



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de falla en herramientas manuales agrietadas

Johnatan Camilo Camargo Capador
Elkin Rodrigo Reyes Bejarano
Carlos Andrés Rivera Aranda

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

Análisis de falla en herramientas manuales agrietadas

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 nuestras familias que siempre nos apoyaron para hacer posible este sueño.

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) Desprendimiento del cromo. b). Formación de grietas desde la parte superior en las aristas. c). Agrietamiento en las aristas del hexágono. d). Deformación en los lados del cuadrante.	21
4-2.	a) Desprendimiento y deformación del cuadrante. b). Deformación y pérdida del recubrimiento del cuadrante. c). Zonas de fractura.	22
4-3.	a) Área de lijado del cuadrante. b). Área de lijado de la copa. c). Dirección de lijado y Máquina de pulido con paño y alúmina. d). Microscopio metalográfico.	23
4-4.	a) Tabla de referencia para la composición de aceros para herramientas, [10]	24
4-5.	a) Microestructura 100X b). 200X c). 500X d). 1000X	24
4-6.	a) Microestructura de la copa 14 mm 100X b). 200X c). 500X d). 1000X . .	25
4-7.	a) Proceso de calibrado con patrón de 61.8 HRC b). Ensayo de dureza en el extensor.	26
4-8.	a) Tabla 1. Datos de dureza de los materiales.	26
5-1.	a) Zona de concentración de esfuerzos y fractura.	28

Resumen

El objeto de la presente investigación es determinar los factores que indujeron fallas mecánicas a dos componentes mecánicos; usadas como herramientas de la industria las cuales son una copa 14 mm y un extensor 120 mm. En primer lugar, se realizó una investigación de los fundamentos teóricos; corrosión bajo esfuerzo, y fatiga, que ayudaron a comprender más a fondo cual pudo haber sido la causa principal para que las piezas se vieran afectadas a estas determinadas fracturas. Luego se llevó a cabo la descripción de cada uno de los componentes afectado, y además de sus respectivas fallas producidas en cada una de las piezas. Luego se llevó a cabo las respectivas observaciones metalográficas de los componentes, así mismo también se practicaron ensayos de dureza. Para finalizar se estableció que la copa se fracturó de manera frágil debido a la corrosión bajo esfuerzo, el extensor fallo por nucleación de fatiga.

Corrosión, esfuerzo, fatiga, fractura, herramientas, extensor, copa.

Abstract

The object of the present investigation is to determine the factors that induced mechanical failures to two mechanical components, used as tools of the industry which are a 14 mm socket wrench and a 120 mm bar tool extension. In the first place, an investigation of the theoretical foundations was carried out; corrosion under stress, and fatigue, which helped to understand more thoroughly what could have been the main cause for the pieces to be affected to these determined fractures. Then the description of each of the affected components was carried out, and in addition to their respective faults produced in each of the pieces. Then the respective metallographic observations of the components were carried out, likewise hardness tests were also carried out. Finally, it was established that the socket wrench fractured in a fragile manner due to stress corrosion cracking, the extensor failure by nucleation of fatigue.

Keywords: Corrosion, stress, fatigue, fracture, tools, bar tool extension, socket wrench.

Contenido

Resumen	x
1. Objetivos	2
2. Corrosión Bajo Esfuerzo (SCC-Stress Corrosion Cracking)	3
2.1. Corrosión Bajo Esfuerzo	3
2.2. Fenómeno de la Corrosión Bajo Esfuerzo	4
2.3. Pruebas con Muestras de Esfuerzo Lento	5
2.4. Mecanismos de la Corrosión Bajo Esfuerzo	5
2.5. Evaluación de Factores	5
2.6. Características de Fractura	6
2.7. Fenomenología de la Propagación de Grietas	7
2.8. Factores Medioambientales	7
2.9. Desarrollo de la Corrosión Bajo Esfuerzo	8
2.10. Microestructura del Material	8
2.11. Factores Mecánicos	9
2.11.1. Mecanismos de Propagación de Grietas	10
2.11.2. Ruptura de la Película	10
2.12. Modelos de Fractura Mecánica	10
2.12.1. Modelo de Ruptura por Pérdida de Brillo	10
2.12.2. Fractura Frágil Inducida por Adhesión	11
2.12.3. Fragilidad del Hidrógeno	11
2.13. Evaluación del la Corrosión Bajo Esfuerzo	12
2.13.1. Carga Estática de una Probeta Lisa	12
2.13.2. Constante-Deformación Vs Las Pruebas De Carga Constante	12
2.13.3. Flexión Vs Tracción Uniaxial	13
3. Fatiga de los aceros estructurales	14
3.1. Evaluación de la Fatiga y la Vida	16
3.2. Apariciones de Fractura en Fatiga	16
3.2.1. Efectos del Medio Ambiente sobre la Resistencia a la Fatiga	16
3.3. Corrosión- Fatiga	17
3.3.1. Iniciación De Agrietamiento	17

3.3.2. Variables de Crecimiento de Grietas por Fatiga	18
3.4. Teorías de Daño por Fatiga	19
4. Procedimiento de análisis	20
4.1. Inspección Visual-Copa 14 mm	20
4.2. Inspección Visual-Extensor 120 mm	20
4.3. Análisis metalográfico	21
4.3.1. Procedimiento	21
4.4. Microestructura del extensor	24
4.5. Microestructura de la copa 14 mm	25
4.6. Ensayo de Dureza HRC	25
5. Análisis de Falla	27
5.1. Copa 14 mm	27
5.2. Extensor 120 mm	27
6. Conclusiones	29
Bibliografía	30

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a una copa y un extensor que presentan 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 Corrosión Bajo Esfuerzo (SCC-Stress Corrosion Cracking)

La corrosión bajo tensión es una de las formas de corrosión que producen agrietamiento de metales como resultado de la exposición al entorno, este tipo de corrosión se puede dar de manera lenta o de manera impredecible. Este fenómeno depende del límite elástico y el esfuerzo aplicado, ya que en la medida que aumentan estos dos factores, disminuye la resistencia a la corrosión bajo tensión. Actualmente no existe una teoría que satisfactoria para la comprensión del comportamiento de la corrosión bajo esfuerzos. En este momento, el conocimiento de cada una de estas formas de agrietamiento es en gran parte fenomenológica. Existen ciertos sistemas o entornos de aleación, que se comportan de manera única y por esta razón ninguna teoría es lo suficientemente universal como para explicarlos. Todavía no se han desarrollado modelos mecánicos que satisfagan ninguna forma de figuración ambiental, la predicción del agrietamiento es inexistente. De todas formas, la predicción de este tipo de fallas es muy importante, ya que la corrosión no ocurre antes o durante el inicio o la propagación de grietas [5].

2.1. Corrosión Bajo Esfuerzo

La corrosión bajo esfuerzo describe fallas de servicio en materiales de ingeniería las cuales se dan por propagación de grietas inducidas por el medio ambiente, dicha propagación de grietas es el resultado de la interacción combinada y sinérgica del esfuerzo mecánico y las reacciones de corrosión. Esta definición es muy general, por esta razón es importante definir claramente el tipo de carga involucrada, los tipos de materiales implicados, los tipos de entornos que causan este tipo de propagación de grietas y la naturaleza de las interacciones que resultan en este fenómeno. Corrosión bajo tensión se usa frecuentemente para describir cualquier tipo de propagación de grietas inducida por el medio ambiente. La exposición ambiental simultánea y la aplicación de esfuerzo provocarán la propagación de grietas. El término sinergia describe este proceso como la interacción paralela combinada de fuerzas mecánicas y químicas dando como resultado la propagación de grietas donde ninguno de los factores actúa de manera independiente o alternativamente daría como resultado el mismo efecto [6].

Las tensiones que ocasionan la corrosión bajo esfuerzo son muy pequeñas, están generalmente por debajo del límite elástico macroscópico, estas tensiones son residuales. Generalmente la corrosión bajo esfuerzo es generada por la carga estática. Normalmente la corrosión bajo esfuerzo se presenta en aleaciones metálicas, pero sin embargo también se puede dar en otro tipo de materiales, incluso en metales puros. La corrosión bajo esfuerzo se da en ambientes acuosos, como resultado de una sustancia química específica, por ejemplo, los iones de cloruro afectan el acero inoxidable. Sin embargo, un entorno determinado puede afectar una aleación y a otra no. La corrosión bajo esfuerzo se observa en combinación con el medio ambiente, dando como resultado una película en la superficie del metal. Estas películas protegen el metal contra la corrosión general, pero lo hacen propenso a la corrosión bajo esfuerzo en ambientes acuosos agresivos [6].

2.2. Fenómeno de la Corrosión Bajo Esfuerzo

La corrosión bajo esfuerzo es un proceso de falla retardada, la iniciación y propagación de las grietas ocurre de una manera muy lenta por ejemplo $1 \cdot 10^{-6}$ m/s hasta que las tensiones superan la resistencia a la fractura. La corrosión bajo esfuerzo ocurre en tres etapas [7]:

- Etapa 1 Iniciación de grietas y propagación.
- Etapa 2 Propagación de grietas en estado estacionario.
- Etapa 3 Propagación de grietas o falla final.

