59^\circ\text{C}$

Las temperaturas M_s nos indican a que temperatura comienza la transformación de la martensita. Estas diferencias de temperaturas indican que la martensita en el núcleo dará inicio a la transformación a una temperatura de $338,59^\circ\text{C}$, mientras que la martensita que se formará en la superficie empezará su transformación a $110,68^\circ\text{C}$, para que la transformación sea completamente martensítica, se debe realizar un enfriamiento subcero para promover la transformación.

5.2 Clasificación de los aceros

Según la nomenclatura de los aceros AISI-SAE la corona corresponde a un 4740 debido a su alto contenido de Ni 0,72 y Mo 0,51.

El piñón se clasifica como 4330 debido también a su alto contenido de Ni 1,92 y Mo 0,28.

En páginas anteriores se habían mencionado los tipos de aceros que se utilizan en la fabricación de engranajes entre los más usados esta el 4340 y según la nomenclatura de los aceros AISI-SAE.

- ✓ 43xx- Aceros al Ni-Cr-Mo (1,80%Ni, 0,65%Cr, 0,25%Mo).
- ✓ 47xx- Níquel - Cromo - molibdeno, 1,05%Ni, 0,45%Cr, 0,20%Mo

El acero con el cual se fabricaron las muestras estudiadas está entre los usados para la fabricación de estos componentes, además de que su contenido de níquel, molibdeno se excede, la corona esta cementada al 0,98%C y 1,03%C el piñón.

5.3 Inspección visual de la falla en los componentes.

Mediante la inspección visual se observa que en la corona hay 42 de 43 dientes que presentan, ocasionada por una deformación plástica, dicha falla se originó

en el diámetro interior de la corona, se realiza señalización del diente no fallado con flecha blanca, Figura 12.



Figura 12. Imagen de corona dentada fracturada en la parte interna de sus dientes.

Se observa pérdida de material al parecer por desconchado ubicada en el flanco en la parte interna de los dientes, cabe resaltar que sólo se produce en la circunferencia interna, ya que la circunferencia externa no presenta ningún tipo de falla. En la figura 13 se puede observar pérdida de la posible capa cementada y dientes pertenecientes a la geometría de la corona, además de presentar deterioro superficial del franco del diente en varios de estos dientes, esto también ayuda en la fatiga de la pieza ya que no hay una carga distribuida uniformemente y los puntos de apoyo sufren variaciones de la carga aplicada.

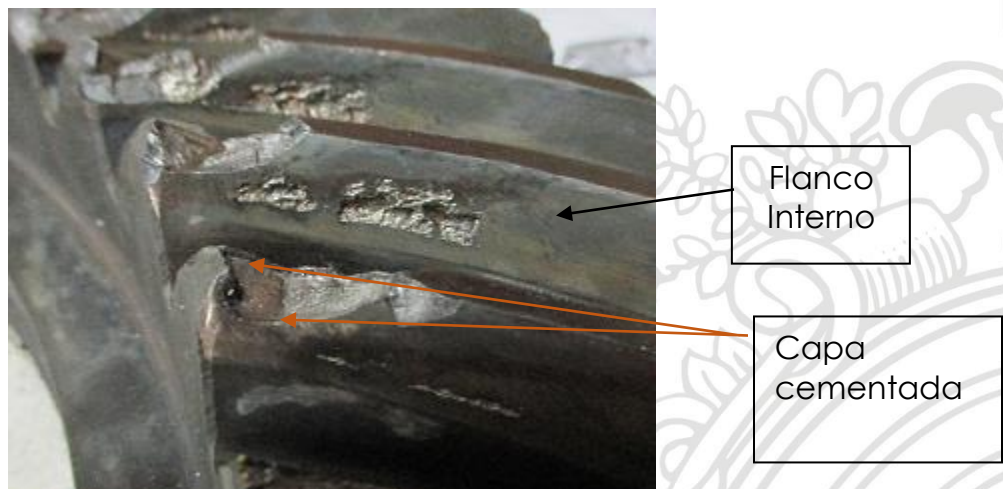


Figura 13. Pérdida en la geometría tanto en bordes y en flancos de los dientes de la corona dentada.

El piñón también sufrió fractura, en la figura 14 se muestra una imagen que corresponde a una fractura de uno de los dientes, además se observan marcas de trinquete que se origina en fallas por fatiga debido a altos esfuerzos de flexión o muchos ciclos de funcionamiento.



Figura 14. Superficie de fractura del piñón.

Realizando un análisis de las imágenes de la figura 14 se evidencian marcas de trinquete señaladas con la flecha (negra), presencia de descostrado (flecha roja) y zona fibrosa donde termina la fractura señalada por (flecha blanca); estas tres zonas mencionada son características de una falla ocasionada por fatiga, las fracturas pueden ser generadas por una fisura en el diente o durante el tratamiento térmico, una entalladura, inclusiones y esfuerzos residuales.

En la figura 15 se puede apreciar las diferentes zonas falladas presentadas durante el proceso de operación del piñón.



Figura 15. Fractura múltiple del piñón.

Los óvalos (rojo) nos marca una zona importante, según revisión bibliográfica estudiada es una pérdida de material ocasionada por Macropitting, estos desprendimientos ocurren con mayor frecuencia debajo de la línea de paso. En esta área el esfuerzo en la superficie es mayor debido a que hay menos dientes engranados además que esta área está sometida a esfuerzos de tensión ocasionados por una carga lineal.

Se observan marcas de trinquete señaladas con la (flecha roja), además de la flecha amarilla que nos marca una zona de fractura con pérdida de material con cavidad.

Cuando comparamos las imágenes de la figura 15 y 16 en la forma de falla podemos identificar que son muy similares por tal motivo podemos ayudarnos de esta imagen para definir que nuestro piñón en primera instancia presenta Macropitting en la superficie y esto además de la carga cíclica puede dar también origen a posibles grietas cuando el lubricante está en contacto con los dos componentes y ejerce presión en el fluido induciéndolo a ingresar a posibles cavidades existentes.

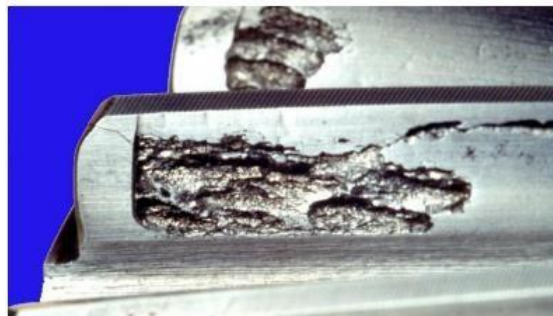


Figura 16. Macropitting en los flancos del engranaje [22].

5.4 Inspección visual del lubricante: también se inspeccionó visualmente el lubricante sin usar y un lubricante con un uso de 44.232Km, los cuales presentan una gran diferencia en su color. El lubricante sin usar muestra un color naranja oscuro mientras que el lubricante usado se observa de color negro, tal como se puede apreciar en la figura 17. Adicionalmente, el lubricante usado presenta un olor fuerte e irritante para los ojos.



Figura 17. Aspecto visual de una muestra de aceite sin usar y una muestra después de 44.232Km de uso.

5.5 Prueba de viscosidad: En la tabla 2 se presentan los resultados de las pruebas de viscosidad realizadas al lubricante sin usar y al lubricante usado.

