Análisis de falla de un resorte helicoidal de compresión y un perno fracturado

Daniel Arturo Bosa Martinez
Favio Martinez
Jasson Hernando Roa Caicedo

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

Análisis de falla de un resorte helicoidal de compresión y un perno fracturado

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

Fundación Universitaria Los Libertadores
Bogotá D. C.
5 de Junio de 2018

Lista de Figuras

4-1. a) Falla perno. b). Falla resorte. 25
4-2. a). Resorte para analizar. b). perno para análisis. c). Dispositivo para corte de probetas . d). resorte 2 para análisis. e). perno para análisis. f). Dispositivo para brillo. 28
4-3. a) Probeta brillo al espejo. b). Banco de lijado. c). Dispositivo para dar brillo espejo a la superficie. d). Ataque con acido. e). Microestructura. f). Durómetro. 29
4-4. a) Perno 100x. b). Perno 200x. c). Perno 500x. d). Perno 1000x. 31
4-5. a). Resorte 100x-b. b). Resorte 200x-b. c). Resorte 500x-b. d). Resorte 1000x-b. 32
4-6. a). Tabla composición AISI-SAE 1070. 32
4-7. a) Tabla dureza Rockwell. 33

5-1. a) Falla perno. b). Falla #1 resorte. c). Falla #2 resorte. 35

Resumen

En el presente proyecto se realizó un análisis de falla a dos piezas mecánicas, la primera un resorte helicoidal de un vehículo y la segunda a un perno de una maquinaria industrial que se sustrae gracias al apoyo del profesor. Lo primero que realizamos fue una inspección e identificación visual a las piezas en las partes de las fallas para poder verificar y dar un indicio al efecto de las fallas, en segunda medida en los laboratorios de la fundación universitaria los libertadores se llevó acabo el análisis de microestructura para poder identificar el tipo de material de las piezas mecánicas y por último se realizó un ensayo de dureza Rockwell y con resultados obtenidos de los análisis poder identificar tanto el material como las causas de las fallas en las piezas analizadas.

Por medio del proceso se pudo encontrar las fallas que afectaron las pieza, tanto el perno como el resorte, los cuales fueron afectados por fallas de fatiga, dado que se puede evidenciar las marcas que debido a la expansión de la falla fue dejando.
Palabras clave: Resorte, perno, maquinaria, falla, análisis, estructura, piezas, mecánicas, microestructura, dureza.

Abstract

In the present project, a failure analysis was made to two mechanical parts, the first a helical spring of a vehicle and the second to a bolt of an industrial machinery that is subtracted thanks to the teacher's support. The first thing we did was an inspection and visual identification of the parts in the parts of the failures to verify and give an indication of the effect of the failures, secondly in the laboratories of the university foundation the liberators took the analysis of microstructure to identify the type of material of the mechanical parts and finally a Rockwell hardness test was carried out and with the results obtained from the analyzes to be able to identify both the material and the causes of the faults in the pieces analyzed.

Through the process it could be found that the failures that affected the pieces, both the bolt and the spring, were affected by fatigue, due it can seen on the marks that due to the expansion of the fault was leaving.
Keyworks: Spring, bolt, machinery, failure, analysis, structure, parts, mechanical, microstructure, hardness.

Contenido

Resumen x

1. Objetivos 2

2. Introducción 3

2.1. Resistencia a la fatiga de las aleaciones ferrosas 5
2.2. Consideraciones micro estructurales 6
2.3. Resistencia a la fatiga 7
2.4. Aspectos morfológicos del agrietamiento por fatiga 7
2.5. Fallas por fatiga debido a cargas variables 9
2.6. Enfoque de la falla por fatiga en el análisis y diseño 10
2.7. Fallas Por Fatiga 11
2.7.1. Etapas de la Fractura por Fatiga 11

3. Fractura y fatiga de los aceros estructurales 13

3.1. Factores que Intervienen en la Fractura por Fatiga 13
3.2. Mecánica de la fractura elástico-plástica 14
3.2.1. Rotura bajo carga cíclica 15
3.3. Fractura y Fatiga de Propiedades de los Aceros 16
3.4. Tenacidad a la fractura 16
3.5. Crecimiento de Fatiga 17
3.6. Comportamiento de Vida de Fatiga 18
3.6.1. Fatiga axial por fatiga 18
3.6.2. Mecanismos de iniciación de grietas por fatiga 18
3.6.3. Fatiga acuosa 19
3.7. Prevención de la fatiga por corrosión 19
3.8. Fatiga de Corrosión y Fatiga por Fricción 20
3.8.1. Influencia de la corrosión previa en la resistencia a la fatiga 20
3.8.2. Resistencia de los metales a la fatiga por corrosión 20
3.8.3. Efecto de la naturaleza, concentración y temperatura del ambiente corrosivo 21
3.8.4. Protección contra la fatiga por corrosión 22
3.8.5. Influencia del oxígeno en la fuerza de la fatiga 22

3.8.6. Mecanismo de fatiga por corrosión 22
3.8.7. Corrosión por fricción 23
3.8.8. El efecto del material y el tratamiento térmico 23
3.8.9. Métodos para la prevención o reducción de la corrosión por fricción . 24

4. Procedimiento de análisis 25
4.1. Inspección Visual 25
4.2. Análisis Metalográfico 25
4.3. Análisis de resultados 30
4.3.1. Microestructura del resorte 32
4.4. Prueba de dureza de Rockwell 33

5. Análisis de Falla 34
5.1. Perno 34
5.2. Resorte helicoidal 34

6. Conclusiones 37

Bibliografía 38

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz de un resorte helicoidal de compresión y un perno fracturado 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

Los conceptos de fatiga y fractura en las estructuras vienen desde muchos años atrás, viendo como las estructuras empiezan a fallar aun después de pocos años de uso y así mismo muchas estructuras más antiguas hoy en día no han fallado, esto produce muchas incógnitas del cómo y por qué estas diferencias significativas en la resistencia ya sea al colapso o a la falla como tal. Ya que vivimos en una sociedad desarrollada, con flujos de información bastante robustos, las fallas por fatigas son temas en los cuales lo diseñadores, ingenieros y en si nadie quiere caer debido a que son experiencias bastantes desagradables, pero que se frecuentan en la vida diaria, aun con los estudios realizados en la actualidad, que llevan en la mesa de estudio más de 150 años. Empezando en los accidentes de ferrocarril del siglo 19, los avances en aeroespacial y la microscopia del siglo 20 y los estudios en nanotecnología del siglo 21. Gracias a estos estudios se evita el proceso de garantizar la seguridad de la construcción dracónica, mientras se hacen estas pruebas el ingeniero que estuvo a cargo debía quedarse debajo de la estructura, esto solo podía garantizar algo, que los diseños se hacían a conciencia para evitar así la mayor cantidad de fallas [3].

Después de esto se ve en las construcciones que, aun pasando la prueba de sobrecargas, estas podría colapsar después de unos años, en ese momento se empiezan a tomar variables de daños como la intemperie o condiciones de carga complejos para mejorar los diseños. Esto era a prueba y error.

En accidente en 1842 de un tren donde se perdieron más de 50 vidas ocurrido por la fractura de un eje, se convierte en un hito de la investigación de fatiga, aunque el término fatiga fue implementado en el año 1854 por Braithwaite, esta falla se atribuye a cambios de la microestructura del material debido a una textura cristalina causada por vibraciones, el calor y la inducción magnética normal en un tren, todas estas contribuciones fueron gracias a la intervención de JM William Rankine (1820-1872), que más tarde se convertiría en el científico líder de estudios en termodinámica del siglo 19 (ciclo Rankine). Basándose en la observación de la superficie del material de fractura excluye cualquier cambio en función del tiempo del material. Este basó su estudio en el tipo de propagación de la falla que se determina que va desde el diámetro externo hacia el centro, y llegó a la conclusión que la fractura súbita fue a causa de una disminución continua de la sección transversal de material. Las primeras pruebas realizadas a los ejes de los trenes se empezaron gracias a los avances de August Wohler (1819-1914), el cual empezó a mirar los comportamientos de los ejes en recorridos de

5000 Km, que tomó como referencia, en donde encontró unos picos inusuales cuando el tren pasaba por sobre los interruptores de la vía férrea, estos hoy en día se toman como medida para determinar las máximas tensiones admisibles en los ferrocarriles. En el diagrama de Wohler se representan las tensiones aplicadas en función de ciclos para fracturar [14].

Diagrama de Wohler: de acero endurecido por precipitación (X3 CrNiC uN 15 5 4) muestra la rotación esfuerzo frente al número de ciclos para la fractura. (Estos no fueron introducidos por Wohler, si no por su sucesor Spangberg, ya que este resumió los resultados obtenidos). Debido a la falta de microscopía, los resultados obtenidos por Wohler, fueron muy poco conocidos durante el siglo 20, ya que no se podía observar los cambios micro estructurales de los materiales, las primeras observaciones microscópicas directas de la deformación cíclica fueron hechas en 1903 en la universidad de Cambridge, aquí se pudo estudiar la superficie pulida de los metales sometidos a flexión, allí encontraron el crecimiento de bandas de deslizamiento de ciertas partículas que al final se convertían en grietas [2].

La mecánica de la fractura es otro concepto introducido en el siglo 20, que en la renovación de la idea dada por Leonardo da Vinci, para ver la susceptibilidad a la fractura dada a la falta de homogeneidad de los materiales, cuando hay una grieta internamente se pueden determinar parámetros como el estrés, la energía y la correlación del fallo del material por concentración de la tensión en el inicio de la grieta.

Gracias a la segunda guerra mundial y al aumento de accidentes de aviones debido a la fatiga, se vuelve clave para convertir la investigación de fatigas de metales como prioridad para la construcción de aviones, en este punto se aumenta el desarrollo de dimensiones micro estructurales y la invención de la microscopia electrónica, la aplicación de observar las dislocaciones de los materiales, se mejoran los métodos de medición de las micro deformaciones y la propagación de las grietas, adicionalmente las pruebas mecánicas de servo hidráulicos a finales de 1950.

Después de todo el proceso de evolución del estudio de fatiga se puede determinar que , los beneficios de estos estudios no solo se encargan en los métodos de predicción de la vida útil en los diseños de ingeniería, sino que también permite la optimización y adaptación de nuevos materiales, para así optimizar la funcionalidad de materiales y disminuir las cantidad de fallas por fatiga, ya que la aparición temprana de grietas puede ser influenciada por el ajuste a la microestructura del material y así aumentar la vida de fatiga hasta la iniciación de grietas, esto puede llegar a comprender más del 90 % de la vida total hasta la fractura [4].

Aún hoy en día y después de tantos estudios publicados, las fallas por fatiga en metales siguen apareciendo, no es suficiente los métodos de dimensionamiento hasta el día de hoy,

dos de los casos actuales es el descarrilamiento en el verano de 1998 de un tren alemán debido a una rueda rota por fatiga, los daños por fatiga de este tren hasta el momento de la publicación del libro son objeto de investigación. En el otoño de 2001 un avión Airbus A300, las primeras investigaciones muestran la fractura del estabilizador vertical y el timón, debido a una fuerte turbulencia de una estela de un avión precedente, aun cuando se podría suponer que es por la mala manipulación del piloto ya que lleva los componentes más allá para lo cual fueron diseñados, este tipo de fracturas llevan a pedir más investigación y avance en el campo de fatiga y fractura de los materiales de ingeniería y esto nos lleva a realizar el estudio y análisis de fallas [13].