Es difícil reconocer con exactitud cuándo suceden las tres etapas porque la transición sucede de manera continua y arbitraria. Por esta razón las pruebas de corrosión bajo esfuerzo se clasifican en dos categorías [7]:

- Pruebas en muestras lisas cargadas estáticamente: se realizan a varios niveles de tensión fijos midiendo el tiempo de fallo. Estas pruebas se usan para determinar la tensión máxima que se puede aplicar para evitar fallas de corrosión bajo esfuerzo, para determinar un intervalo de inspección para confirmar la ausencia de propagación de grietas de la corrosión bajo esfuerzo o para evaluar la influencia de los cambios metalúrgicos y ambientales en la corrosión bajo esfuerzo. No obstante, el tiempo real para la formación o iniciación de grietas depende en gran medida de una amplia variedad de parámetros, como el acabado superficial y el historial anterior. Si se encuentra una grieta en el material entonces el tiempo de inicio de falla se reduce drásticamente.
- Las pruebas en muestras previamente fisuradas cargadas estáticamente: se llevan a cabo con una carga aplicada constante y se mide la velocidad o velocidad real de propagación de grietas. La distribución de esfuerzos en la punta de la grieta, se mide

por el factor de intensidad de tensión, K , para la geometría de grieta y carga específica. Estas pruebas se pueden configurar de manera que K sea aproximadamente constante a medida que cambie la longitud de la grieta. Sin embargo, la mayoría de las fallas de corrosión bajo esfuerzo ocurren bajo carga constante de tal forma que el nivel de esfuerzo aumenta a medida que la grieta se propaga, es decir el esfuerzo aumenta con el aumento de la longitud de la grieta. [1]

2.3. Pruebas con Muestras de Esfuerzo Lento

Además, es posible realizar ensayos a de resistencia a la corrosión aumentando la carga a tensión en las probetas. La prueba realiza en probetas que están sometidas al medio ambiente a bajas velocidades ($1 \cdot 10^{-5}$ a $1 \cdot 10^{-9}$ m / s). Las pruebas se denominan pruebas de velocidad de deformación lenta, son eficaces para estudiar la susceptibilidad relativa de las aleaciones al agrietamiento en un entorno, pero son escasamente certeras para la predicción de las velocidades reales de propagación de grietas en servicio [6].

2.4. Mecanismos de la Corrosión Bajo Esfuerzo

Estos pueden distribuirse en Anódicos: Disolución activa simple eliminación del material de la punta de la grieta. Catódicos: Evolución, concentración, difusión y fragilidad del hidrógeno. El mecanismo determinado debe declarar la velocidad de propagación de grietas reales, fractografía y el mecanismo de formación de grietas. En la punta de la grieta los hay ruptura de los enlaces interatómicos debido a los siguientes factores: Solvatación química y disolución, y Fractura mecánica (dúctil o frágil).

La fractura mecánica es estimulada por los siguientes elementos: tipos ambientales de adhesión, reacciones superficiales, reacciones en el metal después de la grieta, películas superficiales y combinación de reacciones ambientales para originar la fractura real [3].

2.5. Evaluación de Factores

La corrosión bajo esfuerzo ocurre al darse secuencialmente varios sucesos: transporte de masa hasta la punta de la grieta, reacciones cerca a la grieta, adhesión superficial o junto a la punta de la grieta, difusión superficial, reacción superficial, adhesión de volumen, difusión de volumen a la zona plástica delante de la grieta, reacciones químicas en el volumen, la tasa de ruptura del enlace interatómico Factores ambientales determinantes en la velocidad de propagación de las grietas: Temperatura, Presión, especie de soluto, Concentración y actividad del soluto, pH, Potencial electroquímico, viscosidad de la solución, Agitación o mezcla.

Modificando cualquier factor, se puede variar la velocidad de propagación de grietas, aumentándole o disminuyéndola. Una pequeña variación en el ambiente puede generar un cambio drástico en la propagación de grietas, mientras que un cambio considerable puede tener poca influencia. La velocidad de propagación de la corrosión bajo esfuerzo es afectada por [6]:

- La magnitud del esfuerzo o la intensidad del esfuerzo.
- La fase de esfuerzo: tensión y deformación planas.
- Tipo de carga en la punta de la grieta.
- Constitución de aleación: composición nominal, exacta, y de impurezas.
- Estado metalúrgico: resistencia, segundas fases presentes en la matriz y en los límites de grano, composición de fases, tamaño de grano, separación de límite de grano y tensiones residuales.
- Forma geométrica de las grietas: longitud, ancho y relación de aspecto, apertura de grietas y cierre de punta de grietas.

2.6. Características de Fractura

La iniciación y propagación de grietas se da sin advertencia y con poca evidencia de corrosión. Se originan en fallas superficiales por corrosión durante el servicio, desgaste u otros factores. En metales y aleaciones dúctiles las grietas se desarrollan con mínima evidencia macroscópica de deformación mecánica, corresponde practicar ensayos no destructivos. Las grietas se pueden propagar de manera intergranular o transgranular, o se pueden presentar ambos casos en la misma fisura. Aumentando el esfuerzo, incrementa la deformación plástica relacionada con la propagación de grietas, así como la apertura de grietas.

Estudio del fenómeno del proceso de iniciación de grietas [3, 6]:

- Iniciación en superficies discontinuas: comienzan en las características superficiales ya existentes o provocadas por la corrosión, como surcos, vueltas o rebabas resultantes de los procesos de fabricación.
- Iniciación en picaduras de corrosión: empiezan en picaduras que se forman durante la exposición al entorno de servicio o mediante procesos de limpieza. Se generan picaduras en las inclusiones que se cruzan con la superficie libre o por un rompimiento en la película protectora. La transformación entre grietas y picaduras está relacionada con los mismos parámetros de la corrosión bajo esfuerzo, todavía no se ha creado un

método para detectar las grietas superficiales en desarrollo. Una variación en el ambiente corrosivo y potencial puede convertir una picadura en un creador de grietas. El esfuerzo y la deformación en las picaduras son determinantes en la formación de la corrosión bajo esfuerzo, no obstante, hay picaduras que no lo iniciaron.

- **Iniciación por corrosión intergranular:** No se presentan picaduras, la corrosión intergranular se presenta cuando hay una diferencia entre la química de frontera de grano y la química general.

2.7. Fenomenología de la Propagación de Grietas

Generalmente al iniciarse una fisura, esta se propagara. Para que se dé una picadura o corrosión localizada, las condiciones químicas, como fases de grano, inclusiones, segundas fases, y límites de interfaces, generalmente no son necesariamente las mismas para que se propague la grieta Si no se dan las condiciones en la picadura en crecimiento o penetración de corrosión localizada, no se alcanzara el potencial químico, y el pH, por lo tanto, no habrá crecimiento de la grieta. En corrosión bajo esfuerzo para el crecimiento de una grieta resultante del hidrógeno catódico, una pequeña grieta debe iniciarse por dislocación anódica, la propagación dependo de la actividad del hidrógeno. Material susceptible, un ambiente corrosivo y un esfuerzo adecuado, son las condiciones para que se dé la corrosión bajo esfuerzo.

2.8. Factores Medioambientales

Durante la exposición al medio ambiente, suceden reacciones del metal determinadas que permiten el desarrollo del agrietamiento. En el caso de la corrosión bajo esfuerzo intergranular de hierro y níquel, esta reacción se da entre el medio ambiente y las impurezas segregadas a los límites del grano. La durabilidad de los materiales ha aumentado con el tiempo, ya que los materiales se utilizan en entornos más agresivos en condiciones de carga más exigentes. Para el estudio de la corrosión bajo esfuerzo se debe tener en cuenta tanto las exigencias termodinámicas como los factores cinéticos del agrietamiento.

Exigencias termodinámicas: Al darse la corrosión bajo esfuerzo la disolución u oxidación del metal y su disolución en el electrolito deben ser termodinámicamente posibles y la capa protectora, tal como un óxido o sal, debe ser termodinámicamente estable. Se debe tener en cuenta que para qué para generar la corrosión bajo esfuerzo y no corrosión general, es importante valorar las corrientes y las tensiones generadas en la picadura. Reconociendo los potenciales críticos para la corrosión bajo esfuerzo, se han utilizado métodos electroquímicos para evaluar la susceptibilidad a este tipo de corrosión.

Diagramas de pH potenciales. Los potenciales críticos para la corrosión bajo esfuerzo están relacionados con los diagramas de estabilidad del pH potencial (diagramas Pourbaix), ya que los diagramas muestran las condiciones en las que sucederá la formación de la capa y la oxidación del metal. En los materiales en los cuales la corrosión bajo esfuerzo se da mediante un mecanismo de desarrollo de grietas subcrítica provocada por hidrógeno, la exigencia termodinámica para el crecimiento de grietas se orienta por reducción de hidrógeno. La reducción del hidrógeno en el hierro en agua a 25 °C, de modo que, el rango de potenciales en los que el hidrógeno está disponible para generar el crecimiento de la grieta aumentan y se vuelve más oxidante con el pH decreciente [6].

