



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

ANÁLISIS DE FATIGA DE RESORTE HELICOIDAL

Luis David Daza Hernández

Código: 201220038602

Luis Ariel Clavijo Velásquez

Código: 201213101602

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería y ciencias básicas

Bogotá D.C., Colombia

2019

ANÁLISIS DE FATIGA DE RESORTE HELICOIDAL

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

Director:

Doctor en Ingeniería: Ciencia y Tecnología de Materiales

Magíster en Ingeniería: Materiales y Procesos

Ingeniero Químico

Línea de Investigación:

Sistemas Complejos y Aplicaciones Tecnológicas de Impacto Social

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D.C., Colombia

2019

Dedicatoria

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

Proyecto de grado aprobado por la Facultad de Ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de:
Ingeniero Mecánico.

Doctor en Ingeniería: Ciencia y Tecnología de Materiales
Magíster en Materiales y Procesos
Jesús Manuel Gutiérrez Bernal
Director de Proyecto de grado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Lista de figuras

Figura 1 Inspección visual del resorte.....	19
Figura 2 Maquina prueba de fatiga lineal de 4 hz.	20
Figura 3 Zona de falla en el resorte.	20
Figura 4 Selección de la pieza a estudiar.	22
Figura 5 Corte de la pieza que será estudiada.	22
Figura 6 Selección de la probeta sometida a prueba de microestructura	23
Figura 7 Preparación de la probeta para prueba de microestructura.....	23
Figura 8 Pulidora de banda.....	24
Figura 9 Pulidora metalográfica.	25
Figura 10 Microestructura (especificación ASTM E-112)X100	25
Figura 11 Durómetro mecánico.....	26
Figura 12 Microestructura (Especificación ASTM E-112) x100 resorte A1	27
Figura 13 Microestructura (Especificación ASTM E-112) x100 resorte A2	27
Figura 14 Microestructura (Especificación ASTM E-112) x100 resorte A3	28
Figura 15 Microestructura referencia del libro Handboook con la que se comparó para determinar que era martensita revenida	28
Figura 16 Composición AISI-SAE 9254	29
Figura 17Huellas en probeta al realizar pruebas de dureza.	29
Figura 18 Patrón de toma de dureza.	30
Figura 19 Datos dureza vs distancia.....	30
Figura 20 Grafica datos dureza vs distancia.....	31
Figura 21Tratamiento térmico Vs ciclos de falla.	32
Figura 22Tratamientos térmicos prueba de fatiga lineal.	33
Figura 23Marcas de falla resorte A1.	34
Figura 24Marcas de falla resorte A2.	35
Figura 25Marcas de falla resorte A3.	35
Figura 26 Guía esquemática de la aparición de superficies de fractura en la falla por fatiga [31].	36

Resumen

El presente proyecto se realizó un análisis de falla en un resorte helicoidal de un vehículo marca Chevrolet Sail. Lo primero que se realizó fue una inspección visual e identificación de las posibles fallas que este pudiera presentar, de esta manera se da inicio a las pruebas prácticas las cuales se llevaron a cabo en el laboratorio donde se montó el resorte helicoidal. En una máquina de fatiga lineal 4 HZ®, para conocer los ciclos que este soporta antes de fallar, posteriormente se realiza el proceso para conocer la micro estructura del material cual indica martencita revenida. Seguido con las fases del proyecto se realizó la toma de 5 huellas de dureza en HRC con diferentes % de profundidad. En los cuales se obtuvo que, en la huella de 0,02mm da una dureza de 51,00 HRC, la de 0,04mm de 51,00 HRC sin mostrar variación alguna. En la tercera y cuarta toma muestra una pequeña variación de 05 HRC, dando los siguientes datos iguales, la huella de 06,00mm da una dureza de 51,50 HRC y la de 0,08mm de 51,50 HRC. Así mismo la última toma que da en el centro del material da un poco más duro. La huella de 0,10mm da una dureza de 52,00 HRC, después de que se realiza la toma de las 5 huellas se suman los 5 resultados y los dividimos en 5 para así obtener el promedio de la dureza real.

Palabras clave; falla, análisis, micro estructura, piezas.

Abstract

The present project was carried out a failure analysis in a coil spring of a Chevrolet sail vehicle. The first thing that was done was a visual inspection and identification of the possible faults that this could present, in this way the practical tests were started which were carried out in the laboratory where the helical spring was mounted. In a 4 HZ® mechanical cycler, to know the cycles it supports before failing, the process is then performed to know the microstructure of the material, which indicates stunned martensite. Followed with the phases of the project was made the 5 hardness traces in HRC with different depth%. In which it was obtained that in the 0.02mm trace it gives a hardness of 51.00 HRC, that of 0.04mm of 51.00 HRC without showing any variation. In the third and fourth shot shows a small variation of 05 HRC, giving the following data equal, the 06.00mm footprint gives a hardness of 51.50 HRC and 0.08mm of 51.50 HRC. Likewise, the last shot that gives in the center of the material gives a little harder. The 0.10mm trace gives a hardness of 52.00 HRC, after the 5 marks are taken, the 5 results are added and we divide them into 5 to obtain the average of the real hardness.

Keywords; failure, analysis, microstructure, parts

Contenido

Lista de figuras	5
Resumen	6
Contenido	8
Introducción	10
Objetivos	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
Fundamento teórico.....	12
1. Aspectos importantes en la mejora de resistencia a la fatiga.....	12
1.2 Resistencia a la fatiga de aleaciones ferrosas	12
1.3 Fallas por fatiga resultado de cargas variables	12
1.4 Falla por fatiga, enfoque en el análisis de diseño.....	13
1.5 Fallas por fatiga	14
1.5.1 Etapas de la fractura por fatiga.....	14
2. Fractura y fatiga de los aceros estructurales.....	15
2.1 Factores que intervienen en la fractura por fatiga.....	15
2.2 Mecánica de la fractura elastico-plastica.....	16
2.2.1 Rotura bajo carga cíclica.....	17
2.3 Crecimiento de la fatiga	18
2.4 Fatiga axial por fatiga.....	18
2.5 Mecanismos de iniciación de grietas por fatigas	18
2.6 Fatiga acuosa	19
1. Procedimiento de análisis.....	19
2. Análisis metalográfico.....	22
3. Análisis de resultados.....	27
5.1 Microestructura.	27
5.2 Prueba de dureza.....	29
5.3 Prueba de fatiga lineal.	32
6 Análisis de falla.....	34
7 . Conclusiones	37
8. Bibliografía.....	38

Introducción

Los conceptos de fatiga y fractura son implementados desde muchos años atrás. En el siglo 19 por sucesos ocurridos con pérdidas de vidas humanas, se da inicio a pruebas de falla y error en las estructuras, e incluso los ingenieros esperaban bajo las estructuras mientras estas eran probadas, esto con el fin de garantizar los diseños fueran hechos a conciencia. Aunque el término fatiga fue implementado por Braithwaite. Luego de la fractura de un eje de un tren, dando inicio a una ardua investigación. En la cual su principal propósito es determinar la causa raíz de la falla que sufre la pieza, ocasionando que falle la maquina o estructura, generando pérdidas de vidas humanas.

Con los estudios y proyectos desarrollados, en pruebas de materiales y fatigas, da lugar a desarrollo de piezas eficientes, prolongando su vida útil mediante procesos de manufactura con la solución para minimizando errores que lleguen a afectar una herramienta, pieza o máquina. Estos ayudan a su calidad de fabricación reduciendo costos y fallas. Realizando mejores montajes, más confiables con una contribución considerable en el crecimiento de la ingeniería, cumpliendo su finalidad de preservar la vida humana.