2.1. Resistencia a la fatiga de las aleaciones ferrosas

Este capítulo trata de explicar de cómo los estudios que se han proporcionado a medida del tiempo nos dan la ventaja de la alteración de las microestructuras de los aceros, para aumentar la vida útil con respecto a la fatiga, estos estudios nos indican dicho comportamiento, para crear aleaciones y poder identificar o caracterizar su deformación y comportamiento de las fractura en las aleaciones, aunque también están relacionados con temas como el tipo de aleación, la ductilidad y las características de deformación, por medio del análisis de las microestructuras. En este estudio primero que todo se estudia el comportamiento de la fatiga de forma cíclica en la aleación comercial, para poder establecer las características de la microestructura de la aleación y mirar su alteración, después se evaluaran aleaciones particulares en mayor detalle para así poder comparar su relación y resistencia a la fatiga.

Para los estudios toman como referencia los parámetros de los aceros comerciales obtenidos por fabricantes, a esto adicionalmente se realizan pruebas de deformación cíclica, ya que las propiedades podrían ser alteradas por el endurecimiento por la relación tensión-deformación cuando se aplican los estudios de fatiga en aceros, estos son representados en curvas para así ser identificados fácilmente [7].

En varias de las gráficas que se pueden ver en diferentes textos estas se pueden clasificar los comportamientos de los aceros tales como los laminados en caliente, aceros de bajo carbono, microaleados, estos tienen comportamientos de ablandamiento seguidos de endurecimiento, en aceros templados todos muestran ablandamiento cíclico significativo, después de esto se representan en diferentes curvas los diferentes aceros a estudiar para ver el comportamiento normal de estos sometidos a los análisis de fatiga, se evalúan aceros inoxidables, aceros trabajados en frío, y demás aceros que se pueden incluir en el estudio, mostrando que cada uno se comporta distinto en los ciclos de deformación plástica y elástica, esta respuesta práctica nos da el indicio del comportamiento de estos aceros sometidos al estrés para poder analizar su aplicación particular del acero, un ejemplo claro es que en aceros con ablandamiento en una ranura podría llegar a redistribuir la carga aplicada, para poder aliviar la concentración

de dicha carga, a comparación de piezas que son tratadas superficialmente, los efectos residuales generados por la tensión, se podrán dado a alta resistencia [7].

Esta información es útil tanto para ver la deformación y al mismo tiempo se puede observar los esquemas para la identificación los comportamientos en donde los aceros son operativos, estos son presentados principalmente en los niveles de deformación plástica y elástica en lugar de la vida en fatiga absoluta, por ejemplo en las deformaciones plásticas la ductilidad del material son la consideración principal en el análisis de fatiga, ya que se encontraron grietas que pueden acelerar el crecimiento de una fisura y se ve alterada la vida útil, esto quiere decir que una grieta puede predecir el comportamiento y se traduce en el comportamiento dominante en el análisis. En un ensayo de deslizamiento por bandas, en un acero al alto carbono (1045) se puede observar las grietas formadas, a comparación del mismo ensayo aplicado a un acero al bajo carbono (1010) en donde se evidencia que no hay producción de grieta, esto aumentaría la vida útil del acero de bajo carbono. Igualmente en este ensayo se determina que la deformación plástica es la que determina el comportamiento.

En los ensayos donde se aplican tensiones o cargas irregulares, los sobreesfuerzos ocasionales se puede evidenciar la aparición de grietas en los materiales, las cuales se pueden propagar aun aplicando tensiones menores, esto se puede evidenciar en un acero SAE 4340, esto se llega a la conclusión de que la resistencia a la fatiga se encuentra determinada por muchos factores metalúrgicos, y se realiza la consideración de resistencia-ductilidad. En aceros los fallos micros estructurales pueden afectar la vida útil y la aparición de grietas, debido al alto grado de deformación durante el procesamiento, y da lugar a la aparición de grietas, estos son efectos direccionales en el acero, cuando se aplican esfuerzos transversales podría ocasionar la que crezca la grieta y así producir un fallo por fatiga [3].

Efectos de baja homogeneidad en los aceros martensítico envejecido, en los sitios de baja dureza, se prestan para la aparición temprana de grietas, y estas a su vez reducen la vida útil del acero, igualmente estas mediciones son relevantes para aceros descarburados o aleaciones multifacéticas, donde las partes de bajo carbono ayudan a la aparición de grietas.

2.2. Consideraciones micro estructurales

En la actualidad se cuenta con mucha información sobre las fallas de fatiga en lo que corresponde a las aleaciones de hierro-carbono en cuestión de deformaciones estructurales, los efectos del envejecimiento de los aceros y la influencia de la microestructura y la composición de las propiedades de la fatiga. Se ha generado notable atención a el aumento de la utilización de aceros al bajo carbono a través de la micro aleación y procesamientos termo mecánicos, estos aumentos se deben a la comparación del comportamiento del acero SAE980x con el convencional SAE 1010, ya que su fuerza se ve aumentada tres veces, gracias a la combina-

ción del refinamiento del grano y al fortalecimiento de precipitación, los límites elásticos se pueden observar mucho mejores cuando se hace refinamiento del grano. Después de todas las evaluaciones, se empieza a observar los tratamientos que pueden generar una mejor vida con respecto a la fatiga, como el tratamiento termo mecánico, ya que mejora la subestructura del acero, por su parte el acero inoxidable austeníticos tienen mejoras en ciclos altos y resistencia al crecimiento de grietas. Defectos internos Los defectos internos juegan un papel importante en las aleaciones ferrosas ya que estos pueden generar concentraciones de estrés y defectos que se pueden transformar en materiales defectuosos y generar fallas más rápidamente. Estos defectos aumentan las posibilidades de fatiga en los materiales, dependiendo el tamaño, la forma y la distribución de los defectos para así desarrollar un método para hallar el rendimiento de fatiga en materiales defectuosos internamente [3].

2.3. Resistencia a la fatiga

Los tratamientos superficiales son utilizados para aumentar la resistencia a la fatiga para componentes sometidos a flexión o a cargas de torsión, estos tratamientos tales como el granallado, endurecimiento por inducción, carburación, nitruración, gracias a las propiedades que toma debido a la localización del proceso. El granallado genera un estrés residual sobre la superficie a la cual se le aplicará la tensión de compresión, generando un endurecimiento. Las predicciones de fatiga ya sean superficiales o subsuperficiales se deben tomar las dos en cuenta para obtener los máximos beneficios en los tratamientos superficiales a aplicar. Se debe tomar en cuenta tanto el tipo de acero como las posibles fallas que se podrían tener internamente, la composición química de los aceros, las vías de fabricación y los tratamientos, ya que todo esto puede disponer una mayor o menor resistencia a la fatiga. Al igual tener en cuenta para que tipo de uso se va a utilizar los aceros, ya que depende si va a estar sometido a cargas mayores en ciertos momentos [3].

2.4. Aspectos morfológicos del agrietamiento por fatiga

El capítulo trata de dar información de la formación de las grietas ya que esto es fundamental para el estudio y el entendimiento de la fatiga sobre los materiales, entender porque fallo y saber que por solo una pequeña falla se puede desencadenar en una grieta grande hasta llegar al punto de hacer fallar la pieza. Entonces se debe tratar siempre de examinar las piezas que han fallado para así poder identificar las características de las fallas, ya que por medio de esta nos muestra la historia de la pieza hasta su fallo definitivo. Por medio de muchos mecanismos se pueden observar tanto los rasgos superficiales de las fallas como los que se debe utilizar herramientas modernas como los microscopios tanto ópticos como

electrónicos. Ya que en un número de ciclos aun con valores por debajo de los cuales podrían generar falla por tracción, puede llegar a generar la falla de la pieza. Propagación de grietas: el fenómeno de la formación de grietas empieza desde el deslizamiento en el plano cristalográfico, esta es la etapa 1, dentro de unas pequeñas bandas de deslizamiento empieza el proceso de nucleación de los poros, normalmente se ve reflejado cerca de la superficie, esto poco a poco va llegando a ser una grieta, aunque en este momento inicial es hasta ahora una microgrieta. Cuando hay extrusión e intrusión y existe una discontinuidad muy localizada, resulta en aparición de grietas mucho más rápido, se unen las micro fisuras para generar una macro grieta, en la etapa 2 de la fatiga del material. Ciclo a ciclo el material ya pasa de un plano cristalográfico a un plano de cargas externas, en donde la grieta es bastante larga como para poder escapar de la tensión de cizallamiento produciendo por medio de una tensión normal el crecimiento continuo de la grieta a través del material. Este crecimiento se puede dividir en dos partes, una en donde la grieta crece poco a poco en distancias pequeñas, y la otra cuando la grieta es más larga que la microestructura, y la zona de plasticidad creada por el propio crecimiento es mayor que las características de la microestructura.

Si el comportamiento del material es dúctil y no frágil, lo que quiere decir al menos 30°C por encima de la temperatura de transición para los materiales BCC, este colapso se desarrolla a través de la descohesión de la matriz de metal que forma cavidades. En materiales frágiles, por propagación de grietas (por sucesiva y repetida rotura de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalinos) Dependiendo por donde se propaga la grieta, la fractura puede ser transgranular, intergranular o intercristalina [8].

Un mapa más exhaustivo de aspecto macroscópico de posibles fallas por fatiga en probetas de ensayo de laboratorio en formas cilíndricas o prismáticas. Las cuales son sometidas a diferentes condiciones de carga, amplitud de tensión con o sin concentración.

Son llamadas marcas de playa o líneas de detención a las líneas curvas que más se desarrollan dentro del área blanca. Estas pueden estar relacionadas por su densidad y anchura al nivel de tensión aplicada. El número de ciclos no debe confundirse con las estrías. Las marcas de playa también son llamadas marcas en forma de concha, ya que son características morfológicas macroscópicas que se pueden apreciar a simple vista mientras que las estrías son microscópicas en la naturaleza y solo pueden verse con ayuda de microscopio electrónico de barrido (SEM). Se puede presentar por diferentes orígenes en la superficie de la fractura. Principalmente las marcas de playa son producidas por cambios en las tasas de crecimiento de grietas de fatiga cuando se aplican paquetes en número consistente de ciclos. Cada paquete produce una extensión de la fisura total que puede observarse a simple vista [9].