2.9. Desarrollo de la Corrosión Bajo Esfuerzo

Durante el crecimiento de una grieta mediante fractura mecánica, si el progreso total de la grieta supera la transmisión de carga total en la punta de la grieta, la velocidad de la grieta puede controlarse todavía mediante la densidad de corriente de la punta de la grieta.

La velocidad de crecimiento de la grieta depende de la velocidad de ruptura y regeneración de la capa. La velocidad de crecimiento de las grietas se especifica por la cantidad de corrosión generada entre estos dos sucesos. En este momento, solo hay la posibilidad de explicar resultado de las condiciones de electrolitos en bloque de la velocidad de crecimiento de grietas; las condiciones locales pueden modificar significativamente. Si bien, el conocimiento de las condiciones locales de la punta de la grieta es más importante para entender los mecanismos de agrietamiento, el conocimiento de las condiciones de la grieta es adecuado para monitorear y controlar la corrosión bajo esfuerzo [7].

2.10. Microestructura del Material

La corrosión bajo esfuerzo intergranular se divide en dos grupos:

- Precipitación de límites de grano: precipitación de carburo en aceros inoxidables austeníticos y aleaciones a base de níquel, generan debilidad del cromo adyacente al límite del grano, en áreas anódicamente activas.
- a). Precipitación de frontera de grano en aceros inoxidables: En el acero inoxidable austenítico la corrosión bajo esfuerzo se debe especialmente origen de área donde se ha agotado el cromo, se explica por la disminución de un elemento pasivo formador de la capa a lo largo del recorrido continuo a través del material.
- b). Segregación de límites de grano en aleaciones de hierro y níquel: Depende del potencial electroquímico, disminución del cromo, y su concentración en el límite del

grano. Una grieta intergranular por tensión y corrosión puede propagarse a lo largo de un límite de grano que tiene una constitución muy diferente de la de la aleación a general.

- Separación de límites de grano: separación de impurezas de los límites de grano como el fósforo, el azufre, el carbono y el silicio producen un límite de grano de hasta 50 % de impureza en una región de 1 a 2 mm de grosor. Las impurezas intervienen en la corrosión y las propiedades mecánicas del límite del grano y como consecuencias, pueden causar agrietamiento por disolución anódica y fractura mecánica.
- a). La corrosión baja esfuerzo transgranulares: Diversos mecanismos metalúrgicos modifican la corrosión bajo esfuerzo transgranulares; estructura cristalina, anisotropía, tamaño y forma del grano, densidad, límite elástico, composición, clasificación y constitución de fase. Los efectos sobre de la corrosión bajo esfuerzo transgranulares están relacionados con la actuación a la corrosión de la aleación, que puede comprenderse a partir de diagramas de pH potencial o curvas de polarización.

2.11. Factores Mecánicos

La corrosión bajo esfuerzo intergranular y transgranulares tienen más características comunes que los que se dan en los factores ambientales y metalúrgicos en varios materiales. Las intensidades y tensiones de esfuerzo límite, la existencia de una velocidad de crecimiento de grietas independiente del esfuerzo y la dependencia de la tasa de crecimiento de grietas sobre la velocidad de deformación son rasgos habituales a una diversidad de procesos de crecimiento de grietas provocados por el medio ambiente y una variedad de materiales. La tensión empleada se da en función del esfuerzo uniforme y la longitud de grieta; en efecto, para un ensayo de estrés constante, la intensidad del estrés aumenta al aumentar la extensión de la grieta.

Diferentes procesos físicos se enlazan con una intensidad de tensión límite, incluyen tensión de fractura para un mecanismo de fractura de película pasiva, la tensión de cortante resulta crítica para el mecanismo de disolución de deslizamiento, un esfuerzo de fractura para un mecanismo de ruptura inducido por película frágil, o una apertura crítica de punta de grieta. El esfuerzo límite es vulnerable al medio ambiente, la constitución de la aleación y la estructura, y no es rigurosamente una propiedad material. El límite de elasticidad del material está relacionado con el límite de tensión, siendo los umbrales generalmente mayores a la mitad del límite elástico, el umbral es una fracción significativa (aproximadamente 0,8) del límite elástico del material en algunos casos. El desarrollo de grietas se calcula a partir de ensayos de carga constante apoyadas en la profundidad de la grieta dividida por el tiempo total de la prueba. La velocidad lograda de la grieta es un valor mínimo porque el tiempo pa-

ra la iniciación se incluye de modo que las velocidades instantáneas siempre serán mayores [3].

2.11.1. Mecanismos de Propagación de Grietas

Los mecanismos más relevantes para la propagación de grietas se dividen en dos clasificaciones básicas: los basados en la disolución como causante principal de la propagación de las grietas y los que implican fracturas mecánicas en el proceso de propagación de las grietas.

2.11.2. Ruptura de la Película

Considera que el esfuerzo actúa para abrir la grieta y romper la película protectora de la superficie. La observación de marcas discontinuas de agrietamiento y detección de grietas es una indicación de que la propagación de grietas es discontinua. Adicionalmente, las superficies de fractura de la corrosión bajo esfuerzo transgranulares son planas, están orientadas cristalográficamente y coinciden con precisión en los lados opuestos de la superficie de la fractura. Obteniendo que, la rotura y la disolución de la película se aceptan como mecanismos viables de la corrosión bajo esfuerzo intergranular en algunos sistemas, pero no se aceptan generalmente como mecanismos de la corrosión bajo esfuerzo transgranulares [4].

2.12. Modelos de Fractura Mecánica

El modelo de túnel de corrosión: supone que se forma una pequeña serie de pequeños túneles de corrosión en los escalones emergentes. Estos túneles van creciendo en diámetro y longitud hasta que la tensión en los ligamentos restantes causa deformación dúctil y fractura, la grieta se propaga alternando el crecimiento del túnel y la fractura dúctil. Se observó un cambio en la morfología de los túneles, que se volvían ranuras, y para esto se requiere de un esfuerzo de tracción [6].

2.12.1. Modelo de Ruptura por Pérdida de Brillo

Se basa en la suposición de que la película de óxido penetra a lo largo del límite del grano por delante de la punta de la grieta. Las grietas se propagan en períodos alternos de crecimiento de película y fractura de película quebradiza. El crecimiento de la película requiere el transporte de especies a través de la película y, como resultado, el espesor de la película es limitado en ausencia de esfuerzo. Este modelo predice marcas de detección de grietas en superficies de fracturas intergranulares y emisión acústica discontinua durante la propagación de grietas que no siempre se observan durante la corrosión bajo esfuerzo intergranular. El modelo de separación inducido por película: modelo basado en la hipótesis de que una película superficial podría inducir una fractura de separación. En este modelo se asume que:

- Se forma una película o capa superficial delgada en la superficie.
- Una grieta frágil inicia en esta capa.
- La grieta frágil cruza la interfaz película / matrix con poca pérdida de velocidad.
- Una vez en la matriz dúctil, la grieta frágil continuará propagándose.
- Esta grieta eventualmente embonar y arrestará, después de lo cual este proceso se repite.

En este modelo se explican las marcas de detección de grietas y la propagación discontinua de las grietas. Se concluyó que una grieta frágil se puede propagar en una matriz dúctil si la grieta es filosa y se propaga a altas velocidades antes de ingresar a la matriz dúctil. [1]

2.12.2. Fractura Frágil Inducida por Adhesión

Se basa en la hipótesis de que la adhesión de especies ambientales reduce la fuerza de enlace interatómica y el estrés requerido para la fractura de separación. Predice que las grietas se deben propagar de manera continua a una velocidad determinada por la llegada de la especie de fragmentación en la punta de la grieta.

2.12.3. Fragilidad del Hidrógeno

A causa de que la reacción anódica debe tener una reacción catódica correspondiente y a que la reducción de hidrógeno es con frecuencia la reacción catódica, el crecimiento de grietas subcríticas inducidas por hidrógeno puede ser el proceso dominante de crecimiento de grietas por tensión y corrosión en algunos materiales. Agrietamiento debido a la fatiga ocurre la corrosión sólo bajo cargas operativas cíclicas o fluctuantes, mientras que el fracaso resultante de los otros procesos mostrados se produce bajo cargas estáticas o lentamente crecientes. Con ciertos sistemas de aleación, la fragilización por hidrógeno puede tener un papel contributivo en cada uno de estos procesos de fallo.

Dos reacciones de corrosión básica, anódica y catódica, dominan el proceso la corrosión bajo esfuerzo en conjunción con la tensión mecánica. La composición química del medio ambiente, incluyendo el pH y la presencia de venenos de recombinación de hidrógeno que afectan el producto de reacción del cátodo, y la composición y condición metalúrgica del metal determinar cuál de las dos reacciones de corrosión parciales es dominante. Anódica la corrosión bajo esfuerzo (ruta activa corrosión) implica la disolución del metal durante la iniciación y propagación de grietas. Catódica la corrosión bajo esfuerzo (fragilización por hidrógeno del producto de corrosión) implica la deposición de hidrógeno a sitios catódica sobre la superficie metálica o en las paredes de una fisura o grieta y su posterior absorción

en la retícula de metal. Más información sobre los mecanismos de la corrosión bajo esfuerzo. [1]

2.13. Evaluación del la Corrosión Bajo Esfuerzo

La estandarización de los métodos de ensayo de la corrosión bajo esfuerzo en los Estados Unidos se inició en la década de 1960 por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE), y el gobierno federal. Las pruebas estándar también se han desarrollado en Europa, y los métodos de prueba uniformes están actualmente en desarrollo sobre una base más amplia a través de la Organización Internacional de Normalización (ISO).

