



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de Falla y Análisis de Causa Raíz de una Ballesta

Lizeth Viviana Numpaque
Giovany Albeiro Ariza Junco
Edison Vargas Vivas

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

Análisis de Falla y Análisis de Causa Raíz de una Ballesta

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

Ingeniero Mecánico

Director:

Magíster en Ingeniería Mecánica - Ing. Edwin Darío Cendales Ladino

Línea de Investigación:

Análisis de falla, fractografía e ingeniería de superficies.

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D. C. , Colombia

2018

Dedicatoria

A Dios, a nuestras familias y a la Fundacion Universitaria los Libertadores por permitirnos culminar la carrera y poder obtener el titulo de ingenieros mecánicos.

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

Magíster en Ingeniería Mecánica - Ing. Edwin Darío Cendales Ladino
Director de Proyecto de grado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Lista de Figuras

4-1.	a) Ballesta agrietada. b). Corte de las probetas.	21
4-2.	a) Corte de la ballesta . b). Banco de lijado. c). Máquina de pulido metalográfico. d). Lijado obteniendo brillo espejo.	22
4-3.	a) Microestructura de la sección transversal de la ballesta 100X b). 200X c). 500X d). 1000X.	23
4-4.	a) Mediciones de dureza en la superficie de la ballesta 42 HRC b). 44 HRC.	24

Resumen

Este artículo se desarrolló con base a una investigación teórico práctica sobre la mecánica de fractura y el análisis de falla con enfoque en fractura y fatiga y así conocer más a fondo sobre la historia, definición, procesos, tipos de fatiga, tipos de fractura, diseños y fracasos en la que han sido de referencia para la industria en materiales de ingeniería. para esto se seleccionó una pieza mecánica (ballesta de un vehículo) debido a que esta recibe cargas repetitivas de amortiguación que son de gran magnitud, estas cargas causaron el fallo por fatiga ya que en la pieza se observó un punto de concentración de esfuerzos donde se observa el inicio de las líneas de espiga, a esta pieza se le realizó un análisis metalográfico que consta de corte, lijado, medida con durómetro y observación en microscopio para conocer los elementos de los cuales se compone la pieza con lo cual se logró encontrar la falla real de la pieza, en donde inicio, como se propago y la falla final; con esta investigación podemos identificar en qué casos se pueden presentar normalmente estos fallos y de esta manera prevenirlos. **Fatiga, Fractura, Ingeniería, Metalografía, Metodología, Microestructura, Macroestructura, Grieta.**

Abstract

This article is based on a practical theoretical research on mechanical fracture and failure analysis with focus on fracture and fatigue and thus to know more about the history, definition, processes, types of fatigue, types of fracture, designs and failures in which have been referenced for the industry in engineering materials. for this a mechanical piece was selected, because it receives repetitive loads of damping that are of great magnitude, which is made a metallographic analysis that consists of cutting, sanding, measuring with durometer and observation in a microscope to know the elements of which the piece is composed with what has been found to find the real fault of the piece, where it started, how to spread and the final fault; With this practical theoretical research it can be identified in which cases these failures can be presented and thus preventive.

Keywords: Fatigue, Fracture, Engineering, Metallography, Methodology, Microstructure, Macro-structure, Crack.

Contenido

Resumen	x
1. Objetivos	2
2. Introducción	3
2.1. Fractura	6
2.2. Comportamiento de Fractura	6
2.3. Resistencia a la Fractura	7
2.4. Fractura Frágil	8
2.5. Eventos Ocasionados por Fractura Frágil	8
2.6. Características de la Fractura Frágil	9
2.7. Aspectos Microestructurales de la Fractura Frágil	10
3. Fatiga	12
3.1. Relevancia de la fatiga en la industria	13
3.2. Fatiga de Alto Ciclo	15
3.3. Fatiga de Bajo Ciclo	15
3.4. Límite de Fatiga	16
3.5. Etapas de la Fatiga	16
3.6. Diseño para la Prevención de la Fatiga	18
4. Procedimiento de análisis	20
4.1. Inspección Visual	20
4.2. Análisis Metalografico	23
4.3. Análisis de Falla	24
5. Conclusiones	25
Bibliografía	26

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a una ballesta para la amortiguación de un vehículo de carga la cual presenta algún tipo de falla con el fin de determinar la causa probable de falla.

2.2. Objetivo Específicos

- Obtener diferentes piezas mecánicas que hayan sufrido diferentes tipos de fallas y recopilar información bibliográfica acerca de estudios sobre análisis de falla relacionados con los componentes mecánicos obtenidos.
- Realizar pruebas de laboratorio tales como inspección visual, análisis metalográfico y análisis de dureza, bajo normatividad internacional que permitan evidenciar las posibles causas raíz de fallo.
- Determinar las posibles causas de fallo de las piezas seleccionadas mediante la aplicación de la metodología del análisis de causa raíz con el fin de emitir un concepto técnico para evitar la falla de componentes similares debido a la misma causa.
- Elaborar un artículo científico en el cual se plasmen los aspectos más relevantes de la investigación, para su posterior postulación en alguna revista indexada en publindex.

2 Introducción

La mecánica de fractura ha sido usada desde la época Neolítica cuando el hombre inventó y diseñó las primeras herramientas con técnicas muy hábiles. En los siglos XII y XIII sucedieron episodios de fractura en Europa con técnicas de control de calidad de cañones de bronce revisando después de un disparo la presencia de grietas o fractura entonces se consideraba la calidad del material si era lo suficientemente tenaz o no. Leonardo da Vinci (1452 – 1519) fue el primero en realizar experimentos para determinar la capacidad de carga de alambres de acero [3].

Galileo Galilei (1564 - 1642). Fue el primero en formular que la carga de fractura de una barra en tensión es directamente proporcional al área de su sección transversal e independiente de su longitud. La Revolución Industrial del Siglo XIX provocó un incremento en la demanda de metales, como hierro y acero, en la ingeniería y la construcción. Esta grande expansión fue acompañada por una frecuencia mayor de fallas en estructuras de ingeniería. La fractura de vías de ferrocarril fue algo común en el año 1870, luego en 1900 la aparición del automóvil, seguido por los aeroplanos, incrementó la necesidad de entender el fenómeno de ruptura.

Durante el periodo de 1900-1950, fueron desarrolladas distintas investigaciones sobre fractura, las cuales ayudaron a la introducción de la mecánica de fractura. En la Primera Guerra Mundial el ingeniero aeronáutico inglés Alan Arnold Griffith explicó el fallo de materiales frágiles. En 1920 invocó la primera ley de la termodinámica al formular una teoría de fractura basado en un balance energético simple. Un defecto se vuelve inestable, y por lo tanto se produce la fractura. Hasta los años 1950 el trabajo de Griffith fue ignorado por la comunidad de ingenieros. Irwin amplió el enfoque de Griffith a los metales mediante la inclusión de la energía disipada por el flujo plástico local. Mott amplió la teoría de Griffith a una grieta que se propaga rápidamente, Más tarde llegó a ser conocido como el factor de intensidad de tensiones [5].

En 1956, Wells utiliza la mecánica de fractura para demostrar que los fallos del fuselaje en varios aviones jet Comet son resultado de grietas de fatiga que alcanzan un tamaño crítico. En 1957, un grupo descubrió que la plasticidad tiene un papel importante en la fractura de materiales dúctiles, bajo la guía de George Rankine Irwin en el Laboratorio de Investigación Naval de EE.UU. Otra aplicación se produjo en General Electric Winne y Wundt aplican

el enfoque de la tasa de liberación de energía de Irwin a la fractura de grandes rotores de turbinas de vapor. Hallando el comportamiento de ruptura de grandes discos extraídos de estas máquinas y posteriormente aplica este concepto en rotores de otras máquinas. Las consecuencias de un equipo agrietado, corroído y en mal estado generan costos indeseados y peligrosos [12].

