



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de Falla de una Guía Macho para Molde de Inyección

Juan Gabriel Agredo Moreno
Tatiana Moreno Vega
Juan Diego Silva Gómez

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

Análisis de Falla de una Guía Macho para Molde de Inyección

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 la vida, la familia y la universidad los libertadores por darnos la oportunidad de terminar la carrera y poder optar por el título de Ingeniero Mecánico.

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) Guía para macho para molde de inyección. b). Corte transversal guía para macho.	18
4-2.	a) Máquina de pulido. b). Máquina de pulido con discos y lacado metalográfico. c). Microscopio metalográfico OLYMPUS GX.	19
5-1.	a) Guía para macho para molde de inyección microestructura a 100X. b) Microestructura 200X. c). Microestructura 500X. d). Microestructura 1000X.	22
5-2.	a) Área del grano. b) Pieza atacada químicamente.	22
5-3.	a) Molde de inyección YEE 6" X4". b). Zona de inicio y propagación de la falla.	23
5-4.	a) Análisis causa raíz.	24

Resumen

El presente informe se ha elaborado con la intención de determinar el método de falla del componente de un molde para inyección de PVC, el cual nombraremos de ahora en adelante como el macho guía. En el proceso de análisis de falla, inicialmente identificaremos a través de una inspección visual, el elemento por la zona de falla, las estructuras maquinadas que tiene el elemento y apoyados en las fuentes bibliográficas; identificar en primera instancia; hipótesis para determinar las razones por las cuales el elemento falló. Seguido de esto procederemos con un análisis metalográfico siguiendo los protocolos establecidos para tal fin tales como la preparación superficial del material, el ataque químico y finalmente el análisis de la microestructura del elemento. De estos resultados se determinan las especificaciones del acero para posteriormente tomar las durezas tanto en la zona de análisis de la microestructura como en la superficie perimetral del elemento. Lo anterior para determinar la calidad del acero, sus propiedades mecánicas y junto con un detallado análisis de las condiciones de trabajo optimas y las cuales en las que se generó la falla, poder generar una conclusión de la posible causa de la fractura del elemento; en este caso por fatiga.

Palabras clave: Fatiga, guía, falla, análisis, metalografía, dureza.

Abstract

This report has been prepared with the intention of determining the method of failure of the component of a mold for injection of PVC, which we will name from now on as the guide male. In the process of fault analysis, we will initially identify, through a visual inspection, the element through the fault zone, the machined structures that the element has and supported by the bibliographic sources; identify in the first instance; hypothesis to determine the reasons why the element failed. Following this we will proceed with a metallographic analysis following the protocols established for this purpose such as the surface preparation of the material, the chemical attack and finally the analysis of the microstructure of the element. From these results, the steel specifications are determined to subsequently take the hardness in both the analysis area of the microstructure and the perimeter surface of the element. The above to determine the quality of the steel, its mechanical properties and together with a detailed analysis of the optimal working conditions and which in which the fault was generated, can generate a conclusion of the possible cause of the fracture of the element ; in this case due to fatigue.

Keywords: Fatigue, slideways, failure, analysis, metallography, hardness.

Contenido

Resumen	x
1. Objetivos	2
2. Análisis de Falla	3
2.1. Causas Raíz de fallas	3
2.1.1. Deficiencias de diseño	3
2.1.2. Defectos Materiales	4
2.1.3. Defectos de fabricación	4
2.2. Categorías de las fallas	4
2.3. Fallas en la manufactura	5
2.3.1. Proceso de eliminación de material	6
2.3.2. Procesos de metalurgia	6
2.4. Tratamiento Térmico	6
2.4.1. Soldadura	7
2.4.2. Fundición	8
2.5. Limpieza y Acabado	8
3. Fractura	9
3.1. Comportamiento de la fractura	9
3.2. Fractura Dúctil	10
3.3. Fractura Frágil	10
3.4. Mecánica de la fractura	11
3.5. Fatiga	11
3.6. Historia de la fatiga	12
3.6.1. Diferentes fases de vida de la fatiga	13
3.7. Fractura y fatiga de los aceros estructurales	14
3.7.1. Comportamiento de la vida de fatiga	14
3.8. Fatiga de contacto de aceros endurecidos	15
3.8.1. Cambios microestructurales de la fatiga de contacto	15
3.9. Apariencia de fractura	16
3.10. Factores que influyen la vida por fatiga de contacto	17