Los paquetes de repetición de carga pueden tener un tiempo de descanso entre si cortos o largos. Las fracturas por fatiga, pueden presentar marcas de playa debido a la oxidación de

la superficie libre cuando el material está inactivo. Debido a la oxidación las superficies se marcan de diferente forma por la exposición y factores ambientales tales como temperatura del aire, humedad, PH, y también a carga de espectros. Muchas fracturas por fatiga producida bajo condiciones de crecimiento de la grieta sin interrupciones ni variaciones de carga, no presentan marcas de playa. Lo cual indica que cada marca de playa denota una o más paquetes de ciclos, no un solo ciclo y además marca las etapas progresivas de la propagación de grietas. El carril mostrado fue retirado de servicio cuando fue detectada una falla, el carril se instaló después en un laboratorio de pruebas, en el que se probó con un tren de 75 coches hasta que se originó la rotura por fatiga. La alteración de la dirección del convoy indica que ha convertido los dos matices diferentes de las marcas de playa. Se evidencia que las marcas de playa siempre parten de uno o más puntos de partida. Regularmente, bajo cargas de amplitud moderada, solo se ve un punto de iniciación, a diferencia de las cargas de alta amplitud pueden producir dos o más puntos. Se representa en el fracaso de sobrecarga final la zona más oscura, cuando es igual o mayor al que contiene marcas de playa, quiere decir que las cargas cíclicas tienen alta amplitud. Por ende, si se presenta un número bajo de ciclos de fatiga el parte sobrante fracasado por la sobrecarga procedente por el último ciclo. Ocurre lo contrario cuando la amplitud de carga es baja, ya que se puede decir que la fatiga se genera cuando el ciclo es bajo, la relación fatiga entre la superficie propuesta por la fatiga y que se derribo es inferior a 1. Por otra parte 1 será lo que indica que el metal soporta bajo la fatiga del ciclo alto y falla al final. La flexión unidireccional del lugar de iniciación se halla en un solo lado de la muestra, donde las fibras metálicas están bajo tracción, también la inversa de flexión puede aparecer en los dos lados de la iniciación. Cuando aparecen marcas de playa cóncavas, quiere decir que existe flexión unidireccional, por ende si aparece en la superficie una muestra de tensión, lo cual indica que no era perfectamente axial y se originó algo de flexión, al igual si las líneas cóncavas pasan a ser marcas de playa convexas se puede notar que la flexión unidireccional no estaba centrada [13].

2.5. Fallas por fatiga debido a cargas variables

Cuando un material es utilizado para una función en específico, ya sea una máquina o un motor entre otras, están sometidos normalmente a esfuerzos bastante altos, pero que fueron diseñados bajo estos parámetros para tener una vida útil bastante buena, pero por ejemplo el eje de un motor , cada vez que gira este está sometido a cargas de tensión y compresión, y si se tiene en cuenta que un motor gira a 1750 rpm eso quiere decir en un minuto este elemento tendrá esa relación de esfuerzos igualmente. Estos esfuerzos pueden ser variables, repetidos, alternantes o fluctuantes. Un análisis de fallas indica que estos elementos fallan aún con esfuerzos máximos están muy por debajo de la resistencia última a fluencia, cuando ocurre esta repetición de esfuerzos se determina que falla por fatiga. A diferencia de otras fallas como la falla por cargas estáticas, que muestran una deformación visible y por ende se puede reemplazar la pieza antes de que suceda la fractura del material, en las fallas por

fatiga, esta no muestra evidencia física de lo que está ocurriendo internamente y las fracturas son repentinas y por ende peligrosas. Una falla por fatiga es muy similar en apariencia de una falla por fractura frágil, dado que las superficies son planas y perpendiculares al eje de esfuerzo, pero en el desarrollo de esta fractura difiere a la de fractura frágil, ya que transcurren 3 etapas antes de ocurrir la falla total del material [5].

- etapa 1: en esta etapa las grietas no pueden verse a simple vista, ya que son muy pequeñas y van de 2 a 5 granos alrededor del origen, se pueden formar una o más micro grietas originadas por la deformación plástica cíclica.
- Etapa 2: se convierten en macro grietas y empiezan a dejar las marcas características de la falla por fatiga que son por lo general mesetas separadas por crestas longitudinales, normalmente llamadas como marcas de playa o marcas de concha, estas se producen cuando las cargas cíclicas se abren y cierran, se frotan entre ellas, esto depende de la frecuencia y la corrosividad del entorno.
- Etapa 3: después de pasar por el proceso donde el material empieza a perder área transversal, el material restante no puede soportar las cargas, y es donde resulta la fractura súbita del material. En esta etapa se puede presentar la fractura frágil, dúctil o una combinación de las dos. Normalmente en la fractura por fatiga se encuentran las marcas de playa, y adicionalmente se encuentran marcas visibles de la etapa tres llamadas líneas de Chevron, estas apuntan hacia el origen de la grieta inicial.

2.6. Enfoque de la falla por fatiga en el análisis y diseño

En el análisis de falla por fatiga existen muchos factores que se deben tener en cuenta, aun en los casos donde las cargas sean muy simples. Entre estos se encuentran las temperaturas elevadas, ciclos de temperatura, un entorno corrosivo y ciclos de alta frecuencia. Pero aun con todos estos factores en contra se deben diseñar máquinas confiables, y en este punto es donde se mezcla la ingeniería y la ciencia. Estos avances deben enfocarse en dos cosas, una la confiabilidad de los elementos a fabricar ya que en muchos casos están expuestas vidas humanas, y la otra los beneficios a la industria. Es cierto que la ciencia aún no puede explicar completamente los mecanismos de las fallas por fatiga, la ingeniería debe diseñar las cosas que no fallen.

Métodos de vida-fatiga: por medio de varios métodos se trata de estimar la vida que puede tener un elemento antes de que sufra una fractura por medio de ciclos aplicados bajo una carga específica, estos son utilizados para el diseño y análisis de materiales y piezas. Entre estos métodos se encuentran los tres más importante método de esfuerzo-vida, método deformación-vida y método de fractura lineal elástica. Método de esfuerzo-vida: es uno de

los métodos menos exacto, ya que se utiliza para bajo ciclaje y se enfoca solo en los niveles de esfuerzo. Es uno de los métodos tradicionales ya que cuenta con una gran cantidad de datos y se puede adaptar a aplicaciones de alto ciclaje. Es útil para una gran cantidad de aplicaciones de diseño [12].

Método deformación-vida: en este método se consideran tanto esfuerzos como deformaciones para poder llegar a una estimación de vida, este lleva un análisis más detallado de la deformación del material en zonas críticas. Es ideal para bajos ciclajes, pero al aplicarlo existen muchas incertidumbres en los datos obtenidos, es por ello que se realiza para idealizar y ayudar a comprender la naturaleza de la fatiga. Método de fractura lineal elástica: en este método al aplicarse se supone que ya existe una grieta y se realiza para predecir el crecimiento de las grietas y su relación con la variación de los esfuerzos. Es ideal para estructuras grandes junto con códigos de computadora y programas de inspección periódica [4].

2.7. Fallas Por Fatiga

La fatiga es el deterioro progresivo de los materiales que termina produciendo su rotura esta se da cuando se ejerce un esfuerzo repetitivo sobre el metal. Durante el proceso de fatiga se genera una grieta que de acuerdo a las condiciones crece hasta generar la rotura, esta se debe a deformaciones plásticas de la estructura.

2.7.1. Etapas de la Fractura por Fatiga

- Deformación Plástica de Grietas por Fatiga: Pequeñas micro fisuras pueden iniciar debido a una amplitud de deformación suficientemente alta de plástico alterna. Durante la deformación plástica cíclica se puede producir endurecimiento cíclico o ablandamiento cíclico. La gravedad de la perturbación de superficie o el tamaño de la dislocación producida por una carga cíclica depende de la amplitud de la deformación plástica en la región localizada donde se forman las grietas de fatiga, que a su vez depende de la tensión de fluencia.

- Iniciación de una ó más Microgrietas: Aparecen una o más grietas en la superficie exterior del material, en donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas, ya sea por defectos del material, herramientas de fabricación o medios de manipulación. La iniciación se produce a lo largo de bandas de deslizamiento, los límites de grano son particularmente susceptibles a la iniciación de grietas por fatiga. Cuando la densidad de energía de deformación supera el doble de la energía libre superficial, una condición de inestabilidad se produce que energéticamente favorece la iniciación de micro grietas.

- Propagación ó Coalescencia de Micro Fisuras para formar una o más Microfisuras: Una vez nucleada una grieta, entonces se propaga muy lentamente y en metales policris-

talinos a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladura alta; las grietas normalmente se extienden en pocos granos. La fisura se propaga por efecto de las cargas muy lentamente como consecuencia de la tensión o el ciclismo de la deformación plástica por encima del límite de fatiga, las micro grietas iniciales crecen o coalescen hasta formar una macro fisura. Chang sugiere que la tensión requerida para extender la grieta en la matriz es mayor que la requerida para iniciar la grieta en la inclusión. El número de micro fisuras que se forman durante la fatiga, depende de la tensión o amplitud de la deformación plástica a bajas tensiones el crecimiento de micro fisuras es más importante.

- Propagación de una o más microfisuras: La velocidad de extensión de la grieta aumenta, y en este punto la grieta deja de crecer en el eje de esfuerzo aplicado para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado.

- Fracaso Final:Cuando se produce el adelgazamiento del material por separación de las partículas en el plano de la fisura, la pieza es incapaz de continuar resistiendo la carga desde un punto de vista estático y se produce la rotura por fatiga [12].

3 Fractura y fatiga de los aceros estructurales

3.1. Factores que Intervienen en la Fractura por Fatiga

Además de las tensiones aplicadas hay otros factores que intervienen en el proceso de rotura por fatiga como Diseño: Cualquier discontinuidad geométrica actúa como concentradora de tensiones y es por donde puede nuclear la grieta de fatiga, cuando más aguda es la discontinuidad más severa es la concentración de tensiones. Tratamientos superficiales: En las operaciones de mecanizado se producen pequeños surcos en la superficie de la pieza por acción del corte, estas marcas son pequeñas grietas que pueden ir aumentando. Endurecimiento superficial: La mejora en las propiedades de fatiga proviene del aumento de dureza dentro de la capa así como de las tensiones residuales de compresión que se originan en el proceso de cementación y nitruración [11].

Medición de crecimiento de la grieta por fatiga: El método más simple de medición de crecimiento de la grieta es la observación visual con auxilio de microscopio, en esta técnica la propagación de la grieta es medida por medio de marcaciones realizadas en intervalos iguales a lo largo de la superficie pulida de la probeta. Otro método es la técnica de caída de potencial o diferencia de potencial esta técnica utiliza la aplicación de una corriente constante en una probeta, con la propagación de la grieta la diferencia de potencial en puntos de contacto situados en la punta de la grieta aumenta esta diferencia se compara con el voltaje de la probeta donde no hay crecimiento de la grieta y a través de una curva de calibración se determina el largo de la grieta. Mura Et al mostró que el límite de fatiga es directamente proporcional a la tensión de fricción y que la sensibilidad ambiental se relaciona con el grado de reversibilidad de deslizamiento [12].

Resistencia a la propagación de grietas por fatiga: Mecánica de la fractura: La fractura es la separación de un sólido bajo tensión en dos o más piezas. Dentro de la mecánica de la fractura existen dos enfoques diferentes para el estudio de la resistencia y el fallo de los materiales: Energético: Estudia el cambio de la energía potencial cuando las grietas se abren. Local: se basa en examinar las tensiones en la punta de la grieta y compararlas con valores conocidos del material. Griffith propuso que siempre se debía suponer que existen grietas y defectos en los sólidos aunque estos fueran muy pequeños y que la fractura era por tanto el resultado de

su crecimiento o propagación. La idea básica de esta teoría es que una grieta se propaga si la energía potencial del cuerpo disminuye a medida que la grieta avanza. Cuando un sólido tiene una grieta y está sometido a tensiones y deformaciones, las tensiones se concentran alrededor de la punta de la grieta [1].

3.2. Mecánica de la fractura elástico-plástica

Irwin inició una nueva forma de estudiar la fractura a partir de los campos tensionales en la zona de la punta de la grieta de sólidos en estados planos. Se basa en que los componentes del tensor de tensiones cerca de la punta de una grieta tienen siempre independientemente de la forma de la pieza y las cargas sobre ella una expresión en coordenadas cilíndricas [7].