La base de estos estudios. Se establece como la recolección de información datos de fondo. Como también lo son los resultados de las pruebas técnicas. Volviéndose algo necesarias tanto en la ingeniería mecánica, como en las ingenierías, petrolera, automotriz e industrial teniendo un valor muy importante.

Este proyecto también fue realizado con base al desarrollo de un nuevo producto que se va a fabricar en Colombia, para el vehículo Chevrolet Sail delantero.

Objetivos

Objetivo general

- Realizar el análisis de falla por fatiga. A un resorte helicoidal, aplicando el análisis de falla. Para el tipo de suspensión de los automóviles, Chevrolet Sail.

Objetivos específicos

- Recopilar información bibliográfica con el fin de analizar la falla de fatiga que se presenta en el resorte helicoidal.
- Realizar pruebas técnicas de ciclado, dureza y micro estructura las cuales nos ayuden a determinar la causa de la falla que se presenta en el resorte helicoidal.
- Determinar las causas que ocasionaron la falla. Con el fin de emitir el diagnostico técnico para evitar que componentes que estén bajo las mismas condiciones de trabajo puedan fallar por esta causa

Fundamento teórico.

1. Aspectos importantes en la mejora de resistencia a la fatiga

Para aumentar la resistencia a la fatiga, existen varios tipos de procesos y tratamientos superficiales cuando estos son sometidos a flexión o a cargas de torsión. Uno de ellos es el granallado el cual genera un estrés residual sobre la superficie a la cual se le aplicara la tensión de compresión, generando un endurecimiento [1].

Se debe tener en cuenta. Es el tipo de acero al igual que las fallas que puedan ocurrir internamente en el acero. Su composición química, su fabricación, y el uso al cual estará sometido, pues depende si estará sometido en ocasiones a cargas mayores y sus tratamientos ya que toda esta variable puede dar mayor o menor resistencia a la fatiga [2].

1.2 Resistencia a la fatiga de aleaciones ferrosas

Según el tipo de aleación que se tenga. Estará muy ligada su ductilidad y las características de deformación. Con base a esto se puede realizar análisis y pruebas con las cuales nos indicaran su comportamiento para llegar a cambiar la micro estructura en aceros y así alterar varias características y comportamiento de los mismos, como lo es su vida útil con respecto a la fatiga [2].

Estos estudios se llevan a cabo bajo parámetros de los fabricantes de aceros. Realizando pruebas de deformación cíclica ya que se puede ver afectadas las propiedades por endurecimiento de la relación tensión vs deformación. Estos estudios realizados son representados en curvas para su fácil identificación [7]

Consultando diferentes textos se observa una clasificación de los aceros como lo son los laminados en caliente, aceros de bajo carbono y los micro aleados [22], [18], [06], [3].

1.3 Fallas por fatiga resultado de cargas variables

Es una condición en la cual existe una variación en ciertos niveles de los esfuerzos y cargas flexionantes, un ejemplo para este caso. Un eje rotatorio que este dentro de un motor el cual se vea afectado por las cargas flexionantes, esta pieza experimenta tensión y compresión en cada revolución del motor, si el motor gira a 2000 revoluciones por minuto el eje estará sometido a un esfuerzo de tensión y compresión 2000 veces por minuto.

Estos esfuerzos pueden ser variables, repetidos, fluctuantes o alternantes. Si se realiza un análisis de fallas podrá mostrar que falla aun teniendo esfuerzos

máximos están por debajo de la resistencia a fluencia. Cuando se repiten estos esfuerzos se concluye que fallan por fatiga, a diferencia de otras fallas como son las fallas por las cargas estáticas, las cuales dan señales como deformaciones.

En estos casos se puede intervenir la maquina cambiando la pieza antes de suceda la fractura. A diferencia de las fallas por fatigas las cuales no muestran ningún tipo de evidencia física, por lo cual las fracturas son repentinas y peligrosas. Una falla por fatiga es muy similar a una falla por fractura frágil ya que las superficies son planas y perpendiculares al eje de esfuerzo. En el desarrollo de esta fractura difieren la fractura frágil ya que suceden tres etapas antes de que ocurra la falla total [10].

Primera fase: se inicia la formación de grietas las cuales no son perceptibles a simple vista debido a su reducido tamaño. Puede ser de 2 a 5 granos alrededor del origen de las cuales se pueden formar 1 o más micro grietas debido a la deformación cíclica plástica.

Segunda fase: se convierten en macro grietas dejando marcas de playa o marcas de concha las cuales son muy características de la fatiga. Las grietas se producen por las cargas cíclicas que se abren y cierran separando las mesetas de las crestas longitudinales dependiendo de la frecuencia y la corrosión del entorno.

Tercera fase: luego de pasar por las dos anteriores etapas llega la tercera y final que sería el de la falla súbita por pérdida de material. Se puede presentar como fractura frágil, dúctil o una combinación de las dos, donde se evidencia las marcas de playa por perdidas de material y adiciona las marcas de la tercera etapa llamadas líneas de Chevron las cuales apuntan hacia el origen de la grieta inicial [6].

1.4 Falla por fatiga, enfoque en el análisis de diseño

Se deben de tener en cuenta varios factores al momento de realizar un análisis de falla. Que se vean directamente relacionados como es el aumento de temperatura, ciclos de temperatura, ciclos a la alta frecuencia y el entorno corrosivo. Teniendo en cuenta todos estos factores se deben diseñar maquinas confiables. Así que se debe hacer un buen trabajo de parte de la ingeniería, acompañado de la ciencia para aumentar la confiabilidad. Pues se pueden exponer vidas humanas, cada vez que se realicen trabajos o montajes sin realizar los análisis de fatiga y cálculos necesarios. La ciencia no puede explicar todos los fallos de fatiga que puedan ocurrir pero la ingeniería debe encargarse de diseñarlos de tal forma que no fallen [11].

Hay varios métodos para estimar la vida que puede tener alguna pieza antes de sufrir una falla.

Entre los métodos más conocidos para lograrlo se encuentran.

Esfuerzo vida: El cual es uno de los menos exactos. Es utilizado para bajo ciclaje y el enfoque está en los niveles de esfuerzo. A pesar de esto es uno de los más tradicionales pues arroja una gran cantidad de datos, los cuales se pueden aplicar para una gran cantidad de diseños [2].

Deformación-vida: Este lleva un análisis más detallado de la deformación del material en zonas críticas. Es el más adecuado para bajo cilindrajes en el momento de aplicación existen incertidumbres en los datos obtenidos. Por tal motivo se realiza para idealizar como ayuda para comprender la naturaleza de la fatiga.

Fractura lineal elástica: Este método se aplica con el fin de que crezca la grieta, la cual ya debe de existir en el material, de esta forma se puede predecir el crecimiento de la grieta y la relación con la variación de los esfuerzos, es ideal para estructura de gran tamaño [4].

1.5 Fallas por fatiga

El proceso de la fatiga. Dependerá de las condiciones a la que esté sometida la pieza, de esto depende que se generen grietas. Estas grietas crecerán hasta llegar a la ruptura del material. Este es un deterioro progresivo que se da cuando se ejerce un esfuerzo repetitivo sobre el metal [13].

1.5.1 Etapas de la fractura por fatiga

Deformación plástica de grietas por fatiga: Se pueden iniciar micro fisuras debido a una deformación plástica alterna. Durante esta deformación plástica cíclica se puede llegar a producir endurecimiento cíclico o ablandamiento cíclico. La perturbación de esta carga cíclica depende de la amplitud de la deformación plástica en la región donde se forman las grietas de fatiga, que a su vez depende de la tensión a fluencia [3].