La composición del entorno de prueba debe permanecer constante durante toda la prueba, a menos que los cambios son una parte del sistema de la corrosión de interés. Los materiales utilizados para accesorios de la prueba a la corrosión bajo esfuerzo deben resistir el esfuerzo, deben permanecer dimensionalmente estable con el fin de no afectar a la tensión puesta en muestras durante la prueba acción galvánica entre las muestras de ensayo y equipo auxiliar debe ser evitada; tal acción, si está presente, puede o bien acelerar o retardar la corrosión bajo esfuerzo, dependiendo de si hay anódica o catódica de control. [1]

2.13.1. Carga Estática de una Probeta Lisa

Las pruebas para predecir el comportamiento de corrosión bajo esfuerzo de una aleación en una aplicación de servicio particular, deben llevarse a cabo con un sistema de estrés similar a la esperada en servicio. Las numerosas fuentes de tensión sostenida que se sabe que han iniciado la corrosión bajo esfuerzo en el servicio y los métodos aplicables de estresantes. La mayoría de los problemas de servicio la corrosión bajo esfuerzo implica tensiones de tracción de magnitud desconocida que son generalmente muy alto. Las pruebas que incorporan una alta deformación total son generalmente los más realista en términos de la duplicación de servicio. [1]

2.13.2. Constante-Deformación Vs Las Pruebas De Carga Constante

Constante-deformación (de desplazamiento fijo) las pruebas son ampliamente utilizados, principalmente debido a que son simples y económicas de diseñar. Sin embargo, hay una mala reproducibilidad de la tensión de la exposición con algunas de estas técnicas. Por lo tanto, los procedimientos sofisticados se han desarrollado para mejorar esta faceta de la prueba se llaman pruebas de carga decreciente, porque después de la aparición de la corrosión bajo esfuerzo en pequeñas muestras de ensayo la sección bruta estrés exposición disminuye. Esto resulta de la apertura de la grieta bajo la alta concentración de esfuerzos en la punta

de la grieta y hace que algo de la tensión elástica aplicada para cambiar a la deformación plástica, con una reducción concomitante en la carga inicial. Estas tendencias en el cambio de la tensión durante crecimiento de la grieta. [1]

2.13.3. Flexión Vs Tracción Uniaxial

Históricamente, los sistemas estresantes utilizados más ampliamente han incorporado probetas de deformación constante cargadas por flexión. Este método es versátil debido a la variedad de técnicas sencillas que se pueden utilizar para probar la mayoría de los productos de metal en todo tipo de entornos corrosivos. El estado de estrés en una muestra de curva, sin embargo, es mucho más complejo que en una muestra de tensión. Teóricamente, la tensión de tracción es uniforme en toda la sección transversal en la probeta a tensión, excepto en las esquinas de las secciones rectangulares, pero el esfuerzo de tracción en probetas de plegado varía a través del espesor de la muestra.

La tensión de tracción está en un máximo en la superficie convexa y disminuye abruptamente a cero en el eje neutro. Se cambia entonces a un esfuerzo de compresión, que alcanza un máximo en la superficie cóncava. Por lo tanto, sólo alrededor del 50 % de la superficie del metal se encuentra bajo tensión, y la tensión puede variar desde el máximo hasta cero, dependiendo del sistema estresante. Como la corrosión bajo esfuerzo penetra en el metal, el gradiente de tensión a través del espesor de la sección produce cambios en presiones y tensiones que son diferentes de los de un espécimen tensión uniaxial. Esta tendencia rendimientos significativamente diferentes respuestas de la corrosión bajo esfuerzo para los dos tipos de subrayado.

Las muestras de deformación elástica para controlar la tensión de tracción superficial aplicada por la carga de deformación, tensión generalmente se limita a la gama de elástico para el material de prueba. La magnitud de la tensión aplicada se puede calcular entonces a partir de la deformación medida y módulo de elasticidad. Al hacer énfasis en carga constante, la carga típicamente se mide directamente, y la tensión se calcula mediante la fórmula apropiada para la configuración de la muestra y el método de carga. Las células de carga o resortes calibrados pueden ser útiles para la aplicación y el seguimiento de los posibles cambios en la carga durante la prueba. Los tipos de uso general de muestras para pruebas bajo tensión-rango elástico se describen a continuación. En las muestras de deformación plástica, los esfuerzos residuales que resultan de tales operaciones de fabricación como la formación, el alisado y de recalado que implican localizados deformación plástica a temperatura ambiente pueden exceder el límite elástico del material. Otros tipos de muestras utilizados incluyen paneles con bordes cizallados, perforados agujeros, o números de identificación estampada y probetas que muestran evidencia de otras operaciones de fabricación prácticas.

3 Fatiga de los aceros estructurales

La fatiga ha sido definida como el proceso de cambio estructural permanente localizado en un material sometido a condiciones que producen tensiones o tensiones fluctuantes en algún punto o puntos y que puede culminar en grietas o fracturas completas después de un número suficiente de fluctuaciones. Desde las perspectivas del diseño, las pruebas y el análisis de fallas, este proceso de fatiga se puede dividir convenientemente en tres partes:

- Iniciación de grietas.
- Propagación de grietas progresiva estable.
- Fractura final (rápida)

Las fallas por fatiga tienen uno o más orígenes de fatiga, una región de propagación progresiva de grietas por fatiga y una zona final de fractura por sobrecarga rápida. La identificación de la ubicación y la naturaleza de los sitios de origen son importante en el análisis de fallas de la fatiga, ya que el inicio de la figuración por fatiga es con frecuencia el paso que controla la vida en el proceso de falla [1].

Las discontinuidades introducidas durante el procesamiento o fabricación (por ejemplo, inclusiones anormalmente grandes, discontinuidades de soldadura, grietas de molienda) o servicio (por ejemplo, fosas de corrosión, daño por impacto) pueden provocar la iniciación de grietas por fatiga en circunstancias en las que un componente no dañado habría tenido una vida útil aceptable. Por el contrario, el diseño inadecuado, la carga excesiva o la baja resistencia del material en la fatiga pueden provocar fallas por fatiga en ausencia de un "defecto" particular en el lugar de origen. La fractografía proporciona la base para identificar el modo de fractura por fatiga y para localizar sitios de origen a partir del examen de las superficies de fractura.

La iniciación de la fatiga en componentes comunes hechos de aleaciones comerciales ocurre en, y está dominada por, heterogeneidades materiales y geométricas. Los sitios que fomentan la iniciación de grietas por fatiga incluyen inclusiones, partículas de segunda fase, huecos, marcas de mecanizado y otros defectos superficiales, muescas u otras variaciones geométricas. Estos sitios pueden actuar como concentradores de estrés, o pueden producir micro grietas rápidamente por mecanismos tales como desunión por inclusión y fractura de partículas. El efecto de concentración de tensión permite la deformación plástica permanente local con tensiones nominales inferiores al rendimiento. La iniciación ocurre con frecuencia cerca de

superficies libres, ya que las tensiones nominales a menudo son más altas allí (por ejemplo, flexión). Las variaciones geométricas en las superficies pueden elevar localmente las tensiones y deformaciones, y los procesos de acumulación de daños también se ven favorecidos en las superficies [9].

Las pruebas realizadas para dilucidar los mecanismos de iniciación se han llevado a cabo con frecuencia utilizando metales puros monofásicos relativamente homogéneos (sin las heterogeneidades descritas anteriormente). Con base en las observaciones de estas pruebas, algunos investigadores separan aún más la etapa de iniciación en:

- Acumulación de deformación plástica irreversible local.
- Creación de defectos microscópicos.
- Crecimiento y coalescencia de defectos para formar una o más grietas macroscópicas.

Un cuidadoso estudio de laboratorio de metales y aleaciones de alta pureza sin entalladuras ha demostrado que la deformación plástica repetida puede resultar en la localización de cambios micro estructurales permanentes. Por ejemplo, bajo carga cíclica inelástica, se forman bandas de deslizamiento intenso conocidas como bandas de deslizamiento persistentes en cristales individuales de metales FCC puros tales como el cobre. Se pueden formar protusiones e inclusiones (picos y valles) finos de metal donde estas bandas de deslizamiento persistentes se cruzan con superficies libres, la continua rugosidad de la superficie y la acumulación de daños finalmente resultan en la formación de núcleos de grietas en la superficie. El daño cíclico también puede acumularse en los límites de grano, particularmente a temperatura elevada o en condiciones que causan fragilización del límite del grano, y en los límites gemelos [2].