A través del tiempo se ha demostrado que ocurren fallas en componentes y equipos, dichas fallas han hecho que la comunidad de ingeniería desarrolle materiales, técnicas y prácticas de inspección, el desarrollo de materiales y el procesamiento de materiales; han redefinido los criterios de fracaso y además se ha buscado el por qué ocurren las fallas, con programas de integración estructural, mejorando las técnicas de modelación y predicción.

No todas las fallas o funcionamiento del equipo sin importar su trascendencia se deben de investigar. Hallar la causa de la falla y evaluar los resultados ayuda a mejorar el diseño y aumentar la vida del equipo o de la pieza en donde se presentó dicha falla. El análisis de falla es un estudio que ha aportado de gran forma al desarrollo de la ingeniería, enfatizando la innovación en áreas como el diseño, selección de materiales de ingeniería, montajes y mantenimiento, aportando en la reducción de riesgos económicos o pérdidas de vidas humanas, debido a que todo tipo de componentes mecánicos llevados a falla en maquinaria de transporte aeroespacial, aeronáutica, automovilístico u otras industrias han causado muertes que se pudieron haber sido evitadas con un análisis de falla [17].

La fractura es un problema con el que la sociedad se ha enfrentado durante el tiempo que ha habido estructuras hechas por el hombre. El problema puede ser realmente peor hoy que en los siglos anteriores. Los avances en el campo de la mecánica de la fractura y análisis de falla han ayudado a compensar algunos de los posibles peligros planteados por la complejidad tecnológica. Nuestra comprensión de cómo los materiales fallan y nuestra capacidad de prevenir tales fallas han aumentado considerablemente.

Los conocimientos sobre la mecánica de fractura no siempre se han aplicado cuando es apropiado. La causa de la mayoría de las fallas estructurales generalmente es negligencia durante el diseño, la construcción o funcionamiento la estructura y aplicación de un nuevo diseño o material puede producir un resultado inesperado.

El análisis de falla es un trabajo tipo forense en la cual los ingenieros buscan descifrar y aclarar una posible RCA (Análisis de causa raíz) - cuyo fin es determinar todas las posibles causas y variables de falla en componentes mecánicos que hacen parte de algún sistema, determinando las posibles soluciones a los fallos encontrados desde el punto de vista ingenieril y así de este modo evitar que ocurran los mismos problemas, pérdidas de dinero o en casos extremos lesiones o pérdida de vidas. Es necesaria una evaluación del comportamiento

mecánico de componentes del sistema para establecer su durabilidad y confiabilidad basadas en los estudios de ingeniería del mantenimiento y comportamiento mecánico estructural, así como de los materiales que la componen [2].

La escala local de los defectos que conducen a la falla de un material es una relación entre la tensión aplicada y la deformación obtenida. Es decir, la presencia de defectos capaces de incidir en el proceso de fallo de un componente puede ser establecido mediante la teoría de la mecánica de fractura o análisis de falla. Se pueden utilizar diferentes técnicas mediante la mecánica de fractura para hallar la causa raíz de fallo como, Ensayos no destructivos, ensayos mecánicos, análisis macroscópico, análisis microscópico a la estructura Metalografía, Fractografía y análisis de composición química, para determinar las fallas de la pieza logrando conclusiones más exactas del estudio [7].

Como ejemplo, estos análisis ayudaron en el caso de falla prematura en 2 hélices empleadas por un barco pesquero en la zona de canales de Chiloé en Chile, los fabricantes acusan el mal uso de las hélices mientras que el dueño del barco asegura su mala fabricación, la búsqueda de la causa raíz realizada por ingenieros empleando pruebas de análisis químico, análisis macroscópico y metalografía descubrieron que su fallo fue provocado por el tratamiento térmico inadecuado para las condiciones de servicio en las cuales se empleó las hélices [18].

El análisis de falla es un estudio que ha dado grandes aportes al desarrollo de la ingeniería, destacando la innovación en áreas como el diseño, selección de materiales de ingeniería, montajes y mantenimiento (RCM) (ASM Metals Handbook, 2002), contribuyendo en la reducción de riesgos tanto económicos como pérdidas de vidas humanas debido a que componentes mecánicos llevados a falla en sistemas tan complejos como los aeroespaciales o aeronáuticos han causado muertes que se pudieron haber evitado con un análisis de falla, tal como ocurrió en la construcción de los primeros aviones comerciales a reacción (jet), se presentaron fallas catastróficas en vuelo de aeronaves Comets de fabricación Inglesa. La causa fue asociada a un defecto de diseño, debido a los altos esfuerzos alrededor de las ventanas, causados por las esquinas agudas, en las cuales se iniciaron grietas pequeñas que se propagaron y condujeron la fractura y explosión de las naves en pleno vuelo [2].

Debido a todo ello se han implementado labores de mantenimiento, las cuales han podido detectar fallos, tal como el caso de agrietamiento por fatiga que sufrió la biela maestra de un avión a causa de inclusiones no metálicas. La inspección rutinaria de este motor pudo salvar la vida de los pasajeros que posiblemente abordaran el avión [13]. Los fracasos son un hecho de la vida. Un sistema libre de fallos es más un mito que una realidad”.

La mecánica de fractura y análisis de falla son dos procesos de ingeniería que son vitales para ser utilizados como una herramienta de diseño mecánico, indagar sobre la mecánica

de fractura y análisis de falla para evitar dichas fallas estructurales en diferentes sistemas. Los problemas más frecuentes que existen en la Ingeniería es la falla súbita en componentes mecánicos. Las fallas se presentan debido a desgaste, corrosión, malos diseños, errores en selección de material, mal mantenimiento, mal montaje, entre otras. Para evitar dichos fallos, se realizan análisis de falla para prevenir y alargar la vida útil de componentes que han presentado fallos y corregir las fallas más comunes llevando a cabo un adecuado control en el funcionamiento paulatino de los componentes, logrando acciones preventivas para el personal y la maquinaria [15].

2.1. Fractura

Esta es la separación de un cuerpo en dos o varias partes debido a la tensión mecánica, la fractura se clasifica en dos grandes categorías como lo son la fractura dúctil siendo esta una deformación plástica antes y durante la propagación de la grieta y la fractura frágil es producida por la tensión generada por debajo del límite de elasticidad de la sección neta, con poca deformación plástica y una absorción de energía mínima, esta fractura se puede generar en cualquier clase de material sin ninguna advertencia, uno de los objetivos de la ingeniería en estructuras es desarrollar una metodología para evitar las fracturas repentinas en un componente, ya que esto genera un impacto económico y grandes pérdidas humanas en las industrias, es difícil saber cuándo exactamente los problemas de fallas en equipos estructurales y mecánicos se volvieron de suma importancia [19].

2.2. Comportamiento de Fractura

Los fallos estructurales en su mayoría de fractura final suelen ser abruptas, después de algún tipo de defecto de material o defecto de diseño, como lo puede ser una condición inadecuada o detalles de diseño deficiente, que se propaga por un proceso de crecimiento de la grieta y hace que la grieta alcance un tamaño crítico para la fractura final. Se da un proceso de agrietamiento el cual se produce lentamente a lo largo de la vida útil de varios crecimientos de grietas, ya sea producido por agrietamiento debido a la corrosión, por tensión, fluencia y agrietamiento inducido por hidrógeno. Cada una de estas grietas tiene ciertas características que se utilizan en el análisis de fallos para determinar la causa de la fisuración o grieta en crecimiento.

