



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de falla de elementos de transmisión obtenidos de DINISSAN

Juan Camilo Martinez Garcia
Jhonatan Wilmer Garcia Peralta

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

Análisis de falla de elementos de transmisión obtenidos de DINISSAN

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 Fundación Universitaria los Libertadores por permitirnos culminar la carrera y poder obtener el título 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). Picaduras en los dientes. b). Corrosion localizada en las grietas de los dientes.	22
4-2.	a). Medición de dureza Rockwell C en las probetas obtenidas.	24
5-1.	a). Diagrama causa raíz.	26
5-2.	a). Análisis metalográfico 100X b). 200X. c). 500X d). 1000X	26

Resumen

En este proyecto se presenta el análisis de falla para determinar las causas y eventos que dieron lugar a la fractura en un diferencial por medio de un estudio de fatiga y fractura. El análisis se realizó mediante el corte de una muestra altamente afectada, en la cual se hizo un desbaste a través de un proceso de lijado hasta obtener un brillo espejo en la superficie, además de un ataque químico para conseguir parámetros más certeros en el análisis metalográfico. Se observó la presencia de martensita revenida en forma de huellas, una matriz ferrítica (Gris) y un valor de dureza bajo estructura perteneciente a un acero 1040 o 4140. Los causantes de tal falla fue un erróneo mantenimiento en el proceso de lubricación de las piezas, como un tratamiento térmico de revenido en su fabricación ocasionando un descenso en su dureza, cabe aclarar que al ser un análisis netamente experimental no se hace necesario realizar cálculos matemáticos.

Palabras clave: Análisis de falla, Fatiga, Fractura.

Abstract

In this project, failure analysis is presented to determine the causes and events that gave rise to the fracture in a differential by means of a study of fatigue and fracture. The analysis was performed by cutting a highly affected sample, in which a roughing was done through a sanding process to obtain a mirror shine on the surface, in addition to a chemical attack to achieve more accurate parameters in the metallographic analysis. The presence of martensite reave in the form of traces, a ferritic matrix (Gray) and a hardness value under the structure belonging to a steel 1040 or 4140 was observed. The cause of such failure was an erroneous maintenance in the process of lubrication of the pieces, as a thermal treatment of tempering in its manufacture causing a decrease in its hardness, it should be noted that being a purely experimental analysis is not necessary to perform mathematical calculations.

Keywords: Failure analysis, Fatigue, Fracture.

Contenido

Resumen	x
1. Objetivos	2
2. Introducción	3
2.1. Fractura en metales	4
2.2. Fatiga	5
2.3. Fractura En Aceros	6
2.4. Fases de Fallo por Fatiga	7
3. Criterio de Energía para la Fractura	9
3.1. Tenacidad a la Fractura	10
3.2. Prueba de Rigidez de Fractura Elástica Lineal	11
3.3. Pruebas De Rigidez De Fractura No Lineal	12
3.4. Métodos de Prueba en Preparación	12
3.5. Resistencia a la Fatiga	14
3.6. Comportamiento Grietas	14
3.7. Parámetros de Investigación	16
3.8. Coeficientes Límite de Fatiga	16
3.9. Principios del Control de Fractura	18
3.10. Criterio de Energía para la Fractura	21
4. Procedimiento de análisis	22
5. Resultados y análisis	25
5.1. Análisis metalográfico	25
5.2. Análisis De Falla	25
6. Conclusiones	27
Bibliografía	28

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a un engranaje de la caja diferencial de una camioneta NP300-Nissan que presenta algún tipo de falla con el fin de determinar la causa probable de falla.

2.2. Objetivo Específicos

- Obtener diferentes piezas mecánicas que hayan sufrido diferentes tipos de fallas y recopilar información bibliográfica acerca de estudios sobre análisis de falla relacionados con los componentes mecánicos obtenidos.
- Realizar pruebas de laboratorio tales como inspección visual, análisis metalográfico y análisis de dureza, bajo normatividad internacional que permitan evidenciar las posibles causas raíz de fallo.
- Determinar las posibles causas de fallo de las piezas seleccionadas mediante la aplicación de la metodología del análisis de causa raíz con el fin de emitir un concepto técnico para evitar la falla de componentes similares debido a la misma causa.
- 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 pubindex.

2 Introducción

Fatiga es el cambio existente de manera progresiva o permanente en la forma estructural de la pieza producto de fluctuaciones y cargas repetidas hacia el material. Normalmente la fatiga es prevista en un material en forma de grietas, un ciclo de esfuerzos simultáneos, esfuerzos de tensión, y esfuerzos plásticos son las causas profundas para que se produzcan y se propaguen grietas internas en el material, de no estar presente una de las tres presentes la grieta no iniciara y por consiguiente no se propagara en el material.

Los esfuerzos de tensión serán los causantes del crecimiento de la propagación, los esfuerzos plásticos serán el punto inicial de la fractura, así como las cargas de compresión pueden resultar en esfuerzos locales de tensión. Las micro grietas pueden inicialmente aparecer debido a tratamientos de calor, y en tratamientos de soldadura, incluso en un metal previamente pulido sin concentración de esfuerzos puede estar propenso a la formación de grietas de fatiga [1].

Las grietas iniciales siempre serán muy pequeñas, inclusive su reconocimiento no será del todo muy claro para determinar la presencia de una deformación u otra señal que llegase a ser una grieta en la estructura, son tan pequeñas estas grietas como una fracción de micrón siendo la única posibilidad para percibirlos mediante avanzadas técnicas tales como microscopios o escáneres metalográficos.

El proceso de análisis de falla es fundamental en el día a día en el sector industrial y mecánico, es la única forma para encontrar y evaluar las causas de las recurrentes fallas en los equipos y piezas en una organización, por lo tanto, su objetivo es trabajar para revertir y evitar a futuro estas situaciones. Consiste en una identificación clara del problema e inmediatamente llevar a cabo una repuesta de acción, una respuesta de acción rápida es el cambio del componente mediante un proceso de mantenimiento sin un respectivo análisis de falla, relevando y dejando a un costado procesos más de ingeniería que podrían resolver estos paradigmas de una forma clara permitiendo capturar nuevos conceptos e intuitivamente aplicarlos en cada reporte de fallo a futuro [3].

Una apropiada investigación es llevada a cabo mediante un claro conocimiento y dominio del tema, requiere de una preparación teórica previa, fomentando y explorando técnicas aplicadas al mundo de la ingeniería mediante recursos bibliográficos y electrónicos junto con la colaboración de expertos en otras áreas que sean requeridos en circunstancias para el res-

pectivo entendimiento en disciplinas como diseño y procesos de manufactura [6].

El análisis de falla ha evolucionado en el pasar de los años, siendo una de las técnicas más utilizadas en el sector industrial debido a su alta efectividad y confiabilidad, además de ser una herramienta de enseñanza para nuevos y futuros ingenieros. Este proyecto introduce el concepto de análisis de falla, causas y las diferentes técnicas y herramientas de ingeniería para la mejora y prevención en piezas y equipos [4].

2.1. Fractura en metales

Durante años, se han estudiado distintos tipos de fallas, dando así estudios a tragedias tales como caídas de puentes, derrumbe de construcciones y en un caso ya bastante famoso, se podría hablar de barcos como el Titánica, cuyo componente principal era el acero en distintos remaches y como parte de su estructura, sin embargo, con el tiempo y después de muchos análisis, se llegó a encontrar concentraciones preocupantes de azufre en el acero utilizado para la construcción de tan legendario barco. Generalmente durante el proceso de fractura se evidencia en la falla un inapropiado uso ó inapropiado diseño, cuya derivación es el agrietamiento en algún punto y de este mismo modo al crecer dicha grieta, alcanza un punto crítico para producir la fractura final. Durante el proceso de agrietamiento se encuentran distintas formas de fisura en los materiales tales como agrietamiento ya sea producido por hidrógeno o por corrosión bajo tensión, fluencia y fatiga, por ende, cada una de estas formas de fisura tiene características las cuales son analizadas para encontrar las principales causas que conllevan al agrietamiento de un material [7].