Tabla 2. Resultados de viscosidad de dos lubricantes.

| Muestra | T(°c) | RPM | viscosidad Cp. |
|-------------|-------|-----|----------------|
| L sin usar | 57 | 100 | 1120 |
| L operación | 57 | 100 | 1280 |

La prueba de viscosidad se efectuó con el fin de comparar las dos muestras de lubricantes y analizar el cambio en las viscosidades, los resultados obtenidos arrojan un incremento en la viscosidad de la muestra (L operación) de 160 Cp. con respecto a la muestra del lubricante sin usar, este incremento se puede dar por posibles contaminantes en el material como son partículas metálicas debido al desgaste debido a la operación que se da entre la corona y el piñón.

Se debe tener en cuenta que dichas partículas pueden considerarse perjudiciales para la operación ya que son óxidos y pueden comportarse como elementos abrasivos para dichos componentes.

5.6 Prueba con líquidos penetrantes: Se realizó un corte a la corona con hilo de molibdeno con el fin de extraer esta muestra para realizar prueba de líquidos penetrantes, en dicha muestra hubo un diente en particular que no sufrió fractura, se limpió la muestra con varsol con el fin de desengrasarla y se procedió a tomar registro fotográfico ver figura 18.



Figura 18. Sección de la corona con diente que no presentó falla.

En la figura 19 se observa el líquido penetrante en la sección de la corona escogida para el ensayo de líquidos penetrantes.



Figura 19. Sección de la corona con líquido penetrante.

Se aplica el revelador para evidenciar posibles grietas o discontinuidades presentes en la pieza, las grietas se tornan delineadas por un color rojo oscuro como se observa en la figura 20.

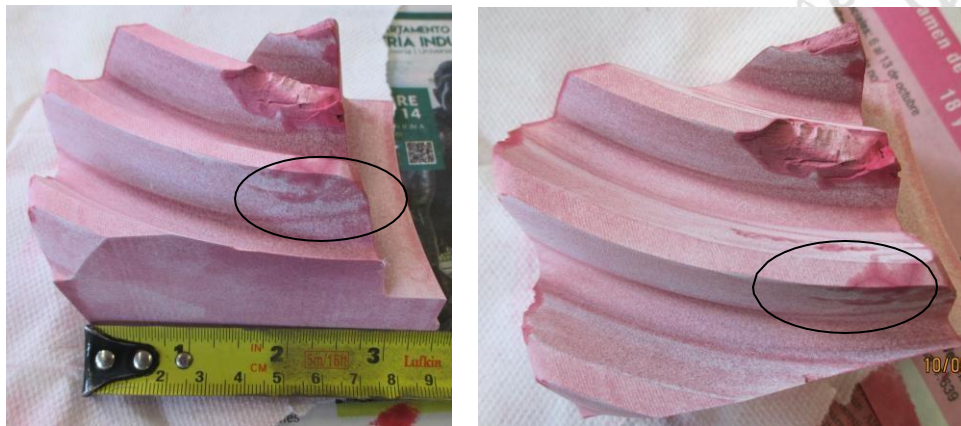


Figura 20. Imágenes de grietas presentes en la corona dentada.

El revelador evidencia inicio de grietas en el flanco del diente que se bifurcan hacia la parte interior del diente que no presentó fallas.

De acuerdo con la figura 21, se puede apreciar una medida aproximada de la altura de paso del piñón en la corona, la altura interna es aproximadamente 9mm y la altura exterior es aproximadamente 5mm esto nos da una idea de cómo fue ajustado el diferencial y que le dieron una leve inclinación esto se evidencia en la diferencia de alturas y sobre todo la zona de trabajo del piñón, en dicha zona se observan grietas.

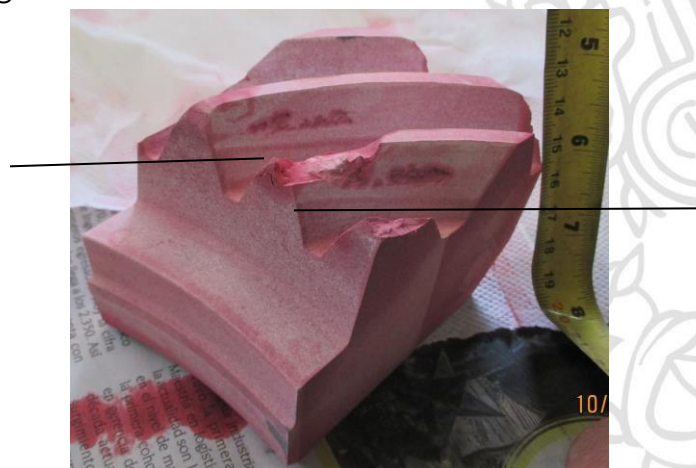


Figura 21. Huella de trabajo en los dientes de la corona.

5.7 Pruebas metalográficas: En la figura 22, se presenta la metalografía de la corona dentada donde se observa para a) Parte externa y b) Parte interna microestructura martensita.

CORONA DENTADA

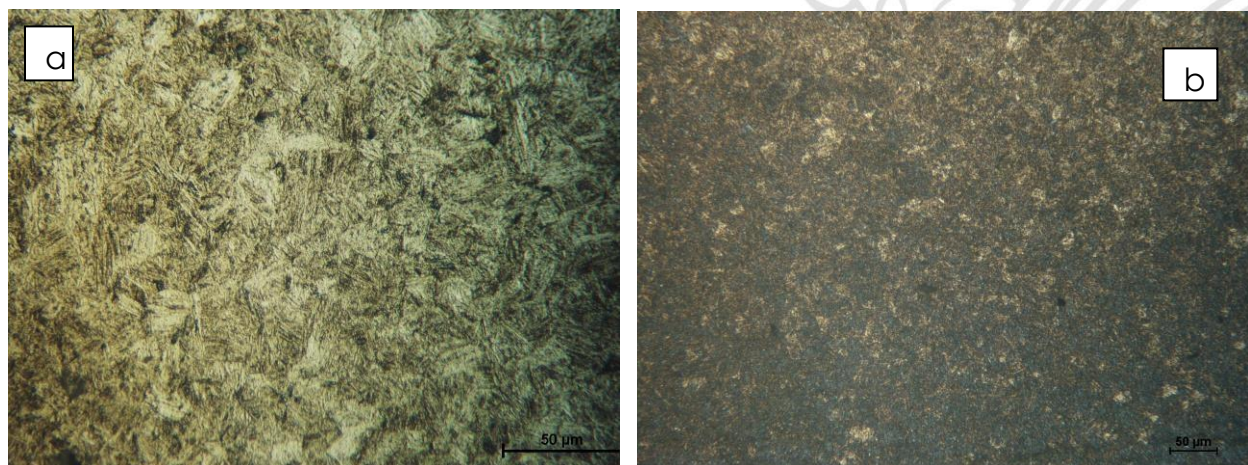


Figura 22. Microestructura interna de la corona, a) interna y b) Borde. Ataque con vilella.

Las pruebas de metalografía mostraron una microestructura constituida por martensita, evidenciando que a esta pieza le fue realizado un tratamiento térmico de cementación, temple y revenido esto se evidencia en la metalografía debido a la morfología del borde que hace alusión a la capa cementada.