- Factor de concentración de esfuerzos: Encontró un método de cálculo de la cantidad de energía disponible para romper en términos de tensiones asintóticas y campos de desplazamiento alrededor del frente de fractura en el sólido elástico lineal.

- Tasa de liberación de energía de deformación: Si el tamaño de la zona plastificada alrededor de una fisura o grieta es pequeña comparada con el tamaño de la propia fisura, la energía requerida para que la fisura crezca, no depende del estado de tensiones del extremo de la fisura. El ritmo o tasa de liberación de energía para el crecimiento de la fisura puede ser calculado como la variación en la deformación elástica por unidad del área de fisura Factor de intensidad de tensiones: Irwin dedujo que el proceso de fractura no podía concentrarse en un solo punto como lo plantea la teoría elástica, sino que se presenta en una zona pequeña próxima a la punta, que denomino zona plástica o zona de proceso de fractura, la cual por el efecto de la deformación absorbe gran cantidad de energía y mantiene las tensiones dentro de un valor finito.

- Curva R Extensión de la fisura, curva de resistencia o R de la curva reconoce el hecho de que la resistencia a la fractura aumenta con el tamaño de grieta en materiales elástico-plástico. La curva R es un gráfico de la tasa de disipación de energía total en función del tamaño de la grieta, y se usa para examinar los procesos de crecimiento lento de grieta estable y fractura inestable. Integral J la deformación por delante de la punta de la grieta se designa J integral, esta se limita a situaciones en las que la deformación plástica en la punta de la grieta no se extiende hasta el borde de la parte de carga [1].

Los tipos de Fracturas mecánicas en los materiales pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones de carga:

- 1. Fractura por sobrecarga: cuando la carga va aumentando lentamente o a una rapidez moderada hasta el punto de rotura.

- 2. Fractura de impacto: cuando la carga que produce la falla aumenta rápidamente.
- 3. Fractura por fatiga: cuando se produce por cargas fluctuantes repetitivas Por la apariencia microscópica:

Igualmente las fracturas pueden ser clsificadas mediante su apariencia microestructural como fractura transgranular: Las grietas se propagan cortando los granos, y fractura intergranular: Las grietas se propagan a lo largo de las fronteras de grano. Asimismo, las fracturas puede diferenciarse por su apariencia macroscopica [12]:

- 1. Fractura Dúctil: Esta fractura ocurre bajo una intensa deformación plástica, esta comienza con la formación de un cuello y la formación de cavidades dentro de la zona de estrangulamiento, luego las cavidades se fusionan en una grieta en el centro de la muestra y se propaga hacia la superficie en dirección perpendicular a la tensión aplicada. Cuando se acerca a la superficie, la grieta cambia su dirección a 45° con respecto al eje de tensión y resulta una fractura de cono y embudo.
- 2. Fractura frágil: Normalmente ocurre a lo largo de planos cristalográficos específicos denominados planos de fractura que son perpendiculares a la tensión aplicada. La mayoría de las fracturas frágiles son transgranulares es decir que se propagan a través de los granos, pero si los límites de granos constituyen una zona de debilidad, es posible que la fractura se propague intergranularmente. Las bajas temperaturas y las altas deformaciones favorecen la fractura frágil. Mecanismos de Rotura: Rotura bajo carga monótona: Las partículas de mayor tamaño se rompen con más frecuencia que las más pequeñas, debido a que al aumentar el tamaño de la partícula en su interior aparecen defectos mayores que reducen la resistencia mecánica, como consecuencia al reducir el tamaño del refuerzo las tensiones que actúan sobre las partículas cerámicas pueden no ser suficientes para provocar su fractura frágil. La rotura final se produce por la coalescencia de los huecos nucleados a través de la matriz.

3.2.1. Rotura bajo carga cíclica

Cuando un material se somete a la acción de cargas cíclicas, la rotura se produce para valores de la tensión inferiores a los que provocan la rotura del material cuando se solicita bajo carga monótona. La iniciación de grietas por fatiga se estudia ensayando probetas lisas sometidas a ciclos de deformación donde se mantiene la amplitud de tensión o de deformación constante. Un lugar preferente para la iniciación de grietas son las zonas formadas por agrupaciones de partículas, estas zonas suelen presentar problemas de adherencia entre la matriz y el refuerzo de porosidad en la matriz. Dentro de las causas generales de las fallas se encuentran [11]:

- 1. Deficiencias de diseño como presencia de un concentrador de tensiones severo, información insuficiente y selección inapropiada de materiales.

- 2. Imperfecciones en materiales, tales como segregación, contenido excesivo de inclusiones, porosidades y cavidades de contracciones.
- 3. Defectos o deficiencias de fabricación, generación de concentradores de tensión superficiales y descarburación.
- 4. Errores de montaje, como des alineamiento, especificaciones de montaje ambiguas o incompletas.
- 5. Condiciones inapropiadas de servicio: operación de equipos bajo condiciones anormalmente severas de velocidad, carga, temperatura, ambiente químico o sin un adecuado mantenimiento.
- 6. Vida a fatiga-Ley de Paris: La vida fatiga contiene dos etapas iniciación y propagación, sin embargo, es difícil distinguir la transición entre ambos.

Para las grietas el periodo de iniciación suele ser del orden del de propagación, en los casos de materiales fabricado sin defectos aparentes esto se conoce como fatiga plana donde el periodo de iniciación ocupa un número de ciclos muy superior al de propagación. Se conoce como longitud de grieta a aquella en la que se produce la transición entre ambos periodos, iniciación y propagación, es la longitud en la que la grieta tiene dimensión suficiente para que su crecimiento dependa únicamente de las propiedades globales del material y no de su microestructura.

Curvas S-N: La mayoría de los datos de un estudio a fatiga se presentan en una gráfica Stress-Number of cycles (Curvas S-N). En este tipo de curvas se representa la amplitud de la tensión frente al número de ciclos en general se cumple que el número de ciclos necesario para causar fallo disminuye conforme aumenta la amplitud de la oscilación en tensión. Existe una tensión límite de fatiga por debajo de la cual el fallo nunca ocurre, en estas ocasiones se dice que el material resiste un número de ciclos infinito [6].

3.3. Fractura y Fatiga de Propiedades de los Aceros

3.4. Tenacidad a la fractura

Los aceros estructurales cubren una gran variedad de productos químicos, realizando pruebas donde se puede caracterizar los espesores, estos efectos los podemos ver reflejados en sus propiedades mecánicas de fractura. A continuación, nombraremos algunos aceros los cuales presenta datos de mecánica de fractura: (A516 Grado 70, A588 Grado A, A633 Grado C, A808, A514 Grado F, A573 Grado E Clase 1, A710 Grado A Clase 3).

Los métodos de prueba para caracterizar las propiedades de fractura de han venido desarrollados alrededor de 30 años. Las pruebas tradicionales como la prueba CVN fueron muy utilizados para caracterizar los aceros y hoy en día se sigue utilizando como una prueba de control de calidad para poder evaluar la dureza del acero, y por lo tanto podremos hacer una comparación con los métodos tradicionales de fractura y con lo recientemente desarrollados que se usan actualmente, donde podremos aplicar la prueba CVN y DT, y poder comparar la energía absorbida y la aparición de fractura en un tipo de acero [1].

La dureza de los aceros obedece a características de la fabricación, métodos metalúrgicos, si el acero está laminado, normalizado, endurecido y templado. Los grados de acero estructural se pueden obtener con niveles de azufre que van desde el 0,001 % hasta 0,040 %, se ha establecido que los aceros que contienen bajo azufre tienen un contenido del 0,010 % estos aceros bajos tienen control de forma de inclusión, también estos aceros tiene menos inclusiones no metálicas, la influencia del azufre sobre el metal causa un gran efecto dramático sobre la dureza, también cambiando el nivel de dureza con diferentes orientaciones de prueba que son comúnmente designadas por las normas ASTM que se aplican a dos placas de acero donde podemos la curva de orientación de las tres siguientes pruebas LT (longitudinal), TL (transversal), Y SL (transversal corta y grosor transversal). Mecanismos de fractura de los diferentes tipos de aceros estructurales tienen combinación de resistencia y dureza, lo que hace lo que hace que se le realice pruebas de dureza de plástico elástico, donde podremos aplicar la prueba JlC, desplazamiento de abertura de punta de grieta o CTOD al realizar la comparación entre dos aceros A 633C Y A516 70 donde nos muestra el comportamiento de los dos aceros y se puede evidenciar el mejoramiento del A633 C debido a sus niveles bajos de carbono, también podemos cuantificar la transición a la fractura frágil por medio de la pruebas de dureza pero teniendo en claro que las pruebas anteriores realizadas se pudo mostrar una variedad significativa de los análisis [3].

3.5. Crecimiento de Fatiga

La propagación en los aceros de las grietas por fatiga en ocasiones es relativamente indiferente a los cambios entre grados, sin embargo se ha podido evidenciar que limpiar el acero tiene una influencia particular en el crecimiento de la grieta dentro de un acero, también se ha podido demostrar que las inclusiones no metálicas e los aceros pueden generar un aceleramiento del crecimiento de grietas por fatiga particularmente en las pruebas de grosor transversal (SL,ST) y transversal (TL), los resultados de estas pruebas indican que la limpieza y la carga se deben considerar cuando se usan datos de tasa de crecimiento de grietas por fatigas [8].

3.6. Comportamiento de Vida de Fatiga

En general podemos clasificar las fatigas como ciclo bajo o ciclo alto. La fatiga de ciclo bajo está más enfocada con el análisis de la deformación plástica localizada, que está relacionada principalmente al inicio de la fisuración del Acero por fatiga por lo cual el comportamiento por fatiga se puede determinar realizándole pruebas basadas en tensión, este método es muy apropiado porque nos da un análisis del comportamiento de la fatiga de los componentes con regiones localizadas de la deformación plástica en muescas. La fatiga de alto ciclo se expresa por un límite de fatiga, el cual es el valor del estrés por debajo al que el acero puede soportar una gran cantidad de ciclos. El límite de fatiga depende de características tales como: El material, la carga, el medio ambiente y tensión superficial, cuando se observa un límite de fatiga este ocurre por encima de ciclos. Los límites de fatiga para varios aceros ferríticos y martensíticos y austeníticos en función de la resistencia a la tracción, una banda ancha abarca los límites de fatiga. También los límites de fatiga estos sujetos a la dispersión pronunciada por las inclusiones donde se realizan pruebas especiales a los aceros que tienen menos inclusiones y por lo tanto podemos observar menos dispersión, entonces si las inclusiones o efectos son más pronunciadas o si las pruebas se realizan con aceros de calidad variable entonces la dispersión debe tender a ser asimétrica porque tendremos más información en la región inferior de la relación de límite de fatiga [3].

3.6.1. Fatiga axial por fatiga

La gran mayoría de los elementos utilizados en la ingeniería están diseñados para aplicaciones de régimen elástico, concentraciones de tensión, a menudo causan daño en los alrededores de la muesca, el daño por fatiga principalmente es causado por deformación plástica del material en la raíz de la muesca la cual es ocasionada durante la carga axial cíclica controlada por tensión.