La fractura final general es abrupta y se produce gracias a pequeñas fracturas intergranulares. Desde la perspectiva macroscópica la fractura es frágil, mientras que el microscópico se denomina dúctil o de hoyuelos. Tratamientos como el temple, las grietas que resultan luego del mecanizado, corrosión por estrés o fatiga; de hecho, se entiende que la grieta por fatiga es en un 50 % por encima de otros factores de fractura, el principal indicador al momento de falla de un material. Por otra parte, la falla dúctil macroscópica es mucho menos frecuente y generalmente es resultado de sobrecargas o por condiciones de servicio que superan la resistencia del material. Los orígenes del análisis mecánico de la práctica de la ingeniería son atribuidos a Griffith que estableció una tasa de liberación de energía para los materiales frágiles, durante observaciones se encontró que un material con mayor longitud tendrá menor resistencia [1].

Existen cuatro modos de fractura: a. Fractura dúctil, b. Fractura frágil c. Fatiga y d. Fractura por sobrecarga. Para realizar un adecuado estudio de las clases de fractura, generalmente se usa un microscopio de barrido. La mayoría de fracturas se llaman fracturas frágiles esto desde el ámbito de la ingeniería, sin embargo, el micro mecanismo de fractura se denomina dúctil,

dicha fractura se caracteriza por una rotura del metal junto con una evidente deformación. Para la mayoría de los metales las fracturas dúctiles a la tracción evidencian un aspecto fibroso y gris que igualmente se clasifican en una escala macroscópica como fracturas de cara, de corte o de cara plana [1].

2.2. Fatiga

Todos los diseños de componentes involucran piezas sujetas a cargas de manera fluctuantes o cíclicas. Muy a menudo resultan en fallas por fatiga debido a las tensiones fluctuantes o cíclicas inducidas. Un mecanismo por fatiga produce casi un 95 % de las fallas estructurales. Las aplicaciones de tensiones mediante cargas repetitivas se acumulan en las piezas y generalmente producen un daño irreparable debido al seguimiento repetitivo de tensiones.

Es realmente complicado percibir cualquier cambio progresivo en el comportamiento de la cuando está en los efectos de un proceso de fatiga, posando estas fallas de una manera imperceptible a simple vista. En toda rotura por fatiga por simple lógica resulta una micro grieta en cualquier punto de la pieza, que a medida que se aplican ciclos de carga a la misma crece hasta alcanzar una dimensión tal que la sección no está en la capacidad de soportar la carga máxima en el ciclo y finalmente el pliegue restante que sostiene la pieza se rompe de forma frágil o dúctil. La rotura inicia mediante pequeñas tensiones en pequeñas concentraciones, cada ciclo de carga representa un avance frente a la grieta, de forma que la rotura sucede cuando la sección es incapaz de resistir la carga estática, es necesario evitar ralladuras en el área superficial en zonas de con un alto nivel de tensión, como mejorar mediante un tratamiento térmico o mecánico que produzca unas tensiones de compresión en la pieza aumentando su dureza y resistencia a la fatiga [7].

Al finalizar la producción de un material independientemente el método de fabricación estos en la mayoría de los casos contienen bordes granos, poros, precipitaciones, defectos a partir de los cuales se desarrollan grietas en la estructura, y dependerá del nivel de tensiones el cual las grietas se propaguen hasta su fractura. En algún lugar de la pieza como es normal se encuentra las tensiones máximas normalmente en zonas que forman un ángulo de 90° o zonas con un mal acabado producto de un mal mecanizado final. Defectos internos como defectos superficiales son los causantes de la fractura en una pieza, si las cargas son fuertes y severas, superarán el límite elástico y producirán deformaciones permanentes notorias en cada ciclo de carga [6].

Teóricamente una pieza diseñada a resistir un alto número de ciclos durante su vida útil tiene una alta probabilidad de sufrir rotura en su superficie, lo peor que puede resultar al finalizar un mecanizado de una pieza es que resulte un acabado con ralladuras y rayones en la superficie, lo mejor en estos casos es lograr un acabado tipo espejo para aplicar un

tratamiento térmico con el fin de mejorar sus resistencia y propiedades mecánicas [12].

2.3. Fractura En Aceros

En cuanto el metal se deforma su capacidad por deformación adicional se agota, por ende, el metal se fractura por un micro mecanismo frágil. La fractura de escisión se genera por la separación de enlaces atómicos y ocurre en metales que generan poca o nula deformación plástica. Para la fractura intergranular, se entiende que tiene una baja tenacidad y baja ductilidad, del mismo modo el límite de grano es el camino de la falla. Sus principales causas pueden ser: Debilidad interna de los límites de grano, Embotellamiento del límite de grano por Nitrógeno u otros entornos agresivos como en la Corrosión intergranular [1].

Por otra parte, en presencia de un entorno agresivo, reduce la capacidad para soportar una carga por parte de un material del mismo modo que dicho ambiente no puede atacar a todos los materiales, pero además el entorno requiere de tiempo a medida que el ambiente interactúa con el material. Si un material está sometido a una carga, dependiendo del nivel al que sea sometido, el tiempo en que falle varía si a esto se le suma un ambiente susceptible a un posible ataque. Dependiendo del material y la manera en que se extiende la grieta, no repercuten significativamente en el aumento de la misma, igualmente el agrietamiento también puede ser generado durante el proceso de fabricación del metal [2].

Sin embargo, se entiende que, al tener un medio corrosivo a través de la grieta, esta se propaga con más velocidad. Aceros de alta resistencia: Para estos aceros, la alta resistencia y la tenacidad, está relacionado con características como el tamaño junto con la distribución de carburos y nitruros, las proporciones relativas de las fases martensita dúctil o baja en carbono y austenita meta estable, junto con el tamaño del grano. Por el contrario, los aceros con tenacidad a la fractura relativamente baja contienen predominantemente estructuras ferríticas y perlíticas [2].

En los aceros templados, la resistencia a la fractura en los aceros templados se encuentra eliminando carburos de aleación gruesa, del mismo modo aumentando la templabilidad para minimizar la formación de ferrita y la aleación para lograr una austenita a temperatura ambiente. El aumento en la temperatura de austenización, disuelve nitruros y carburos que se encuentran en los aceros, además de engrosar el tamaño del grano, esto elimina grietas en los carburos y así mismo aumenta la tenacidad a la fractura, los mayores niveles de tenacidad a la fractura se dan por la formación de martensita refinada esto por el enfriamiento rápido [9].

2.4. Fases de Fallo por Fatiga

- Fase de iniciación (Deformación plástica cíclica antes de la iniciación de grietas)

Se puede desarrollar una o más grietas en el material, estas pueden aparecer en cualquier punto, pero por lo general ocurren cercano a un punto de concentración de tensión y en la superficie exterior donde a los ciclos de fluctuaciones son elevados y de manera constante. Las grietas suelen formarse en zonas con un alto número de cargas, aumentando con el número de ciclos llegando a provocar la aparición de una fisura, facilitando la existencia de la intrusión y la propagación de la grieta debido a tracción.

Producto de cualquier perturbación o dislocación saliente a la superficie del material, debido a la acumulación "slip steps" en regiones locales, la presencia de extrusiones, intrusiones y protuberancias son el síntoma causante de perturbaciones y dislocaciones en el material, tales perturbaciones pueden ser vistas en diferentes planos interceptándose entre sí [5].

- Iniciación de una o más micro grietas

El modo de iniciación de micro grieta depende de cual ocurre más fácilmente, si es una estructura débil e indicios de fragilidad están presentes, presentara un comportamiento típico y particular diferente a otros. Durante los ciclos de deformación plástica, las dislocaciones aparecen sobre la superficie del metal, si estas dislocaciones son de manera constante y continua en la superficie llegan a convertirse en grietas en la mayoría de casos en la parte central del grano, lugar donde el flujo de esfuerzos es menor, la resistencia allí se vuelve menor con una porción del grano decreciendo y un tamaño del mismo incrementando. Son muchos los obstáculos que llegan a causar dislocaciones en los materiales, lo más normal es que se lleve a cabo un incremento en el esfuerzo elástico, debido a que el esfuerzo de energía excede dos veces la superficie libre de energía activando una condición de inestabilidad que energéticamente favorece la creación de micro grietas [1].