Iniciación de una o más micro grietas: en la superficie de la parte externa de la pieza aparecerán una o más micro grietas donde las fluctuaciones de tensión o compresión son más elevadas. Donde irán creciendo lo largo de la banda de deslizamiento. Cuando la energía de deformación es superada por el doble de la energía libre superficial, se presenta una condición de inestabilidad favoreciendo energéticamente la presencia de las microgrietas [5]

Propagación o coalescencia de micro fisuras para formar una o más micro fisuras: una grieta cuando es nucleada se propaga lentamente y en metales polí cristalinos a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladora. Por la tensión o los ciclos de la deformación plástica que es superior al límite de la fatiga.

Se generara una propagación en un lapso de tiempo prolongado, la micro estructuras crecerá hasta formar una macro fisura [10].

Propagación: Una macro fisura. Es la velocidad de extensión en que la grieta aumenta. Dejando de crecer la grieta en el eje de esfuerzo e inicia a crecer, en la dirección perpendicular al esfuerzo aplicado [10].

Fractura súbita: La separación de las partículas afecta el grosor de la pieza. Causando que el material se adelgace en el plano de la fisura. Se produce la ruptura de la pieza por fatiga, pues la pieza no puede resistir la carga desde un punto de vista estático [12].

2. Fractura y fatiga de los aceros estructurales

2.1 Factores que intervienen en la fractura por fatiga

Como se vio anteriormente hay factores que afectan o intervienen en la ruptura por fatiga. Como el diseño de la pieza, adicional a esos existen otros más que también afectan como lo es.

Cualquier discontinuidad geométrica: es por donde puede nuclear la grieta de fatiga o actúa como concentradora de tensiones. Cuando más aguda pueda ser más severa la concentración de tensiones [6].

Tratamientos superficiales: Cuando se realiza una pieza se pueden llagar hacer unos pequeños surcos en la acción de mecanizado. Estas marcas actúan como pequeñas grietas que pueden ir aumentando.

Endurecimiento superficial: Una mejora en cuanto a las propiedades de la fatiga se da en el aumento de la dureza de la capa así como la de las tensiones residuales de compresión las cuales se original en el procesos de cementación y nitruración [11].

Medición de crecimiento de las grietas por fatiga: Se puede realizar con un método de observación visual. Con ayuda de un microscopio. En esta técnica la grieta será medida por medio de marcaciones realizadas en intervalos de distancia iguales a lo largo de la probeta.

Otra técnica que se utiliza para este fin, es la diferencia de potencial la cual consiste en aplicar una corriente constante en una probeta con el crecimiento de la grieta la diferencia de potencial en dos puntos de contacto situados en la punta de la grieta aumentara el voltaje. Este se compara con el voltaje de la probeta donde no existe grietas con la ayuda de una curva de calibración se podrá definir el largor de la grieta [12].

Resistencia a la propagación de grietas por fatiga: La fractura es la separación de un sólido el cual estará sometido bajo tensión, se puede dar en dos o más piezas. Por lo tanto, Hay dos enfoques diferentes para el estudio de la resistencia y el fallo de los materiales [20].

Energético: el cual estudia la variación de energía potencial cuando las grietas abren.

Local: Existe una teoría la cual fue propuesta por Griffith. Esta indica que siempre existen grietas en los sólidos aunque sean de un tamaño mínimo y la fractura es el resultado de su crecimiento. La idea de esta teoría es que una grieta tiende a propagarse si la energía potencial del cuerpo tiende a disminuir a medida que la grieta crece. Por este motivo se examina las tensiones en la punta de la grieta, y los compara con valores conocidos del material de esta forma conoce el tamaño de la grieta y si la hay [1].

2.2 Mecánica de la fractura elastico-plastica

Se da un avance considerable en 1957 gracias que Irwin planteo estudiar la fractura a partir de los campos tensionales. Para su formulación plantea que el proceso de fractura no puede en un solo punto, como en un análisis elástico. Se presenta en zonas pequeñas, pero a la vez finita denomina una zona plástica en esta las tensiones dejan de ser infinitas partiendo de una energía elástica [7].

Factor de concentración de esfuerzos: Es un método de cálculo de la cantidad de energía disponible. Para romper en términos de tensiones asintóticas alrededor del frente de la fractura en el sólido elástico lineal [12].

Tasa de liberación de energía de deformación: Si la relación de la zona plastificada alrededor de la fisura es pequeña comparada con el tamaño de la propia fisura. La energía que se requiere para que la fisura crezca no depende del extremo de la fisura Irwin hace referencia que el proceso de fractura no podía concentrarse en un solo punto si no que se da en un zona pequeña próxima a la punta la cual denomino zona plástica, esta zona por efecto de la deformación mantiene las tensiones dentro de labores finitos absorbiendo energía [12].

Curva R extensión de la fisura es un gráfico en función del tamaño de la grieta. El cual se puede examinar los procesos de crecimiento de grieta estable y fractura inestable [12].

Clasificación de las fracturas mecánicas según condiciones de carga

Fractura por sobre carga: La carga aumenta a una rapidez moderada hasta la rotura.

Fractura de impacto: la carga que hace la falla aumenta súbitamente.

Fractura por fatiga: Cuando la falla se produce por cargas repetitivas. Otra manera de diferenciar las fracturas es por su apariencia macroscópica. Ya que si hay una propagación de las grietas esta cortaran lo granos, este fenómeno se conoce como fractura transgranular. Y si las grietas se propagan a lo largo de las fronteras del grano este se puede conocer como fractura intergranular [12].

Fractura dúctil: Se origina un cuello y una cavidad dentro de la zona de estrangulamiento estas cavidades se fusionan con una grieta en el centro de la muestra posteriormente crecerá hacia la superficie perpendicularmente a la tensión aplicada, cerca de la superficie la grieta cambiara su dirección a 45° con respecto al eje de tensión. Teniendo como resultado una fractura de cono y embudo, esta fractura ocurre bajo grandes deformidades plásticas [12].

Fractura frágil: Por lo general las fracturas frágiles son transgranulares lo que quiere decir que se propagan a través de los granos. Pero puede llegar a ser intergranular mente. Siempre y cuando los granos constituyen una zona de debilidad hay mayor probabilidad de que sea intergranular, está fractura se favorece a bajas temperaturas y altas deformaciones, normalmente se da la rotura bajo carga monótona lo que conlleva que las partículas de mayor tamaño pueden llegar a romperse con mayor frecuencia que las partículas más pequeñas. Debido que si se aumenta el tamaño en el interior de estas aparecen defectos lo cual reduce su resistencia mecánica [12].

2.2.1 Rotura bajo carga cíclica

Los ensayos que se realizan a pruebas de fatiga se llevan a cabo en probetas lisas. Las cuales se someten a ciclos de deformación manteniendo la amplitud de tensión o la deformación constante. Normalmente donde se presentan las grietas son en aquellas zonas formadas por agrupaciones partículas, suelen presentarse problemas de adherencia entre la matriz y el esfuerzo [11].

Causas generales de las fallas

Deficiencia de diseño: Selección inapropiada de materiales e información insuficiente.

Imperfecciones de materiales: Como lo son porosidades y cavidades de contracciones [11].

Defectos de fabricación: Generación de concentradores de tensión superficial y descarburada.

Errores de montaje: Especificaciones ambiguas o incompletas [11].

Condición inapropiada de servicio: Manipulación de los equipos por técnicos sin conocimientos. Equipos con poco mantenimiento o en condiciones extremas [11].

Vida a fatiga ley de parís: Es difícil percibir la transición entre sus dos etapas iniciación y propagación.

Para los materiales fabricados sin defectos las grietas y su periodo suele ser de propagación. Siendo conocido como fatiga plana donde el periodo de iniciación a comparación de la propagación es superior. Cuando ocurre la transición del periodo de iniciación al de propagación este efecto se conoce como longitud de grieta, por motivo de que la grieta tiene dimensión suficiente para que el crecimiento dependa de las propiedades del material y no de su micro estructura [11].