4. Procedimiento de análisis	18
4.1. Inspección Visual	18
4.2. Ensayo de Dureza Rockwell	19
4.2.1. Resultado de dureza	19
5. Análisis metalográfico	21
5.1. Metalografía Guía Macho de Molde de Inyección	21
5.2. Análisis de falla	23
5.3. Análisis causa de raíz	24
6. Conclusiones	25
Bibliografía	26

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a una guía macho para molde de inyección que presenta algún tipo de falla con el fin de determinar la causa probable de falla.

2.2. Objetivo Específicos

- Obtener una pieza mecánica que haya 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.

2 Análisis de Falla

En ingeniería cuando un producto diseñado empieza a no hacer bien sus funciones antes de su vida útil esperada, se dice que falla. Las fallas pueden causar la pérdida de vidas, paradas no programadas de las plantas, aumentar los costos de mantenimiento y reparación, así como los costosos litigios de daños y perjuicios. Por lo general cuando un producto falla prematuramente, se dice que este está defectuoso, sin embargo, es extremadamente importante distinguir entre un producto defectuoso y un producto imperfecto. Al hacer un análisis de falla, se debe tener mínimo comprensión básica de dos campos de materias que son: ciencia de materiales e ingeniería de los materiales. La ciencia de los materiales se preocupa por la estrecha relación entre el comportamiento de los materiales y su estructura interna, donde se ven los materiales a la escala micrométrica y submicrométrica. Tener el conocimiento sobre el rendimiento de los materiales es importante para saber la función sensible de su estructura interna. La ingeniería de los materiales trata con el comportamiento de los materiales en una base continua, es decir, en cada milímetro o metro en el que material se va a comportar en cuestiones básicas de mecánica. Lo que es el estrés como la fractura de mecanismos son ramas de la mecánica, que pueden ser herramientas útiles para analizar una falla [11].

2.1. Causas Raíz de fallas

Se considera que un análisis de falla es el examen de las características y causas del fallo del equipo o componente, las fallas revelan causas de raíz física que caen en una de cuatro categorías fundamentales:

2.1.1. Deficiencias de diseño

Las características inaceptables de un producto o sistema que son resultado del proceso de diseño. Este proceso abarca el desarrollo de concepto original, la configuración general, definición y diseño detallado, incluida la selección y especificación de materiales y procesos de fabricación. Se puede encontrar en las deficiencias de diseño los aumentos de estrés debido a muescas excesivamente afiladas (por ejemplo, en chaveteros de los ejes) o radios insuficientes (por ejemplo, en los ejes de los cojinetes).

También se ve residuos no anticipados de tensiones asociadas con configuraciones de tratamiento térmico diseñadas con geometrías complejas, o tensiones de embalaje de configuraciones que contienen interferencia no deseada. Dos metales especificados para uso en una aplicación de desgaste podrían sostenerse agrietamiento si los metales son incompatibles, como el desgaste por deslizamiento de componentes hechos de acero inoxidable de la serie 300 que son de grupo austenítico.

Otro ejemplo seleccionar un material que es incapaz de proporcionar propiedades mecánicas adecuadas para aplicación (incluida resistencia, resistencia a la fatiga, resistencia a la fractura, resistencia a la corrosión, resistencia a la temperatura elevada, etc.) Los materiales pueden exhibir anisotropía, o variabilidad en las propiedades dentro de un producto. Se puede demostrar que el material cumple con las propiedades requeridas, pero las propiedades físicas requeridas para alguna aplicación pueden depender de la resistencia, tenacidad o resistencia al agrietamiento por tensión y corrosión en una dirección que no sea longitudinal[2].

2.1.2. Defectos Materiales

Las imperfecciones o discontinuidades inaceptables en los materiales son defectos, y algunos tipos de imperfecciones pueden ser generalmente perjudicial para el rendimiento o la apariencia de un producto o sistema. A pesar de las medidas tomadas para controlar, documentar, medir, analizar y mejorar procesos involucrados en fabricación del producto, se producen defectos de material. Muchos defectos se evitan que salgan a través de procedimientos internos y sistemas de garantía de calidad. Sin embargo, a veces se entregan materiales defectuosos [2].