- Fase de propagación (Propagación de micro grietas para formar una o más)

Toda grieta crece producto de la aplicación de cargas, siendo muy difíciles de percibir incluso próximas a generar la rotura en la pieza, además se nota que su dirección de propagación no es de manera óptima. Cuando la grieta atraviesa unos pocos granos ocurre una reorientación, en este instante la propagación es de manera estable.

Observar una micro grieta no es tarea fácil a menos que se tenga las herramientas tecnológicamente requeridas para realizar tal estudio, ya es muy diferente cuando esta micro grieta tiene una longitud significativa momento en el cual su percepción será más sencilla. El número de micro grietas que se forma durante la fatiga depende del esfuerzo y de la amplitud del esfuerzo plástico, para altas amplitudes se formara un mayor número de grietas, estas pueden detenerse tan pronto se alcance un esfuerzo nominal por debajo del límite de fatiga.

El mecanismo básico para la propagación de micro grietas en metales es por deformación plástica, una pequeña grieta es propagada inicialmente a través de un plano cristalográfico [7].

- Falla final

La pieza sigue deformándose constantemente alcanzando un estado crítico producto del crecimiento de la grieta resultando catastrófica la sección neta de la pieza la cual será incapaz de resistir la carga produciéndose la rotura por fatiga.

3 Criterio de Energia para la Fractura

El principio de la conservación de la energía se aplica para los fenómenos físicos existentes, entonces se entiende que la fractura requiere de energía. Los experimentos muestran que la energía durante la fractura no es constante, sino que esta aumenta a medida que se produce la fractura, sin embargo, durante los procesos o fallas no es posible determinar este fenómeno, puesto que no se puede detener de golpe una fractura [1].

Usando mecánica de fractura en el análisis de falla: El investigador debe realizar un experimento de fractura con una muestra y analizar los resultados para determinar en otros casos las causas de una falla y su comportamiento frente a las condiciones de operación a las que se ve sometido el metal. Para realizar un adecuado análisis a la tenacidad de un material, se debe tomar una muestra del material afectado. Sin embargo, por lo general se siguen instrucciones estándar del manual del fabricante para determinar la falla de un material y no se utiliza un adecuado análisis de falla, teniendo en cuenta que puede que esta sea distinta a la ya estandarizada y que incluso su análisis resuelva inquietudes o corrija al operario en el uso de un elemento [7].

Por otro lado, el investigador necesita realizar estudios tanto en el material afectado, como también en un material sin ningún tipo de grieta, ya que esto permite determinar eficientemente las posibles causas, pero se debe buscar que al reproducir la falla, esta concuerde con el material fracturado, es decir si la fractura es producida por hoyuelos, y la muestra tomada para la comparación produce una fractura por división, no se tendría certeza en los resultados desencadenando en un margen de error muy amplio. Es importante que tales análisis estén acompañados de evidencias fotográficas, para evitar pasar por alto si la parte defectuosa contenía defectos graves y si la falla final tenía como desencadenantes algunas grietas ya sea por fatiga o incluso por corrosión al estar sometida a una tensión [8].

Debido a que la orientación del material produce la variación en la tenacidad a la fractura, se debe mecanizar para así garantizar que la dirección del crecimiento de la grieta y el plano, concuerden con el material que presenta la falla. Factores como soldadura, temperaturas atípicas en el material o aleaciones, incurren en resultados distintos, por ende, si el investigador no encuentra el valor del fallido dentro del sobre ASTM, incurre en un error al comparar los resultados con los valores ASTM. Mecánica de fractura subcrítica: Para abordar un tema de esfuerzo plástico en el campo de tensión en la punta de una fisura, se

relaciona con SCFM o mecánica de fractura suscritica que por lo general se aborda para utilizar conceptos elásticos [3].

Para el caso de corrosión con tensión por carga sostenida, la intensidad en el esfuerzo ejercido debe superar ciertos valores para que de este modo se produzca un crecimiento de grietas, se le conoce como umbral de estrés de corrosión a dicho valor mínimo. Luego el umbral se desarrolla analizando una muestra agrietada hasta llevarla al punto de fractura al mismo tiempo que se registra el tiempo del procedimiento. Las cifras del análisis se muestran en un gráfico que especifica la intensidad de tensión aplicada en función del tiempo hasta la ruptura. Crecimiento de grietas por fatiga, los análisis de fatiga-estriación proporcionan información razonable acerca de las tasas de crecimiento de grietas y la curva de crecimiento de grietas [3].

Al proporcionar información sobre la tasa de crecimiento de las grietas y las tensiones del material, se puede calcular los valores de intensidad del estrés y se puede hacer una comparación entre las propiedades reales del material y las anticipadas, para obtener información más exacta y asertiva del material. A partir de la tasa de crecimiento en las grietas, las propiedades de velocidad y las tensiones conocidas, se puede concluir el tipo de uso que se le dio al material o herramienta, sea una sobrecarga o indebida manipulación [7].

Un cambio en el entorno mientras se lleva un proceso de agrietamiento puede dejar su marca, dichos cambios generalmente se asocian con la topografía de micro fracturas produciendo un cambio en la tasa de crecimiento de la grieta. Cualquier marca de playa proporciona un cambio en las circunstancias que rodean el proceso de agrietamiento. Marcas similares llegan a ocurrir en superficies de tensión-corrosión-grieta debido a cambios en el medio que lo rodea o en la carga [5].

Si no se tiene conocimiento de la naturaleza de los cambios, la información puede obtenerse a partir de las características de la tasa de crecimiento de la grieta: se puede calcular el tiempo de formación entre marcas de playa y el estrés requerido para producir los tamaños de grietas aproximados. Los conceptos de mecánica de fractura, aportan una mejor eficiencia para evaluar las situaciones de servicio en busca de posibles fallas por parte de inspectores e ingenieros. Para evaluar la forma de fractura potencial para una aleación de dureza y tensión operativa se usa un mapa de esfuerzo operativo [9].

3.1. Tenacidad a la Fractura

Se puede definir como las medidas de resistencia que tiene un material para la propagación de una grieta por esto se asocia con los métodos mecánicos de fractura que estudian los efectos generados por defectos en los componentes de la parte estructural del material. En

realidad, el evento de fractura se puede denominar estable o inestable. Cuando se habla de una grieta de extensión inestable se asocia con una fractura frágil, la fractura ocurre en un punto exacto mientras que con la fractura estable se asocia con un proceso de fractura dúctil lo cual hace que sea de proceso continuo. Para efectos de medición de la tenacidad si la fractura es quebradiza o dúctil esto no influye durante el proceso de deformación que un material u objeto puede sufrir. El proceso de deformación se puede describir como lineal o no lineal. Toda la carga comienza como lineal-elástica. Para la prueba de resistencia a la fractura se toma una muestra de prueba con un defecto existente o al menos evidente que puede ser una grieta formada por carga de fatiga. Los aceros que son usados en estructuras pueden ocupar amplias características de grosores y procesamiento, teniendo cierta relación con las propiedades mecánicas de la fractura [1].

3.2. Prueba de Rigidez de Fractura Elástica Lineal

El primer método de prueba se llama K_{Ic} , ASTM E 399, el cual mide la tenacidad a la fractura con una carga lineal-elástica con la región de punta de la grieta ejerciendo restricción a la deformación cerca al plano del grosor. Para realizar la prueba de fractura dúctil, se identifica un punto donde la extensión de la grieta alcanza un 2% sobre la longitud de la grieta, lo que indica que esta medida depende del tamaño [1].