2.3 Crecimiento de la fatiga

La propagación de las grietas en los aceros ocasionadas por fatiga es indiferente a los cambios entre grados. Más sin embargo se ha evidenciado que al realizar una limpieza en el acero influye en el crecimiento de la grieta. Otro suceso que se ha evidenciado es las inclusiones no metálicas en los aceros generan aceleramiento en el crecimiento de las grietas por fatiga particularmente en las pruebas de grosor de paso transversal y paso longitudinal (ST, SL) y trasversal (TL). Esto indica que la limpieza y la carga deben ser consideradas cuando se utilicen datos de tasa de crecimiento por fatiga [8].

2.4 Fatiga axial por fatiga

En procesos de daño por fatiga bajo esfuerzos axiales o de flexión pueden aparecer unas marcas en la superficie de rotura de forma más o menos circular y centrada en el punto de inicio de la grieta delimitando claramente varias zonas. Cada una de estas marcas indica el punto en que finaliza un proceso de carga y se inicia el siguiente. Además, dentro de estas zonas aparecen otras marcas menos acentuadas que corresponden a cada uno de los ciclos de carga [7].

2.5 Mecanismos de iniciación de grietas por fatigas

Las grietas en aceros al carbono normalmente dan inicio en pozos de corrosión, estas también pueden ser tras granulares las cuales pueden tener una pequeña ramificación. Los efectos ambientales también se ven involucrados en la aparición de las grietas, los cuales son más amplios para aquellos materiales que están expuesto al ambiente acuosos, que para ambientes que están expuestos a gases donde se pueden controlar las picaduras, dilución preferencial, ruptura de películas de óxido protector y reducción de energía superficial. Ya que estas grietas por corrosión su origen se debe a un proceso electroquímico de la interacción del material con el medio ambiente [12].

2.6 Fatiga acuosa

La fatiga acuosa es una solución de aleación química que soporta el material cuando entra en contacto con la corrosión del ambiente. Lo que hace que disminuya su resistencia a la fatiga, para esto se realizaron dos tiempos de pruebas. La primera fue someter un tipo de acero dulce a una solución de cloruro de sodio. La segunda fue con agua de mar artificial, el resultado que se obtuvo fue la aparición de pozos profundos distribuidos sobre toda la superficie en la que se llevó este tratamiento, llegando a concluir los dos experimentos sugieren que los defectos se podrían mejorar la iniciación de las grietas por fatiga [6].

1. Procedimiento de análisis

A continuación se muestra el procedimiento que se lleva a cabo para las pruebas de fatiga lineal y dureza las cuales se practicaron en el resorte helicoidal para luego determinar las posibles fallas y su micro estructura.

Lo primer que se hace para iniciar el proceso es una inspección visual a la pieza que se va someterá a las pruebas que en este caso es el resorte helicoidal, el cual no presente ningún tipo de anomalía.



Figura 1 Inspección visual del resorte.

Después de realizar la inspección visual del resorte y de determinar su buen estado físico, se realizó la debida instalación entre la bancada y la copela del resorte Chevrolet Sail M300. En la máquina de prueba fatiga lineal de 4 HZ® y se da inicio al proceso de ciclado en el cual se cuentan 101757 ciclos antes de que el material del resorte presento la falla.



Figura 2 Maquina prueba de fatiga lineal de 4 hz.

Se realiza una inspección visual del resorte helicoidal por la parte donde falla. Para este procesos se deja un registro fotográfico, en el cual se observa como fallo la pieza, y se evidencia lo prolongación de la falla por el material. Se observa el inicio de la falla y las marcas convergen al mismo punto posteriormente se obtiene una zona de fractura final. Lo que indica que aparentemente el resorte falla por fatiga.



Figura 3 Zona de falla en el resorte



2. Análisis metalográfico

- Etapa uno: escoger la pieza a estudiar. En este caso del resorte helicoidal se realiza un corte cerca a las puntas donde se presenta la falla.



Figura 4 Selección de la pieza a estudiar.

- Etapa dos: Se realizó registro fotográfico de la pieza que fue intervenida en el proceso de micro estructura con el fin de ser analizada previamente en donde se produjo la falla del material. Esta se profundiza en las zonas donde se presenta la entalla.



Figura 5 Corte de la pieza que será estudiada.

- Etapa tres: después de elegir las piezas a intervenir se realizaron cortes en las mismas, puesto que se necesitan superficies completamente planas para dar inicio al proceso de pulido hasta obtener un brillo espejo, este proceso se realiza por medio de una cortadora el cual debe ser lento debido a las altas fuerzas que se ejercer y a la temperatura que se puede alcanzar, para evitar estos efectos se debe realizar el corte con refrigeración preferiblemente con agua para garantizar una temperatura optima y no dañar la superficie del material que será intervenida.



Figura 6 Selección de la probeta sometida a prueba de micro estructura

- Etapa cuatro: En el momento que se tiene la probeta con el tamaño adecuado para una fácil manipulación se selecciona una de las dos caras por la cual se realiza el pulido para seguir con el proceso de micro estructura.



Figura 7 Preparación de la probeta para prueba de micro estructura

- Etapa cinco: se da inicio al lijado para esto se coloca sobre la banda de la pulidora metalográfica que tiene menor número de revoluciones el papel abrasivo n°240 y se mantiene constantemente húmedo, se ejerce presión suavemente sobre la superficie a observar de la probeta, hasta que sea cubierta totalmente de rayos de pulido paralelas.



Figura 8 Pulidora de banda.

Una vez que se obtiene este resultado, se detiene la pulidora se desmonta el papel abrasivo n° 240 y se monta el papel abrasivo n° 300, se mantiene constantemente húmedo, se ejerce presión suavemente sobre la superficie a observar de tal manera , que las nuevas rayas de pulido sean perpendiculares a las obtenidas con el papel n°240. Una vez que la superficie a observar está cubierta totalmente de rayas, se apaga la pulidora se desmonta el papel n° 300 y se monta el papel abrasivo n°400. Teniendo la precaución de girar la probeta 90° para que las rayas de pulido sean perpendiculares a las producidas anteriormente, se mantiene húmedo constantemente el papel abrasivo, generando una presión suave sobre la superficie a observar. Esta misma operación se repite con el papel abrasivo n° 400

- Etapa seis: luego de pasar la probeta por las diferentes lijas hasta obtener la superficie uniforme y lisa se da fin a este proceso con llevar la probeta al pulido de brillo espejo , para este se inicia el pulido sobre un paño, con ayuda de una pulidora metalográfica que es de menos número de revoluciones este procesos se realiza con alúmina disuelta en agua con el fin de obtener un mejor terminado, para finalizar este proceso es de gran ayuda el microscopio en el cual se verá la probeta y se verificara si queda alguna imperfección de lo contrario se dará finalizado el proceso con éxito.



Figura 9 Pulidora metalográfica.

- Etapa siete: luego de que se tiene la probeta pulida a espejo se realiza el ataque con ácido nítrico mezclado con alcohol esta composición ataca la micro estructura del acero revelando los componentes básicos luego de unos minutos de hacer reacción se observa en el microscopio con el fin de identificar y caracterizar el acero. Es bueno aclarar que no se puede atacar el acero durante mucho tiempo con este ácido ya que esto quemaría la estructura del acero, en caso de ser necesario neutralizar el proceso de ataque con ácido solo se necesitara de lavarlo con agua para frenar el proceso de inmediato.
- Etapa ocho: terminados los pasos del ataque con ácido. La micro estructura del acero estará disponible para observarla en un microscopio con estas imágenes se identifica el acero y con la comparación de la biografía utilizada se podrá saber de qué acero está formada la pieza tratada.