2.1.3. Defectos de fabricación

Los productos pueden diseñarse correctamente utilizando materiales de construcción sólidos, pero son defectuosos ya que se entregan desde el fabricante, debido a imperfecciones rechazables (defectos) introducidas durante el proceso de fabricación o debido a errores de instalación de un sistema en un sitio. Existe una amplia variedad de defectos causados por la fabricación, todos y cada uno de los procesos de fabricación o instalación tienen muchas variables que, cuando se permite superar los límites de control, puede dar como resultado un proceso defectuoso [2].

2.2. Categorías de las fallas

Hay muchas maneras de categorizar las fallas y daños materiales en términos de formas, mecanismos o causas. Las categorías pueden priorizar o identificar vías de investigación, siempre que las categorías no limiten la investigación crítica, para ello podemos ver por ejemplo la

categoría de factores estresantes, para determinar la causa de falla de un material, se deben considerar los factores estresantes. Un estresor es una influencia externa que puede ser causa directa o indirecta de la falla. La influencia de los factores estresantes depende de gran medida de la susceptibilidad del componente, los criterios de rendimiento y la susceptibilidad del material.

Los factores que causan esfuerzos en los materiales son:

- **Mecánica:** Cargas estáticas, dinámicas o cíclicas aplicadas, presión impacto, tensiones residuales por la fabricación, movimientos finales aplicados.
- **Químico:** Exposición inadvertida aguda o crónica a un entorno químico agresivo, compatibilidad de materiales.
- **Electroquímico:** Un metal susceptible a un ambiente acuoso corrosivo.
- **Térmico:** Exposición a temperaturas elevadas que da como resultado la degradación de los materiales.
- **Radiación:** Iluminación ultravioleta, luz solar, radiación ionizante de plantas de energía nuclear, etc.

La falla física de los materiales se puede ubicar en muchas categorías según el sistema de clasificación, pero se pueden categorizar en cuatro que son las siguientes:

- Distorsión o deformación indeseada.
- Fractura.
- Corrosión.
- Desgaste.

Estas cuatro categorías representan las formas generales de falla, y cada forma de falla puede tener una variedad de diferentes mecanismos subyacentes [2].

2.3. Fallas en la manufactura

En la manufactura podemos encontrar bastantes anomalías y fallas, algunas son las siguientes:

2.3.1. Proceso de eliminación de material

Ocasionan fallas como grietas debido a un mecanizado abusivo, quemadura de molienda, agrietamiento de capa de refundición de mecanizado por descarga eléctrica, ataque intergranular de mecanizado electroquímico, agrietamiento por tensión residual debido al sobrecalentamiento [2].

2.3.2. Procesos de metalurgia

Estas operaciones de metalurgia tienen doble propósito. Primero, obviamente están diseñados para producir piezas con la configuración deseada, en segundo lugar la metalurgia puede desarrollar una forma final con solidez interna y propiedades mecánicas mejoradas mediante mejora calidad interna debido a la deformación por compresión, refinamiento del grano, estructura de grano uniforme, eliminación de la porosidad de la colada y ruptura de los patrones de macrosegregación, patrón de flujo de grano beneficioso para un mejor rendimiento de la pieza, tenacidad mejorada y/o resistencia a la fatiga debido de grano y la deformación de fibras, superficie bruñida y calidad superficial controlada.

Sin embargo, los factores beneficiosos del procesamiento de la deformación pueden convertirse en un problema potencial si el proceso no es cuidadosamente entendido. Las posibles fallas pueden ser:

- Problemas relacionados con la fractura, por ejemplo, estallidos internos o grietas en superficies libres.
- Problemas relacionados con el flujo de metal, es decir, grano final y bajo rendimiento de la superficie, no homogéneo, cierres fríos, defectos de flujos, bandas de corte y estructuras localmente debilitadas.
- Control, selección de materiales y problemas de uso.

El movimiento del metal durante estos procesos, y sea a temperatura ambiente o a temperatura elevada, las hace fuentes comunes de discontinuidades superficiales, como vueltas, uniones y cierres fríos. También se pueden incrustar en la superficie óxidos, astillas o astillas de material base. Estas imperfecciones en la superficie producen muescas de gravedad desconocida que actúa como un aumento de estrés, que pueda afectar negativamente la fuerza bajo carga [2].