Para elegir la muestra de prueba se rigen cinco geometrías de muestras diferentes las cuales son: Muestra de doblado con muescas en el borde SE(B), Muestra compacta C(T), Muestra de tensión en forma de arco A(T), Muestra compacta en forma de disco DC(T), Forma del arco muestra curva (B). Varias de estas muestras se suelen usar en otras pruebas, como por ejemplo las muestras dobladas o compactas las cuales son utilizadas para el análisis de tenacidad a la fractura, mientras que para los otros tres tipos de geometrías representan otros tipos de formas estructurales, es decir las pruebas de tenacidad a la fractura en su mayoría se hacen con el dobladillo con muescas en el borde o con muestras compactas, pero al seleccionar los dobles o la muestra compacta se tiene en cuenta: La cantidad de material disponible, El equipo de carga disponible para las pruebas y las capacidades de mecanizado [7].

Para un mejor criterio de validez se tiene en cuenta que el tamaño sea suficiente al realizar la prueba, como también la ubicación en la fuente del material y la correcta orientación de la muestra, para esto las normas ASTM tienen un sistema de letras para especificar la orientación. Se deben seguir los parámetros en tolerancias para partes como superficies, la ubicación de la muestra, los orificios de los pasadores, los acabados de la superficie y el tamaño. Acto seguido se elige la máquina de carga, al mismo tiempo que se preparan los accesorios de carga e instrumentación para tener registrados los datos de la prueba. Generalmente se hacen las pruebas en máquinas ya sea servo hidráulicas de circuito cerrado o en máquinas de

accionamiento de cruceta en velocidad constante [6].

El más costoso es el primero, que permite el desplazamiento de la carga y en algunos casos otro control del transductor. Por eso es más común el "precracking" que se realiza a carga constante. El segundo tipo de máquina de carga es más económico del mismo modo genera mayor estabilidad y solo permite el control de la cruceta. Al cumplir con esto en la mayoría de las pruebas de resistencia a la fractura, esta máquina satisface los requerimientos para el análisis de resistencia a la fractura. Sin embargo, no es muy buena al momento de precracking. Los accesorios de carga deben estar ajustados para la prueba, las muestras de doblado SE (B) y A (B) usan un accesorio de doblez. En cuanto a las muestras de tensión C (T), DC (T) y A (T) necesitan una carga de pin y horquilla [1].

3.3. Pruebas De Rigidez De Fractura No Lineal

Para medir la tenacidad a la fractura se usan parámetros lineales elásticos para materiales con dureza baja que se llegan a fracturar cerca o debajo de la parte de carga lineal de la prueba. Los dos principales parámetros en fractura no lineal son J y δ_a . La prueba Jlc ASTM E 813 utiliza el parámetro J , en esta prueba se desarrolla una curva R en la cual hay un punto cerca del comienzo de la curva denominado Jlc y usando J versus δ_a . Para la muestra compacta en la prueba J tiene un corte en la cara frontal, entonces se puede montar un medidor de desplazamiento en las líneas de las cargas aplicadas. Los elementos de carga necesarios son el accesorio de doblado para los dobles y el pasador para el compacto [1].

El resultado en la prueba Jlc es un gráfico de J frente a la extensión física de grietas δ_a , por esto existen dos tipos de procedimientos para desarrollar estos datos puesto que se requieren desplazamiento y longitud de grieta física. El primer método es el de múltiples muestras por requerir varios especímenes y la extensión de la grieta se mide en la superficie de la fractura al final de la prueba. El segundo método es la prueba para una sola muestra de igual modo para lograr los resultados de J frente a δ_a se necesita de un método de monitoreo de longitud de ondas.

3.4. Métodos de Prueba en Preparación

- Estándar J combinado

Teniendo en cuenta que tanto el estándar Jlc y el estándar J-R son similares en múltiples aspectos, se encuentran en proceso de combinarse en un solo proceso estándar de ASTM, de hecho, permitirá la medición de curva J-R y también el punto Jlc. El parámetro J se evalúa en el punto de craqueo inestable y se le llama J_u cuando se produce después de un craqueo

estable significativo y J_c si la fractura inestable es anterior a un craqueo estable significativo [7].

- Método de prueba a la resistencia a la fractura común.

Generalmente para el método, se usa la misma muestra para distintas pruebas al igual que instrumentación y procedimientos de prueba, este enfoque está diseñado para que las pruebas puedan ofrecer alguna medida aceptable de la resistencia a la fractura y permite la medición de la tenacidad tanto para los mecanismos de fractura frágiles como dúctiles [1].

- Prueba de resistencia a la fractura de transición.

El comportamiento de fractura de transición suele ser frágil por lo que ha sido un área problemática durante las pruebas de tenacidad a la fractura, además se evidencia una amplia dependencia de dispersión en los valores de dureza. Las muestras, los instrumentos, los accesorios, el cálculo de los parámetros de dureza y los procedimientos de prueba, continuarán con los estándares dispuestos [1].

- Prueba de fractura de soldaduras.

Las soldaduras generalmente se componen de materiales que actúan como metal base, pasando por la zona afectada por la presión, calor y en el metal de aporte de soldadura. El procedimiento de precracking para hacer que la grieta aumente lo necesario, al igual que la colocación de la muesca para el debido muestreo del material correcto y el manejo de las tensiones residuales junto con la distorsión se cubrirán en la norma. Un control de fractura es un esfuerzo concreto para garantizar un funcionamiento u operación segura sin fallas por fractura. Generalmente no ocurre una fractura por sobrecarga en una superficie no afectada o dañada, teniendo en cuenta que las fracturas vienen desencadenadas por una fisura, grieta o defecto del material que debilita la resistencia del componente. Es decir, durante la formación prolongada de la grieta, la resistencia estructural disminuye hasta que llega a ser tan baja que las cargas de servicio no puedes distribuir más la fuerza y se produce la fractura [1].

Al momento de querer prevenir una falla, la fuerza ejercida no debe superar el valor seguro del elemento, para así no permitir el aumento de grietas. Para determinar el tamaño de la grieta admisible y para determinar la vida operacional segura se usa el análisis de tolerancia al daño. La tolerancia a daños es la propiedad estructural de un material para mantener una grieta o daño sin que este se propague más para mantener una deformación de manera segura, hasta eliminar o reparar el daño e incluso reparar el componente averiado. Durante la etapa de diseño, existe la posibilidad de elegir un material acertado para cumplir características de resistencia a grietas para que dichas grietas no generen un peligro durante la vida útil del material. Existen distintos modos de inspeccionar un agrietamiento, estos se pueden

programar para prevenir daños futuros o realizar mantenimientos a daños existentes. Las inspecciones, reparaciones y reemplazos se deben programar de acuerdo a un previo análisis de tolerancia a daños o fractura. Para el análisis de tolerancia al daño se usa la mecánica de fractura como herramienta matemática de análisis, para así determinar cómo crecen las grietas y como afectan la resistencia de una estructura, su exactitud está dada por cargas y tensiones [3].

3.5. Resistencia a la Fatiga

Mediante probetas sometidas a fuerzas variables y ciclos de esfuerzos hasta el síntoma de rotura, es el método más común para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas de fatiga. No solo existe la posibilidad de analizar esfuerzos de flexión, es posible realizar también ensayo para determinar esfuerzos axiales, torsionales o combinados de tipo fluctuante o alternado [7].

Se requiere un buen número de pruebas para determinar la resistencia a la fatiga, ensayos con distintos niveles de tensión. Se realizan varias pruebas distribuidas en diferentes niveles y los resultados son representados mediante la gráfica S-N. Las coordenadas del diagrama están definidas como La resistencia a la fatiga (S) y deberá especificar un numero de ciclos (N). Se destaca los cambios en la pendiente de la curva, también la aproximación de puntos experimentales mediante rectas. Estas rectas permiten diferenciar y tener una percepción clara cuando existe fatiga a un bajo número de ciclos [7].

El límite de carga representado y por el cual el material no fallara, está representado mediante una recta horizontal, cabe aclarar que no todos los materiales cuentan con un límite de resistencia a la fatiga.