PIÑÓN

En la figura 23, se presentan las imágenes metalográficas del piñón.

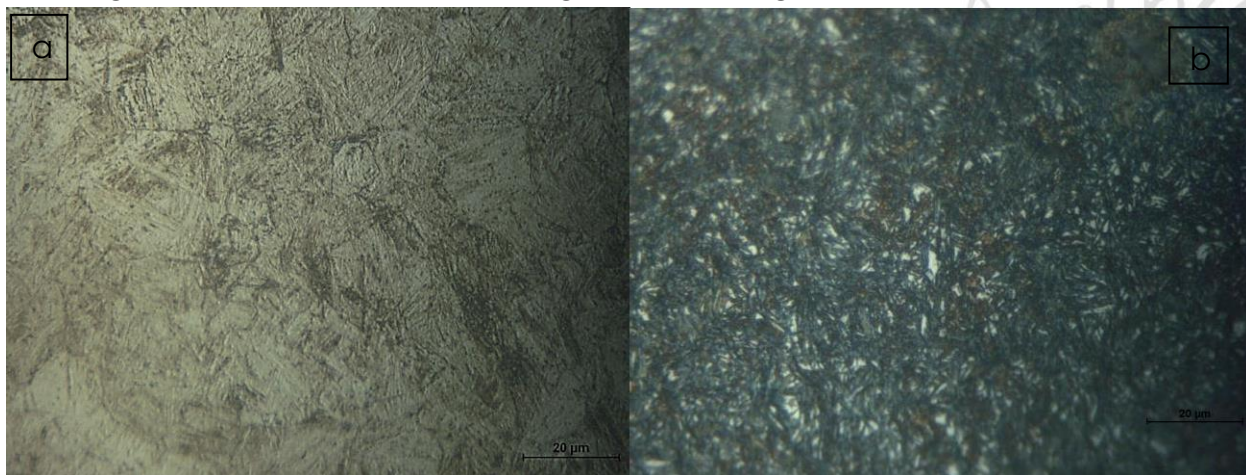


Figura 23. Imágenes de metalografías del piñón, a) centro y b) borde. Ataque con vilella.

Se ataca la muestra con reactivo de vilella este nos revela los límites de grano para la austenita en aceros de alta aleación, además de revelar la martensita revenida, la micrografía a) muestra la microestructura de martensita revenida presente en el núcleo del piñón, la micrografía b) revela la microestructura de martensita y austenita retenida presente en el borde de la probeta del piñón, además en la figura 24 se presenta la micrografía de la capa cementada del piñón con aproximadamente 1,2 mm de espesor.

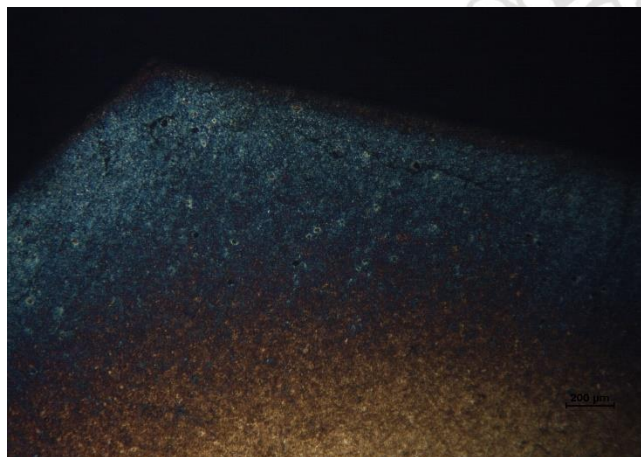


Figura 24. Imagen de la capa cementada del piñón.

Se establece una comparación de la figura 25 y la figura 26, que corresponde a una microestructura con austenita residual.

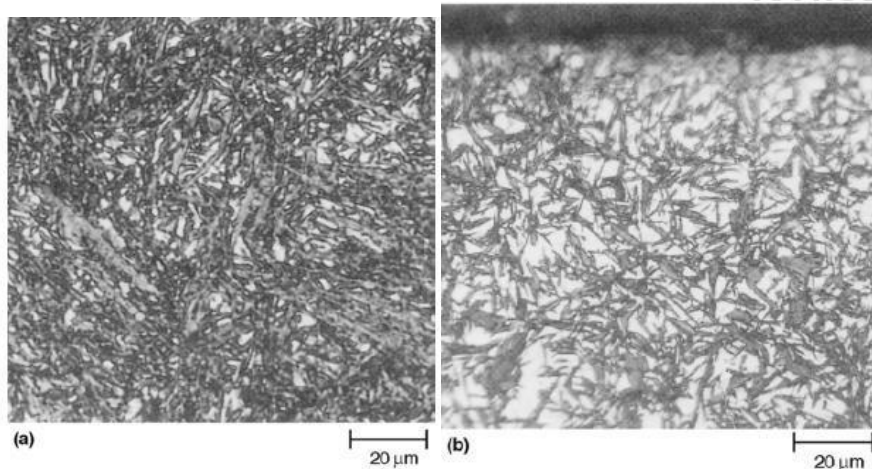


Figura 25. Austenita retenida (luz) martensita en el acero de níquel-cromo carburado. a) 15% austenita, b) 40% austenita [21].

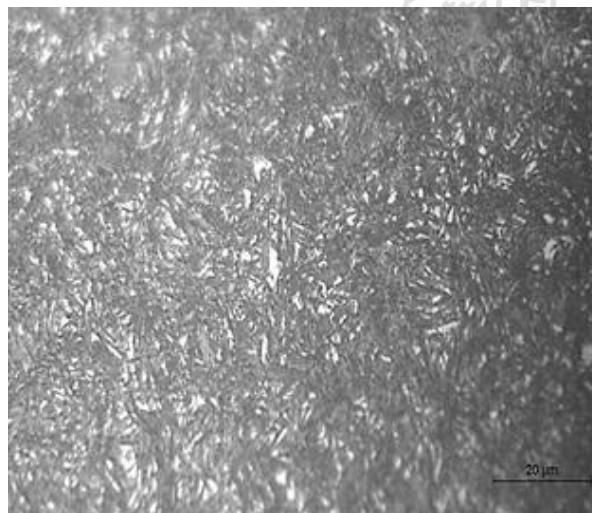


Figura 26. Microestructura del piñón en el borde.

Se observa una microestructura similar en las imágenes, teniendo en cuenta que en la figura 24 b) se identifica mayor cantidad de austenita retenida presente en

la microestructura y la austenita retenida se observa como pequeños granos en forma de isla rodeados de martensita.

Se realizó un conteo en la figura 26 bajo los parámetros de la norma E 562-11 para determinar la fracción de volumen de austenita retenida presente en la muestra; según el recuento de puntos dio como resultado el 12.3 fracción % de volumen, este procedimiento se llevó a cabo siguiendo las indicaciones de la norma anteriormente mencionada, se tomaron 20 fotos aproximadamente y se estableció una malla de 100 puntos, en cada foto se colocó la malla y se realizó un conteo de puntos, después de obtener el conteo de puntos se realizó una tabla en Excel y se ingresaron los datos donde se realizó el cálculo del nivel de confiabilidad que no debía superar el 10% para cumplir con la confiabilidad del ensayo la norma explica cómo hacer este cálculo utilizando la fórmula, en la figura a continuación se ven puntos rojos que evidencian la presencia de austenita retenida y los azules están libres de esta fase .