La fractura final suele ser abrupta y se produce por escisión, ruptura o fractura intergranular está puede implicar condiciones de ruptura y de escisión, los mecanismos de fractura también son denominados dúctiles. Distinción importante porque una fractura puede ser denominada frágil desde una ingeniería (macroscópica), y el metal subyacente una (microscópica) este mecanismo se podría denominar dúctil o frágil. Los metalúrgicos, se refieren a la escisión

a menudo como la fractura frágil y la rotura de hoyuelos se considera fractura dúctil. Sin embargo, estos términos deben ser usados con precaución, porque muchos de los fallos se producen por rotura de hoyuelos, aunque la mayoría de estos fallos sufren muy poca deformación plástica global (macroscópico), deformación desde el punto de vista técnico. Las fallas estructurales en su mayoría son de un tipo más preocupante ya que la fractura frágil, se inicia en defectos, muescas o discontinuidades [5].

Siendo estas grietas resultado del mecanizado, enfriamiento, fatiga, fragilización por hidrógeno, metal líquido fragilización o corrosión por estrés, también conducen a la fractura frágil; la fractura dúctil macroscópica, sobre carga da como resultado de que la parte ha sido sub designada, para un conjunto específico de condiciones de servicio, fabricado indebidamente o fabricado a partir de materiales defectuosos. La fractura también es el resultado de la parte que ha sido abusada o sometida a condiciones de carga y ambiente que excedieron el uso previsto.

La teoría de Griffith que estableció un criterio de velocidad de liberación de energía para materiales quebradizos y el trabajo específico de la fractura, dando como orígenes a la moderna mecánica de la fractura para la ingeniería; la teoría de elasticidad nos habla del concepto de la energía de deformación contenida en un cuerpo elástico por unidad de volumen es simplemente el área bajo la curva tensión-deformación [11].

2.3. Resistencia a la Fractura

Habitualmente hablamos de fractura dúctil o quebradiza cuando los factores más comunes que rigen la transición se dividen en la dúctil-frágil, siendo la falla dúctil, en los aceros característicos por corte, encontrada en la superficie debido al flujo plástico que ocurre alrededor de pequeñas inclusiones, a su vez la superficie de fractura de la fractura se presenta normalmente plana sin presentar alguna o ninguna evidencia de plasticidad en el microscopio.

La fractura de escisión frágil es fácil de reconocer debido a las características reflectantes de la superficie. La fractura es intercrystalina. La alta tenacidad en la fractura se asocia con la cantidad de energía que es necesaria para que una grieta se propague a través del material. Esto es proporcional a la longitud de trayectoria y la rigidez del material plásticamente deformado. La tenacidad a la fractura se distingue por las condiciones que caracterizan las resistencias de fisura altas y bajas en Materiales. El requisito necesario para una falla es la existencia de una muesca de fisura o de corte ya que esta induce un perfil de intensidad de tensión con el valor de estrés principal. Las grietas pueden crecer en la longitud principal si el metal es dúctil ya que en la región principal y la punta de la grieta se deforman plásticamente bajo la influencia de la intensidad de la tensión alta, provocando que las caras de las grietas se separen, ya que entre más ductilidad se presente en el metal, más grande será la

zona plástica en la punta de la grieta [2].

Cuando el material es suficientemente duro sirve para restringir el crecimiento de la zona plástica por el material circundante, el cual provoca que se formen tensiones plásticas secundarias alrededor de la punta de la grieta, ambas en ángulo recto con respecto a la tensión aplicada en el plano de la grieta, y paralelas a la cara de grieta desarrollando un estado triaxial de tensión de tracción. Para el endurecimiento del material existen diferentes formas como la disminución de temperatura, aumento de la tasa de carga o cambio en la microestructura si el máximo triaxial estrés en la grieta punta excede la fractura o estrés del material de la grieta puede crecer.

2.4. Fractura Frágil

Definir fallas también está relacionado con lo que se entiende por vida de diseño, la fractura frágil o fractura elástica generalmente se encuentra en las aleaciones de alta resistencia, significa que habrán pocas o alguna deformación permanente difíciles de detectar por su tamaño antes de que ocurra una fractura, usualmente se presenta poca tolerancia a la discontinuidad acompañada con una alta dureza y alta resistencia, estructuras soldadas o estructuras en fundición, encontrando que todas las fallas fueron pequeños defectos que habían escapado de la detección durante las inspecciones previas realizadas a dicho material o componente, un análisis realizado posteriormente a estos materiales demostró que la mayoría de los casos los pequeños defectos crecían lentamente a causa de cargas repetidas o por un ambiente corrosivo siendo las superficies fracturadas macroscópicamente planas esto quiere decir que las fracturas se producían en un Angulo de 90° con la carga aplicada haciendo que llegara a alcanzar un tamaño crítico, después de esto se producía una falla rápida y catastrófica [7].

2.5. Eventos Ocasionados por Fractura Frágil

- Se forma una pequeña falla durante la fabricación (por ejemplo, soldadura, remachado) o durante el funcionamiento (fatiga, corrosión).
- El defecto luego se propaga en un modo estable debido a cargas repetidas, con entornos rosados, o ambos. La tasa de crecimiento inicial es lenta e indetectable con todas las técnicas menos sofisticadas. La tasa de crecimiento de grietas se acelera con el tiempo, pero la grieta permanece estable.
- La fractura repentina ocurre cuando la grieta alcanza un tamaño crítico para las condiciones de carga predominantes. La fractura final es rápida, procediendo casi a la velocidad del sonido.

Los metales frágiles son principalmente de uso cotidiano, como lo son los aceros para herramientas endurecidas, el hierro fundido gris y muchos más metales que se manipulan a diario, por lo general es característico de los metales duros fuertes y sensibles a muescas posean una muy alta fragilidad, realizando investigaciones se intenta reducir la resistencia útil de los metales sin correr el riesgo de un fractura frágil, por lo general se piensa que los metales blandos son los que van a presentar una fractura frágil, pero no estos metales son más propensos a sufrir una fractura dúctil ya que son metales blandos y débiles: como por ejemplo el hierro fundido gris es un metal muy frágil por lo que contiene una elevada cantidad de escamas internas de grafito haciendo que nuestro metal posea poca capacidad para fluir o llegar a deformarse siendo esto necesario para comportarse como un metal dúctil [2].

Los aceros de bajo carbón o de carbón medio son utilizados para aplicaciones donde se desea la capacidad de ajuste a deformación plástica, siendo estos metales frágiles donde existe poca o ningún peligro de fractura; si sometemos a estos metales a un ambiente donde se combinan diferentes circunstancias estos aceros nos van a presentar fracturas totalmente quebradizas, las fracturas frágiles se presentan únicamente bajo tensiones de tracción residual sin cargas aplicadas o con cualquier combinación de tensiones aplicadas [1].

2.6. Características de la Fractura Frágil

Las fracturas frágiles tienen ciertas características que les permiten su identificación. No hay deformación bruta permanente o plástica del metal en la región de fractura frágil, además, la superficie de una fractura frágil es perpendicular a la tensión de tensión principal. Las marcas características en la superficie de la fractura frecuentemente, pero no siempre, apuntan a la ubicación desde la cual se originó la fractura. En el caso del acero plano, como láminas, planchas o barras planas, y también regiones endurecidas, hay marcas características en forma de V de chevron o herradura que apuntan hacia el origen de la fractura [4].

Podemos encontrar variedad de casos en los cuales no se va a poder encontrar marca de la fractura, ya que estas marcas llegan a ser muy finas y débiles, para poder ver las marcas de la fractura se necesita de un haz de luz muy fuerte el cual nos mostrara la textura de la superficie siendo este haz de luz muy bien controlado llegaremos a ver la textura formada por la fractura, las fracturas en algunas partes puede crear un patrón de líneas radiales, crestas o en forma de abanico, las fracturas frágiles de metales producen granos muy finos y extremadamente duros, haciendo muy complicado llegar a encontrar algún patrón de fractura visible y puede ser muy difícil encontrar con certeza el origen de la fractura [7].