3.6. Comportamiento Grietas

El comportamiento de las micro grietas en componentes estructurales es en algunas ocasiones claramente diferentes a lo que se espera en una grieta convencional, es decir grietas de gran longitud. Todas las grietas no tienen la misma forma ni comportamiento. "smallcrack requiere que todas las dimensiones físicas en particular tanto la longitud como profundidad de una grieta de superficie y por lo tanto las dimensiones físicas varia con el material, dimensiones y cargas de interés. Al contrario, una grieta es tipo "shortcuando solo presenta una dimensión física (normalmente longitud a través de la grieta) es pequeña en comparación al escalonado de longitud [6].

- Grietas micro estructuralmente pequeñas:

Es considerada micro estructuralmente cuando las dimensiones de las grietas son pequeñas en relación a las características microestructura de sus dimensiones, el tamaño de la grieta puede estar en el orden de un pequeño diámetro del grano. También si una pequeña grieta se aproxima al límite del tamaño del grano, la grieta en fatiga podría tanto acelerarse como desacelerarse o incluso detenerse dependiendo de si el efecto "slip step" este presente este se propaga de forma continua en el grano directamente. Esta propagación depende de la orientación del grano, la inmersión de un segundo efecto "slip step" la intersección entre estos dos, la intersección de un grano a otro podría requerir un cambio en el camino de la grieta [6].

- Grietas mecánicamente pequeñas:

Es considerada mecánicamente pequeña cuando las dimensiones de las grietas son pequeñas en relación a las características mecánicas de sus dimensiones, su característica es contar con una zona plástica de deformación, el tamaño de esta zona plástica puede ser simplemente una larga fracción del tamaño de la grieta, muchas grietas micro estructuralmente pequeñas son también mecánicamente pequeñas así como una grieta mecánicamente pequeña es considerada una grieta estructuralmente larga, tradicionalmente largas grietas son tanto micro estructuralmente y mecánicamente largas [6].

- Grietas químicamente pequeñas:

Experimentos sobre una variedad de aceros ferríticos y martensíticos en acuosos ambientes se ha determinado que bajo condiciones de corrosión y fatiga, pequeñas grietas pueden crecer de una manera superlativa y mucho más rápido. Reacciones electromecánicas, mezclas convectivas y difusiones iónicas son factores para la creación y expansión de grietas en la superficie. Una grieta fatiga por corrosión crece desde una pequeña grieta en la superficie, como también a través de un corto espesor en el borde de la grieta.

La fatiga es un proceso comprendido como dominante en un ciclo de deformación plástico, tal que un daño por fatiga puede normalmente ocurrir bajo una fuerza de flexión. Cualquier agrietamiento por fatiga generalmente comienza en localizaciones donde están presentes discontinuidades o donde la deformación plástica esta en forma de slip bands. La vida de fatiga depende del ciclo de iniciación de la grieta como la propagación de la misma, de otra forma cuando las causas de fatiga son causadas por inclusiones e imperfecciones en la pieza, la vida entera consistirá de la propagación de la grieta.

Toda prueba y caracterización del comportamiento de un material es utilizado extensivamente para predecir el rango en el cual criticas grietas están presentes en un componente debido a elevadas cargas para componentes que están sujetos a esfuerzos de manera cíclica [6].

3.7. Parámetros de Investigación

El uso de mecanismos de fractura en el diseño de estructuras de acero ha ido creciendo, las estructuras en acero cubren un amplio campo en el mercado, como por ejemplos en las edificaciones y construcción de puentes, como también en un gran número de equipos y elementos mecánicos. Hay aproximadamente 1000 posibilidades de acero en el mercado, sin embargo, actualmente se limita al uso de una docena de estos para ser aplicados en la industria.

Cada especificación es basada en el diseño, el cual ofrece temperatura y ambiente de aplicación, esfuerzo y espesor junto con otras propiedades mecánicas necesarias para cualquier tipo de diseño. Todos pueden tener un significativo efecto sobre el mecanismo de fractura, pero debido a sus propiedades es donde se verá reflejada la diferencia de falla en cada uno de estos [3].

La propagación de grietas de fatiga en aceros es considerada de manera intensiva al cambio entre grados. La limpieza del acero ha demostrado que tiene una significativa influencia sobre el comportamiento del rango de propagación de la grieta dentro de un acero. Se ha demostrado que inclusiones no metálicas pueden acelerar el crecimiento de la grieta, este resultado demuestra que una limpieza y una orientación de cargas deben ser considerados en el análisis [10].

Un alto ciclo de fatiga en aceros es frecuentemente expresado por un límite de fatiga, el cual es el valor de esfuerzo por debajo el cual el acero puede suponer aguantar un infinito número de ciclos. El límite de fatiga no debe ser confundido con el esfuerzo a la fatiga, el cual es la resistencia de esfuerzo bajo cargas de fatiga por un numero específico de ciclos, este esfuerzo es usado cuando el material no tiene un aparentemente un límite de fatiga [11].

El límite de fatiga depende de la resistencia a la tracción, sin embargo, el límite de fatiga como una proporción de la última resistencia a la tracción depende de varios factores tales como: Tipo de material, carga y ambiente. Por lo tanto, bajo algunas condiciones (Fatiga por corrosión, ciertas condiciones del material, o concentraciones de esfuerzos sobre el material) un límite de fatiga no podría ser observado en un acero [13].

3.8. Coeficientes Límite de Fatiga

Las condiciones ambientales en las pruebas han de estar previamente controladas, es necesario prestar especial atención para que efectos de carga no deseados no se introduzcan en el ensayo. Sin embargo, es claro y normal que una pieza cualquiera de una tiene un tipo de fabricación acorde a sus necesidades y una forma de trabajo totalmente diferente al de las probetas. Es necesario y muy frecuente en la práctica llevar a cabo el uso de coeficientes modificativos, empíricamente obtenidos, para ajustar los resultados de la conducta a fatiga de las probetas

a los de cada pieza.

El resultado de estos factores da finalmente la obtención del límite de fatiga corregido (S_e), el cual está definido como el valor de la tensión alternante máxima que permite conseguir una vida infinita del mismo en las condiciones de funcionamiento [1].

Los coeficientes K_i son: K_a : Factor de acabado superficial, K_b : Factor de tamaño, K_c : Factor de confiabilidad, K_d : Factor de temperatura, K_e : Factor de efectos varios, K_f : Factor de efectos diversos.

Para estimar de forma empírica de forma general un valor aceptable es necesario incurrir a la experiencia, junto con un coeficiente de seguridad apropiado. En caso de no contar y tener la suficiente experiencia, lo más prudente en este caso es utilizar valores recomendados, ya después de la elección al realizar el ensayo corroborar si el comportamiento y la pieza ha sido adecuada al ensayo o no.

- Factor de acabado superficial (K_a):

La explicación de la reducción del límite de fatiga por el acabado superficial es que debido a la existencia de una mayor rugosidad en la superficie de la probeta se produce un fenómeno de concentración de tensiones en la misma.

Tanto del acabado superficial como del esfuerzo último de acero depende el factor K_a . A un mayor esfuerzo último, el factor de superficie siempre llega a ser menor, debido a que todo acero entre más resistente es más sensible y propenso a efectos de concentración de esfuerzos producidos por imperfecciones de la superficie [1].

- Factor de tamaño (K_b):

A un mayor volumen de la pieza sometida a altas y elevadas tensiones, mayor podrá ser la posibilidad de conseguir un defecto de tamaño crítico que provoque el comienzo de la grieta de la fatiga, pues a un mayor tamaño en la pieza es menor su resistencia.

Si las probetas están sometidas a flexión giratoria, los puntos que soportan mayores esfuerzos son los que están entre la circunferencia a trazos y el contorno de la sección; si los puntos mostrados fueran defectos en la sección, la de mayor diámetro tendrá muchos más defectos en la zona crítica, con lo que tendría mayor probabilidad de que se iniciara una grieta por alguno de ellos.