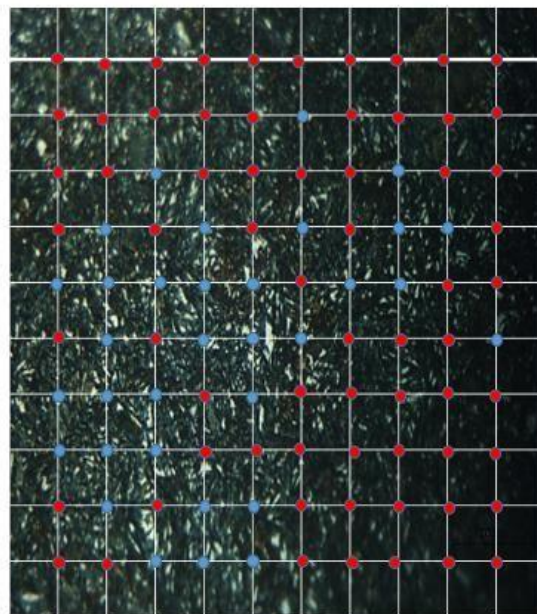


Figura 27. Fracción %volumen de austenita retenida en la muestra del piñón.

Se le dio importancia al estudio de la austenita retenida ya que cuando esta es sometida a tensiones muy altas, sufre transformación inducida por deformación bajo tensión en martensita cuando esto ocurre se puede presentar agrietamiento

debido al cambio volumétrico que presenta que experimenta la red cristalina microestructura.

Durante el proceso de preparación de la muestra del piñón para realizar la metalografía, se encontró una grieta en la microestructura ver figura 28. La probeta es sometida a ultrasonido sumergida en alcohol etílico con el fin de desalojar cualquier suciedad que pueda tener esta zona donde se visualizó la grieta. Al realizar el ataque con nital al 2% y la observación al microscopio se encuentra la grieta.

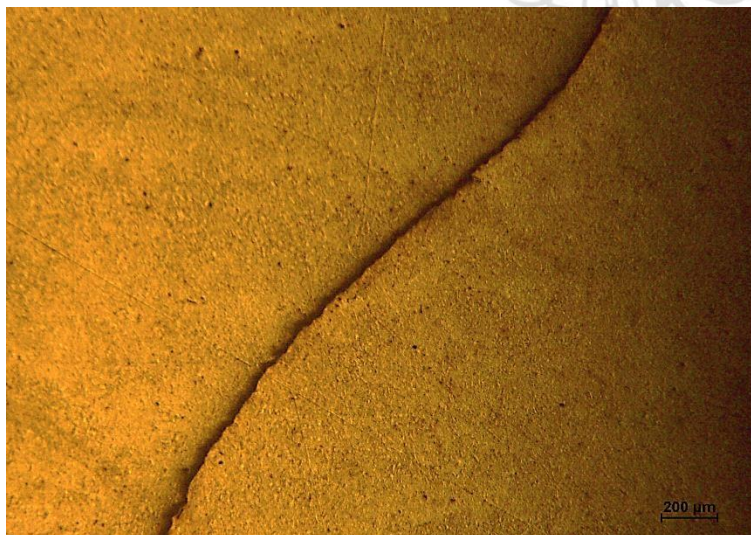


Figura 28. Grieta observada mediante el proceso de metalografía.

5.8 Microscopía electrónico de Barrido: La muestra fue atacada con nital al 5% y se utilizó la técnica de electrones retrodispersados con el fin de observar morfología de las fases presentes ya que si se tiene una superficie lisa observaremos distintos tonos de gris; se evidencia que la microestructura de la corona presenta posiblemente ferrita widmanstätten (Tipo C intragranulares) que crece en los límites de grano posiblemente originada mediante el proceso de transformación sólida (marcado con óvalos rojos), esto puede ser ocasionado

por que la velocidad de enfriamiento es demasiado alta para permitir la formación de ferrita intergranular [23]. La otra fase que se observa es martensita para la figura 28 (a) superficie y (b) centro las dos imágenes están exentas de austenita retenida.

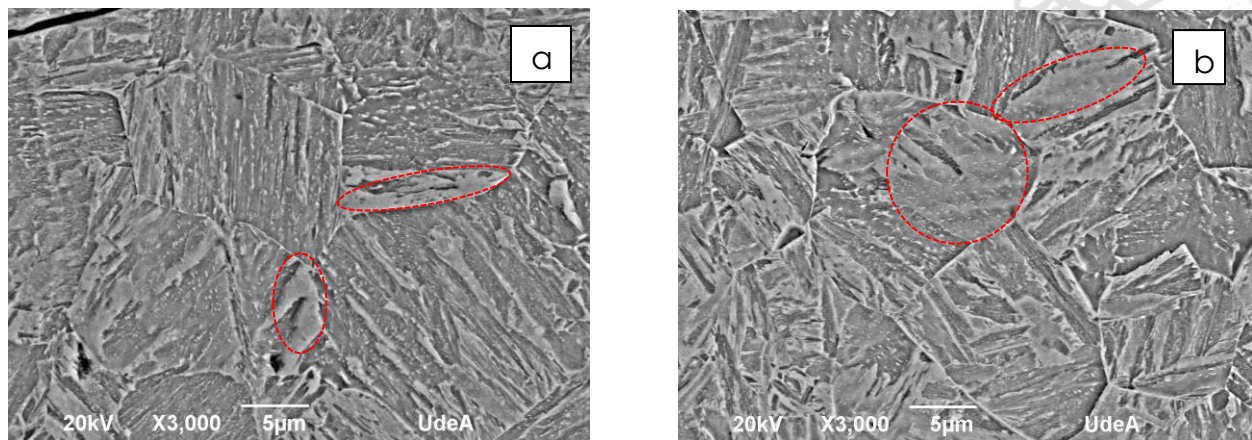
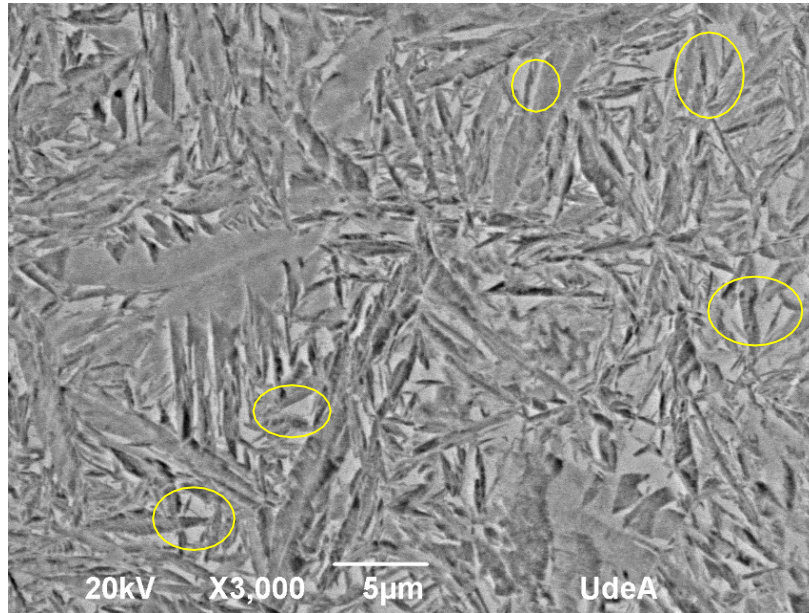


Figura 29. Imagen del SEM para la microestructura de la corona.