La propagación de grietas por fatiga se ha dividido históricamente en dos partes, designadas etapa I y etapa II. La propagación de la etapa I ocurre en planos cristalográficos específicos con el mayor esfuerzo de cizalladura fluctuante resuelto. La propagación de la etapa II ocurre en planos normales a la tensión de tensión fluctuante. Ciertos metales (como aleaciones de aluminio) y condiciones de carga consideradas por investigadores tempranos que investigan procesos de fatiga exhibieron propagación en etapa I sobre una región limitada (característicamente abarca no más de unos pocos granos cercanos a la superficie) adyacente a sitios de origen, seguida de una transición a etapa II propagación.

En consecuencia, esta división entre etapas de propagación fue natural. Sin embargo, muchas aleaciones comerciales (especialmente la mayoría de los aceros) típicamente no exhiben ninguna propagación detectable en la etapa I. Después de la iniciación en tales aleaciones, el crecimiento ocurre inmediatamente mediante la llamada propagación en la etapa II. Las

muecas, las esquinas agudas o las grietas preexistentes también pueden eliminar la propagación en etapa I detectable en muchos metales. De forma similar, algunas aleaciones (como ciertas supe aleaciones de base de níquel y aleaciones de base de cobalto) pueden mostrar regiones de propagación muy extensas en planos cristalográficos específicos (la llamada propagación en etapa I) con poco o ningún tipo de crecimiento en etapa II discernible antes de la fractura final. Dependiendo de la carga y la geometría, la propagación extensiva en estos materiales ocurre en planos cristalográficos alternados de tal forma que el crecimiento sigue un patrón en zigzag o facetado aserrado, en promedio normal a la dirección de la tensión fluctuante [9].

3.1. Evaluación de la Fatiga y la Vida

La determinación de la vida de una estructura de ingeniería se basa en dos partes. Esto es el conocimiento de la estructura en sí y el conocimiento de cómo se carga esa estructura. La información subyacente requerida para comprender completamente estos dos elementos singularmente complicados es significativa. Además, el conocimiento que se requiere abarca muchas disciplinas diferentes. Estas disciplinas, en el caso de los aviones, pueden incluir aerodinámica, flujo de fluidos, mecánica, mecanismos, estructuras, metalurgia, ciencia de los materiales, corrosión, métodos de inspección, estadísticas, métodos de prueba y diseño. Para predecir la vida del componente, por lo tanto, la determinación de intervalos de inspección requiere el conocimiento de varias disciplinas de ingeniería. Uno necesita conocer las cargas futuras de la estructura para que pueda calcular su vida y luego determinar los intervalos de inspección apropiados para evitar una falla catastrófica [9].

3.2. Apariciones de Fractura en Fatiga

La falla por fatiga de los componentes y estructuras de ingeniería resulta de una fractura progresiva causada por cargas cíclicas o fluctuantes. La magnitud de cada evento de carga individual es demasiado pequeña para causar una fractura completa del componente no dañado, pero la acción acumulativa de numerosos ciclos de carga, que a menudo asciende a cientos de miles y millones, da como resultado el inicio y la propagación gradual de una grieta a muchas grietas. La fractura completa se produce cuando la grieta alcanza tamaño crítico. La fatiga es una importante causa potencial de falla mecánica, ya que la mayoría de los componentes o estructuras de ingeniería están o pueden estar sujetos a cargas variables durante su vida útil [3].

3.2.1. Efectos del Medio Ambiente sobre la Resistencia a la Fatiga

En un material dado, la resistencia producida por fatiga a un determinado valor de esfuerzo máximo dado, generalmente esta tiende a disminuir en la presencia de un ambiente agresivo,

el efecto varía ampliamente, dependiendo drásticamente de las características y combinaciones del material con el ambiente, El ambiente afecta el crecimiento de lo que es denominado como "rata", además de la probabilidad de la iniciación de la fatiga y la grieta de ambas. Para muchos de los materiales la influencia del medio ambiente es más pronunciada en los rangos de la tensión mucho más bajos.

Las pruebas de análisis de fatiga-corrosión en unas muestras lisas de acero de alta resistencia indican que pueden producirse reducciones muy grandes en la resistencia a la fatiga, o la fatiga generada en el agua salada, como un ejemplo se tiene, la resistencia a la fatiga a (10×10^6) ciclos podría reducirse a tan solo un 10 % de la que es producida en el aire seco. En estas pruebas, el papel principal de la piel pulida, la creación de los levantadores de tensión locales que han iniciado las grietas. El agua salada produce también un aumento en la tasa de crecimiento de las grietas en los aceros [1].

Los aceros inoxidable tienen una menor resistencia a la fatiga en agua de mar que en el agua dulce, probablemente esto es debido a la presencia de iones cloruro en el agua del mar. Se sabe que los cloruros atacan las películas protectoras de la superficie de óxido en aceros inoxidable y, por lo tanto, se expone el material subyacente al medio ambiente y afectan la resistencia a la fatiga las aleaciones de aluminio, son altamente susceptibles a la fatiga por corrosión, como por ejemplo, la pequeña cantidad de vapor de agua normalmente presente en la atmósfera terrestre reduce severamente la vida de fatiga de varias aleaciones de aluminio, se ha observado debido a estudios que la fatiga en el aire del ambiente es aproximadamente una décima parte de la vida de fatiga en vacío o en aire seco. (Humedad relativa de menos del 1 %).

3.3. Corrosión- Fatiga

3.3.1. Iniciación De Agrietamiento

La influencia de un entorno agresivo en el inicio de fatiga-agrietamiento de un material (Comportamiento típico de fatiga en un entorno agresivo en comparación con el comportamiento de fatiga en un entorno inerte o con alta frecuencia), permite comparar las curvas de vida de esfuerzo de la muestra lisa (S-N) obtenidas de ambientes inertes y agresivos. Tanto como el 95 % de la vida de la estructura se gasta en la iniciación de Fatiga- Agrietamiento enunciada anteriormente, un entorno agresivo puede promover la iniciación de grietas y acortar la vida de fatiga de la estructura. Las grietas por fatiga por corrosión siempre se inician en la superficie, a menos que existan defectos cercanos a la superficie que actúan como sitios de concentración del estrés y faciliten la iniciación de grietas subsuperficiales. Las características de la superficie en los orígenes de las grietas de corrosión-fatiga varían con la aleación

y con condiciones ambientales específicas. En aceros al carbono, las grietas a menudo se originan en fosas de corrosión hemisféricas y a menudo contienen cantidades significativas de productos de corrosión. Las grietas son a menudo transgranulares y pueden exhibir una ligera cantidad de ramificación. Las picaduras superficiales no son un requisito previo para el agrietamiento por corrosión y fatiga de los aceros al carbono tampoco es transgranulares en ausencia de fosas y sigue los límites de grano o los límites de granos de austenita anteriores [2].

En las aleaciones de aluminio expuestas a soluciones acuosas de cloruro, las grietas producidas en fatiga-corrosión con frecuencia son originadas en sitios picadura o corrosión intergranular. La propagación inicial de grietas de fatiga iniciadas en aire seco, donde el crecimiento inicial sigue los planos cristalográficos. El agrietamiento inicial por fatiga por corrosión en el eje de la tensión principal también se produce en las aleaciones de aluminio expuestas al aire húmedo, pero las picaduras no son requisito para el inicio del agrietamiento [9].

3.3.2. Variables de Crecimiento de Grietas por Fatiga

Las variables fundamentales involucradas en cualquier evaluación de vida son aquellas que describen los efectos y la interacción del comportamiento del material, la geometría y el historial de estrés en la vida de un componente. Para los métodos de mecánica de fractura, el comportamiento del material se describe por la resistencia a la fractura y los datos de tasa de crecimiento de grietas, y la geometría se define a través de un factor adimensional.

Para los métodos tradicionales de fatiga como el método de vida de esfuerzo, se obtiene una curva S-N, que traza el estrés en función del número de ciclos hasta el fallo, mediante pruebas de fatiga y se utiliza para definir un límite de resistencia dependiente del material. Los efectos de la geometría se establecen a través de un factor de muesca de fatiga. Ambos métodos definen el historial de tensiones dentro de un espectro que describe la frecuencia y el orden de las tensiones esperadas en el servicio. Es importante recordar que las tensiones esperadas en el servicio son tensiones límite y no tensiones finales, que se han multiplicado por un factor de seguridad para cumplir con los requisitos de resistencia estática [4].

Cuando se habla de fatiga una estructura es sometida a una carga variable esta se vuelve un problema complejo, los modelos de daño, más usados es uno conocido como daño lineal, esta regla de este tipo de modelo se conoce como la regla de Miner creada en el año 1945 también esta es conocida como predicciones de vida no conservativas los enfoques no tienen en cuenta la carga de fatiga cíclica, desde que el método Miner se ha ejecutado, muchas teorías del daño por la fatiga para mejorar la predicción de la misma [1].