3.6.2. Mecanismos de iniciación de grietas por fatiga

Las grietas por corrosión son causadas por un proceso electroquímico que depende de la interacción del material con el ambiente. En los aceros al carbono las grietas se inician en pozos de corrosión, también las grietas pueden ser transgranulares y pueden tener una pequeña ramificación. La picadura superficial no es un requisito que caractericé el agrietamiento por fatiga por corrosión de cameros al carbono, como no lo es la fractura transgranular. Los efectos ambientales en la aparición de las grietas de fatiga son más amplios para los materiales que están expuestos a ambientes acuosos que para los ambientes que están expuesto a gases y donde podemos encontrar los siguientes (picadura, disolución preferencial, ruptura de películas de óxido protector y reducción de energía superficial) [12].

3.6.3. Fatiga acuosa

Los factores de la aparición de fatiga acuosa están directamente relacionados a una solución de aleación química que está soportando el material al entrar en contacto de corrosión ambiental lo que disminuye al material es la resistencia a la fatiga, también se ha podido observar la mejora que se le ha atribuido a retrasos en la aparición de grietas o propagación temprana causadas por la disolución de micro fisuras o concentraciones de tensión. Las primeras pruebas que se realizaron a un acero dulce en una solución desairadas de cloruro de sodio dieron como resultado la iniciación de grietas críticas por corrosión y dar inicio a fallas por fatiga por corrosión, el mismo material estuvo expuesto a pruebas con agua de mar artificial mostrando como resultado pozos pozos profundos y distribuidos sobre la superficie. Dejando como resultado que ambos experimentos sugieren que los defectos se podrían mejorar la iniciación de la grieta por fatiga.

3.7. Prevención de la fatiga por corrosión

Para poder mejorar la fatiga por corrosión las soluciones temporales son reducir o poder eliminar el estrés cíclico, también aumentando la resistencia a la fatiga por corrosión del material esto se logra realizando cambios al material, el diseño o el entorno que lo rodea [11].

- Cambios en material o tratamiento térmico: El tratamiento térmico que se le realice al acero es un factor importante, la aleación de cromo al material reduce de manera más efectiva los efectos de corrosión al acero, se le realiza un programa exhaustivo de fatiga contra el aire y la corrosión con carbono, baja aleación y aceros al cromo obteniendo como resultado del aire muestran un comportamiento habitual, siendo el límite de fatiga proporcional a la resistencia a la tracción, y par los resultados con agua la resistencia a la fatiga de carbono aceros y aceros de baja aleación es casi independiente de la resistencia a la tracción.

- Cambio en los diseños de los componentes: En ocasiones realizando cambios en el diseño podremos reducir el estrés operativo para poder aumentar la resistencia a la fatiga, pero tan solo realizando un cambio menor como aumentar un filete podremos mejorar o aumentar el área transversal o agregar un refuerzo.

- Efectos de la corrosión: El efecto de la corrosión la podemos evitar con protección galvánica por ánodos y también con el ambiente, esta protección en los aceros ha podido disminuir la corrosión por fatiga y materiales expuestos a ambientes acuosos teniendo buenos resultados, esta aplicación también se ha utilizado en aceros con aleaciones pasivas para mejorar el comportamiento, se deben evitar las grietas porque son un punto de iniciación que están internamente avancen con la rapidez. Se han realizado pruebas como los inhibidores que se han agregado al medio ambiente donde se ha

podido reducir tasas de corrosión, al igual que otra técnica como la polarización electroquímica que ofrece una resistencia a la fatiga, esta prueba en los aceros al carbono ha demostrado la reducción la fatiga. Ejemplos de falla por fatiga

3.8. Fatiga de Corrosión y Fatiga por Fricción

En esta sección se va a tratar las diferentes circunstancias por las cuales los metales se ven afectados por la corrosión como son (resistencia del material, efecto de la naturaleza, ambiente temperatura), como protegerlos y las pruebas que se le realizan para detectar la fatiga por corrosión y fricción. La acción corrosiva de un metal se puede presentar cuando este se encuentra expuesto a un ambiente corrosivo la cual se empieza evidenciar en el metal con una superficie áspera y la formación de grietas en ciertos puntos donde se presenta pérdida de la resistencia a la fatiga, además si el metal se es sometido a tensiones fluctuantes. También se ha podido demostrar que el aumento de la fatiga por corrosión de los metales puede aumentar si se les restringe el suministro de aire a la superficie, este proceso se ha podido demostrar ser una electroquímica el cual es altamente dañino. Las fallas por corrosión se presentan en piezas que se encuentran en servicio, como por ejemplo tuberías que transportan líquidos corrosivos, ejes de hélice marina y componentes de turbinas, como consecuencia de la corrosión la superficie se decolora, esta corrosión también depende del material y del medio en que se encuentre, aunque estas fallas son más frecuentes en metales en servicio que en pruebas que se realizan en laboratorio. Una de las características de la fatiga por corrosión es la aparición de grietas las cuales se quiebran por una falla de fatiga normal, esto se presenta por el ataque electroquímico es reducido a medida que la grieta va incrementando, otra característica es que estas se van formando como una especie de ramas y generalmente son intercristalinas.

3.8.1. Influencia de la corrosión previa en la resistencia a la fatiga

McAdam ha realizado investigaciones sobre el efecto de la corrosión en ausencia de estrés, el realizó pruebas a una gran variedad de aceros y a algunas aleaciones de aluminio donde estas muestras se corrolleron en agua dulce durante diversos periodos de tiempos, posteriormente se secaron, se aceitaron y se sometieron a pruebas de fatiga y la curva S-N donde se obtuvieron como resultado la reducción en el límite de fatiga contra la resistencia a la tracción.

3.8.2. Resistencia de los metales a la fatiga por corrosión

Esta resistencia en los materiales se realiza con pruebas de fatiga en máquinas de fatigas normales con muestras que son mantenidas en ambientes corrosivos, se han utilizado técnicas como la inmersión completa, por rociado o con una mecha saturada que es dirigida sobre la superficie de la muestra, la velocidad de la corrosión está directamente relacionado con

el suministro de oxígeno. Sin embargo, un gran número de investigadores han relacionado la fatiga de los materiales sobre la influencia de la sustancia química y de los tratamientos térmicos.

Lo que se puede concluir de la resistencia a la fatiga han sido el número de pruebas que ha realizado McAdam, el cual realizó pruebas de fatiga por flexión rotativa en dos ambientes como son: en aire y el otro con una corriente de agua dulce la estaba dirigida a la muestra, para metales ferrosos y no ferrosos donde obtuvo como resultado que las fuerzas de fatiga en el aire y en el agua son trazadas contra la resistencia a la fatiga. Las pruebas que se realizaron en el aire dieron como resultado un comportamiento normal, adicionalmente el límite de fatiga es proporcional a la fuerza de tensión y en los resultados de las pruebas con agua se pudo observar que en los aceros al carbono y aceros de baja aleación es independiente a la fuerza de tracción. También se obtuvo como resultado que en los aceros al carbono que tiene un contenido de carbono entre (0,03 a 1,09 %) recocido, endurecido y templado, presenta una resistencia a la fatiga por corrosión que está entre (-+6 y +- 11 toneladas/ in2), para los de baja aleación esta se encuentra entre (40-112 toneladas/ in2). Y para los aceros que contienen 5 % o más de Cr mostró un resultado mucho mayor a la resistencia de corrosión por fatiga. Otras pruebas realizadas por Wescott quien sumergió completamente las muestras en salmuera y por lo tanto el suministro de oxígeno a la muestra fue restringido y en estas condiciones la resistencia a la fatiga no se ve tan afectada, y en comparación de las pruebas realizadas por McAdam muestran que los aceros de baja aleación son más resistentes que los aceros al carbono.

3.8.3. Efecto de la naturaleza, concentración y temperatura del ambiente corrosivo

La mayoría de las pruebas que se han realizado para el análisis de fatiga por corrosión se han realizado en fresco a aguasal, la cual está relacionada con el efecto sobre la corrosión sin estrés, pero el autor McAdam realizó estudios en pruebas para cuatro tipos de aguas diferentes (agua dulce, dura y blanda) donde pudo observar que en estas tres no existía mucha diferencia, pero en la cuarta la cual era un agua de río era mucho más perjudicial por su contenido de sal. Se han realizado numerosos intentos para poder identificar el efecto que tiene la corrosión atmosférica, sobre las estructuras que están expuestas a la intemperie y que se encuentran sujetas a la corrosión atmosférica, se han realizado pruebas intermitentes a aleaciones de aluminio donde las muestras estuvieron expuesta al aire libre y se compararon con pruebas similares donde se redujo la vida útil de las aleaciones 7075-T6 y 2024-T3 en estado desnudo, y muestra de alclad 7075-T6 y 2024-T3 no agregan valor. El ataque corrosivo se encuentra relacionado con la temperatura, porque al aumentar la temperatura el ataque corrosivo también aumenta.

3.8.4. Protección contra la fatiga por corrosión

Para proteger los metales contra la fatiga por corrosión se puede realizar por tratamiento superficial o por adición de inhibidores, también se puede obtener protección contra la corrosión con tratamientos mecánicos superficiales como son el laminado en superficie y el shot-peening y por último la nitruración, donde estos resultados han sido mostrados por varios autores. La protección que puede brindar los recubrimientos por superficie se puedan dar de dos maneras, la primera puede prevenir al acceso del agente corrosivo al metal base y la segunda si el metal base es anódico donde este puede restringir el ataque electroquímico. Donde el recubriendo debe ser constante para poder evitar el acceso del agente químico, donde los recubrimientos anódicos dan mejor protección, como ejemplo en zinc que es anódico en el acero y ofrece una buena protección, pero en cambio el cobre que es catódico al acero puede reducir la resistencia a la fatiga por corrosión. Los revestimientos no metálicos también se han utilizado para dar protección contra la corrosión por fatiga. Los inhibidores ofrecen al metal una película química con la que protegen la superficie a la corrosión, los aceros más utilizados para realizar las investigaciones han sido los cromatos y dicromatos.

3.8.5. Influencia del oxígeno en la fuerza de la fatiga

Varios investigadores llegaron a la conclusión la influencia que tiene el oxígeno en la atmósfera en la propagación de la fatiga, donde realizaron pruebas restringiendo el suministro de oxígeno y teniendo como resultado que los metales no se observaron con severa afectación, algunas pruebas que se realizaron fue la inmersión total de muestra en agua destilada donde presentó poco efecto a la fatiga, otra prueba realizada fue la del goteo en el acero de agua salada en un ambiente de hidrógeno puro. También los investigadores realizaron pruebas con mayor resistencia a la fatiga con entornos corrosivos en el aire. Después de estos resultados al parecer las pruebas de fatiga en el aire y al vacío se vieron marcadas según el tipo de material con el que se realizaron las diferentes pruebas, en donde los aceros, aleación de aluminio y magnesio no se presentó ningún efecto, pero en la resistencia a la fatiga por vacío si se pudo evidenciar un incremento.