La figura 29 se comparan las microestructuras del centro y el borde del diente del piñón, evidencia la diferencia de microestructura en cuanto a la morfología de la martensita para el centro, además de observa la austenita retenida y martensita que se encuentra situada en el borde del diente del piñón.

a



b

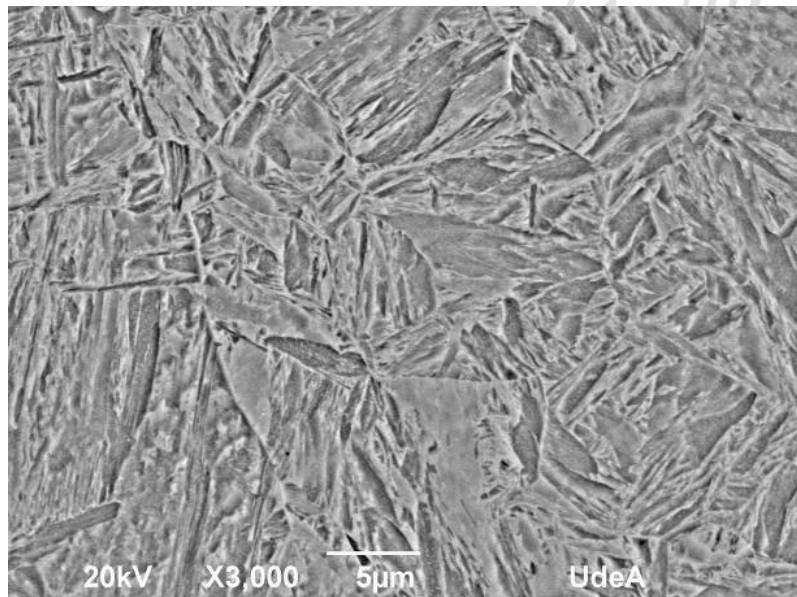


Figura 30. Imagen del SEM para la microestructura del piñón, (a) Borde y (b) centro.

5.9 Pruebas tribológicas.

La figura 31 muestra los registros de fricción obtenidos con una muestra extraída de la corona. Para esta prueba se tomó una muestra de lubricante ya usado con aproximadamente 44.237 kilómetros recorridos y una muestra de lubricante sin usar, se realizaron las pruebas de fricción sobre una muestra extraída de la corona cuando se analizan las gráficas de las pruebas de fricción se observa que el coeficiente de fricción con el lubricante usado (gráfica roja) es más inestable comparada con el coeficiente de fricción en presencia del lubricante sin usar, a pesar de esto en la muestra sobre la que se realizaron los registros de fricción no se observa huella residual en ninguno de los dos medios.

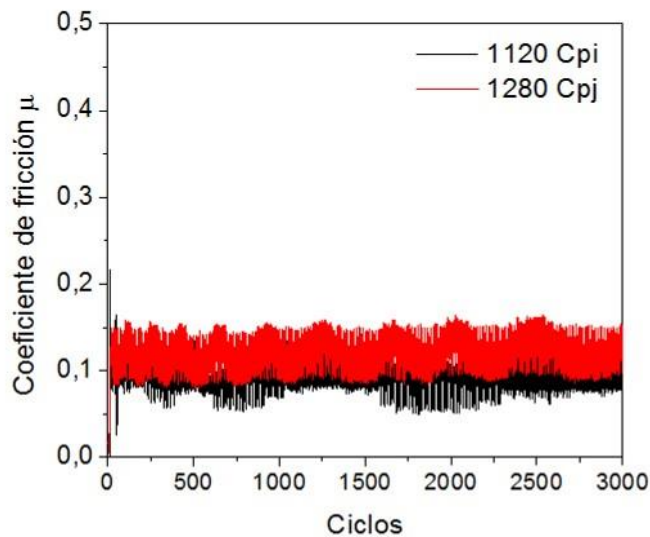


Figura 31. Registros de fricción de una muestra extraída de la corona con lubricante sin usar y lubricante ya usado.

5.10 Espectrometría infrarroja (FTIR) realizada a los lubricantes.

Se realizó infrarrojo al lubricante nuevo (V1) con el fin de identificar la naturaleza del fluido, como resultado se obtuvo según la base de datos con la cual se comparó que su base es parafina. Ver figura 32.

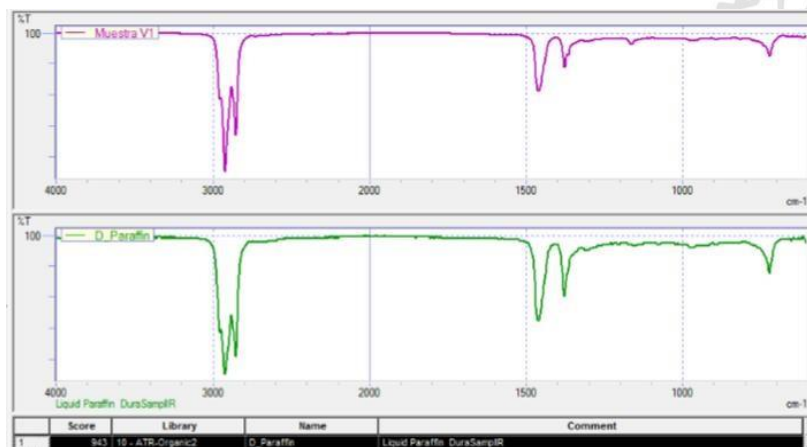


Figura 32. Espectros infrarrojos para identificación de la muestra.

Posteriormente de la caracterización del lubricante, se procedió a comparar las espectrometrías infrarrojas de la muestra V1 lubricante nuevo (línea verde) y la muestra US lubricante usada línea (roja). Ver figura 33.

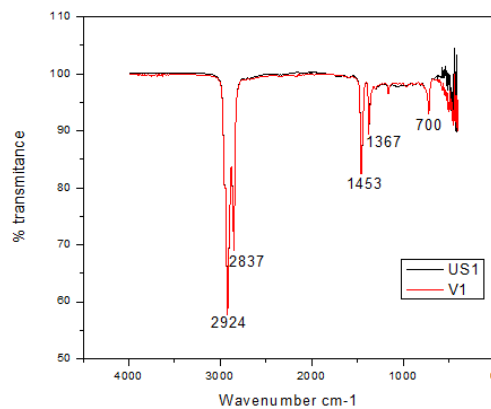


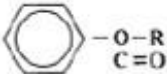

Figura 33. Espectroscopia infrarroja, superposición de las muestras.

Según la tabla 4. Cuando se comparan los espectros de los dos lubricantes no se observa una diferencia tan significativa entre los dos. Presenta bandas que hacen alusión a aditivos detergentes y posible oxidación.

- ✓ En 700 cm^{-1} . encontramos aditivo de polimetilmetacrilato estireno-isopreno para mejorar el índice de viscosidad.
- ✓ En $1050\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$. Encontramos sulfonato detergente.
- ✓ En 1040 cm^{-1} . en esta zona encontramos oxidación.
- ✓ $1100\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$. Rango de oxidación del lubricante.