8 mm es aproximadamente el tamaño utilizado en las probetas para ensayos de fatiga, la resistencia a la fatiga de la pieza = límite de fatiga, por lo tanto, se toma $K_b = 1$. Para diámetros mayores a 250 mm debido a su alto costo son pocos usuales, sin embargo, se sugiere tomar valores de $K_b = 0.6$

Mediante ensayos experimentales el factor de tamaño en cargas axiales no es significativo, ni implica ningún efecto en las piezas sometidas [1].

- Factor de confiabilidad (K_c):

El factor de confiabilidad mediante datos y un gran número de muestras, corrige la resistencia a la fatiga con el fin de obtener un mayor factor de seguridad y probabilidad de que la resistencia real de una pieza de mayor o igual proporción que el valor corregido.

Una confiabilidad del 99,9% teóricamente estaría acorde y sería suficiente, según la tabla anterior un factor de confiabilidad al igual que en los casos de los factores K_a , K_b varía entre 0 y 1. El personal de diseño decide con que factor de confiabilidad trabajar, teniendo siempre presente que el factor de seguridad (N) tiene en cuenta datos desconocidos de la propiedad de los materiales y en los datos experimentales. La selección del factor (N) está sujeta a la decisión de la confiabilidad, cuando se desea obtener un valor alto de confiabilidad lo más prudente será tomar valores para N bajos, mientras que para un valor bajo en confiabilidad sería óptimo tomar valores para (N) de forma conservadora [1].

- Factor de temperatura (K_d):

Las propiedades en un material siempre dependerán del ambiente y temperatura de trabajo. Hay que tener en cuenta la reducción de resistencia a la fatiga, en donde se utiliza el factor de temperatura, K_d , al igual que en los anteriores varía entre 0 y 1, dependiendo de la temperatura: cero cuando no hay evidencia de temperatura y uno cuando la resistencia para vida infinita es igual al límite de fatiga, en pocas palabras, cuando la temperatura no transforma la resistencia.

En aceros en intervalo entre la temperatura ambiente y 450°C el límite de fatiga permanece de forma constante y comienza a decrecer cuando supera o está por encima de este valor [1].

- Factor de efectos varios (K_e):

De los anteriores factores mencionados, también hay otros factores que alteran la resistencia a la fatiga en los materiales; todo aquel efecto no considerado por los otros factores es cuantificados por el factor K_e . Sin embargo, la información cuantitativa sobre dichos efectos no es totalmente suficiente. Normalmente, $0 < K_e < 1$; cuando no existe signo de corrosión, esfuerzos residuales, etc., se puede considerar $K_e = 1$.

3.9. Principios del Control de Fractura

Para realizar un control de fractura se necesita un amplio conocimiento de estructuras ya que gracias al agrietamiento estas se ven afectadas, entonces también es importante tener en cuenta el tamaño máximo permitido para una grieta. El análisis de tolerancia al daño tiene dos principales objetivos: Establecer el efecto de las cargas externas sobre las grietas existentes y relacionar el crecimiento de la grieta en función del tiempo. Para cada diseño se suele usar un factor de seguridad para evitar una falla del tipo estructural, las cargas que un material puede llegar a soportar deben ser mayores a las cargas que será sometido durante su tiempo de servicio, es decir que la resistencia real en una estructura debe ser mayor que

la resistencia requerida. El factor de seguridad es entonces la relación de la resistencia real sobre la resistencia requerida [1].

- Medidas de control de fractura:

Cuando previamente se ha calculado y desarrollado el diagrama de resistencia residual el tamaño máximo permitido de la grieta, se deduce de la resistencia residual mínima permisible, por otra parte, otra información importante es el análisis de la propagación de grietas, donde se muestra por medio de una curva cómo se desarrolla una grieta en función del tiempo. Hay varias maneras en que la información se puede usar para ejercer control en posibles fracturas, como lo son: Inspección periódica, Características de fallo seguro, Diseño de durabilidad o jubilación obligatoria, Inspección periódica por prueba destructiva, reparación de la falla después de la prueba [1].

Inspección periódica, se debe tener en cuenta que existen distintas formas para detectar una grieta, es importante que los tiempos entre inspección de una materia no sean prolongados, ya que el avance de un agrietamiento es grave si este no se llega a detectar a tiempo, por consiguiente, la reparación también se debe hacer en el menor tiempo posible para evitar una falla. La seguridad de fallas, generalmente es una variación del control de la fractura mediante una inspección periódica. La única diferencia es que la estructura está especialmente diseñada para tolerar más daño que el que se puede evidenciar. La seguridad de la falla se puede lograr por medio de descargadores de grietas o caminos de carga múltiple que están diseñados para evitar que una grieta avance o llegue al tamaño crítico de fisura. Alternativamente, una tubería o recipiente de presión puede diseñarse de tal manera que al formarse grietas, estas causen fugas en lugar de roturas. Durabilidad del control de fractura, un enfoque de durabilidad se aplica a estructuras con grietas difíciles de detectar o cuando por el tamaño de las grietas es difícil de detectar. Se usa un análisis de durabilidad para lograr establecer una vida de diseño, teniendo presente la dispersión o las incertidumbres bajo condiciones normales de trabajo [6].

Hay que tener en cuenta los puntos débiles de este enfoque los cuales pueden llegar a ser la dependencia crítica sobre el análisis de durabilidad junto con el factor de seguridad, los altos costes de los componentes de jubilación sin una aparente causa obvia. No obstante, existen materiales los cuales están diseñados para una prolongada vida útil, sea por necesidad de evitar mantenimientos que incurran en tiempos muertos, o porque las grietas se hacen difíciles de controlar por su acceso o el tipo de servicio que preste el elemento.

- Inspección destructiva mediante pruebas:

Para tener conocimiento de si el material soporta algún tipo de grieta, este se lleva a un ensayo destructivo el cual permite evidenciar para elementos con ciertas prestaciones de trabajo bajo

esfuerzos, en que tipos de fallas pueden incurrir. Puede que un material sometido a prueba en el cual se presente una grieta se fracture, mostrando así resultados de análisis de este modo seleccionar el nivel de estrés máximo al cual permite llegar un material, para tener en cuenta la probabilidad que sea necesario cambiar en el momento propicio. La detección de grietas más grandes que el tamaño permisible o deseable, está dada por los factores que la rodean tales como obstrucción por otros elementos estructurales de una máquina, accesibilidad, ángulos de visión, e incluso se pone en juego la habilidad del inspector. El análisis de señal o señal con ruido es común en dispositivos de óptica o electrónicos, pero se debe tener en cuenta que un análisis de ruido es un ensayo del tipo no destructivo y el resultado del proceso de medición suele ser más complejo por la interdependencia de las respuestas de medición y decisión [3].

- Planes de control de fracturas:

Un plan adecuado en el control depende en que desencadena incurrir en algún tipo de fractura. Si se llega a considerar que un determinado número de fracturas no incurre en un daño significativo del material entonces el plan incurre en costos aceptables, se entiende como un plan óptimo. Las medidas de control deben encontrarse dentro de un rango aceptable. El fabricante o diseñador debe prescribir el plan de control de fracturas de acuerdo a unas normas gubernamentales y estándares de ingeniería, esto para que el operador implemente dicho plan a través del mantenimiento, inspección, la reparación o el remplazo. El plan debe adecuarse de manera que pueda ser adecuado para una estructura en particular y para los potenciales operadores. Grietas no detectables por inspección, por varios aspectos puede que una grieta no sea detectable ya sea por el tamaño de la estructura siendo este muy grande y haciendo muy difícil una adecuada inspección o porque su tamaño permisible es tan pequeño que desafía cualquier tipo de inspección. Dando paso a distintos planes de inspección, uno de ellos describe necesario una inspección destructiva para demostrar que no hay grietas más grandes que la aprobación, por ende de tener grietas más grandes, ocurrirá una falla pero esta falla no debe generar consecuencias mayores, después de la detección de grietas.