3.8.6. Mecanismo de fatiga por corrosión

La aparición de fatiga por corrosión se puede evidenciar con la formación de cavidades en la superficie, por consiguiente, esto va relacionado con la aparición de grietas que se van incrementando en las cavidades internas. La propagación de estos pozos tiende a disminuir a medida que van creciendo, permitiendo la aparición de nuevos pozos antes de que el metal llegue a la fractura. Ya se tiene claro que el efecto de la fatiga por corrosión es un proceso electroquímico, y donde ciertas regiones del metal son anódicas y otras irregulares o con diferencias por el acceso del oxígeno. Por esta razón se puede presentar que una gran cantidad de iones metálicos puedan pasar a la solución en los ánodos, si se presenta este tipo de

corrosión puede ser muy peligrosa por dos razones, la primera los productos de corrosión se forman en la solución corrosiva para no haya reacción y sea sofocada, la segunda el ataque solo se presenta en las partes anódicas y esto puede ser grave si el área anódica es más pequeña que el área catódica. El ataque que se presenta en ciertas regiones es un ataque típico de un proceso electroquímico, pero se ha podido demostrar que la corrosión por fatiga se puede minimizarse o eliminarse con protección catódica por contacto en el metal más noble el cual es muy conocido. En este mismo documento los autores argumentan que el efecto acelerado de la corrosión se puede asociar a cuatro factores: 1. La distorsión u obliteración de la estructura cristalina del metal el cual se vuelve menos estable y más reactivo. Esto daría a un desplazamiento potencial anódico en una dirección del metal base. 2. La ruptura de películas protectoras, dando una polarización anódica reducida. 3. La eliminación de productos de corrosión que de lo contrario ralentizarían el ataque dando una resistencia reducida de la ruta electrolítica entre cátodos y ánodos. 4. La mejora en el suministro de oxígeno, dando una polarización catódica reducido.
Como resultado las razones de la unión de la corrosión y la fatiga pueden ser más dañinas que al estar por separado por que en primer lugar la formación de películas protectoras se frena la tasa de corrosión y en segundo lugar las concentraciones de estrés introducidas en los pozos de corrosión hay una reducción en la resistencia a la fatiga.

3.8.7. Corrosión por fricción

Este fenómeno ocurre cuando dos superficies sólidas se encuentran en contacto y en un movimiento repetitivo con una pequeña amplitud. Su presencia se puede distinguir por la corrosión que se forma que consta de partículas de óxido finamente divididas, en los aceros se conoce como óxido de hierro, que se caracteriza por ser de un color marrón rojizo y a veces se le conoce como çacao", mientras que en otros metales como el magnesio y aleaciones de aluminio, las partículas se presenta de color negro y por lo general se encuentran acompañadas de una picadura localizadas en las superficies. Esta corrosión por fricción la podemos encontrar frecuentemente en piezas en servicio que se sujetan juntas y no sufren movimiento relativo entre estas podemos encontrar en uniones atornilladas y remachadas y cubos instalados a presión en los ejes, pero también las podemos ver en superficies que están destinadas a actuar como cojinetes, como consecuencia de la vibración cuando estas no se encuentran operando o en funcionamiento.

3.8.8. El efecto del material y el tratamiento térmico

La corrosión por fricción normalmente es evaluada por medio de inspecciones visuales y también con medidas de pérdida de peso, en donde los materiales blandos y los aceros inoxidables son más propensos a presentar corrosión por fricción que con los metales duros. Un investigador realizó una comparación de combinación de materiales, comprobando con hierros

fundidos midiéndoles el volumen del material que se había dañado y llegó a la conclusión que la falla se encontraba relacionada con la dureza. Los materiales que se encuentran en estado de recocido presentan más resistencia a la fatiga por corrosión y con un comportamiento similar bajo corrosión por fricción, por otro lado, podemos concluir la fuerza de fatiga en condiciones de corrosión por fricción tiene una relación influenciada por el estrés, y la mayor susceptibilidad de los materiales duros puede ser el resultado de su mayor sensibilidad de muesca.

3.8.9. Métodos para la prevención o reducción de la corrosión por fricción

La solución para eliminar o reducir la corrosión por fricción están relacionadas con la aplicación que se realice, en aplicaciones donde no se necesita que exista el movimiento relativo, es debe evitar el deslizamiento y por lo tanto se podrá evitar la corrosión por contacto, esto se puede conseguir aumentando la presión o el coeficiente de fricción. Pero si no se controla el deslizamiento con los métodos nombrados esto puede ser perjudicial por que el daño se puede incrementar, para aumentar el coeficiente de fricción podemos utilizar la técnica de galvanoplastia en metales como el cadmio, estaño, cobre, plata y oro, pero si este deslizamiento continuo, estas capas se irán desgastando y se previene el daño. Otro método que se podría utilizar para evitar el deslizamiento consiste en introducir un material elástico (caucho) entre las superficies que se encuentren en contacto para que este caucho pueda absorber el movimiento elástico. Y si definitivamente no se puede reducir el deslizamiento entonces se tendrá que el coeficiente de fricción. También se han realizado varios experimentos con diferentes grasas donde se descubrió que la pérdida de peso por el desgaste puede estar relacionado con el uso de algunos, por tal motivo la lubricación con grasa o aceites no es siempre es efectivo, porque los movimientos del contacto metal-metal se pueden producir los desgastes. A pesar de los métodos que existen para controlar la corrosión por fricción existirán aplicaciones en donde no se pueda evitar por tal motivo este efecto se podrá reducir modificando el diseño [10] .

4 Procedimiento de análisis

4.1. Inspección Visual

El proceso de fotografía es fundamental para evidenciar los elementos que van a ser estudiados y así poder sacar las conclusiones pertinentes. en estas fotos se puede observar como las piezas fallaron y así ubicar como la falla se fue propagando por el material. en este caso en específico las fallas son aparentemente por fatiga de material dado que se pueden observar en inicio de la falla debido a que las marcas convergen en el mismo punto y se obtiene una zona de fractura final (Figura **4-1**).

(a) (b)

Figura 4-1: a) Falla perno. b). Falla resorte.

4.2. Análisis Metalográfico

- Paso 1: escoger las piezas a estudiar, por medio de asesoramiento del profesor encontramos dos piezas que fallaron aparentemente por fatiga, en este caso se toman una parte de un resorte que fallo por las dos puntas (Figura **4-2**-a) y una cabeza de un perno (Figura **4-2**-b).
- Paso 2: se toma la evidencia fotográfica de las partes antes de ser intervenidas, en este caso se profundiza en las zonas en donde se encuentra la falla, para poder ser analizada previamente.
- Paso 3: tomamos las partes y se empieza haciendo un corte a el resorte, ya que se necesita una parte totalmente plana para comenzar el proceso de pulido a espejo, esto se

hace por medio de cortadora, la introducimos a la cortadora destinada en el laboratorio para obtener probetas de los dos materiales escogidos. Este proceso se debe hacer lento debido a que se generan altas fuerzas y así mismo altas temperaturas, lo que se desea es no dañar el disco de la tronzadora y a su vez la superficie del material. Adicional a la fuerza aplicada se debe tener siempre refrigerada por medio de agua para garantizar una temperatura óptima.

Esto se realiza con seguridad utilizando los implementos de protección como careta para esmerilar, gafas de seguridad transparentes y guantes de vaqueta para poder coger la probeta después del corte y evitar quemadura en la mano. Cuidadosamente en la máquina de corte se baja la palanca que manipula el disco de corte de una forma lenta para evitar la fundición del acero y evitar algún daño y accidente. Para el perno no se utiliza el proceso de corte, ya que su superficie tiene una apariencia que sirve para empezar el proceso de pulido, sin necesidad de procesos alternos.

- Paso 4: Al tener las probetas, se procede en seleccionar una cara de los extremos y la sometemos a la lijadora para dar un acabado uniforme al corte generado por la cortadora de metal y dejar la superficie más uniforme para poder seguir con el procedimiento de lijado, para las dos piezas es distinto, ya que el resorte al ser sometido a corte genera una superficie uniforme para empezar el lijado manual, pero a diferencia el perno tiene grabado el código de fábrica, con una profundidad considerable, se determina que se retiraran estas letras para obtener mucho mayor uniformidad. Para este proceso utilizamos una lijadora con motor y una lija muy abrasiva, este proceso es muy agresivo ya que se obtienen altas temperaturas, pero la remoción de material es alta, y es eficiente para el cometido de eliminación de los códigos.

- Paso 5: se empieza el lijado de las piezas con una lija de grano grande (#80 ó 60), para empezar a quitar todas las grandes imperfecciones, cuando se observa que las líneas ya todas son paralelas se procede a girar la pieza 90° para seguir lijando hasta que se vuelvan a ver todas las líneas de nuevo paralelas. Cuando se obtiene este acabado se procede al cambio de lija, por una de grano un poco más fina (#100) esto para ir quitando gradualmente todas las pequeñas líneas de imperfección obtenidas por la lija anterior. Y así se empieza a subir paulatinamente el número de lija para obtener cada vez unas líneas muchos más finos y así se garantiza la desaparición de imperfecciones grandes que puedan evitar la buena caracterización del acero en el microscopio.

- Paso 6: el proceso de pulido a espejo termina con el paso de la pieza por el paño, es un pulido por medio de un disco en máquina, donde se coloca la pieza y empieza el proceso de brillado, la efectividad de este proceso depende de los procesos anteriores con las lijas manuales, ya que si no se hicieron bien los procesos anteriores este brillado no quedará como se desea. Para mejorar el terminado se utiliza la alúmina disuelta en

agua. Para terminar y verificar el buen pulido se pasa previamente por el microscopio para observar las imperfecciones, y así saber que el proceso fue terminado con éxito.

- Paso 7: ataque con ácido, cuando es aprobada la pieza de pulido a espejo, se hace una mezcla de alcohol y ácido nítrico, esta mezcla se debe aplicar únicamente sobre un acero pulido, este ataca la microestructura y revela los componentes básicos de cada acero, para que después de hacer reacción se pueda observar en el microscopio y así caracterizar el acero e identificarlo. El proceso de ataque es muy breve para evitar quemado de estructura, para neutralizar este proceso se utiliza lavado en agua, esto frena el proceso inmediatamente.

- Paso 8: una vez realizado el ataque con ácido y su posterior neutralización, se procede al microscopio para poder observar la microestructura, estas imágenes se pueden observar en la pantalla de computador, este muestra las imágenes del acero para poder identificarlo, estas se comparan con bibliografía utilizada y así podemos ver qué tipo de acero estamos trabajando.

- Paso 9: Prueba de dureza, se utiliza para tener como referencia que dureza tiene el acero que estamos utilizando, se realiza por medio de un durómetro mecánico, con punta de diamante, este nos muestra una medida para poder ir a las tablas de identificación.