Se puede concluir que nuestra muestra de lubricante presenta aditivos, detergentes y por supuesto oxidación según los parámetros que nos proporciona dándonos a conocer los grupos funcionales presentes la tabla 4.

Tabla 4. Contaminantes presentes en lubricantes.

| Contaminant or lubricant component | Absorption, cm^{-1} | Type of vibration | Interferences |
|--|------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Water | 3300-3500, 1600 | O-H stretch | Glycol, oxidants |
| Fuel | 500-1000, 1600 | C-H out of plane deformations of aromatics | Unsaturation in lubricants |
| Oxidized lubricant | 1700-1750, 1100-1200 1630, 1270 | C=O stretch N=O stretch (oxidized from blow-by) | Viscosity index improvers Alkenes |
| Glycol coolant | 1040, 3300-3500 1080, 3300-3500 | C=O stretch C-O stretch | Oxidation Antioxidant |
| ZDDP | 950-1050 | P-O-C asymmetric stretch | Aromatics |
| Sulfonate detergent | 1100-1200 | SO ₃ asymmetric | Oxidation |
| Pour-point depressant (polymethacrylate) | 1732 | C=O stretch | Oxidation |
| Dispersant: Succinimide | 1707 | O O | |
| Mannich base | 1650 | C-N-C | Oxidation |
| Viscosity index improver: Polymethacrylate | 1732 |  | |
| Styrene-isoprene | 700 | C=O  | Oxidation Fuel |

5.11 Difracción de rayos X

La austenita retenida fue confirmada por medio visual como es el microscopio óptico, pero con la finalidad de corroborar su presencia se realizó el ensayo de difracción de rayos X, particularmente cuando la cantidad involucrada es pequeña es habitualmente determinada por difracción de rayos X. La precisión usando un difractómetro está en la región de 0,5% para el rango 1,5 a 38% de austenita [24].

Se realizó ensayo de difracción de rayos X, para la corona dentada y el piñón con el fin de observar las fases cristalinas presentes en las dos piezas. Los difractogramas obtenidos para las muestras se pueden observar en la figura 34 y 35.

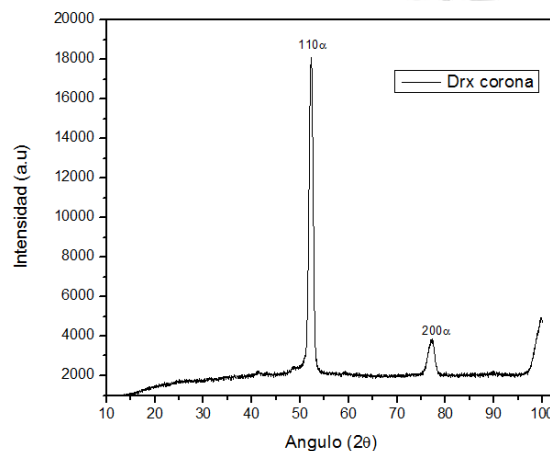


Figura 34. Difracción de rayos X de la corona.

La identificación de las fases cristalinas para la figura 34 y 35, se realizó utilizando el software "X'pert HighScore", el cual utiliza de patrones adscritos a las bases de datos PDF y COD.

Para la figura 35 se encontró en la base de datos [25], las fases presentes corresponden a ferrita α para los ángulos 52° plano (110) y 77° (200).

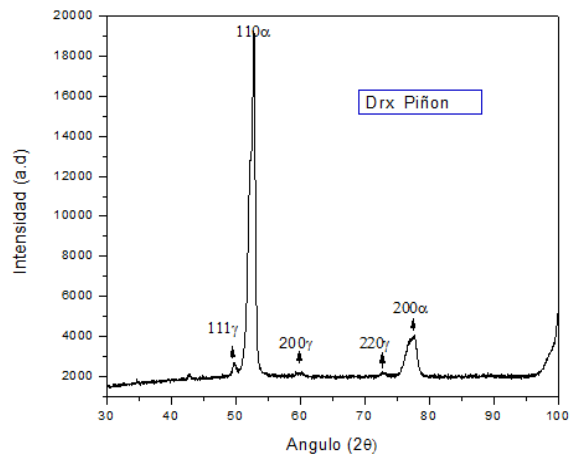


Figura 35. Difracción de rayos X del Piñon.

Para el difractograma de la figura 35, se encontraron dos fases presentes en la muestra que hacen referencia a ferrita α correspondiente a los ángulos 52° plano (110) y 77° plano (200), además de la fase hierro gamma encontrada en la base de datos [26], que pertenece a los ángulos 50° plano (111) y 59° plano (200). La fase gamma pertenece a la ausenita retenida presente en la muestra del piñon. Se establece una comparación entre el difractograma de la figura 36 (a) difractograma del piñon y el difractograma (b) encontrado en la literatura [27], con dicha comparación podemos asumir que posiblemente el contenido de ausenita retenida en el piñon puede ser de 12% en volumen con respecto al difractograma (b) de la línea (2).

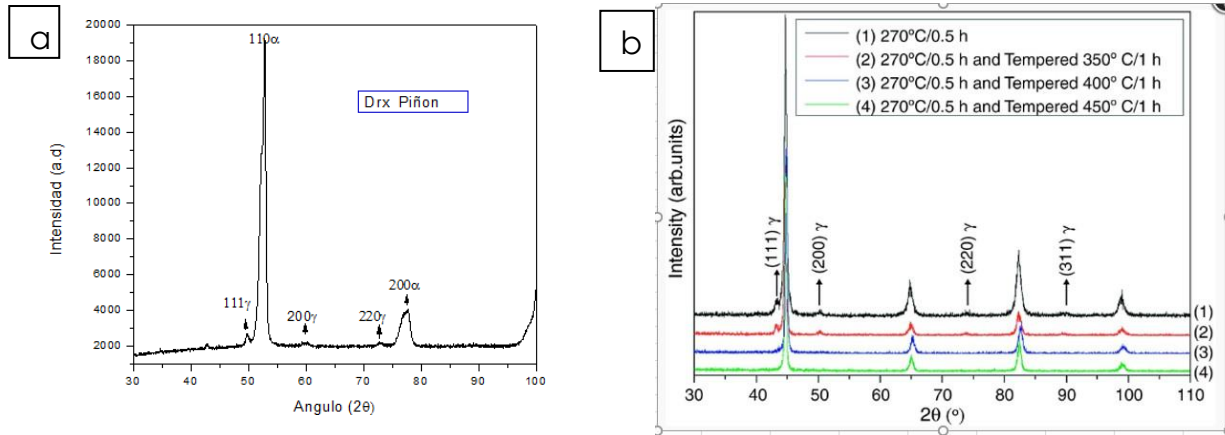


Figura 36: (a) difractograma del piñon, (b) difractograma comparativo [27].

Se establece una comparación entre el difractograma (a) y la figura (b) (2), nos interesa este difractograma en particular ya que la intensidad de los picos es muy similar a la muestra, además que las fases que se presentan en dicho difractograma son las que fueron previamente identificadas en la muestra del piñon.

5.12. Patrones de contacto de engranajes Arvi Meritor

En la búsqueda de información de estos componentes, se encontraron manuales de mantenimiento proporcionados por la casa fabricante, en este caso Meritor donde se indica cómo debe realizarse el ajuste de estos componentes. En la figura 37, se muestran algunas recomendaciones de cómo debe ser la marca dejada mediante el proceso de ajuste [28].