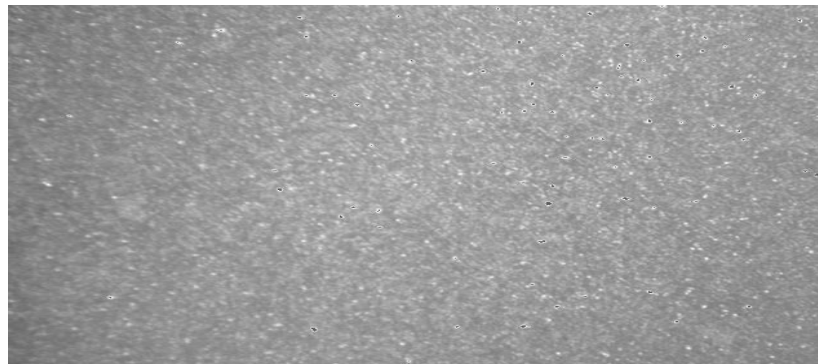


Figura 10 Micro estructura (especificación ASTM E-112) X100

Nótese que la micro estructura indica que es martensita revenida. La cual no es una fase, ni es ya martensita, son finas partículas de la fase cementita en una matriz de la fase ferrita. Esta es una estructura meta estable de baja temperatura

de los aceros, se obtiene por un reacomodo local de los átomos lo que hace que cambie su estructura cristalina en el revenido de la martensita busca la evolución de las fases ferrita y cementita queriendo estar en equilibrio, por esto se tendrán finos carburos en la matriz de ferrita, la cual no será perlita llagando a si obtener martensita revenida la cual tendrá una tenacidad y resistencia a la fatiga de gran interés [5].

- Etapa nueve: última fase del análisis metalográfico, en esta fase con ayuda de un durómetro mecánico de marca MISAWA SEIKI Modelo 3R Medidor de dureza Rockwell, Pila de peso; 60Kgf (suspensión), 40Kgf, 50Kgf (como se indica) Total de 150Kgf, el cual posee una punta de diamante con el fin de que su dureza sea mayor al material que se estudia, se realizó la prueba de dureza a la probeta para tener la referencia del acero que se está utilizando, con la medida de dureza arrojada se identificara por medio de las tablas de propiedades de aceros industriales que acero es el que se está tratando. La dureza que nos dio en el material fue de 51HRC, 51HRC, 51,5HRC, 51,5HRC y 52 HRC.



Figura 11 Durómetro mecánico.

3. Análisis de resultados

A continuación se analizan los resultados obtenidos anteriormente en la ejecución del proyecto para posteriormente analizar la falla que presentó el resorte.

5.1 Microestructura.

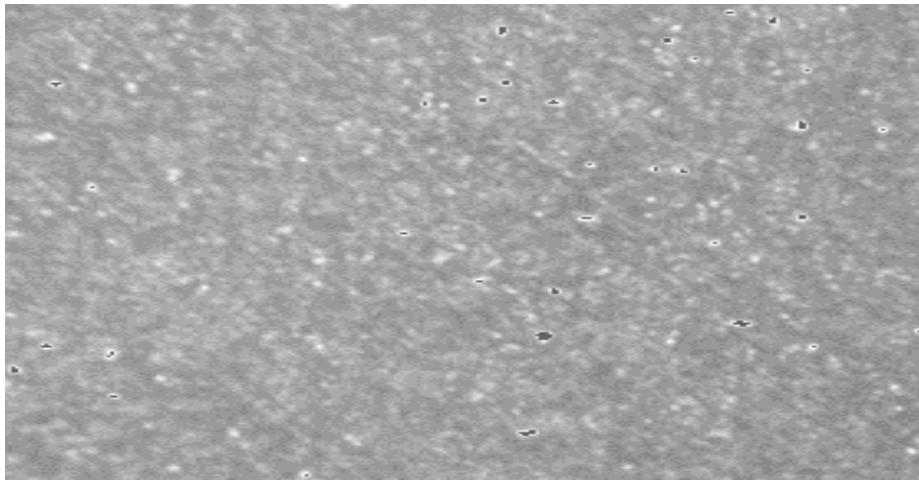


Figura 12 Micro estructura (Especificación ASTM E-112) x100 resorte A1



Figura 13 Micro estructura (Especificación ASTM E-112) x100 resorte A2



Figura 14 Micro estructura (Especificación ASTM E-112) x100 resorte A3

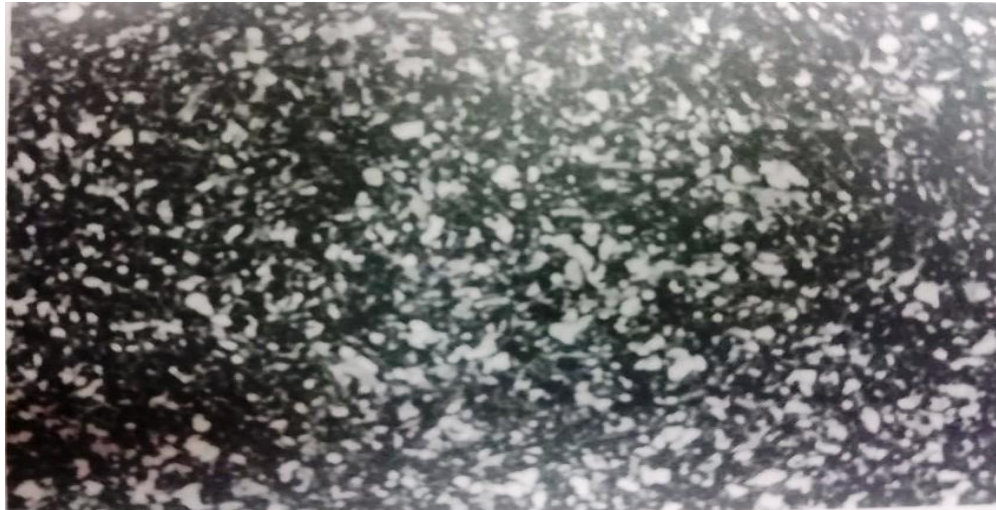


Figura 15 Micro estructura referencia del libro Handboook con la que se comparó, para determinar que era martensita revenida las microestructuras que se investigaron

Se puede observar en las tres micro estructuras reveladas en las probetas, son similares en su composición química puesto que muestran perlita y cementina en una cantidad menor, dado a que el ataque con ácido hace que la perlita se oscurezca y se pueda ver la célula de la perlita en relación a la cementita, de esta forma se determina este acero como un 9254 por medio del diagrama de aceros. Con esto se da indicios que la falla sufrida en los resortes helicoidales y sus variaciones en resistencia a la fatiga pueden ser afectadas directamente por el tratamiento térmico realizado en cada una de ellas.

Obteniendo un dato importante como lo es el tipo de material el cual se define anteriormente con ayuda del diagrama de acero, el cual indica que es un acero SAE9254. Con este se puede conocer su composición AISI. Con estos datos se busca en el atlas de metalografías donde se encuentran las micro estructuras más típicas, de esta forma se hallará lo que se requiere para esta muestra.

Figura 16 Composición AISI-SAE 9254

ACERO SAE	C	Mn	P.Max	S.Max	Si	Cr
9254	0.50-0.60	0.50	0.040	0.040	1.20-1.60	0.50-0.80

5.2 Prueba de dureza



Figura 17 Huellas en probeta al realizar pruebas de dureza.

Esta prueba de dureza se toma con el durómetro mecánico en cinco repetidas ocasiones en diferentes puntos de la probeta como se observa en la figura 17. Los resultados obtenidos son los que se observan en la figura 19 datos de dureza la cual hace una relación distancia vs dureza.