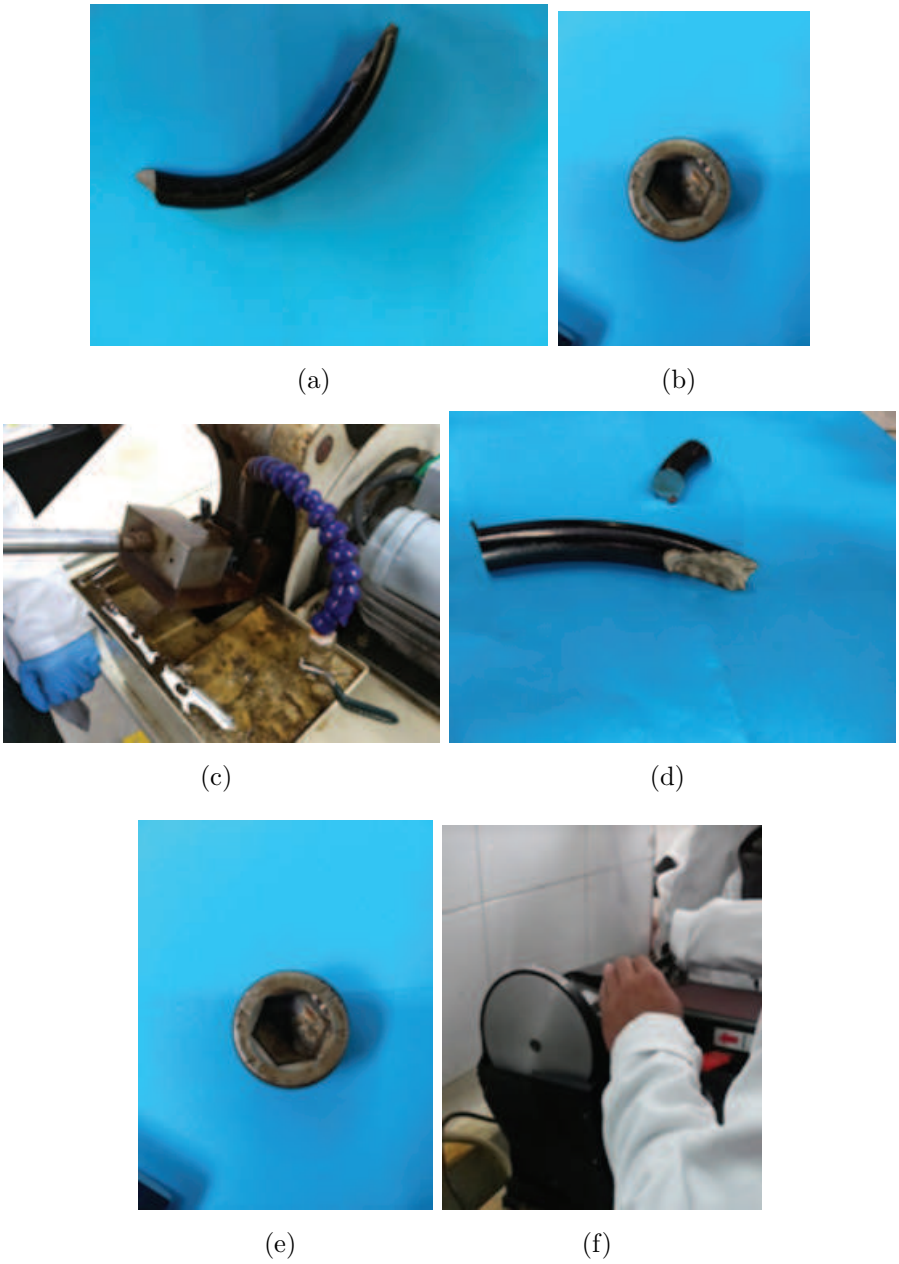


Figura 4-2: a). Resorte para analizar. b). perno para análisis. c). Dispositivo para corte de probetas . d). resorte 2 para análisis. e). perno para análisis. f). Dispositivo para brillo.

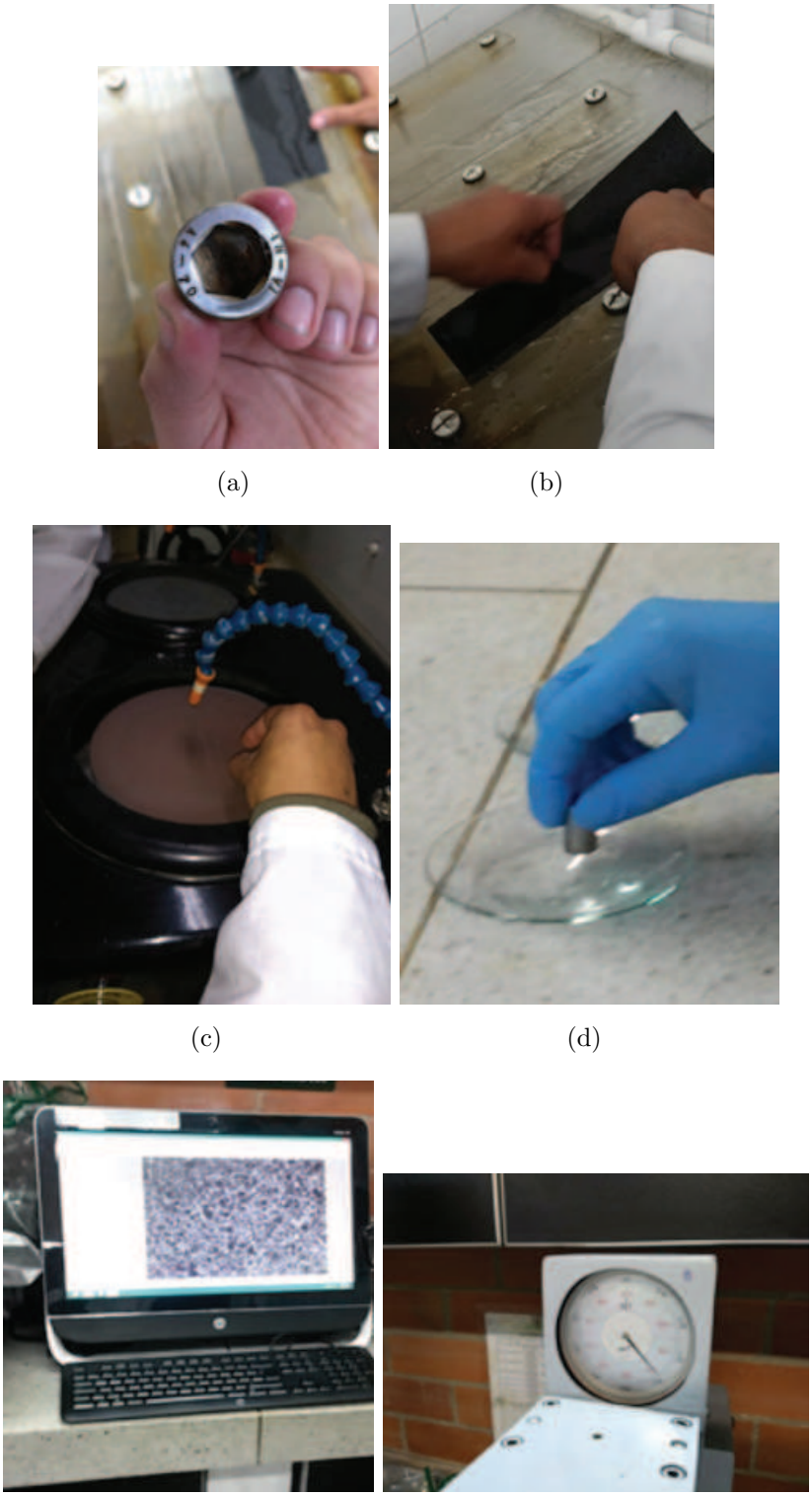


Figura 4-3: a) Probeta brillo al espejo. b). Banco de lijado. c). Dispositivo para dar brillo espejo a la superficie. d). Ataque con acido. e). Microestructura. f). Durómetro.

4.3. Análisis de resultados

- Ataque con ácido al perno: El perno no reaccionó al ataque con ácido, ya que las imágenes bajo el microscopio no revelan la microestructura establecida, posteriores consultas indican que el ácido utilizado (ácido nítrico) únicamente hace reacción para develar la perlíta para hacerla más oscura y dar contraste a las zonas establecidas de perlíta, diferenciar la ferríta de la martensita. según esto podremos llegar a la conclusión que el perno puede estar compuesto de otros elementos y por ende no tuvo reacción alguna. el proceso de ataque tuvo tres tiempos distintos para verificar si por culpa del tiempo podría no haber hecho reacción por lo consultado "la rapidez de ataque aumenta; la selectividad disminuye y se incrementan los porcentajes de HNO2, el ataque puede ir entre unos segundos a un minuto"dado esto podemos deducir que este material podría estar con composiciones diferentes (Figura **4-4**).

  Averiguaciones posteriores también con empresas dedicadas al suministro de piezas como tornillos y demás elementos, se llevó la cabeza que se estudió, con los códigos que llevaba impreso y nos confirman que esos códigos no son universales, y su identificación no era posible, al mismo tiempo se buscó por catálogos de diferentes compañías fabricantes de tornillos y pernos, no se encuentra resultado.

- Ataque con ácido al resorte: Después de ver las imágenes ya con el ataque hecho y la asesoría del profesor, se pueden observar la perlíta en una gran cantidad, y una parte de ferríta (se podría definir como martensita revenida). En la Figura **4-5** podemos observar como la perlíta está en mayor proporción, dado que el ataque con ácido nítrico hace que la perlíta se oscurezca y se puedan ver la célula de perlíta en relación de la cementíta, así se puede llegar a determinar este acero como un 1070 por medio del diagrama del acero, se puede relacionar esta imagen.

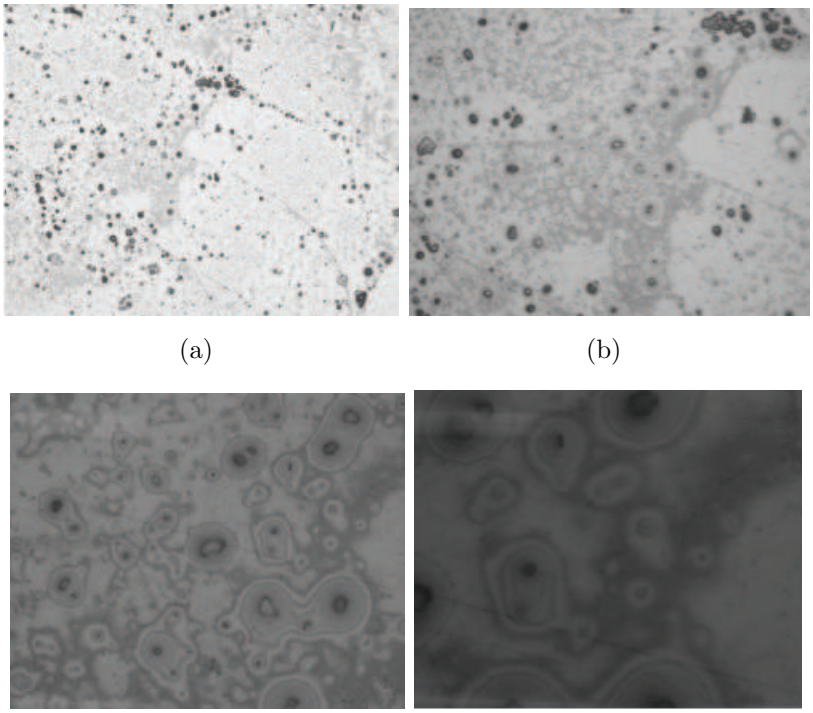


Figura 4-4: a) Perno 100x. b). Perno 200x. c). Perno 500x. d). Perno 1000x.