3.4. Teorías de Daño por Fatiga

La fatiga es un proceso de daño localizado de un componente producido por una carga cíclica, se denota porque tiene un inicio de grietas una propagación de la grieta y por último una falla final del componente. En un proceso de carga cíclica la deformación de tipo plástica puede ocurrir en el sitio donde se produce en donde hay mayor tensión, a medida que van aumentando los ciclos de la pieza la longitud del agrietamiento de la pieza va aumentando hasta que la pieza se separe y falle. Los pasos generales de la fatiga son [8]:

- Nucleación de grietas.
- Crecimiento corto de grietas.
- Crecimiento de grietas prolongado.
- Fractura final

En el plano de cizalladura es donde las grietas empiezan y las superficies o dentro de los límites de los granos y este es una definición del primer paso en el proceso de la fatiga, luego de esto las grietas tienden a crecer en lo largo del plano de tensión máxima del corte y a través del límite del grano.

El siguiente paso es el crecimiento de la fractura y tiene dos partes Etapa 1 y la Etapa 2; en la primera la nucleación y crecimiento de grietas a lo largo de la longitud en el plano local esfuerzo cortante máximo en la punta de plasticidad de la grieta se afecta por las características de deslizamiento, la fisura es comparable a la microestructura del material.

En la etapa 2 la propagación sigue en el plano largo normal al plano principal de tensión de tracción globalmente y en la dirección máxima de tensión de corte localmente. Se caracteriza por que a lo largo de esta grieta se ve menos afectada por las propiedades de microestructura se debe a que la zona de plástico con punta de grieta para la fractura de esta etapa es mucho más grande que la microestructura del material.

4 Procedimiento de análisis

4.1. Inspección Visual-Copa 14 mm

La copa de 14 milímetros de cuadrante de $\frac{1}{2}$ pulgada hexagonal marca Stanley, es una herramienta manual que se utiliza para el soltar y apretar tuercas y tornillos de 14 mm de cuadrante, con ayuda de un ratchet, un volvedor a un determinado par de apriete, soporta esfuerzos torsionales. Este tipo de herramienta es utilizado en sector industrial y automotriz.

A simple vista en la Figura 4-1-a, se puede apreciar que el recubrimiento se desprendió de cromo del material base. También se puede observar en la Figura 4-1-b, las grietas formadas desde la parte superior de la copa. Es evidente que el agrietamiento se presenta en las aristas del hexágono Figura 4-1-c. En la Figura 4-1-d, se evidencia deformación en los lados del cuadrante.

4.2. Inspección Visual-Extensor 120 mm

Extensor de 120 milímetros de cuadrante de $\frac{1}{2}$ pulgada marca Stanley, es una herramienta manual complementaria, se utiliza para acoplar una copa de cuadrante de $\frac{1}{2}$ pulgada a un ratchet o volvedor del mismo cuadrante para soltar, apretar tuercas y tornillos. Esta herramienta está diseñada para soportar cargas torsionales. Es usado tanto en el sector industrial y automotriz.

La característica más evidente del extensor es que hubo ruptura y desprendimiento de parte del cuadrante Figura 4-2-a, también se encontramos deformación en la parte interna del cuadrante. En la Figura 4-2-b. Parte inferior, se observa que el recubrimiento de cromo se desprendió, en la parte superior se aprecia deformación del cuadrante. Las zonas de fractura se detallan en la Figura 4-1-c.

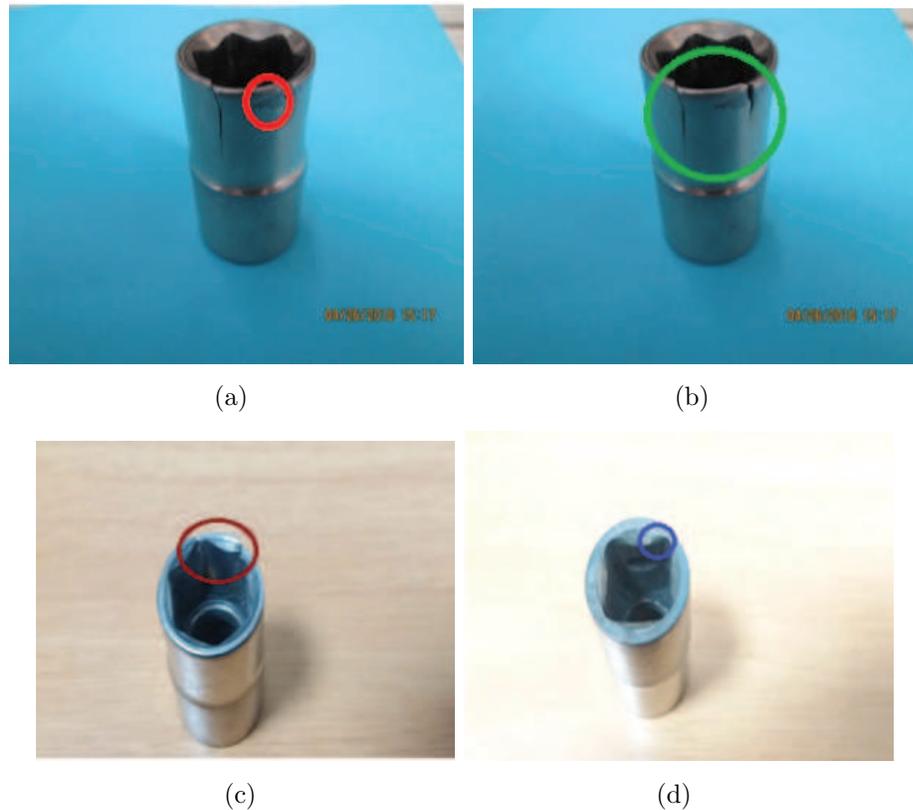


Figura 4-1: a) Desprendimiento del cromo. b). Formación de grietas desde la parte superior en las aristas. c). Agrietamiento en las aristas del hexágono. d). Deformación en los lados del cuadrante.

4.3. Análisis metalográfico

4.3.1. Procedimiento

- 1. Corte: El proceso de corte sirve para extraer una muestra del material fracturado. En primer lugar, se toman todas las precauciones necesarias para el uso seguro de la herramienta de corte, se utiliza la careta para protegerse de material que pudiera desprenderse durante el corte, también se usan los guantes de carnaza para retirar la pieza después de realizado el corte, ya que esta se calienta. Se realiza un corte al extensor para retirar el cuadrante. El corte se realiza de una manera progresiva sin ejercer demasiada presión para que el disco y el extensor no se vayan a dañar, siempre teniendo en cuenta el suministro constante de agua. La refrigeración es importante para que la muestra no se caliente demasiado y no vaya a sufrir alteraciones que puedan falsear la observación metalográfica. En la Figura 4-3-a y b, tenemos el extensor luego del corte.

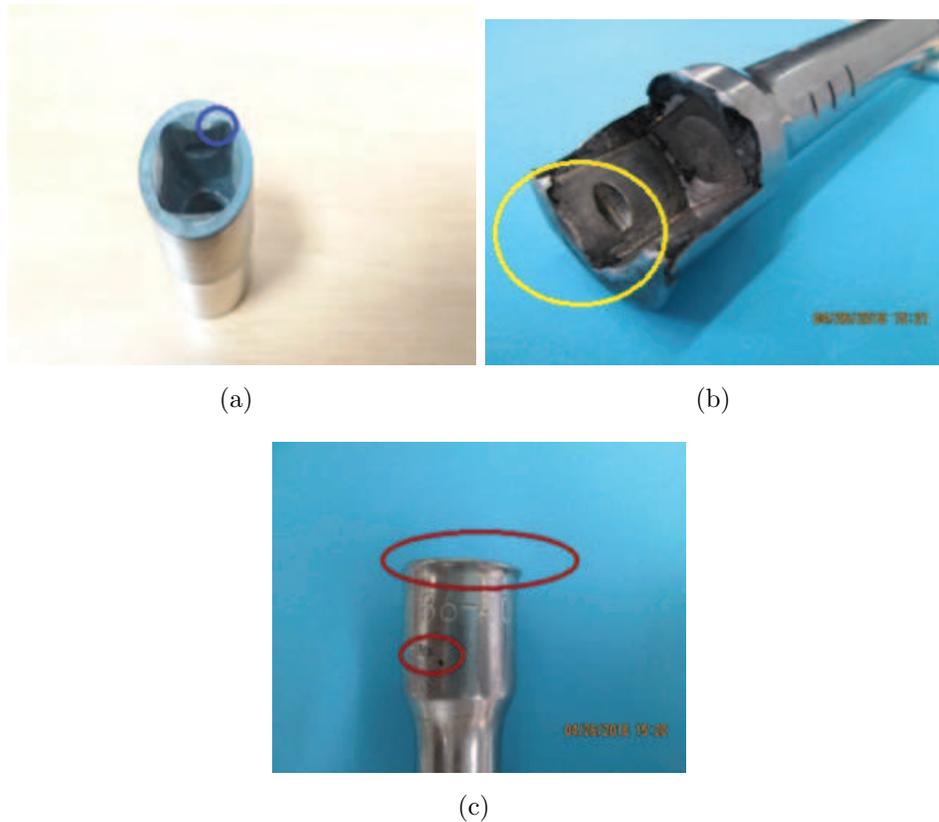


Figura 4-2: a) Desprendimiento y deformación del cuadrante. b). Deformación y pérdida del recubrimiento del cuadrante. c). Zonas de fractura.