Aunque el control de fracturas exige la reparación o el remplazo inmediato del elemento, esto para algunos casos no llega a ser necesario por la forma en que se viene dando la grieta y su mínimo riesgo que no implica intervención reactiva. Para evitar incurrir en gastos se pueden seguir pasos de contingencia junto con análisis sobre el área afectada, sin necesidad de parar un proceso mientras se compra una nueva pieza o se planea el mantenimiento de la existente [6].

- Requisitos de tolerancia de daño:

Para cumplir con los requisitos el fabricante está en la obligación de diseñar de manera que sea alta la eficiencia al momento de buscar una grieta antes que esta se desarrolle y genere fallos,

por lo cual el fabricante también debe prescribir los posibles lugares para hacer seguimiento. Igualmente, el operador está en la obligación de cumplir a cabalidad los procedimientos que indica el fabricante para la adecuada inspección de un área o un elemento. La mejor forma para determinar los rangos o ciclos de inspección, se basa en la probabilidad acumulada de detección. Una mejora útil de los requisitos especificaría la probabilidad acumulativa de inspección deseable. Al existir distintos tipos de análisis de grieta y para tener un orden y estándar en cada una de las ramas para la ingeniería, existe ASME que es el ente regulador que indica normas ya sea marítimas, aéreas e incluso nucleares [6].

3.10. Criterio de Energía para la Fractura

El principio de la conservación de la energía se aplica para todos los fenómenos físicos existentes, entonces se entiende que la fractura requiere de energía. Los experimentos muestran que la energía durante la fractura no es constante, sino que esta aumenta a medida que se produce la fractura, sin embargo, durante los procesos o fallas no es posible determinar este fenómeno, puesto que no se puede detener de golpe una fractura.

Usando mecánica de fractura en el análisis de falla, el investigador debe realizar un experimento de fractura con una muestra y analizar los resultados para determinar en otros casos las causas de una falla y su comportamiento frente a las condiciones de operación a las que se ve sometido el metal. Para realizar un adecuado análisis a la tenacidad de un material, se debe tomar una muestra del material afectado. Sin embargo, por lo general se siguen instrucciones estándar del manual del fabricante para determinar la falla de un material y no se utiliza un adecuado análisis de falla, teniendo en cuenta que puede que esta sea distinta a la ya estandarizada y que incluso su análisis resuelva inquietudes o corrija al operario en el uso de un elemento. Por otro lado, el investigador necesita realizar estudios tanto en el material afectado, como también en un material sin ningún tipo de grieta, ya que esto permite determinar eficientemente las posibles causas, pero se debe buscar que al reproducir la falla, esta concuerde con el material fracturado, es decir si la fractura es producida por hoyuelos, y la muestra tomada para la comparación produce una fractura por división, no se tendría certeza en los resultados desencadenando en un margen de error muy amplio [1].

Es importante que tales análisis estén acompañados de evidencias fotográficas, para evitar pasar por alto si la parte defectuosa contenía defectos graves y si la falla final tenía como desencadenantes algunas grietas ya sea por fatiga o incluso por corrosión al estar sometida a una tensión. Debido a que la orientación del material produce la variación en la tenacidad a la fractura, se debe mecanizar para así garantizar que la dirección del crecimiento de la grieta y el plano, concuerden con el material que presenta la falla [8].

4 Procedimiento de análisis

Un conjunto de anillo y piñón transfiere potencia desde el eje de transmisión a los ejes.

1) Una NP300 presentaba un sintoma no común en la transmisión de potencia a través de su eje de piñón proveniente de la corona, elemento que fue obtenido y suministrado por Talleres Autorizados Dinissan.



(a)



(b)

Figura 4-1: a). Picaduras en los dientes. b). Corrosion localizada en las grietas de los dientes.

2) Elegir la muestra es un paso fundamental al momento de evaluar el criterio de falla, es primordial conocer el lugar de donde se extrae la muestra, esto puede dar una noción y una serie de hipótesis de la posible causa de fallo en el material.

3) Se toma una muestra mediante un corte por plasma, con las dimensiones específicas para poder desarrollar un análisis metalográfico más veraz.

4) El desbaste grueso, al momento de extraer la pieza, las superficies no presentan una estructura uniforme por razones del procedimiento de corte, para seguir el procedimiento de análisis se requiere de una superficie plana y homogénea. Esta operación se realiza mediante una cinta de lija girando a unas revoluciones determinadas por el operador, al realizar dicha operación se debe evitar a toda costa que la presión sobre la muestra sea excesiva para que el plano no presente desniveles ya que el objetivo del procedimiento es dejar la superficie lo más pareja posible.

5) El desbaste final se hace sucesivamente utilizando una serie de lijas con un diferente tamaño en su grano, de forma que su grano sea menor a medida que se cambia el tipo de lija.

Se quiere lograr un brillo espejo en la cara sometida al análisis, en primera instancia se hace un pulido con lija 60 manualmente, con una adición de agua de forma constante lijando de manera homogénea la muestra en un solo sentido, para luego girar la muestra 90 grados y continuar con un pulido uniforme. La adición de agua tiene como objetivo remover los pequeños residuos del material producto del lijado y a su vez, actuar como una especie de lubricante en la pieza.

6) Aplicada sobre la misma superficie, se procede a realizar el mismo procedimiento anterior cambiando por una lija tipo 100, 600 y 1000 en el orden mencionado. La presión aplicada sobre la muestra no debe ser excesiva durante el lijado, ya que esto puede generar la aparición de rayas profundas lo cual no sería conveniente para un análisis y obviamente una toma de resultados satisfactoria.

7) Con el uso de la pulidora de doble disco, se procede a realizar un pulido con objeto de eliminar imperfecciones muy finas existentes en la muestra, dando un acabado mucho más fino. Al disco es aplicado un abrasivo conocido como alúmina, se debe estar muy pendiente de que el disco en ningún momento carezca o exceda la cantidad de alúmina, sosteniendo la muestra de manera que el pulido sea pareja y que el disco gira a una velocidad constante.

8) Para culminar con el pulido de la muestra, se pasa al paño que se encuentra al lado del disco en la pulidora del laboratorio para formar una superficie tipo espejo en la muestra y de este modo dar por terminado el pulido y la preparación de la muestra.

9) Como proceso final la pieza se somete a un ataque químico necesario para que el material revele su estructura, este ataque químico es aplicado por la cara que fue previamente pulida con una mezcla de alcohol etílico y ácido nítrico los cuales son usados en aceros y hierros. Es adecuado de 3 a 5 segundos para que el ataque químico sea correcto. El nital actúa oscureciendo la perlita y pone en manifiesto los bordes de la ferrita. Ferrita y cementita blancos y perlita más oscura. Finalmente se lava la muestra con agua, y se seca agitando la muestra en el aire.

10) Se procede a observar las piezas en el microscopio óptico, con la ayuda del docente se procede a tomar las respectivas fotos de la microestructura a diferentes aumentos para luego ser previamente analizadas.

11) El análisis concluye con tomar la dureza en un durómetro de Rockwell para identificar que material se ha trabajado. El valor medido de dureza resulta ser de 23 HRC.



(a)

Figura 4-2: a). Medición de dureza Rockwell C en las probetas obtenidas.

5 Resultados y análisis

5.1. Análisis metalográfico

En la figura 5-2 podemos observar martensita revenida en forma de huellas digitales, junto con una matriz ferrítica (Gris). Se puede concluir basado en los resultados que esta estructura puede pertenecer a un acero 1040 o 4140. Además, se puede decir que existe un gran porcentaje de ferrita y martensita que fue previamente templado para llegar a martensita. Las durezas tan bajas coinciden con los resultados obtenidos al ser una matriz ferrítica, y como es sabido la ferrita es muy débil, probablemente al haber realizado un revenido en su proceso de fabricación este pudo ser el causante del bajón en su dureza, las durezas altas pueden ser apreciadas en matrices perlíticas o martensíticas.