2.4. Tratamiento Térmico

De todos los diversos métodos de procesamiento de acero tiene el mayor impacto global en el control de microestructura, propiedades, tensiones residuales y control dimensional. De los

tratamientos térmicos podemos mirar fallas como crecimiento del grano, transformación de fase incompleta, descarburación, martensita no templada, fricción por temple y condiciones similares de fragilidad, precipitación inadecuada, microestructura sensibilizada, inhomogeneidad en microestructura y pérdida de propiedades debido al sobrecalentamiento durante el horneado posterior al recubrimiento [2].

2.4.1. Soldadura

Se pueden dividir en dos clases, aquellas rechazadas después de las inspecciones y las pruebas mecánicas y fallas en el servicio que pueden surgir por fractura, desgaste, corrosión o deformación. Las características de superficie que son causa de rechazo incluyen excesivo desajuste en la junta de soldadura, excesiva convexidad de talón y esfuerzo de talón, concavidad excesiva del talón y soldaduras de tamaño insuficiente, corte y superposición agudos en la punta de la soldadura, grietas, porosidades, arco de ataque. Las características superficiales pueden ser grietas debajo del soporte, porosidad, inclusiones, fusión incompleta, penetración inadecuada, grietas de solidificación y grietas de licuación. Los detalles de los métodos de prueba para la soldadura se proporcionan en los estándares de la American Welding Society (AWS). Las fallas de servicio de las soldaduras, similares a cualquier tipo de otro componente estructural, dependen del funcionamiento ambiente y la naturaleza de la carga aplicada y puede influir fallas de:

- Fallo de sobrecarga por mecanismos de grietas frágiles.
- Fallo de sobrecarga por mecanismos frágiles de agrietamiento dúctil.
- Colapso plástico.
- Pandeo.
- Fatiga.
- Fatiga por corrosión.
- Corrosión.
- Corrosión bajo tensión-SCC.
- Agrietamiento inducido por hidrógeno.

Si se involucraran temperaturas elevadas, entonces la deformación de fluencia y la ruptura de tensión deberían agregarse a esta lista [2].

2.4.2. Fundición

Las fallas en las fundiciones pueden ocurrir a causa de las condiciones de servicio, diseo inadecuado, selección de materiales inadecuados, deficiencias de fabricación, o una combinación de todas. Una falla relacionada con defectos es el resultado de una condición que no cumple con los criterios de aceptación establecidos que el diseñador no pudo anticipar. Sin embargo, muchas de las causas comunes de fallas en las fundiciones ocurren a partir de uno o más aspectos de diseño, selección de materiales, imperfecciones de fundición, procesamiento defectuoso, ensamblaje incorrecto o condiciones de servicio no inicialmente anticipado. Algunas imperfecciones de fundición no tienen ningún efecto sobre la fundición o la vida útil del molde donde se lleva a cabo, pero dará una apariencia insatisfactoria o hará un procesamiento adicional, como el mecanizado haciendo el proceso más costoso. La clasificación de los defectos en fundición los fundidores han usado nombres únicos, tales como rattle, scab, heckle y shut, para describir las imperfecciones de la fundición. Sin embargo, debido a que las fundidoras a veces usan una nomenclatura diferente para describir imperfecciones o defectos, el Comité Internacional de Asociaciones Técnicas de Fundición (ICFTA) ha estandarizado la nomenclatura, comenzando con la identificación de siete categorías básicas de imperfecciones de fundición:

- Proyecciones metálicas.
- Discontinuidades.
- Defectos.
- Dimensión incorrecta.
- Inclusiones o anomalías estructurales.
- Picaduras
- Fundición incompleta

2.5. Limpieza y Acabado

Fallas que se pueden encontrar en este punto de las industrias pueden ser corrosión debido a una limpieza inadecuada antes de pintar, ataque intergranular o fragilidad por hidrógeno debido a la limpieza con ácido, fragilidad del hidrógeno debido a la formación de placas [5].