Estos patrones de ajuste los recomienda la casa fabricante Meritor con el fin de que sus clientes puedan tener una noción de cómo se da un buen ajuste entre los componentes.

Generoid Gears

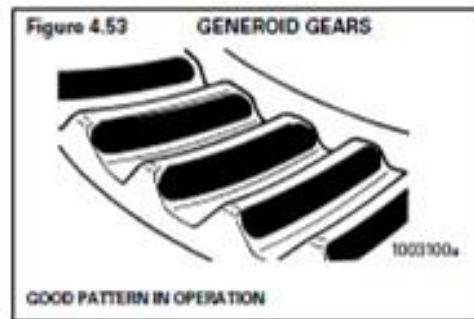
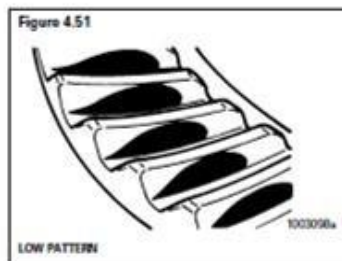
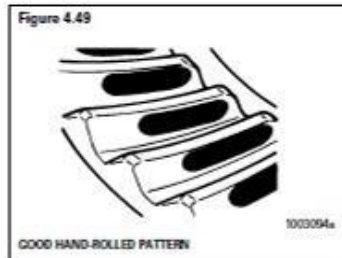


Figura 37. Patrones de contacto Arvi-Meritor.

5.13 Patrón de contacto en unidades que utilizan diferencial Arvi Meritor.

La figura 38 muestra las imágenes que se tomaron con el fin de realizar una comparación de los ajustes que se realizan en las diferenciales antes de ser montadas nuevamente a las unidades.

Cuando son comparadas las marcas entre si no se observa que se siga un parámetro del tipo de huella que debe realizar el diferencial luego de ser ajustado. Si se comparan los ajustes anteriores con los recomendados en el manual de mantenimiento de Arvi-Meritor no se encuentra este tipo de marca en el manual.



Figura 38. Ajuste de diferencial.

5.14 Patrones de contacto del diente ANSI-AGMA 2005 -D03

La posición y el patrón de contacto de diente es un contribuidor importante a la calidad del engranaje cónico, dependiendo de la cantidad de la carga aplicada a engranajes cónicos, cualquier desviación del patrón de contacto adecuado indica la naturaleza del error.

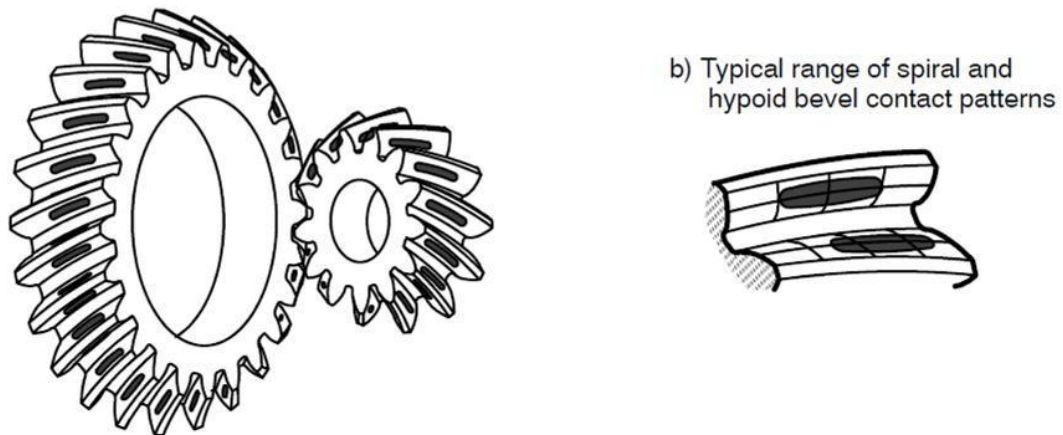


Figura 39. Huella de contacto para engranajes hipoidales.

Estas huellas de contacto entre corona y speed pueden ser observadas fácilmente pintando los dientes con un compuesto de marca y funcionando el equipo unos segundos debajo de una carga ligera.

El contacto se extiende a lo largo de aproximadamente la mitad de la longitud del diente y está más cerca de la punta del diente que del talón, además, el contacto se alivia un poco a lo largo del flanco y la parte superior del perfil. Ver figura 40.

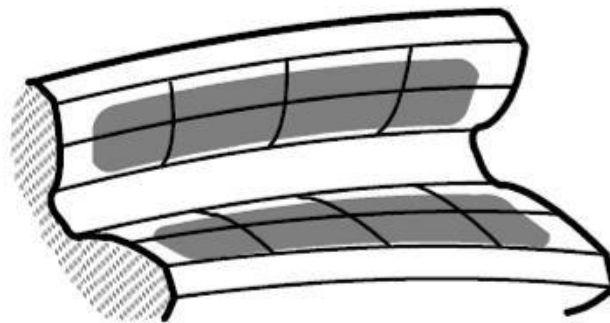


Figura 40. Contacto a plena carga.

El patrón de contacto debe extenderse en la longitud total del diente, sin necesidad de concentración en el extremo o parte superior de los dientes de ambos miembros [29].

5.15 Prueba de dureza

La dureza medida en el centro de la corona y el piñón fue de 54RC. Se esperaba una menor dureza ya que la ductilidad del centro es primordial para dicha función de estos componentes.



6. CONCLUSIONES

- Se realizó la inspección visual de la falla en los componentes y el lubricante; se encontraron marcas de trinquete en las superficies fracturadas además de pérdida en la geometría de la circunferencia interior de la corona, las marcas de trinquete se originan en fallas ocasionadas por fatiga del material, además de observar hendidura, posiblemente ocasionada por impacto en la parte del flanco esto se puede dar por un mal ajuste entre piñón y corona, ya que los esfuerzos que experimentan estos dientes pueden compararse con los de una viga en cantiléver. No se puede predecir con certeza si esta falla por fatiga se originó por exceso de carga o posiblemente el material excedió el límite de fatiga durante su periodo de operación, ya que no se conocen dichos datos lo que si se tiene certeza es que la morfología de la falla fue ocasionada por fatiga.
- La viscosidad del lubricante aumenta un poco posiblemente por contaminación de partículas metálicas en el lubricante para estar seguros de esto se tendría que realizar un conteo de partículas además de su tamaño, debe de tenerse en cuenta que estas partículas pueden propiciar un medio abrasivo para estos componentes. El lubricante se observó muy oscuro, espumoso y sobre todo con un olor muy irritante para el olfato y los ojos.
- La prueba de metalografía evidencia una estructura martensita; el piñón presenta capa cementada y estructura martensítica con austenita retenida, su dureza fue de 54 Rockwell C medida en el centro, además de una micro grieta que no presenta ninguna bifurcación de la parte exterior del diente, esta grieta es posible que hubiese tenido lugar durante la transformación de la austenita retenida a martensita es una posibilidad mas no es una afirmación.