2.7. Aspectos Microestructurales de la Fractura Frágil

Generalmente las fracturas frágiles presentan uno o ambos métodos de fractura siendo estas la fractura escisión o intergranular es necesario utilizar un equipo electrónico ya sea un microscopio, o un microscopio de barrido siendo este en el equipo más utilizado en los laboratorios, una fractura frágil puede presentarse en los materiales amorfos y cristalino [4].

La fractura escisión a macro escala se identifica con una alta reflectividad a la luz y de una superficie relativamente plana, y en la micro escala es presentan una serie de regiones planas o de repisas las cuales a menudo tiene unas facetas, con una mayor magnificación en el microscopio nos mostrara que las repisas están conectadas por ligamentos como las líneas de río se unen de manera tal que se propagan y tienden a ser parecidas a el agua que fluye río abajo, esta propagación de líneas fluviales no siempre siguen la iniciación de la grieta, ya que esta puede ocurrir en varios lugares, haciendo que estas líneas solo indiquen la dirección de propagación de grietas [11].

La superficie de las fracturas de materiales donde se muestran las grandes fracciones de escisiones pueden mostrar los agrietamientos de un plano cristalográfico dentro del grano dado, llegando a una de las más conocidas y características fracturas de los materiales frágiles como lo es la fractura facetada frágil "líneas de los ríos"; dichos ligamentos de conexión pueden ser de un gran tamaño el cual nos permite observar un MVC (modelo-vista-controlador) estas grietas por lo generan son de delgadas y se entrelazan entre sí a través de la superficie de fractura [10].

En los materiales cristalinos podemos observar que se presenta una tensión normal la cual evidencia convincentemente que la fractura de escisión ocurre por un movimiento de dislocación previa la cual genera un núcleo de escisión, haciendo un esfuerzo cortante en varios planos de deslizamiento, si hablamos de un material amorfo e isótropo este se comporta de tal manera que el punto de corte es en el plano a macroescala donde se presenta la mayor tensión, si la energía presentada en el enlace es de manera interatómico es anisotropía, la tensión normal se presenta en el plano unido más débil esto logra aparentemente controlar la fractura de escisión.

Según la estructura cristalina que se esté trabajando se puede determinar el número de familias de plano de corte específico o la multiplicidad del plano de corte, esto quiere decir q pueden existir un número indeterminado de familias de plano de corte en una estructura cristalina, las fracturas por escisión no se presentan en los metales alcalinos BCC (estructura cubica centrada en el cuerpo) en cambio en los materiales HCP (Estructura hexagonal compacta) son considerados de forma rutinaria y esto se dividen en solo un plano de la familia pero esto no es obligatoriamente cierto pueden existir varias familias en el plano de escisión

[1].

El crecimiento de la fractura es inversamente proporcional al número de planos activos ya que estos disminuyen mediante un proceso de unión, pero a su vez estos se vuelven mucho más altos, esto se conoce como patrón de río ya que las ramas del patrón de río se unen en la dirección de la propagación de grieta dichas marcas son utilizadas para encontrar la dirección de la fractura local, el límite de inclinación se presenta cuando los planos se dividen principalmente formando un ángulo pequeño el uno con el otro como resultado de una ligera rotación en uno de los ejes comunes de intersección, con respecto al caso de límite de inclinación en las fracturas de escisión se presentan habitualmente ininterrumpidas los planos y los pasos se propagan a través del límite. Si los planos presentan una división, giraran alrededor del eje perpendicular al límite y a esto se le conoce como límite de torsión, se produce por la desalineación de los planos de corte en el límite y la fractura se propaga de nuevo por los límites haciendo una serie de fracturas de corte paralelas, formando numerosos planos de escisión que se unen, y pasos más altos [7].

3 Fatiga

La fatiga es el proceso de cambio estructural permanente progresivo localizado que ocurre en un material sometido a condiciones que producen tensiones y tensiones fluctuantes en algún punto a puntos y que pueden culminar en grietas o fractura completa después de un número suficiente de fluctuaciones. El daño de la fatiga es causado por la acción simultánea del esfuerzo cíclico, del esfuerzo de tensión, y de la tensión plástica. Si alguno de estos tres no está presente, una grieta de fatiga no se iniciará y se propagará [2].

El fenómeno de la fatiga se da de la siguiente forma: Proceso, Progresivo, Localizado, Cambio estructural permanente, Fluctuación de tensiones y tensiones punto o puntos, Grietas o Fractura completa. La deformación plástica resultante del esfuerzo cíclico inicia la grieta; El esfuerzo de tracción favorece el crecimiento de la fisura (propagación). Aunque los esfuerzos de compresión no causarán fatiga, las cargas de compresión pueden dar lugar a esfuerzos de tracción locales. Durante un fallo de fatiga en un metal libre de fallas similares a las de una grieta, las microfisuras se forman, se unen, o crecen hasta macrofisuras que se propagan hasta que se supera la tenacidad a la fractura del material y se produce la fractura final [3].

Bajo carga habitual las grietas de fatiga se inician cerca o en las singularidades que se encuentran en o justo debajo de la superficie, como arañazos, afilados cambios en la sección transversal, fosas, inclusiones o límites de grano fragilizados. Las microfisuras pueden estar presentes inicialmente debido a soldadura, tratamiento térmico o conformado mecánico. Incluso en un metal sin fallos con una superficie altamente pulida y sin concentradores de tensión, puede formarse una grieta de fatiga [5].

Si la amplitud del esfuerzo alterno es lo suficientemente alta, se produce una deformación plástica (es decir, movimiento de dislocación de largo alcance) que conduce a pasos de deslizamiento sobre la superficie. El ciclo continuo conduce a la iniciación de una o más grietas de fatiga. Alternativamente, las dislocaciones pueden ser un obstáculo, tal como una inclusión o un límite de grano, y forman una banda deslizante, una partícula agrietada, una de cohesión entre partícula y matriz, o de cohesión a lo largo del límite de grano [6].

Las grietas iniciales son muy pequeñas. Su tamaño no se conoce bien porque es difícil determinar cuándo una banda de deslizamiento u otra característica de deformación se convierten en una grieta. Ciertamente, sin embargo, se pueden observar grietas tan pequeñas como

una fracción de micra utilizando herramientas metalográficas modernas como el microscopio electrónico de barrido o el microscopio de túnel de barrido. Las microfisuras crecen o se unen para formar una o más macrofisuras, que a su vez crecen hasta que la tenacidad a la fractura es excedida [1].

Había propuesto un método mediante el cual el fracaso de componentes de repetidos. Las cargas podrían ser mitigadas, y en algunos casos eliminados. Este método dio como resultado el enfoque del diagrama de respuesta de estrés-vida y el enfoque del modelo de prueba de componentes para el diseño de la fatiga.

Los fallos anteriores de cargas repetidas habían resultado en fallas de componentes tales como tuberías de arcilla, hormigón y estructuras de madera, pero las necesidades de más máquinas hechas de componentes metálicos a finales de 1800 estimularon la necesidad de desarrollar procedimientos de diseño que evitaran fallas de cargas repetidas de todos los tipos de equipo. Esta actividad fue intensa a partir de mediados de 1800 y todavía está en curso hoy. Aunque ha habido mucho progreso el desarrollo de procedimientos de diseño para evitar el fracaso de la aplicación de cargas repetidas sigue siendo una tarea desalentadora.

Se trata de la interacción de varios campos del conocimiento, a saber, ingeniería de materiales, ingeniería de fabricación, análisis estructural (incluyendo cargas, esfuerzo, deformación y análisis de mecánica de fractura), inspección no destructiva y evaluación, ingeniería de confiabilidad, tecnología de pruebas, reparación y mantenimiento de campo y procedimientos de diseño holístico [2].