3 Fractura

La fractura es la separación de un cuerpo sólido en dos o más piezas bajo la acción de estrés. La fractura se puede clasificar en dos grandes categorías que son fracturas dúctiles y fracturas frágiles, las fracturas dúctiles son caracterizados por una extensa deformación plástica antes y durante la propagación de la grieta. Por otro lado, la fractura frágil tiene lugar en situaciones de estrés debajo la resistencia neta, con muy poca deformación plástica observable y una absorción mínima de energía. Es difícil identificar exactamente cuando los problemas de falla estructural y el equipo mecánico se volvió de importancia crítica, sin embargo, esta claro que los fracasos que causan la pérdida de vidas han ocurrido por más de 100 años. A lo largo de la década de 1800, los puentes cayeron y los recipientes a presión explotaron, y a finales de 1800, los accidentes ferroviarios en Reino Unido fueron continuamente reportado como ".el accidente ferroviario más serio de la semana" [5].

3.1. Comportamiento de la fractura

En la mayoría de los fallos estructurales, la fractura final suele ser abrupta después de algún tipo de material o defecto de diseño que se ve agravado por un proceso de crecimiento de grietas que causa la grieta al alcanzar un tamaño crítico para la fractura final. El proceso de agrietamiento ocurre lentamente a lo largo de la vida útil debido al crecimiento de varios mecanismos de grietas tales como fatiga, agrietamiento por corrosión bajo tensión, fluencia y agrietamiento inducido por hidrógeno. Por el contrario la fractura final suele ser abrupta y se produce por rotura, ruptura o fractura intergranular. La mayoría de las fallas estructurales son del tipo más preocupante, la fractura frágil, y esta casi invariablemente se inicia en defectos, muescas o discontinuidades. Grietas resultantes del mecanizado, temple, fatiga, fragilización por hidrógeno, metal líquido, la fragilización o la corrosión por estrés también conducen a una fractura frágil.

De hecho, el iniciador individual más frecuente de fractura por fragilidad es la fatiga, que conservativamente representa el 50 % de todas las fracturas frágiles en la fabricación de productos. Por el contrario, la falla del servicio por falla dúctil macroscópica es relativamente infrecuente (aunque los mecanismos microscópicos de la fractura dúctil en última instancia puede conducir a la fractura frágil macroscópica) [2].

3.2. Fractura Dúctil

La fractura dúctil resulta de la aplicación de una fuerza excesiva a un metal que tiene la capacidad de deformarse permanentemente, o plásticamente, antes de fracturarse. Por lo tanto, la propiedad de la ductilidad es simplemente la capacidad del material fluir o deformarse, lo que puede o no conducir a la fractura, dependiendo de la magnitud de la fuerza aplicada. La propiedad de la ductilidad esta relacionada de alguna manera con la propia dureza, aunque este ultimo generalmente se mide en presencia de una muesca o otra concentración de estrés, tiene la capacidad de absorber energía y deformar plásticamente antes de la fractura es característico de la ductilidad y tenacidad.

Esta propiedad mecánica también permite que las partes metálicas se formen sin fracturas. Las características de una fractura dúctil son diferentes a las fracturas frágiles. Sin embargo, debe reconocerse que muchas fracturas contienen algunas de las características de ambos tipos. Algunas características de una fractura dúctil es que hay una considerable deformación bruta permanente o plástica en el región de fractura dúctil, en muchos casos, esto puede estar presente solo en la región de ruptura final de una fractura que puede tener con una fractura frágil, la apariencia característica de la superficie de una fractura dúctil es opaca y fibrosa ya que es causado por la deformación en la superficie de la fractura, las fracturas dúctiles se producen solo mientras el material esta siendo estirado, es decir, se detiene la deformación y la grieta deja de propagarse si el material dejar de estirarse [5].

3.3. Fractura Frágil

Fragilidad significa poco o ninguna deformación permanente en la fractura, por lo general acompañado de alta dureza y resistencia, pero poca tolerancia para discontinuidades. Aceros de herramientas endurecidos, hierro fundido gris y muchos otros metales se usan rutinariamente, dentro de sus limitaciones, con satisfactorios resultados. Sin embargo, si una herramienta de corte de metal esta doblada, de repente se romperá con una fractura frágil, habrá poco o nada de permanente deformación, y las piezas se pueden volver a colocar juntas en perfecta alineación.