- El proceso de lijado se realiza para eliminar las irregularidades de la superficie que se va a observar. Se realiza para dar acabado tipo espejo a la copa y al cuadrante del extensor, para esto, se empieza a lijar con diferentes tipos de lija. Empezando con la más gruesa para este caso la N° 60 hasta la N° 1000, Figura 4-3-c, después con paño y alúmina en la máquina de pulido. El lijado se debe realizar de manera paralela a lo largo de la lija hasta que sean visibles las líneas en un solo sentido. Luego se procede a lijar la pieza a 90° de la dirección inicial hasta que solo sean visibles las líneas en la dirección del lijado. Después se repite el procedimiento anterior sucesivamente con las lijas más finas hasta llegar al paño. En todo momento se debe garantizar el suministro de agua. En la pulidora se ajusta a una velocidad aproximada de 160 rpm con el paño, se debe sostener la pieza fuertemente sobre el disco para que no se caiga. Se debe mantener el suministro de agua constantemente y de alúmina regularmente. En este proceso las piezas a analizar van adquiriendo brillo tipo espejo.
- Ataque químico: El ataque químico revela la microestructura de las piezas afectadas. Se atacan las piezas afectadas con nital al 30 %, se sumergen las superficies brilladas a espejo en el ácido directamente, durante aproximadamente 5 segundos, para que no se

vayan a quemar. Luego se debe neutralizar la reacción con agua lo más rápido posible.

- Observación metalográfica: Se realiza la observación metalográfica con el fin de identificar la microestructura de los materiales. Para este proceso se hace uso del microscopio metalográfico y el computador Figura 16. Se hace a cada una de las piezas a aumentos de 100x, 200x, 500x, 1000x (Figura 4-3-d).

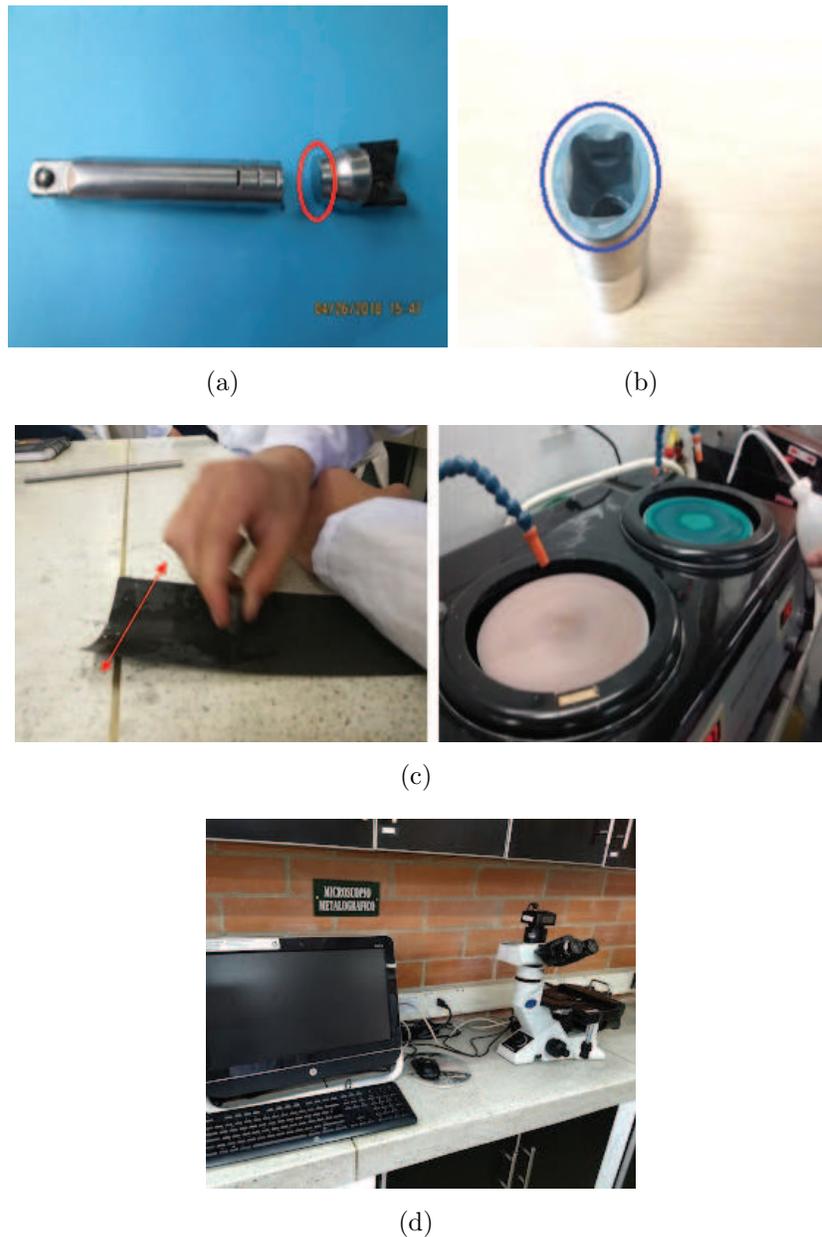


Figura 4-3: a) Área de lijado del cuadrante. b). Área de lijado de la copa. c). Dirección de lijado y Máquina de pulido con paño y alúmina. d). Microscopio metalográfico.

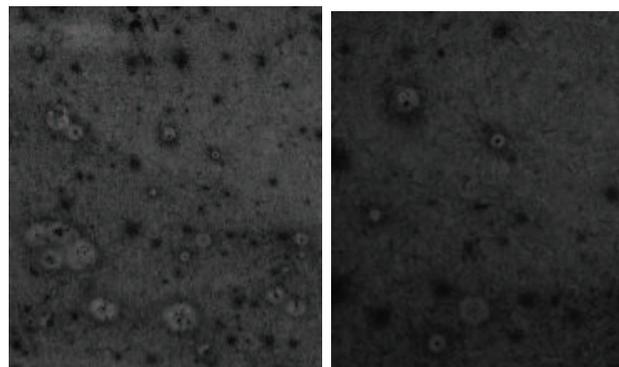
4.4. Microestructura del extensor

A partir del análisis de la Figura 4-5-d, se puede establecer que la microestructura del material corresponde con un acero O1 templado en aceite con el fin de obtener la matriz ferrítica con martensita sin revenir; además se observa la presencia de carburos posiblemente de tungsteno o cromo los cuales son incluidos en la microestructura para mejorar la resistencia mecánica del material y la resistencia a la oxidación [10].

Designación	C	Mn	Si o Ni	Cr	V	W	Mo
W1*	0.60 a 1.40 (a)	...	...	...	...	...	...
S5*	0.55	0.80	2.00 Si	...	...	...	0.40
O1*	0.90	1.00	...	0.50	...	0.50	...

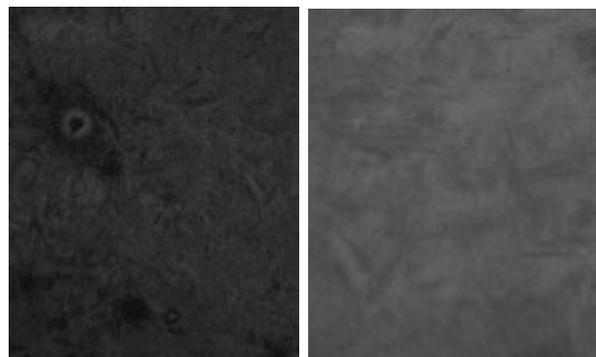
(a)

Figura 4-4: a) Tabla de referencia para la composición de aceros para herramientas, [10]



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 4-5: a) Microestructura 100X b). 200X c). 500X d). 1000X

4.5. Microestructura de la copa 14 mm

De manera similar, del análisis de la Figura 4-6, se establece que la microestructura de la copa presenta una matriz de cementíta revenida, con presencia de carburos de vanadio o cromo. De esta forma la composición puede ser similar a la del acero O1 para herramientas, establecida para el extensor, sin embargo, el proceso de revenido del material posiblemente se ideó para aumentar la ductilidad del material sacrificando en parte la resistencia mecánica del mismo.