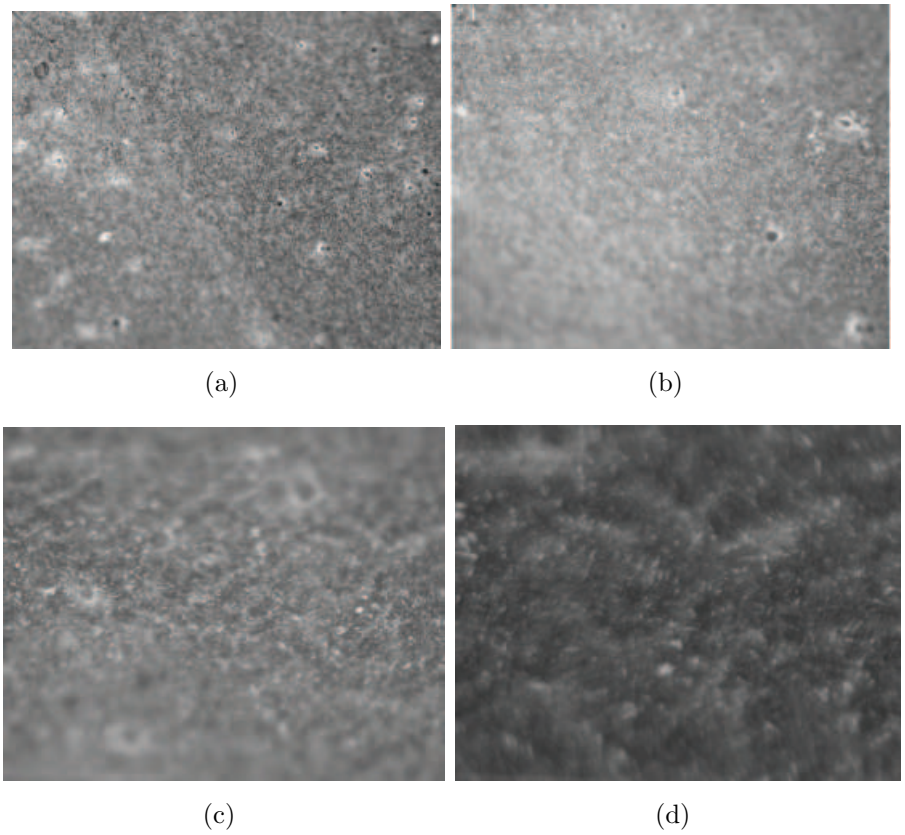


Figura 4-5: a). Resorte 100x-b. b). Resorte 200x-b. c). Resorte 500x-b. d). Resorte 1000x-b.

4.3.1. Microestructura del resorte

Para conocer la microestructura del resorte ya hemos conocido algunos datos importantes para llegar a conocer su microestructura, del tipo de material, el cual es un acero 1070, ya anteriormente se había definido por medio del diagrama del acero, también podemos conocer su composición AISI y con estos datos podremos irnos al atlas de metalografías donde allí podremos encontrar las microestructuras más típicas y podremos encontrar las búsquedas que requerimos para nuestra muestra.

STEEL	C	Mn	P. Max	S. Max
1070	0,65-0,75	0,60-0,90	0,040	0,050

(a)

Figura 4-6: a). Tabla composición AISI-SAE 1070.

4.4. Prueba de dureza de Rockwell

En la prueba de dureza se utilizó un durómetro mecánico con una punta de diamante, esta prueba nos ayuda a entender la dureza que tiene el acero que estamos estudiando y así poderlo caracterizar, los resultados son los siguientes:

Pieza	Medida por Durómetro
Resorte	40 HRC
Perno	61 HRC

(a)

Figura 4-7: a) Tabla dureza Rockwell.

En el caso del resorte encontramos que la dureza es de 40 HRC esto quiere decir que el material que estamos ensayando puede ser un acero endurecido o una aleación templada y revenida, teniendo en cuenta que para el acero 1070 el cual es el tipo de material que analizamos en la microestructura y por medio de las tablas según la norma AISI notamos que el acero es bastante duro por medio de la prueba de dureza realizada.

El número de dureza del perno es 61 HRC donde notamos que es un material con mayor dureza y resistencia a la deformación elástica, dado que entre mayor número HRC mayor va a hacer la dureza del elemento a estudiar.

5 Análisis de Falla

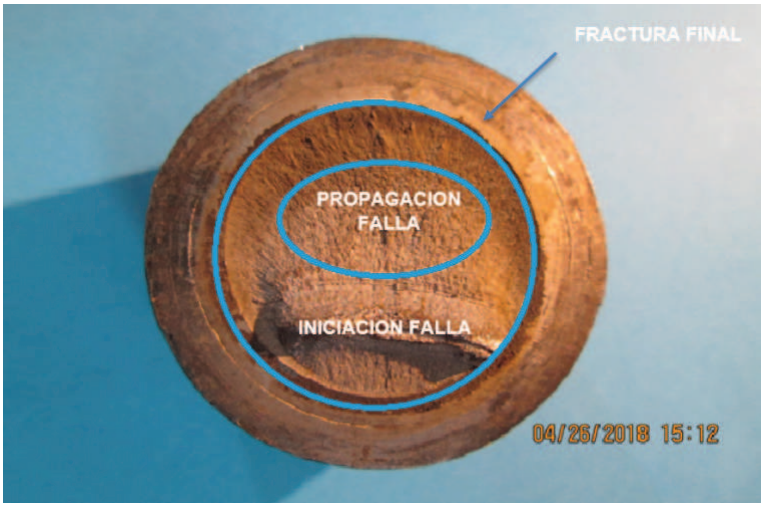
5.1. Perno

La fatiga en los materiales se da por diversos cambios en dicha estructura tales como pequeñas grietas, inclusiones de elementos extraños en el material, irregularidades presentados en los procesos de mecanizado de las piezas, una vez tengamos el inicio de la falla esto amplifica el efecto por toda la pieza hasta que esta se fracture. Lo encontrado en el perno muestra que la fractura inicia en la parte superior en el extremo del cuñero y por su baja rugosidad se extienden rápidamente las grietas hasta llegar al punto de ruptura rápida al final, por tanto, podemos deducir que la falla se presentó por esfuerzos flexionantes de rotación en sentido de las manecillas del reloj con esfuerzo nominal bajo.

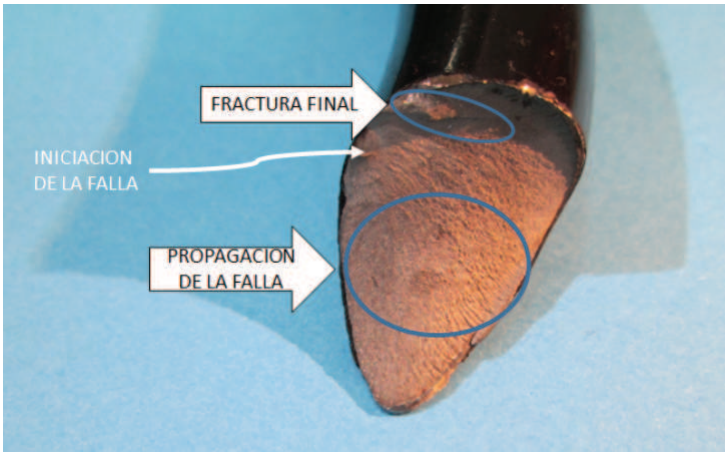
5.2. Resorte helicoidal

Una vez analizado el resorte encontramos que la fatiga es causada por la tensión a la que fue sometida la pieza por cargas axiales cíclicas constantemente, esta falla inicia por una pequeña grieta que se encuentra localizada en el extremo del resorte y a medida que se expanden empiezan a notar marcas de playa las cuales se presentan cuando el material lleva expuesto vario tiempo a las tensiones que oscilan, una vez pasa la tensión máxima esta hace que el material falle como se puede ver en la siguiente imagen.

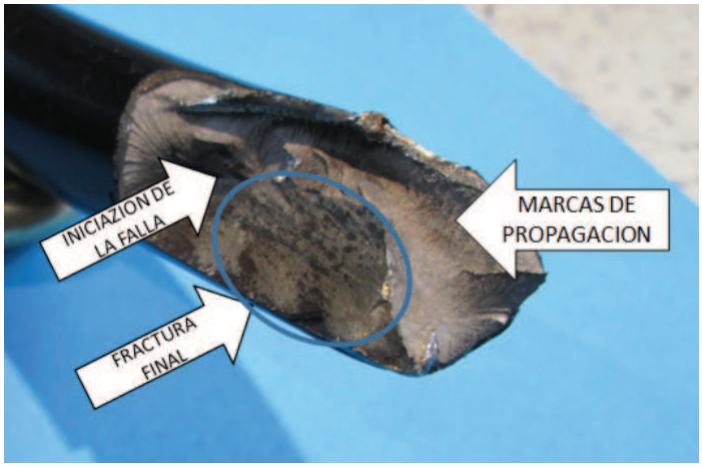
Después de observar la otra falla que se produjo en la otra punta del resorte se puede determinar que la falla inicia en la parte interna de la y se propaga hasta llegar a la zona final de fractura cuando el material ya no puede soportar todas las cargas producidas sobre el elemento, estas marcas se pueden observar por todo el material, por medio de las "marcas de playa". el inicio de la falla también se puede determinar gracias a que las marcas convergen hacia el mismo lado y un punto en común. la parte de fractura final se puede observar cuando el material falla súbitamente y deja una marca con material roto no uniforme.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-1: a) Falla perno. b). Falla #1 resorte. c). Falla #2 resorte.

En la Figura **5-1**-(a), podemos observar una superficie rugosa con líneas que convergen hacia un mismo punto en el cual determinamos una zona donde inicia el punto de la grieta y de allí las marcas de playa se expanden hasta la parte final de la fractura estas marcas se distribuyen por toda el área y muestran ciertas similitudes.
En la Figura **5-1**-(b), podemos observar que la fractura se propaga de forma transversal, notamos que las marcas de playa de toda el área de falla convergen en un solo punto, en una parte se evidencia que existe un área de fractura súbita que supone la fractura final, no se propaga en dirección al resorte ya que la fractura se produce en un ángulo aproximado de 45°.
En la Figura **5-1**-(c), evidenciamos que esta falla se propaga en diferentes planos y podemos suponer que la falla inicia en dos distintas zonas, debido a que la rugosidad esta en diferentes partes de la pieza y estas convergen en dos puntos distintos.

6 Conclusiones

- El análisis de falla es una metodología que nos permite identificar la fractura raíz de cualquier tipo de elemento mecánico por medio del informe realizado se pudieron analizar diferentes tipos de materiales y a su vez las fallas que afectaron su buen funcionamiento.
- Con el desarrollo de este análisis de falla las teorías mezclada con la práctica de laboratorio dan los conocimientos fundamentales para el análisis de fatiga, con la experiencia obtenida se pueden demostrar los fundamentos obtenidos durante la carrera, y así mismo se pueden aplicar en diferentes áreas del conocimiento.

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 (Ingenieria e ingenieria civil). – ISBN 9781615039760

[6] Carlson, Carl S.: Understanding and applying the fundamentals of FMEAs. En: *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2014

[7] Committee, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987

[8] Committee, ASM International. H.: *ASM Handbook-Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, 1992 (ASM Handbook v. 18). – ISBN 9780871703804

[9] Committee, ASTM: *ASTM dictionary of engineering science & technology*. Tenth Edition. ASTM International, 2005

[10] Forrest, P.G.: *Fatigue of Metals*. Elsevier Science, 2013. – ISBN 9781483160733

[11] Halford, G.R.: *Fatigue and Durability of Structural Materials*. ASM International, 2006. – ISBN 9781615030743

[12] Lampman, S.R. ; DiMatteo, N.D. ; Committee, ASM International. H.: *Fatigue and Fracture*. ASM International, 1996 (ASM handbook). – ISBN 9780871703859

[13] Milella, P.P.: *Fatigue and Corrosion in Metals*. Springer-Milan, 2012. – ISBN 9788847023369

[14] Ramachandran, V: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005