Todos estos deben ser colocados en una actividad de diseño consistente que puede ser referido como una política de diseño de fatiga. Obviamente, si otros los modos de fallo relacionados con el tiempo ocurren concomitantemente con cargas repetidas e interactúan sinérgicamente, entonces la tarea se convierte en aún más difícil. En la medida en que los seres humanos siempre desean usar más bienes y colocar más demandas sobre las cosas que nosotros puede diseñar y producir, el desafío de la fatiga siempre va a estar con nosotros [7].

3.1. Relevancia de la fatiga en la industria

No hay duda de que la fatiga desempeña un papel importante en todas las aplicaciones de diseño industrial. Muchos componentes son sometidos a alguna forma de tensión / tensión fluctuante, y por lo tanto la fatiga potencialmente desempeña un papel en todos estos casos. De todos modos, eso sigue siendo imperativo que todos los diseños consideren aquellos aspectos de los procesos de nucleación distintos de la fatiga que pueden actuar para nuclear grietas que podrían propagarse bajo la influencia de cargas cíclicas [2].

El estado intrínseco del material y todas las fuentes potenciales de grietas también deben ser evaluados. Sin embargo, la fatiga es un factor significativo y frecuentemente crítico en la prueba, análisis y diseño de materiales de ingeniería para máquinas, estructuras, aviones y centrales eléctricas. Un avance de ingeniería importante de este siglo es también la transferencia del proceso de fatiga multietapa desde el campo hasta el laboratorio. Con el fin de estudiar, explicar y calificar el componente diseños o para llevar a cabo análisis de fallas, un paso clave de ingeniería es a menudo la simulación del problema en el laboratorio [17].

En la industria el significado que tiene la fatiga es un proceso de cambio estructural permanente progresivo localizado donde el material está sometido a condiciones que le producen al material deformaciones y tensiones en uno o varios puntos esto puede terminar en grietas o fracturas completas después de varios ciclos de perforación, la grieta o fractura crece hasta que finalmente la parte restante no fisurada ya no puede soportar la carga y el componente se fractura, cuando hablamos de estrés en el componente siendo este suficientemente bajo para aleaciones de acero puede teóricamente llegar a ciclarse esto quiere decir que tendrá un límite de resistencia definido; por otro lado, las aleaciones de aluminio no tienen límite de resistencia llegando a fallar debido a fatiga así se realicen cargas muy bajas [15].

La fatiga se descubrió en el siglo XIX después de que varios ingenieros encontraron agrietamientos en los componentes de un puente y del ferrocarril, pasaba el tiempo y el uso de los metales fue aumentando a causa del uso de maquinaria, debido a esta expansión se registraron más y más fallas en componentes sometidos a cargas repetidas, las fallas más conocidas en esta época son las tuberías de arcilla, estructuras de concreto o de madera, gracias a la revolución de que causó la creación de las máquinas se llegó a la necesidad de desarrollar procesos de diseño para evitar fallas por cargas repetidas de todo tipo de equipos; a pesar de que se ha avanzado en el tema el proceso de diseño para evitar las fallas a causa de cargas repetitivas sigue siendo desalentadora. Ya que se necesita de muchos campos de la ingeniería para la fabricación de una máquina siendo estos el análisis estructuras la inspección y evaluación no destructivos, tecnología de prueba, reparación y mantenimiento del equipo procesos de diseño etc [16].

Todos estos conocimientos son necesarios y deben usarse de manera adecuada en una actividad de diseño constante que pueda denominarse una política de diseño de fatiga, a medida que el ser humano quiera utilizar más bienes o exigir más cosas que se puedan llegar a diseñar y producir, el desafío de la fatiga nos acompañara. El proceso de la fatiga ha demostrado ser muy difícil de estudiar, un amplio progreso en la comprensión de las fases de la fatiga aceptando en general sus cuatro fases que se pueden generar en un material o componente: La primera es la Nucleación de grietas de fatiga siendo está muy difícil de estudiar cuando influyen condiciones externas en la nucleación como lo es la temperatura, corrosión de todos los tipos o el desgaste nos generara un problema para modelar el daño, en segundo lugar en-

contramos la propagación de grietas estructuralmente dependiente (a menudo llamada grieta corta o pequeña fase de grieta), en tercer lugar encontramos la propagación de grietas que se caracteriza por fractura elástica lineal mecánica, mecánica de fractura elástica y plástica o fractura completamente plástica mecánica, y en cuarto lugar encontramos la inestabilidad e insuficiencia final [2].

3.2. Fatiga de Alto Ciclo

Esta fatiga implica gran cantidad de ciclos, el promedio de ciclos es mayor a 10^5 ciclos y una tensión elásticamente aplicada; para aplicar las pruebas de fatiga en un metal no ferroso es necesario generar unos 10^7 o 10^8 ciclos, aunque la tensión aplicada es lo suficientemente baja como para ser elástica, presentando en la deformación en la punta de la grieta, la presentación de los datos generalmente los encontramos en forma de grafico de tensión mecánica (S) versus el número de ciclos hasta el fracaso (N), la tensión (S) puede ser la máxima (σ_{max}), o mínima (σ_{min}), la amplitud (σ_a), y la relación de S-N determina el valor específico de la tensión media (σ_m) [7].

La vida de la fatiga es determinada por la cantidad de ciclos hasta su fallo en un esfuerzo especificado a nivel, por otro lado, la resistencia a la fatiga corresponde a la tensión a la cual la falla no ocurre en un número predeterminado de ciclos, un ejemplo es que el número de ciclos es proporcional a el nivel de tensión mecánica aplicada esto quiere decir que mientras el nivel de estrés disminuye el número de ciclos baja, mientras que la fatiga aumenta la resistencia a la tracción estática también lo hace.

Para una gran cantidad de aceros, existe una correlación directa entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga; es decir, los aceros de mayor resistencia a la tracción tienen límites de resistencia más altos; El agrietamiento por fatiga puede ocurrir bastante temprano en la vida útil del miembro por la formación de una pequeña grieta, generalmente en algún punto de la superficie externa. La grieta se propaga lentamente a través del material en una dirección más o menos perpendicular al eje de tracción principal En última instancia, el área de la sección transversal del miembro se reduce hasta el punto en que ya no puede soportar la carga, y el miembro falla en tensión [2].

3.3. Fatiga de Bajo Ciclo

En la fatiga de bajo ciclo, la tensión y la amplitud de la tensión alcanzan o superan la elasticidad límite de un material. Toda la sección de la muestra se somete deformación plástica macroscópica y no solo la superficie. Se crean líneas de deslizamiento segmentadas, lo que en la fatiga de alto ciclo implica una sola superficie de granos orientados hacia un mismo sentido.

Los límites de grano, son mucho más difíciles de deformar que los granos comunes de bajo ciclo, particularmente a temperaturas superiores al NDT (Temperatura de ductilidad nihil) del material. La micro grieta se desarrolla a lo largo de los límites de los granos y, por lo tanto, intergranular. Una vez que se vuelve lo suficientemente largo, alrededor de dos o tres granos, es directamente impulsado por la carga externa y puede crecer en un plano normal a la carga aplicada o continuar creciendo en forma intergranular si la amplitud de la tensión es suficientemente alta [2].

3.4. Límite de Fatiga

Es la amplitud de esfuerzo más baja donde aún pueden crecer micro grietas iniciadas en bandas de deslizamiento persistentes en una macro grieta al romperse las barreras de frontera de grano. No siempre el daño se produce por debajo del límite de fatiga esto está estrictamente relacionado al hecho de que en los granos pequeños las micro grietas que se nuclean son demasiado pequeñas para ser impulsado por el estrés local a través de las micro barreras que enfrentan, principalmente grano límite en sí. En granos grandes, en cambio, si el daño se nuclea, puede crecer en el grano sin encontrar ninguna barrera en absoluto hasta un tamaño de incluso 100 micras o más [1].