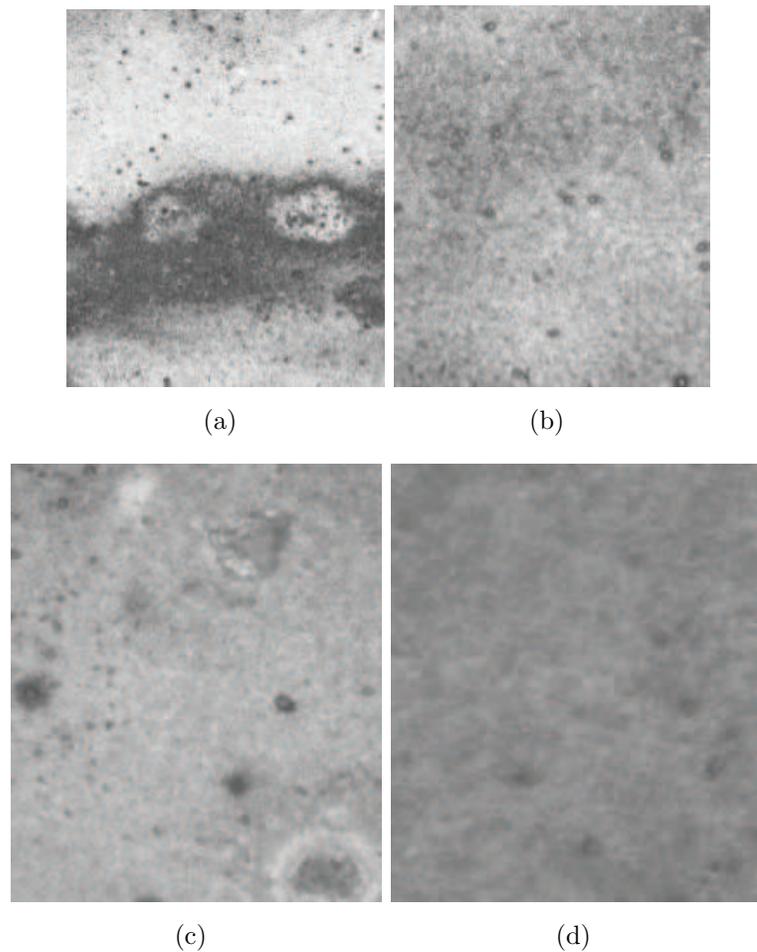


Figura 4-6: a) Microestructura de la copa 14 mm 100X b). 200X c). 500X d). 1000X

4.6. Ensayo de Dureza HRC

El ensayo de dureza básicamente nos dice cuál es la resistencia que tiene cada material a ser penetrado. Para nuestro caso de estudio, se va realizar en ensayo de dureza Rockwell escala C. Para este ensayo, en primer lugar, se realiza la calibración del durómetro, se instala el

indentador de punta de diamante, se aplica carga de 150 kgf, se obtiene el valor de 61.8 HRC en la escala de materiales duros (Figura 4-7-a). A continuación, se realiza el ensayo en la copa y al extensor. El ensayo de dureza se realiza en la copa 14 sin ningún problema, pero no es posible realizarlo en el cuadrante por su forma, por lo anterior el ensayo se realiza en el cuerpo del extensor (Figura 4-7-b), los resultados de las mediciones de dureza se muestran en la Figura 4-8.

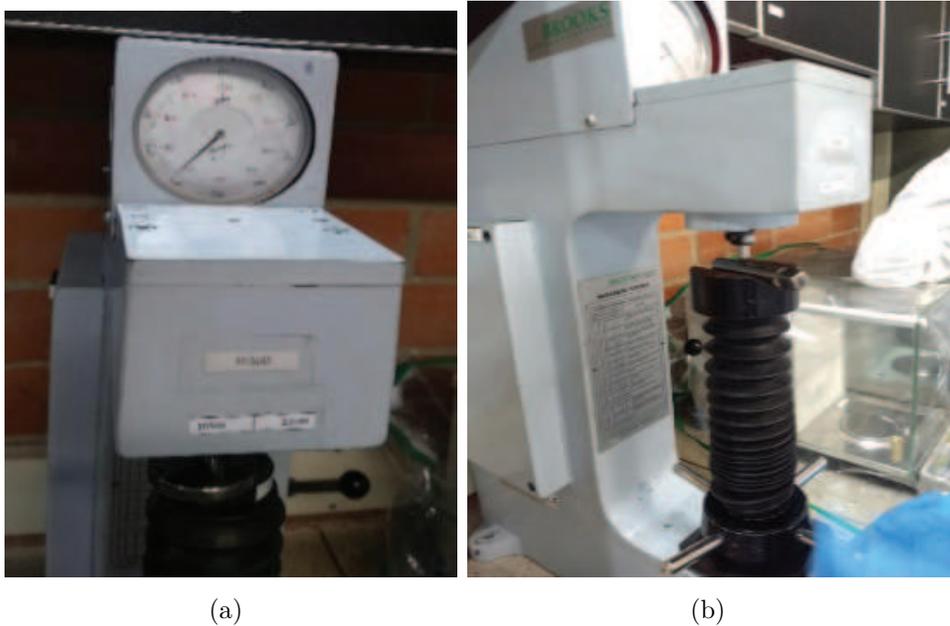


Figura 4-7: a) Proceso de calibrado con patrón de 61.8 HRC b). Ensayo de dureza en el extensor.

PIEZA	*DUREZA HRC
Copa 14	45
Extensor	45

*HRC: Dureza Rockwell C

(a)

Figura 4-8: a) Tabla 1. Datos de dureza de los materiales.

5 Análisis de Falla

5.1. Copa 14 mm

Podemos suponer que la falla de la copa fue la consecuencia de varios factores. En primer lugar, ocurrió la pérdida del recubrimiento de cromo. Recordemos que el cromo proporciona resistencia al desgaste y a la corrosión, al perder parte del recubrimiento, el material queda expuesto a la corrosión y al desgaste. El recubrimiento pudo haberse desprendido por la vibración generada al usar herramientas de impacto o percutoras, como lo son pistolas neumáticas o eléctricas. El uso repetitivo de herramientas de impacto debilitó la estructura de la copa. Para usar este tipo de pistolas, existen copas fabricadas en aceros especiales. Por otra parte, con el uso repetitivo de la herramienta de impacto, va generando un desgaste en el cuadrante interno de la copa, así como fatiga del material.

Las aristas del cuadrante hexagonal son concentradores de esfuerzos, este factor y los demás antes mencionados aceleran el proceso de fractura. Por último, la corrosión bajo esfuerzo genera el crecimiento de la grieta. Tenemos dos posibles hipótesis acerca de la falla en la copa. La primera es que el acero que se usó en la fabricación, no es acero para herramientas. Para corroborar esta hipótesis se requiere de un análisis químico para determinar realmente los componentes de la herramienta. La segunda hipótesis es que la falla ocurrió por un uso inadecuado de la herramienta.

5.2. Extensor 120 mm

En primer lugar, al analizar detenidamente el extensor, es evidente que sufrió impactos de martillo en la parte superior haciendo el material en el extremo se deforme. Esta condición vulnera la estructura interna del extensor, ya que la herramienta no está diseñada para soportar este tipo de esfuerzos. Otra condición importante, que se puede observar en la Figura 5-1 es que muy cerca de la zona de fractura, se presenta la mayor concentración de esfuerzos en donde existe un cambio de diámetro.

Suponemos que la grieta se origina en el extremo del extensor y que luego se propagó hacia la parte interior hasta finalizar, de esa misma manera se propagó el estrés bajo tensión. Se puede observar que en la trayectoria de la grieta hay dos coloraciones, la oscura suponemos



(a)

Figura 5-1: a) Zona de concentración de esfuerzos y fractura.

que es la que inició la grieta, el material reaccionó con el medio ambiente. La parte más brillante y limpia fue por donde se fracturó al final la herramienta. Se puede concluir que la fractura se originó por nucleación de fatiga.

Para la fabricación de herramientas que sean confiables, es recomendable utilizar un acero adecuado como lo es el acero al Cromo-Vanadio. La combinación del cromo aumenta la resistencia al desgaste y a la corrosión. Sin embargo, el acero se hace más dúctil. La adición de vanadio en el acero aumenta su tenacidad, mejorando así la resistencia al impacto.

6 Conclusiones

- El análisis de fallas mecánicas nos permite establecer resultados bastante aproximados para poder concluir por qué fallan las piezas mecánicas y esto nos da una mejor perspectiva para poder aplicar este tipo de análisis como ingenieros mecánicos pero a nivel industria. Con esto podemos mejorar el diseño mecánico, para que las piezas diseñadas se hagan con materiales de alta calidad. Previniendo así que ocurran algunas fallas mecánicas.
- A través de este estudio se implemento el metodo de análisis de fallas con el fin de detectar la raíz del daño y llegar a la conclusión de que tipo de falla ocurrió en el material.

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] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987
- [5] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM Handbook-Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, 1992 (ASM Handbook v. 18). – ISBN 9780871703804
- [6] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM Handbook*. ASM International, 2005 (ASM Handbook v. 13, parte 2). – ISBN 9780871707079
- [7] DAVIS, J.R.: *Corrosion: Understanding the Basics*. ASM International, 2000. – ISBN 9781615030682
- [8] HALFORD, G.R.: *Fatigue and Durability of Structural Materials*. ASM International, 2006. – ISBN 9781615030743
- [9] LAMPMAN, S.R. ; DIMATTEO, N.D. ; COMMITTEE, ASM International. H.: *Fatigue and Fracture*. ASM International, 1996 (ASM handbook). – ISBN 9780871703859
- [10] MANGONON, P.L. ; GARCÍA, H.J.E. ; DE ITA DE LA TORRE, A.: *Ciencia de materiales: selección y diseño*. Pearson Educación, 2001 (Áncora y delfín). – ISBN 9789702600275