5.2. Análisis De Falla

De acuerdo a las fotografías tomadas se evidencia fatiga en los dientes quiere decir que se calentó o el endurecimiento se perdió, por lo que resultó en sobre esfuerzos sobre el elemento y pérdida de uno de los dientes del engranaje El engranaje que se fracturo tiene una baja resistencia lo cual conllevó a la generación de grietas superficiales que hicieron que se descascara el diente esto con base en las imágenes mostradas. Se puede establecer que el engranaje tenía una resistencia mecánica muy baja debido a lo que se evidencia con la baja dureza y debido a que tiene una matriz ferrítica genera más fácilmente las grietas de fatiga, por lo tanto hubo agrietamiento superficial que descascaró el diente para generar una falla catastrófica en el elemento.

Es claro que un elemento mecánico necesita de una lubricación para evitar fricción directa entre las piezas involucradas, esta fue otra causa evidente desde un inicio para que con las causas anteriormente mencionadas, produjeran un daño más crítico y más severo. En la Figura 5-1 se observa el diagrama de causa raíz para el elemento mecánico analizado.

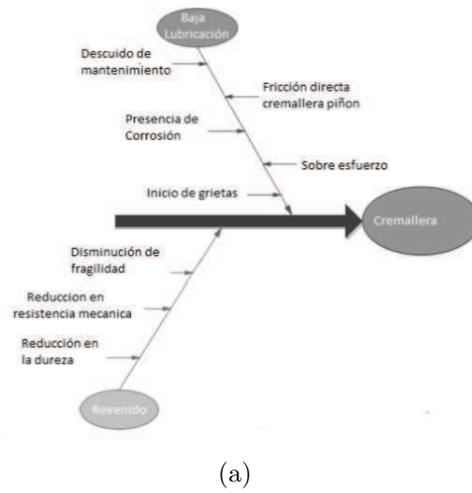


Figura 5-1: a). Diagrama causa raíz.

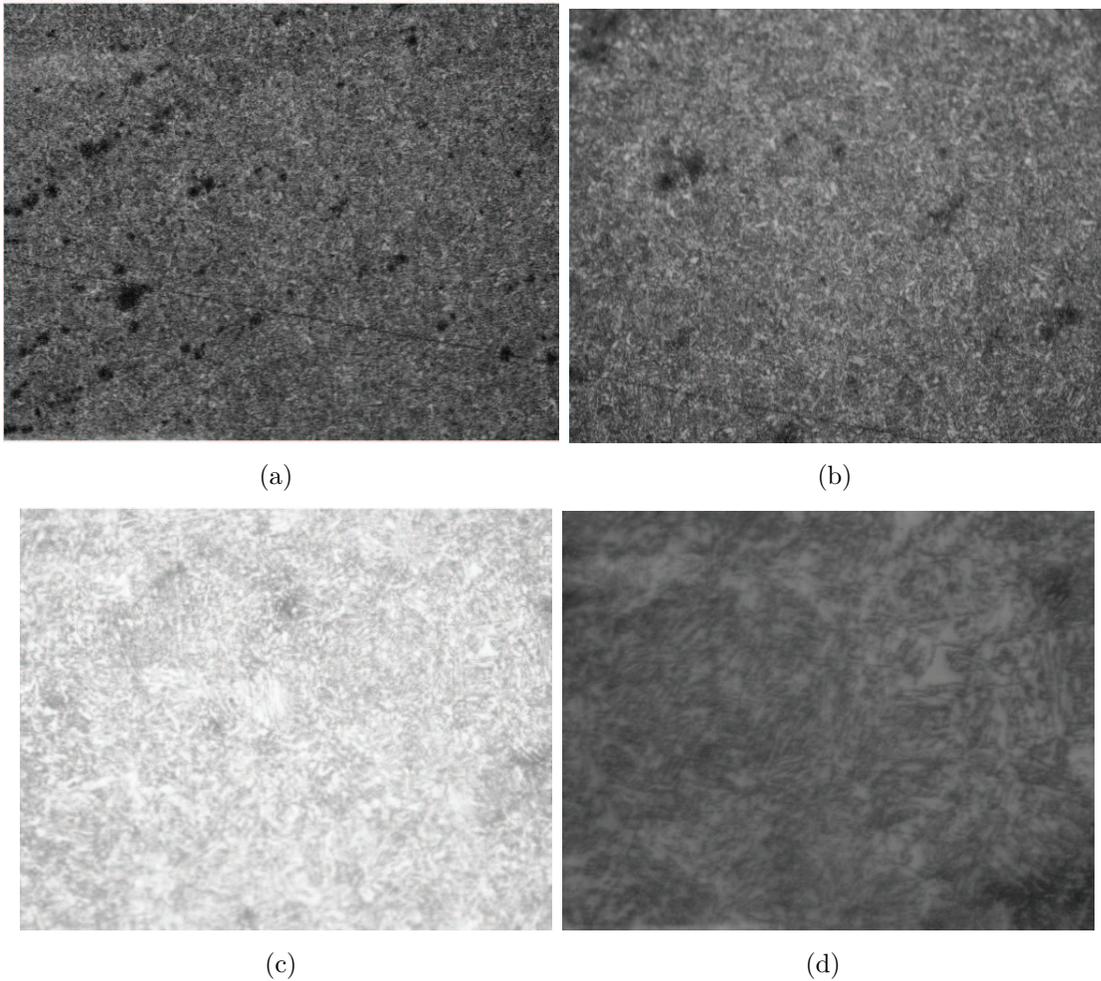


Figura 5-2: a). Análisis metalográfico 100X b). 200X. c). 500X d). 1000X

6 Conclusiones

- El análisis de falla es una metodología que le permite al ingeniero establecer unas condiciones sobre las cuales hubo la falla, mientras que un análisis metalográfico provee de una manera más detallada las diferentes estructuras del acero para así ser estas relacionadas con las propiedades tanto físicas como mecánicas y a pesar de lo complicado que es percibir el inicio de una falla por fatiga, la presencia de grietas en la estructura es un indicador elevado de la existencia de falla por fatiga en el material, tratamientos térmicos y procesos de soldadura podrían producir en una pieza la generación de microgrietas en la fase inicial por fatiga.
- Para las actividades de análisis se llevan a cabo con dispositivos y herramientas idóneas, sin embargo si se llegan a contar con herramientas o implementos limitados, esto se convierte en un reto al momento de evidenciar resultados. Son bastantes los factores a tener en cuenta para un análisis de fatiga, donde se requieren equipos sofisticados y tener presente otros factores en el material. Muchos aspectos son los que intervienen al momento de generarse un ataque por corrosión, sin embargo el estudio de los materiales, proporciona información importante sobre las características que el material tiene y su potencial corrosivo.
- Para elementos, materiales o herramientas en servicio, un seguimiento o estudio durante su intervención sea por mantenimiento o por reemplazo de una pieza, se debe estudiar tanto potenciales de fractura, como potenciales corrosivos para realizar un mantenimiento preventivo. Ensayos como partículas magnéticas, tintas penetrantes, emisiones acústicas, análisis de vibraciones son pruebas las cuales proporcionan también información en un análisis de falla.

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] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987
- [7] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM Handbook: Fatigue and fracture*. ASM International, 1990 (ASM Handbook)
- [8] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM Handbook-Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, 1992 (ASM Handbook v. 18). – ISBN 9780871703804
- [9] FORREST, P.G.: *Fatigue of Metals*. Elsevier Science, 2013. – ISBN 9781483160733
- [10] KRUPP, U.: *Fatigue Crack Propagation in Metals and Alloys: Microstructural Aspects and Modelling Concepts*. Wiley, 2007. – ISBN 9783527610679
- [11] MILELLA, P.P.: *Fatigue and Corrosion in Metals*. Springer-Milan, 2012. – ISBN 9788847023369
- [12] RAMACHANDRAN, V: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005
- [13] SCHIJVE, J.: *Fatigue of Structures and Materials*. Springer Netherlands, 2008. – ISBN 9781402068089