- Los líquidos penetrantes revelan que el diente no fallado de la corona sufrió golpes por impacto en la parte del flanco cerca a la circunferencia exterior cerca del borde del diente.
- Los resultados de la espectrometría de emisión óptica de piñón y corona, nos evidencian que estos tienen un contenido de carbono de 0,29% y 0,38%, además de una capa cementada de 1,03% y 0,98% respectivamente, además, en la prueba de metalografía el piñón mostro austenita residual, esto se origina mediante proceso de tratamiento térmico, es posible que una de las causas de la aparición de la austenita en la microestructura es debido a la diferencia de M_s (comienzo de la transformación martensítica) entre el centro y el borde, esta posibilidad se contempla, ya que se calculó la temperatura M_s para el centro y según la ecuación de Payson and Savage fue de 338,59°C y para el borde cementado es M_s 110,68°C lo cual implica que la temperatura M_f (fin de la transformación martensítica) está por debajo de la temperatura ambiente, por esta razón se aumenta la probabilidad de tener austenita residual; la cual debe eliminarse por refrigeración o por tratamiento subcero.
- La prueba de difracción de rayos X mostro la presencia de la fase ferrita α , además de hierro gamma que nos hace alusión a la austenita retenida, el contenido de dicha fase en la muestra es posible que pueda generar agrietamiento debido a las condiciones de trabajo que está sometido el piñón, dichas condiciones posiblemente puedan propiciar la transformación de la austenita retenida a martensita produciéndose un cambio volumétrico debido al cambio de fase esto a su vez puede generar un agrietamiento del piñón y además hay que tener en cuenta que estas grietas se hacen más grandes a medida que más ciclos se tengan hasta producir se la falla del piñón.
- Se realizó microscopia electrónica de barrido con el fin corroborar la presencia de austenita residual, que se evidencio durante el análisis metalográfico del piñón, con dicha prueba puede establecerse la posibilidad de contenido de ferrita widmanstatten en los límites de grano.

- Las pruebas de tribológicas mostraron un coeficiente de fricción un poco más inestable con el lubricante usado que con el lubricante sin usar, sin embargo, los valores obtenidos fueron muy similares y en ninguno de los dos casos se obtuvo huella de desgaste.
- Los patrones que se encontraron en la teoría se compararon con los observados mediante el semestre de industria y no se observó huella parecida a la recomendada por Arvi-Meritor ni por la norma ANSI/AGMA2005 D03.



7. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

- Se recomienda realizar un estudio más a fondo del tiempo de vida útil del lubricante y el periodo de asentamiento de la diferencial para tener con mayor certeza el tiempo de cambio de éste, además de tratar de saber qué temperatura alcanza este en la diferencial durante el periodo de operación ya que las altas temperaturas ayudan en la degradación del lubricante.
- Consultar a personal que esté capacitado y con tiempo de experiencia en el tipo de ajustes que se debe realizar a esta diferencial o pedir a personal de Arvi Meritor capacitación en este tipo de componentes y como debe elaborarse su montaje para la operación y si este tipo de diferencial es el adecuado para este tipo de automotores o se requiere de un rediseño en éste, teniendo en cuenta las condiciones topográficas en las que trabajan estos buses en la ciudad de Medellín.
- Se aconseja estudiar la cantidad de pasajeros que ingresen en horas pico y de poca fluencia, con el fin de saber qué tanto peso está cargando el sistema de suspensión de esos buses; ya que el housing también presenta falla ocasionada por fisuras que se presentan en las fundas ocasionando pérdidas de lubricante del diferencial.
- Se debe realizar estudios que determinen la cantidad de austenita retenida que puede aceptar un engranaje para que no conlleve a la falla.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] <https://sites.google.com/site/partesautomovil/automotor/traccion-trasera>.
- [2] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4483/fichero/6.+Engranajes.pdf>
- [3] www.arvimeritor.com Características del Diferencial Arvi Meritor.
- [4] http://repositorio.sena.edu.co/sitios/elementos_maquinas/vol8/vilumen08.htm/#.
- [5] Manual de Diseño para engranajes cónicos ANSI /AGMA 2005-D03.
- [6] Trabajo mantenimiento a cajas de velocidad disponible en: http://repositorio.sena.edu.co/sitios/elementos_maquinas/vol15/pdf/15-mantenimiento-de-cajas-de-velocidad.pdf pagina 21-31 [consultada el 10 de agosto del 2016].
- [7] ASM Metals Handbook Volume 11-Failure Analysis And Prevention Classification of Gear Failures Página 2568 -2603. Año 1996.
- [8] Tecnología del tratamiento térmico de los Metales Autor Asdrúbal Valencia Giraldo. Capítulo 13 Páginas 99- 345-364.
- [9] Transformaciones de fase en metalúrgica (1948). Autor Asdrúbal valencia Giraldo Editorial universidad de Antioquia.
- [10] Revista integración universitaria FESC -2013 Engranajes historia fabricación fallas Paginas 35- 42.
- [11] <https://www.youtube.com/watch?v=bojVO3KBO>.



[12] Trabajo mantenimiento a cajas de velocidad disponible en: http://repositorio.sena.edu.co/sitios/elementos_maquinas/vol15/pdf/15-mantenimiento-de-cajas-de-velocidad.pdf pagina 21-31 [consultada el 10 de agosto del 2016.

[13] <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902861.pdf>

[14] Mantenimiento de cajas de velocidad #15 – Fallas en los engranajes– pagina 21-26 Centro de gestión de mercados, logística y TIC´s, SENA –BOGOTA 2013.

[15] <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902861.pdf>

[16] Articulo Fuente Danel-las fallas en los engranajes-4902861.

[17] <https://es.slideshare.net/isabelgilbrettiscom/03-lubricantes-para-engranajes-14652909>.

[18] ASM Metals Handbook Volume 11 - Failure Analysis and Prevention- Lubricants Páginas 855-857.

[19] Tribología y lubricación industrial y automotriz Autor Pedro Ramón Albarracín. Tomo 1. 4 edición.

[20] Revista de Metalurgia Vol. 41 #3 mayo –junio 2005 Comportamiento frente al desgaste y fricción de aceros empleados en líneas de manutención aérea ensayados con y sin lubricación. Página 212-219.

[21] ASM Metals Handbook Volume 09- Metallography And Microstructures 2004. Página 2675.

[22] http://eneng.com.br/es_ES/analisis-de-fallas.

[23] Transformación de fase en metalurgia, Autor Asdrúbal Valencia Giraldo. Capítulo 13 Páginas 148-154.



[24] Smith ells Metals Reference Book, 6th ed, EA. Brandes, Ed, Butterworths, London, 1983, Página 4-17.

[25] Schmitz-Pranghe, N. Duenner, P.Kohlhaas, R. Golden Book of Phase Transitions, Wroclaw, 1, 1 - 123, (2002).

[26] Lindh, A.E. Westgren, A. Zeitschrift fuer Physikalische Chemie (Leipzig), 102, 1 - 25, (1922).

[27] jose Alberto da cruz, D. s. (2012). Efecto de la temperatura de temple sobre el producto de la descomposicion isoterma formado de bajo de Ms. *Journal of materials research technology*, 93-99.

[28] Maintenance Manual 5E Tandem Axle Forward Carriers And Single Axle Carriers Arvi Meritor página 64-66.

[29] Design Manual for Bevel Gears, AGMA STANDARD. ANSI/AGMA 2005 –D03. [consultada el 28de octubre de 2016].