3.5. Etapas de la Fatiga

La tasa de crecimiento de la fatiga que caracteriza la evolución de las micro grietas durante la misma primera fase cristalográfica de la fatiga que fue definida por Forsyth como Etapa I de fatiga, va de una fracción de Angstrom a decenas de Angstrom por ciclo, dependiendo de la amplitud de esfuerzo aplicada y la micro densidad de poros. El crecimiento del daño es muy lento y difícil de observar.

En la fatiga de ciclo bajo, puede ser muy alta y fallar lo cual se produce dentro de unos pocos miles o diez mil ciclos de trabajo. En la Etapa I de fatiga la generación y el crecimiento de micro grietas se desarrollan en planos cristalográficos a lo largo de aquellas direcciones en las que el esfuerzo de cizalladura resuelto llega a un valor crítico.

En esta etapa de fatiga el crecimiento está condicionado por la metalurgia con factores tales como inclusiones, segundas fases, interfaces metalúrgicas, grano límites, etc. que pueden bloquear o retrasar el crecimiento de micro grietas ya que tienen un tamaño comparable [8].

En la etapa II, las grietas cuando el crack alcanza un tamaño macroscópico de al menos 200-400 μm , es decir, dos o tres granos grandes o decenas de granos pequeños, pasan del control de estrés local a uno normal y comienza a crecer en un plano normal a la dirección de la carga externa. Etapa II de fatiga, como fue llamado por Thompson y Wadsworth.

Estudios recientes confirman lo que ya se dijo que en la Etapa I las micro grietas se originan casi de inmediato con la activación de las primeras líneas y bandas de deslizamiento persistentes y la primera formación, después de que finalice la fase I de endurecimiento y ablandamiento al menos en fatiga de alto ciclo, los métodos de análisis modernos que hacen uso de fotomicrografías y la réplica de la superficie a través de películas de acetato puede ver detalles de hasta un micrón de tamaño [9].

En la Etapa II, la fisura por fatiga resta el área a la sección transversal resistente que se vuelve cada vez más sobrecargado, iniciando así la última etapa o la Etapa III de fatiga, aunque se inició como un ciclo alto fatiga, puede convertirse en fatiga de ciclo bajo y crecer muy rápido.

Ahora viene la fatiga volver a ser impulsada por el estrés de corte, pero esta vez a lo largo de los límites de grano persistentes como se dice en esta etapa, la sobrecarga puede ser tan alta que desencadenar una ruptura rápida de hoyuelos alimentada siempre por tensiones de corte que se abren, agrandan y une los poros alrededor de las inclusiones característica de esta etapa son los llamados labios de corte que son el signo visible de falla dúctil [8].

Como se ha mencionado anteriormente, incluso si no están presentes tensores, muescas o inclusiones de tensión, se pueden iniciar pequeñas microfisuras debido a una amplitud de deformación plástica alterna suficientemente alta. Cuando una luxación emerge en la superficie, un paso de deslizamiento de uno se crea un vector de hamburguesas. Durante la carga invertida perfecta en el mismo plano de deslizamiento. Ocurre en muchos planos, y la inversión nunca es perfecta. La acumulación de pasos de deslizamiento en una región local rugosidad de la superficie. Por lo tanto, la resistencia al fallo por fatiga es mayor para aleaciones que no están sujetas a una localización severa de la deformación plástica.

El proceso de falla por fatiga puede dividirse en cinco etapas:

- Deformación plástica cíclica antes de la iniciación de la ráfaga de fatiga.
- Iniciación de uno o más microcracks.
- Propagación o coalescencia de microcracks para formar una o más microcracks.
- Propagación de uno o más macrocracks.
- Fallo final.

Estas etapas en el proceso de fallo por fatiga son complicadas y están influenciadas por muchos factores [14].

3.6. Diseño para la Prevención de la Fatiga

El diseño utilizado en la fatiga y en la tolerancia del daño, es uno de las dos suposiciones iniciales que se hace a menudo sobre el estado del material. Ambos están relacionados con la necesidad de invocar la mecánica para hacer el análisis de esfuerzo, deformación y mecánica de fractura.

Haciendo que el material sea manejable necesitamos que se cumplan los siguientes pasos: El material es un continuo homogéneo, continuo, isotrópico ideal, libre de defectos. El material es un continuo isotrópico homogéneo ideal, pero contiene una discontinuidad ideal [8].

En fatiga puede o no ser considerado un defecto, dependiendo del enfoque de diseño de fatiga o vida de tensión. Estos enfoques normalmente usados para diseñar para vida finita o infinita, en ambas suposiciones los materiales se consideran libres de defectos, excepto cuando el procedimiento de muestreo utilizado para seleccionar las muestras de ensayo de material pueda capturar los probables defectos.

Cuando seleccionamos los lugares de la muestra para pruebas de fatiga, tenemos que demostrar que el enfoque es poco fiable y ha llevado en parte al enfoque tolerante a los daños, al igual que otras suposiciones como la inspección y la detectabilidad que no son partes inherentes del enfoque de diseño original; por el contrario, la experiencia pasada y actual guía los procedimientos de inspección y mantenimiento de campo, si y cuando se consideran [9].

El enfoque de tolerancia a los daños se usa para tratar una discontinuidad similar a una grieta, escape en la liberación inicial o en las prácticas de inspección de campo. Por lo tanto, esto se acopla directamente a inspección no destructiva (NDI) y evaluación (NDE). Los potenciales de iniciación de la propagación pueden considerarse parte del proceso de diseño y sus características de crecimiento de la grieta subcritica bajo condiciones monotonías, sostenidas y cíclicas que deben incorporarse en el diseño. El parámetro de inestabilidad final, así como la deformación plana de tenacidad de la fractura que debe ser incluida en el diseño.

El enfoque de tolerancia a los daños se basa en la capacidad de Seguimiento del daño durante todo el ciclo de vida del componente o sistema. Se requiere un amplio conocimiento y que los modelos de mecánica de fractura estén disponibles para ayudar en la evaluación del comportamiento potencial. De igual forma son necesarios los procedimientos de caracterización de los materiales para asegurar que la evaluación del material propiedad o característica de respuesta. NDI debe realizarse para asegurar que la probabilidad de detección. Este enfoque

ha demostrado ser fiable, especialmente Componentes críticos para la seguridad [8].

En los enfoques anteriores a menudo se usan para un sentido complementario en el diseño de la fatiga. Los detalles de los tres enfoques son el proceso de fatiga, que ha demostrado ser muy difícil de estudiar. De igual forma, se ha avanzado mucho en la comprensión de las fases de la fatiga en los últimos 100 años.

Actualmente se acepta generalmente que cuatro fases distintas de fatiga pueden ser:

- Nucleación.
- Propagación de grieta estructuralmente dependiente (llamada grieta corta o pequeña grieta.
- Propagación de la grieta que es caracterizable por la mecánica lineal de la fractura elástica, el elástico-plástico.
- Mecánica de la fractura o mecánica de fractura totalmente plástica, Inestabilidad final.

Estas fases son un proceso extremadamente complejo que implican varios procesos en sí mismo; como la nucleación de las grietas de fatiga son extremadamente difícil de estudiar, junto con los mecanismos de fatiga pura dependiendo de la composición intrínseca del material. Cuando se decide perseguir la nucleación de grietas en un material, se asume que el material está libre de grietas. Cuando están implicadas influencias extrañas en la nucleación, tales como efectos de temperatura como influencia, la corrosión de todo tipo, o la fricción, el problema de modelar el daño es formidable [8].