Figura 18 Patrón de toma de dureza.

Con este patrón verificamos que el durómetro está calibrado y en óptimas condiciones, para que las muestras de dureza sean confiables, así mismo se garantizó que la toma de dureza está dentro de especificaciones establecidas.

Figura 19 Datos dureza vs distancia.

<i>Distancia de la orilla al centro de la probeta en mm</i>	<i>Dureza HRC</i>	<i>Dureza ideal HRC (teórica)</i>
<i>0,2</i>	<i>51,00</i>	<i>54</i>
<i>0,4</i>	<i>51,00</i>	<i>54</i>
<i>0,6</i>	<i>51,50</i>	<i>54</i>
<i>0,8</i>	<i>51,50</i>	<i>54</i>
<i>10</i>	<i>52,00</i>	<i>54</i>

En un ciclo ideal si este acero, se calienta a una temperatura de 830-900°C seguido por el enfriamiento brusco con aceite así quedando el material templado y para darle alivio de tensiones se pasa por revenido a temperaturas entre 350°C y 450°C quedando la dureza en 51,5 HRC, después de que el enfriamiento es Max. 54 HRC. [22]

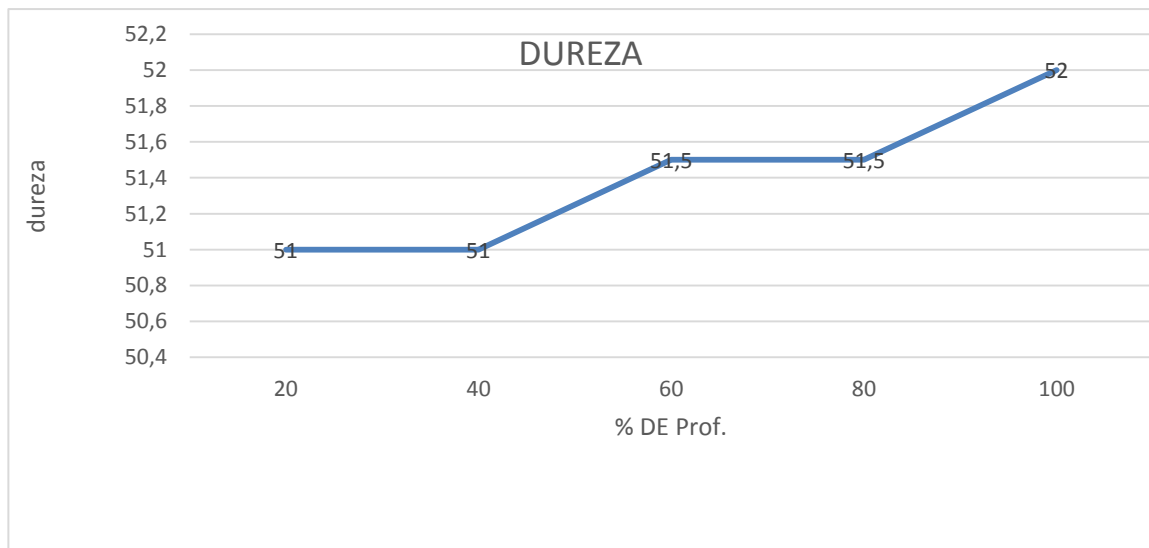


Figura 20 Grafica datos dureza vs distancia

Se observa en la figura 20 grafica dureza vs distancia, que la dureza es directamente proporcional a la distancia de donde se toma la huella de dureza puesto que mientras que esta aumenta la dureza de igual manera tiende a ser mayor.

Si se promedian los datos obtenidos en las huellas de dureza dará una media de 51,4 HRC la cual es un numero de dureza bastante alto lo cual indica que el material que fue sometido a las pruebas puede llegar a ser un acero endurecido o la otra opción es que sea una aleación templada y revenida, si se tiene en cuenta que la micro estructura revelada por el material, lo cual indica que es un acero 9254.

Al igual se nota que es un acero con un índice de dureza bastante alta esto según la tabla 1 norma AISI y la prueba de dureza que se le practico a la probeta. La desviación estándar es 0,418330013 y el coeficiente de variación es 0,008138716. Se evidencio que las variaciones de estas pruebas son mínimas las cuales son despreciadas al no representar variaciones considerables en los resultados obtenidos.

Con esto podemos concluir que la dureza está dentro de especiaciones asignadas por el cliente, para que este resorte cumpla con su funcionalidad mecánica al que es requerido.

5.3 Prueba de fatiga lineal.

Se sometieron tres resortes helicoidales con diferentes tratamientos térmicos a prueba de fatiga lineal, para determinar las variaciones que estos presentan. Los resultados son los siguientes.

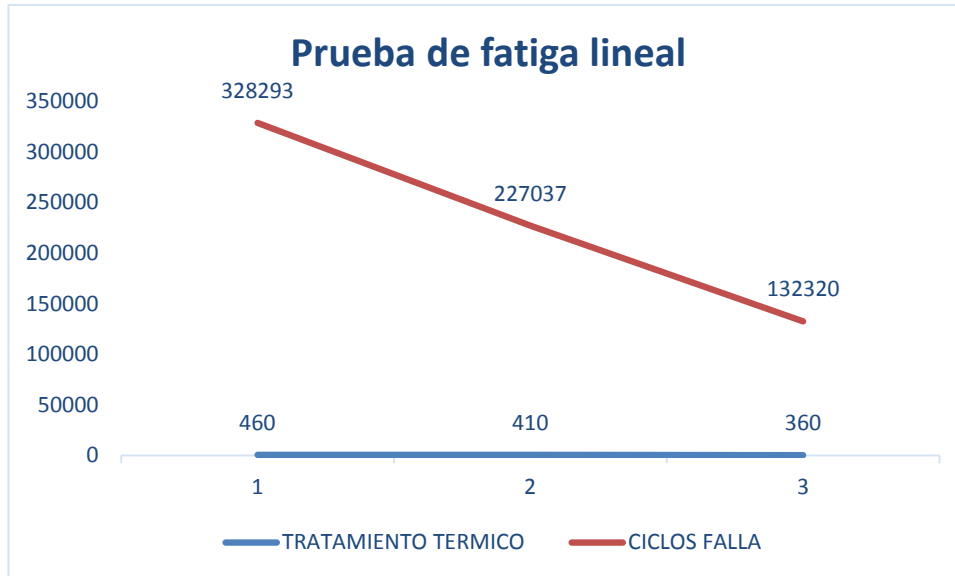


Figura 21 Tratamiento térmico Vs ciclos de falla.

Se dio inicio a esta prueba con el calentamiento controlado de la barra desde la superficie hacia el interior tomando el tiempo necesario para que la temperatura sea pareja en todo el material, esto produce lo que en tratamiento térmico se conoce como austenización que es la transformación a 900 °C de la perlita en austenita. Posteriormente se efectúa el enrollado de la barra en una máquina la que por medio de matrices le da la forma de espiral a la barra, estas matrices permiten que todos los resortes salgan exactamente iguales desde el punto de vista dimensional. Después de enrollado el resorte al rojo vivo es templado para adquirir su dureza máxima mediante su introducción en un depósito con aceite, este enfriamiento brusco es vital para la transformación de la austenita en martensita y paso clave en la calidad final del tratamiento térmico. El resorte luego de ser templado resulta extremadamente duro por lo que es necesario disminuir esta dureza a un punto óptimo, para esto el resorte es revenido es decir es calentado a una temperatura de entre 390 °C y 460 °C durante un tiempo mínimo de 60 minutos en un horno de atmósfera controlada. El objetivo de este proceso no es eliminar los efectos del temple si no modificarlos para disminuir la dureza y resistencia del resorte y aumentar la tenacidad del mismo eliminando las tensiones internas que siempre tienen los aceros templados.