Metales comunes, particularmente aceros de bajo carbono y medio carbono, que se usan ampliamente en la industria, normalmente se consideran con propiedades dúctiles y se utilizan normalmente en aplicaciones donde la capacidad de ajustar por deformación plástica deseado. Sin embargo, bajo ciertas combinaciones de circunstancias, estos aceros normalmente dúctiles pueden fracturarse en una manera frágil. La fractura frágil puede ocurrir únicamente debido a tensiones de tracción residuales, sin carga aplica, o cualquier combinación de tensiones aplicadas y residuales. Las características de estas fracturas se pueden identificar porque no hay deformación bruta permanentemente o plástica del metal en la región de frac-

tura frágil, la superficie de una fractura frágil es perpendicular a la tensión principal. Por lo tanto, la dirección de la tensión de tracción que causó la fractura puede ser identificado fácilmente.

Otras características es que dejan marcas en la superficie de la fractura con frecuencia, pero no siempre, señalar de nuevo la ubicación desde la cual se origino la fractura, en el caso de acero plano, como chapa, placa o barras planas, y también aceros endurecidos hay una marca característica en forma de v que apuntan hacia el origen de la factura, en muchos caos, estas marcas son extremadamente finas y muy difíciles de reconocer a menos que se coloque una luz para que roce las proyecciones de la textura de la superficie [8].

3.4. Mecánica de la fractura

La mecánica de la fractura es la ciencia de predecir el transporte de capacidad de carga de estructuras y componentes que contienen grietas. La mecánica de fractura se basa en una descripción matemática del campo de estrés que rodea una grieta en un cuerpo cargado. Dos categorías de fractura mecánica son la mecánica de fractura elástica lineal (LEFM) y mecánica de fractura elasticoplastica (EPMF).

LEFM se usa cuando la punta de la grieta es fuerte y solo hay una pequeña cantidad de deformación plástica en o cerca de la punta de la grieta, LEFM se utiliza para metales de alta resistencia, aceros de alta resistencia, titanio y aleaciones de aluminio. EPMF se usa cuando la punta de la grieta no es nítida y hay algo de plasticidad en la punta de la grieta. EPMF se usa en el diseño de materiales, tales como aceros de menor resistencia y mayor dureza [6].

3.5. Fatiga

La fatiga es el proceso de cambio estructural progresivo que ocurre en un material sometido a condiciones que producen tensiones y tensiones fluctuantes en algún punto o puntos y que pueden culminar en grietas o fracturas completas después de un número suficientes de fluctuaciones. Las consecuencias de la fatiga y costos de fractura, agrietamiento por corrosión, y mal funcionamiento del equipo no es deseado, es peligroso y costoso. El fenómeno fatiga ha sido durante mucho tiempo estudiado por investigadores y prestada atención por ingenieros y diseñadores.

Como cuestión de hecho, entre los cinco posibles mecanismos de falla que pueden poner en peligro la resistencia del material, es decir, rotura o fractura frágil, flujo plástico o fractura dúctil, fatiga, corrosión y fluencia, solo hay uno a saber, la corrosión que puede generar más

daño que la fatiga. En la medida en que los humanos siempre deseemos usar más bienes y poner más demandas en las cosas que podemos diseñar y producir, el desafío de la fatiga siempre estará con nosotros. El proceso de la fatiga ha demostrado ser muy difícil de estudiar. No obstante, un amplio progreso en la comprensión de las fases de fatiga se ha realizado en los últimos 100 años más o menos. Ahora se acepta en general que cuatro fases distintas de fatiga pueden ocurrir:

- Nucleación de grietas.
- Propagación de grietas estructuralmente dependiente.
- Inestabilidad e insuficiencia final.
- Propagación de grietas que se caracteriza por fractura elástica lineal mecánica, mecánica de fractura elástica y plástica o fractura completamente plástica mecánica.

3.6. Historia de la fatiga

Quien lo haya llamado primero quizás fue el inglés Braithwaite en 1854 o más a lo mejor el francés Poncelet ya en 1839, el termino de fatiga es ciertamente el más apropiado para definir precisamente esta acumulación continua de daño en el material que se debilita y finalmente falla porque, desafortunadamente, este daño no es recuperable y no sana como en los humanos después de descansar durante un tiempo. La fátiga comienza a principio a principios de 1800 u sigue en desarrollo industrial de este periodo particular, impulsado por las dos principales industrias de la época, la minería y en particular la industria ferroviaria.