4 Procedimiento de análisis

4.1. Inspección Visual

En primera instancia se buscó una pieza mecánica que hubiera fallado por algún tipo de esfuerzo o carga en específico, en un taller de mecánica automotriz se halló una ballesta que es utilizada para la amortiguación de vehículos de gran tamaño y peso, por lo general estas ballestas vienen aleadas con silicio y manganeso, los diversos tipos de tratamientos térmicos aplicados a estas ballestas les permiten recibir cargas y devolver a su estado original después de retirada la carga, estas ballestas se ubican de forma que; la ballesta más larga y ancha quede unida al chasis del auto que se desee amortiguar, para garantizar la alineación de las ballestas se usa un tornillo central y varias bridas en forma de u, estos elementos están sometidos a tensión y a compresión todos al mismo tiempo, además de esto las hojas deben soportar la fricción que se origina entre ellas, esto hace que se calienten las hojas y juntos con los otros esfuerzos den origen a la fatiga, por lo general cuando una hoja falla lo conveniente es cambiarlas todas debido a que al momento del fallo se pueden fracturar las otras hojas, las hojas también fallan debido al calentamiento de otras piezas, para el retiro de estas piezas comúnmente se hace por medio de un soplete, estas altas temperaturas cambian por completo las propiedades iniciales del material.

Luego de esto se realizó un análisis inicial de la pieza donde se observan las líneas de espiga que es por donde empezó a fallar el material, en la parte superior de esta se evidencia un golpe que es el que pudo ocasionar el inicio de la falla, también se pueden observar los siguientes ciclos de la falla donde se produjo la rotura.

Para poder iniciar el análisis de la pieza se tuvo que cortar, debido a que esta es demasiado grande para realizarle los análisis, y también es muy grande para los instrumentos que vamos a utilizar, este corte se realiza en compañía de nuestro tutor el cual nos guía y supervisa el corte realizado con la tronzadora.



(a)



(b)

Figura 4-1: a) Ballesta agrietada. b). Corte de las probetas.

Después de cortada la pieza queda un poco quemada y rayada a causa del disco de corte. Para poder atacar la pieza se tuvo que hacer un proceso de lijado, el cual se realizó con lijas de diferentes calibres 100, 240, 320, 600 y 1000, iniciando por la más gruesa y terminando en la más delgada, luego de que se realizó el respectivo lijado en dos direcciones, esto se hizo hasta que no se evidenciaran rayas al través, con ayuda de agua y paños para que nuestra probeta no pierda el trabajo que ya se realizó.

Después de acabar el proceso de brillo espejo la pieza debe quedar de la siguiente manera. Luego de este proceso, la pieza o probeta, es atacada con nital para poder evidenciar la estructura y los componentes de este, con la ayuda de un lente de microscopio observamos más detalladamente la probeta. Con ayuda del microscopio se obtuvieron las siguientes imágenes.

Después de que se miró la estructura de la probeta con ayuda del microscopio, se procede a tomar su dureza encontrando en este material una dureza Rockwell de 43 HRC, dicha dureza se toma con ayuda del durómetro, donde se utilizó un cono con punta de diamante de 120° .

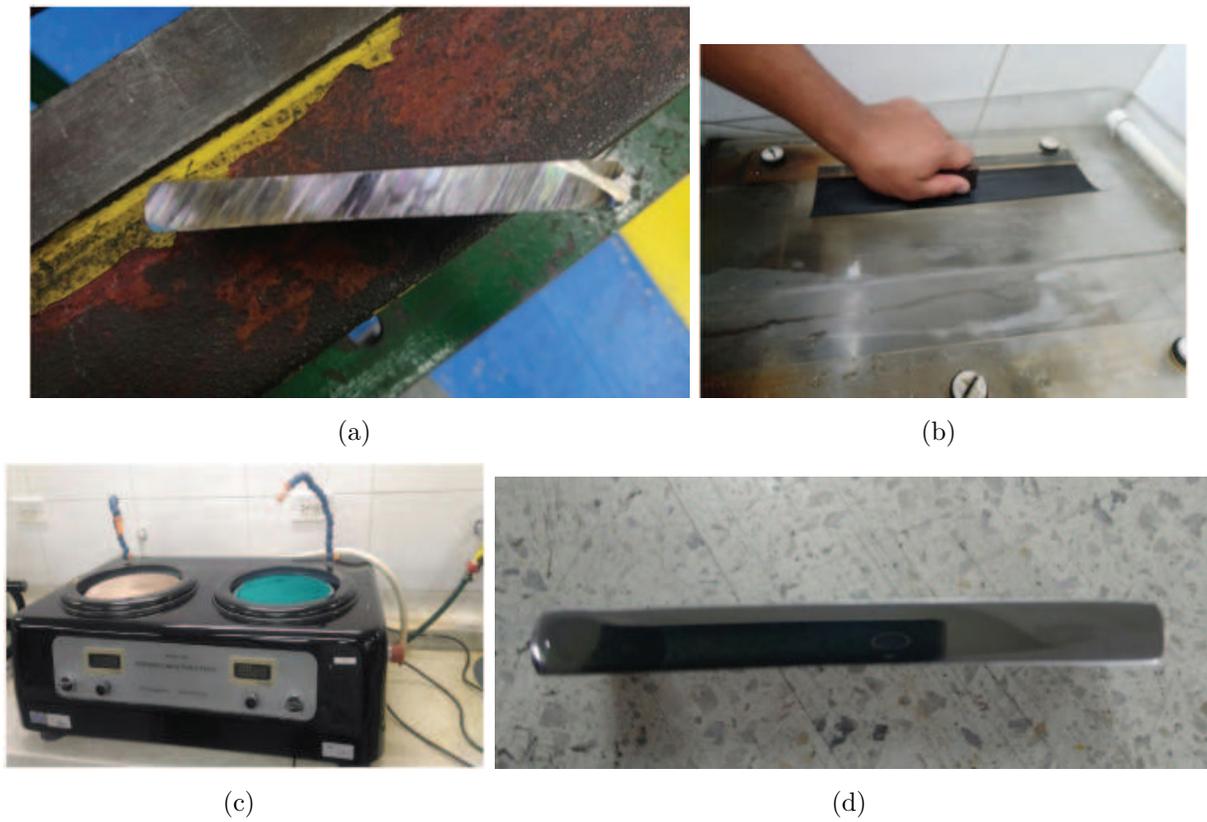


Figura 4-2: a) Corte de la ballesta . b). Banco de lijado. c). Máquina de pulido metalográfico. d). Lijado obteniendo brillo espejo.