Figura 22 Tratamientos térmicos prueba de fatiga lineal.

PRUEBA DE FATIGA LINEAL		
RESORTE	CICLOS FALLA	TRATAMIENTO TERMICO
1	328293	430 °C
2	227037	410 °C
3	132320	360 °C

- En el primer tratamiento térmico el revenido se realiza a una temperatura constante de 430 °C, a diferencia de los demás resortes este es fue sometido más tiempo en su revenido por lo tanto a una temperatura más alta de los tres, el preset se realiza en caliente dando los siguientes datos, altura de 333mm altura mínima 180mm quedando en una altura 328 mm y se sometió a una carga de a 350 Kg. El granallado se hizo con granalla de alambre CCW41 en frio a una intensidad de 90 Amperios, como resultado se obtuvo que el resorte helicoidal con mayor número de ciclos 328.293 con una diferencia de 195.973 ciclos a comparación del resorte número dos y 101.256 a comparación del resorte uno.
- En el segundo tratamiento térmico el resorte es sometido a una temperatura de 410 °C, para este revenido se mantiene una temperatura constante, posteriormente se lleva al preset en caliente dando los siguientes datos, altura de 333mm altura mínima 180mm quedando en una altura 328 mm y se sometió a una carga de a 350 Kg. Se realizó el granallado en caliente y este se hizo con granalla de alambre CCW41 a una intensidad de 90 Amperios, este resorte falla a los 227.037 ciclos.
- En el tercer tratamiento térmico que se realiza al resorte helicoidal el revenido presenta variaciones en la temperatura las cuales oscilan de 400 a 360 °C al igual que el anterior se lleva al preset en caliente dando los siguientes datos, altura de 333mm altura mínima 180mm quedando en una altura 328 mm y se sometió a una carga de a 350 Kgy es granallado en caliente con granalla CCW41 a una intensidad de 90 Amperios. Más sin embargo el resorte es más frágil por las variaciones de temperatura lo que hace que soporte menos ciclos puesto como se observa en la gráfica falla a los 132.320 ciclos siendo de esta forma el resorte con menos ciclos.

6 Análisis de falla

Se lleva a cabo una inspección visual del resorte en la zona de falla, en el cual se evidencia:

El resorte falla por fatiga que es causada por la tensión a la que se somete el resorte, en este caso de cargas cíclicas constantes, la falla da inicio por una grieta que se encuentra localizada en un extremo del resorte la cual inicia su expansión por medio del material generando las marcas de playa estas son generadas cuando el material es expuesto durante un tiempo prolongado a tensiones oscilantes, una vez que pase la tensión máxima esta hace que el material falle.

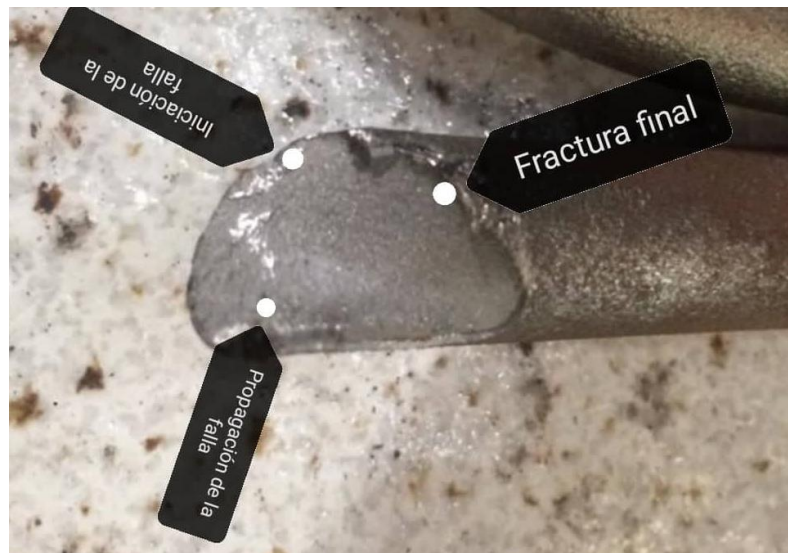


Figura 23 Marcas de falla resorte A1.



Figura 24 Marcas de falla resorte A2.



Figura 25 Marcas de falla resorte A3.

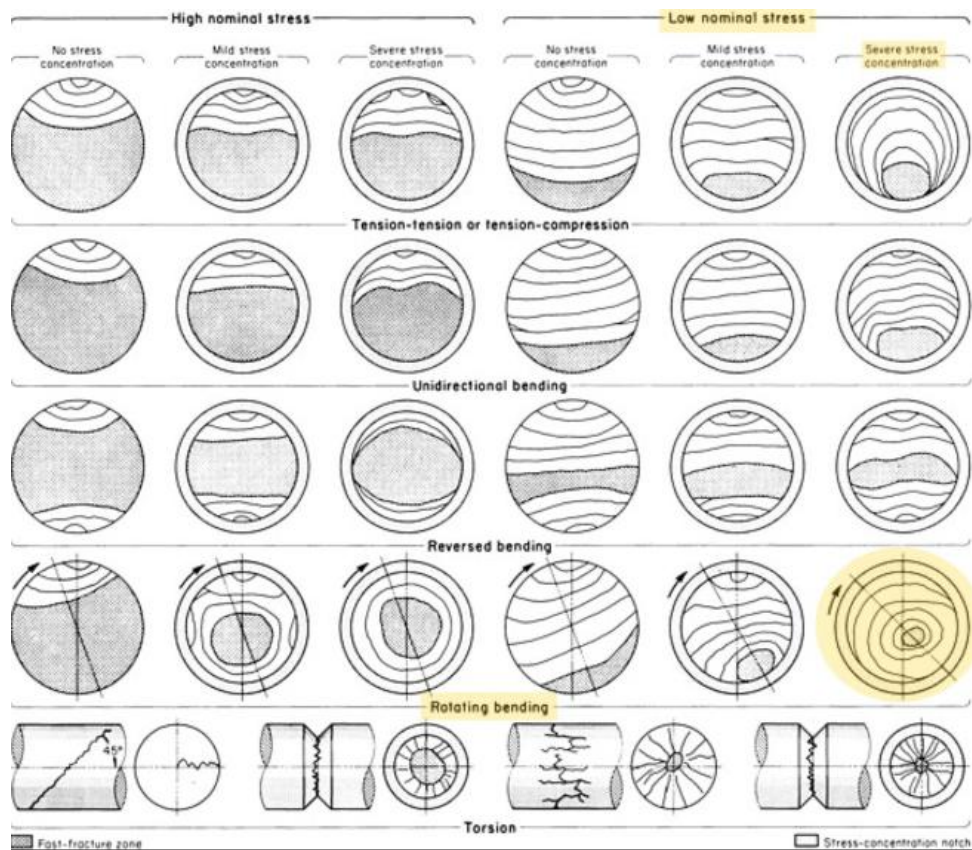


Figura 26 Guía esquemática de la aparición de superficies de fractura en la falla por fatiga [31].

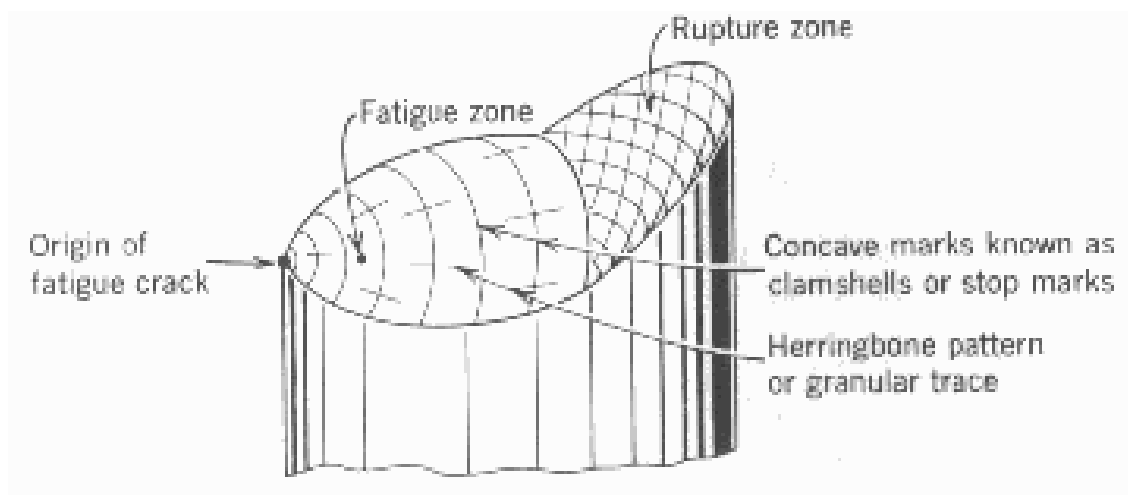


Figura 27 Zona típica de fatiga con marcas identificativas. [32]

Al someter estos resortes a condiciones severas de carga, disminuye considerablemente su vida útil presentándose el fenómeno de fatiga, el cual ocasiona debilitamiento del material perdiéndose propiedades mecánicas generándole un micro grieta.

Se observa en el registro fotográfico los tres resortes helicoidales que sufren una falla por fatiga y torsión según comparación con el libro ASM Handbook Committee ASM manual Fractografía, vol. 12, ASM International (1987). Evidenciando una superficie rugosa con líneas que a su vez convergen hacia un mismo punto, llegando hasta una zona donde se inicia el punto de grieta, desde el punto se observa las marcas de playa expandiéndose hasta la parte final de la fractura la cual se determina cuando el material presenta una falla súbita dejando una marca con material roto uniforme.

7 . Conclusiones

Luego del análisis de los resultados obtenidos de las pruebas de fatiga y micro estructura. Realizadas a los tres resortes se llega a las siguientes conclusiones.

- Se pudo comparar la teoría junto con pruebas prácticas concluyendo así Que el acero cambia sus propiedades mecánicas si es sometido a diferentes tratamientos térmicos, reduciendo la vida útil de los mismos. ocasionando que se genere micro grietas las cuales se expande unas cargas cíclicas generando la falla del material.
- El material del que está hecho los tres resortes helicoidales es el acero SAE9254 que se comprende bajo la norma AISI (American Iron and Steel Institute) el cual mediante tratamiento térmico se puede elevar su dureza. Indicando que es uno de los materiales que cumplen las características para la fabricación de este tipo de piezas y sus exigencias mecánicas.
- Un análisis de fatiga que comprende pruebas técnicas de dureza y de metalografía realizadas en el resorte helicoidal o a cualquier otra pieza mecánica puede determinar las fallas que presenta la pieza en el material al momento de la falla.
- El desarrollo de este proyecto ayuda a fortalecer los conocimientos teóricos que se han adquirido a lo largo de la carrera, puesto que se tienen que poner en práctica en los momentos que se desarrolla las pruebas tanto de dureza como de micro estructura para poder analizar resultados y determinar las fallas.

8. Bibliografía

- [1] Anderson, T.L.: Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Fourth Edition. CRC Press, 2017. – ISBN 9781498728140
- [2] ASM International. Handbook Committee, George F.: ASM handbook. Vol. 9: Metallography and Microstructures. ASM International, 2004
- [3] ASM International. Handbook Committee, W.T. ; Shipley, R.J.: ASM handbook. Vol. 11: Failure Analysis and Prevention. ASM International, 2002
- [4] Bhushan, Bharat: Modern tribology handbook, two volume set. CRC press, 2000
- [5] Campbell, F.C.: Fatigue and Fracture: Understanding the Basics. ASM International, 2012 (Ingeniería e ingeniería civil). – ISBN 9781615039760
- [6] Carlson, Carl S.: Understanding and applying the fundamentals of FMEAs. En: Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2014
- [7] Committee, ASM International. H.: ASM handbook. Vol. 12: Fractography. ASM International, 1987
- [8] Committee, ASM International. H.: ASM Handbook-Friction, Lubrication, and Wear Technology. ASM International, 1992 (ASM Handbook v. 18). – ISBN 9780871703804
- [9] Committee, ASTM: ASTM dictionary of engineering science & technology. Tenth Edition. ASTM International, 2005
- [10] Forrest, P.G.: Fatigue of Metals. Elsevier Science, 2013. – ISBN 9781483160733
- [11] Halford, G.R.: Fatigue and Durability of Structural Materials. ASM International, 2006. – ISBN 9781615030743
- [12] Lampman, S.R. ; DiMatteo, N.D. ; Committee, ASM International. H.: Fatigue and Fracture. ASM International, 1996 (ASM handbook). – ISBN 9780871703859
- [13] Milella, P.P.: Fatigue and Corrosion in Metals. Springer-Milan, 2012. – ISBN 9788847023369
- [14] Ramachandran, V: Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories. ASM International, 2005
- [15] Ramachandran, V., Raghuram, A., Krishnan, R., & Bhaumik, S. (2005). *Failure Analysis of Engineering Structures Methodology and Case Histories*. Ohio: ASM International.
- [16] Rojas Cruz, M. (2007). Análisis de Falla: Un Viaje a la Raíz del Problema y la Solución. *Metal Actual*, 42-48.
- [17] Scott MacKenzie, H. I. (2008). Overview of the mechanisms of failure in heat treated steel components. *ASM International*, 43-86.
- [18] Tovar, G. (1999). Análisis de falla en componentes de ingeniería. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes*, 75-83.

- [19] Wulpi, D. J. (1999). *Understanding How Components Fail*. Ohio: ASM International. 2013.
- [20] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. (2008) *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*,
- [21] Edwin Alberto Medina Silva, Raúl Andrés Castellanos López. (2015), *Análisis Fractográfico De Un Acero Al Carbono SAE 1045 Sometido A Cargas De Tensión, Flexión E Impacto*. Universidad Francisco Jose de Caldas.
- [22] ASM International. Handbook Committee, George F.: ASM handbook. Vol. 9: *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004.
- [23] M.S. Jójav y G.S. Máslov. *Motores de automóvil*. Traducido por Ing. Antonio Molina García; editado por Editorial Pueblo y Educación, 1985. 497 – 498 p.
- [24] Carl f. bachel, Assignator to continental aviation and engineering corporation of virginia ., 1951 *Rocker arm construction*. United states patent office.
- [25] Motohashi, Nobutsuna (Tokyo, JP), Assignator to continental aviation and engineering corporation of virginia ., 1951 *Manufacturing method of rocker arm*. United states patent office.
- [26] *Análisis de falla y el diseño de máquinas*. (2014). Repositorio Universidad Nacional de Colombia.
- [27] *Corrosion handbook, hilti*. (2015), Volume 1 of HILTI Handbook
- [28] (Fatigue and Fracture (1996) , Volume 19 of ASM Handbook.)
- [29] *Mecánica de fractura y análisis de falla*, (2002) Hector Hernandez Albañil., primera edición pag 111
- [30] ASM handbook vol 4 heat and treatment... pag 332 fig.148 [31] ASM handbook vol 4 heat and treatment... pag 337 fig.164
- [31] ASM Handbook Committee ASM manual Fractografía , vol. 12 , ASM International (1987)
- [32] *Teoría y diseño*, ed. AF Madayag, pág. 3.