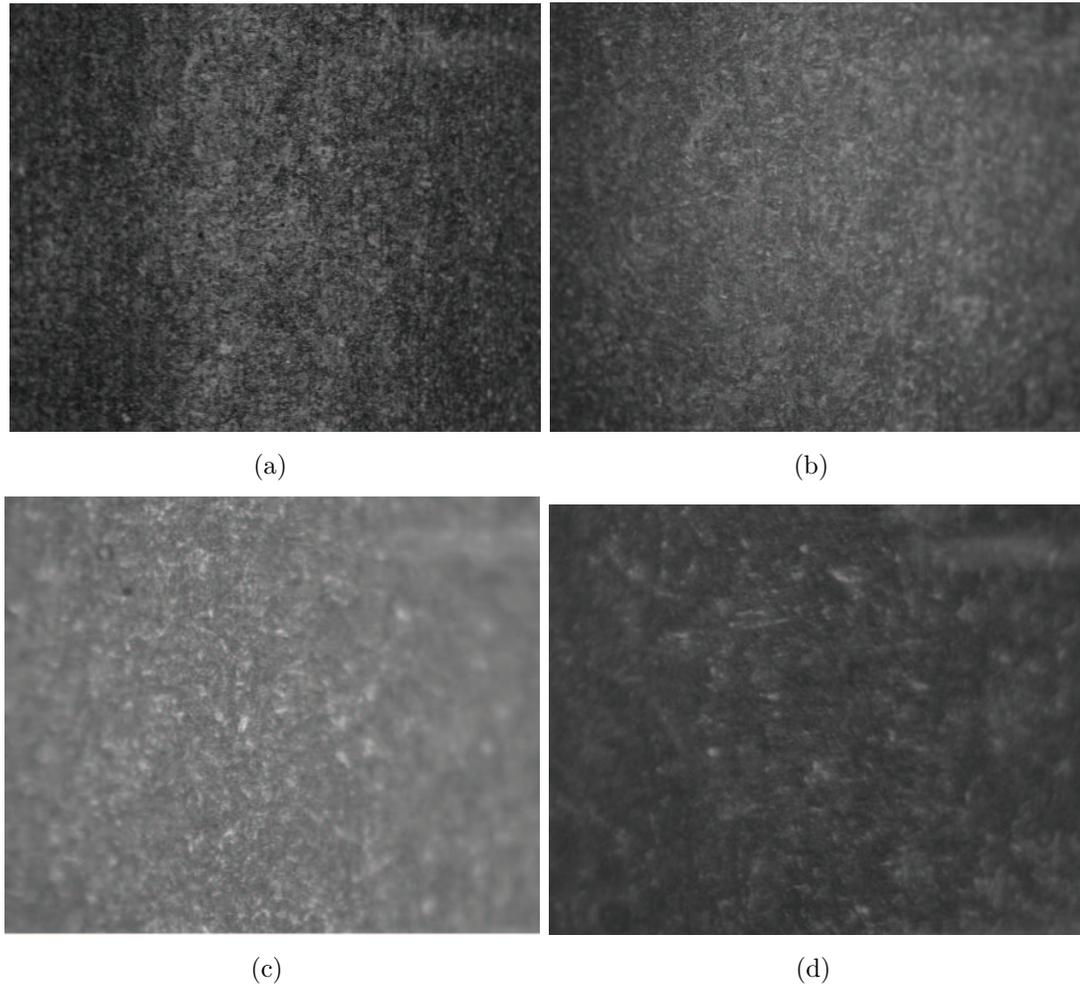


Figura 4-3: a) Microestructura de la sección transversal de la ballesta 100X b). 200X c). 500X d). 1000X.

4.2. Análisis Metalografico

Es un acero al Cr-Ni-Mo, de las serie 43XX que normalmente es suministrado en estado de temple de 820°C a 860°C , con un revenido de 540°C A 660°C (bonificado) se puede evidenciar que posee estos tratamientos térmicos debido a que presenta una coloración más oscura en el contorno de la capa superior de la pieza, a su vez se observa que el material contiene una estructura perlítica con carburos. Este material es utilizado para construcción de piezas de maquinaria que están sometidas a torsión e impacto. Es un acero de gran templeabilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga en piezas de gran sección. No presenta fragilidad de revenido y posee maquinabilidad a dureza relativamente alta, resistencia a la torsión. Utilizado preferencialmente en motores, ejes para carros y camiones, bielas para motores, árboles para carros, No se recomienda utilizar sin tratamiento térmico.



(a)

Figura 4-4: a) Mediciones de dureza en la superficie de la ballesta 42 HRC b). 44 HRC.

4.3. Análisis de Falla

Se realizó un análisis para encontrar las causas del fallo prematuro de la ballesta donde se han empleado los procedimientos de la práctica habitual del análisis de fallas, con la inspección ocular de la pieza rota y empleo de diversos procesos para la caracterización de propiedades. El estudio demuestra que el fallo ocurrió por fatiga mecánica, iniciándose en la parte central, zona que soporta las máximas tensiones de tracción, propagándose de manera sesgada hacia la izquierda, y finalizando su falla en la parte exterior de la ballesta. Diversos factores negativos de diseño, metalúrgicos y de fabricación han facilitado la rotura prematura de las ballestas.

En inspección visual de la pieza se observaron las líneas de espiga (marcas *herringbone*). En la parte superior se evidencio un defecto interior del material que pudo ocasionar el inicio de la falla, la cual se propagó de manera sesgada hacia la izquierda dirigiendo la falla hacia la parte exterior de la ballesta.

5 Conclusiones

- El análisis de falla desempeña un papel importante en todas las aplicaciones de ingeniería y diseño industrial, uno de los objetivos de la ingeniería mecánica es desarrollar una metodología para evitar fallas repentinas en un sistema. Siendo de gran importancia y gran aporte para el desarrollo de este trabajo y de nuestra experiencia en procesos de ingeniería.
- Se realizaron diferentes tipos de análisis para detectar el (RCA) análisis de causa raíz en la ballesta, el cual demostró que el fallo ocurrió por fatiga mecánica, esto se logró diagnosticar gracias a la información teórica práctica acerca de la mecánica de fractura y se enfocó a un análisis de falla de una ballesta de vehículo.

Bibliografía

- [1] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, George F.: *ASM handbook*. Vol. 9: *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004
- [2] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, W.T. ; SHIPLEY, R.J.: *ASM handbook*. Vol. 11: *Failure Analysis and Prevention*. ASM International, 2002
- [3] AVALLONE, Ugene. ; BAUMEISTER III, Heodore. ; SADEGH, Lim: *Standard Handbook or Mechanical Engineers*. 11th Edition. McGraw-Hill, 1987
- [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 (Ingenieria e ingenieria civil). – ISBN 9781615039760
- [6] DE CAMPOS FRANCESCHINI CANALE, L. ; TOTTEN, G.E. ; MESQUITA, R.A.: *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*. ASM International, 2008 (EngineeringPro collection). – ISBN 9781615030989
- [7] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987
- [8] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM Handbook: Fatigue and fracture*. ASM International, 1990 (ASM Handbook)
- [9] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM Handbook-Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, 1992 (ASM Handbook v. 18). – ISBN 9780871703804
- [10] DAS, Amiya K.: *Metallurgy of failure analysis*. Vol. 132. McGraw-Hill New York, NY, 1997
- [11] FORREST, P.G.: *Fatigue of Metals*. Elsevier Science, 2013. – ISBN 9781483160733
- [12] GROUP, Mechanical Failures P. ; SHIVES, T.R. ; WILLARD, W.A. ; FOR MATERIALS RESEARCH (U.S.), Institute ; FOR MATERIALS RESEARCH. METALLURY DIVISION, Institute: *Mechanical failure, definition of the problem: proceedings of the 20th meeting of the Mechanical Failures Prevention Group, held at the National Bureau of Standards, Washington, D.C., May 8-10, 1974*. U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of

- Standards : for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off, 1976 (NBS special publication)
- [13] KHATTAK, MA ; ZAREEN, N ; MUKHTAR, Anique ; KAZI, S ; JALIL, Amena ; AHMED, Zaheer ; JAN, Miraj M.: Root cause analysis (RCA) of fractured ASTM A53 carbon steel pipe at oil & gas company. En: *Case Studies in Engineering Failure Analysis 7* (2016), p. 1–8
- [14] LIVINGSTON, AD ; JACKSON, G ; PRIESTLEY, K: Root causes analysis: Literature review. En: *HSE Contract Research Report* (2001)
- [15] MCEVILY, Arthur J.: *Metal failures: mechanisms, analysis, prevention*. John Wiley & Sons, 2002
- [16] NISHIDA, Shin-ichi: *Failure analysis in engineering applications*. Butterworth-Heinemann, 1992
- [17] RAMACHANDRAN, V: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005
- [18] SCHIJVE, J.: *Fatigue of Structures and Materials*. Springer Netherlands, 2008. – ISBN 9781402068089
- [19] WULPI, Donald J.: *Understanding how components fail*. ASM international, 2013