Probablemente, el primer artículo publicado sobre fatiga y el primer experimento de fatiga en el mundo fue dirigido en Alemania por Albert en 1837 y estaba preocupado por la falla continua de las cadenas de transporte en la mina. Pero fue el sector ferroviario el que dio el mayor impulso a la fatiga y la mejoraría más significativamente para el diseño. Era de hecho, un ingeniero ferroviario alemán, Wöhler, quien en 1858 inicio estos estudios eso llevaría al descubrimiento de que el daño por fatiga depende de la amplitud de estrés cíclico y la formulación, en 1870, de la ley fundamental nombrada después a él la ley de Wöhler los materiales pueden ser inducidos a fallar por muchas repeticiones de tensiones, todas las cuales son más bajas que la fuerza estática. Sin embargo, no fue antes de 1924, 50 años después del trabajo de Wöhler, que el primer libro de texto sobre fatiga será publicado por el inglés Gough. Antes de que se publicara el primer libro sobre fatiga, fue en 1910 que se pudo mirar los resultados de Wöhler se hicieran presentados en una escala algorítmica, llamadas las curvas S - N tan familiares hoy en día para los ingenieros. La gran aceleración en el estudio de fatiga apareció entre los años 1939 y 1960 cuando la atención de los científicos y el mundo tecnológico se movió del sector ferroviario al aire y al espacio, siendo más avanzado

y fuertemente impulsado por las necesidades de la guerra y más tarde por los militares y competencia comercial [9].

3.6.1. Diferentes fases de vida de la fatiga

Las investigaciones microscópicas en el comienzo del siglo 20 tienen demostrado que los núcleos de grietas de fatiga comienzan como microgrietas invisibles en bandas deslizantes. Después de que se volvió más información microscópica sobre el crecimiento de pequeñas grietas, resultó que la nucleación de microgrietas generalmente ocurre muy temprano en la vida de la fatiga. Se obtuvieron indicaciones de que puede tener lugar casi inmediato si se aplica una tensión cíclica por encima del límite de fatiga. Los límites de fatiga es el nivel de estrés cíclico por debajo del cual no falla si se llega a ocurrir una fatiga. El punto importante es que la vida de fatiga hasta que falla consiste en dos periodos que son el periodo de iniciación de grieta y el Periodo de crecimiento de grieta.

La iniciación de grietas por fatiga es consecuencia del deslizamiento cíclico. Implica deformación plástica cíclica, o en otras palabras, actividades de dislocación. Esta microplasticidad preferiblemente ocurre en granos en el material de superficie debido a la menor restricción en el deslizamiento. En la superficie libre de un material, el material circundante esta presente en un solo lado. El otro lado es el entorno, normalmente un entorno gaseoso o un líquido. Como consecuencia, la deformación plástica en los granos de superficie es menor restringido por granos vecinos que en granos subsuperficiales, puede ocurrir a un nivel de estrés más bajo . El deslizamiento cíclico requiere un esfuerzo de cizallamiento cíclico.

En el inicio de las grietas se toma en cuenta que a). Un solo ciclo es suficiente para crear una intrusión microscópica en el material, que de hecho es una microfisura, b). El mecanismo que ocurre en el primer ciclo puede repetirse en el segundo ciclo, y en ciclos subyacentes y causa la extensión de la grieta de cada ciclo, c). Se puede esperar a que ocurra la primera iniciación de una microfisura a lo largo de la banda deslizante.

Porque una distribución de esfuerzos no homogénea, un pico de estrés ocurre en la superficie. Además, la rugosidad de la superficie también promueve la iniciación de la grieta en la superficie del material. Otras condiciones de superficie con un efecto similar son los hoyos de corrosión y el daño de fatiga por frotamiento ambos ocurriendo en la superficie del material. Una conclusión que se puede sacar de esto es que el periodo de iniciación de grietas en la fatiga es un fenómeno de la superficie del material [10].

En el Periodo de crecimiento de grieta, mientras el tamaño de la microfisura siga siendo del orden de un solo grano, la microfisura esta obviamente presente en el material elásticamente anisotrópico con una estructura cristalina y una serie de diferentes sistemas de deslizamien-

to. La microfisura contribuye a una distribución no homogéneas en un nivel micro, con una concentración de tensión en la punta de la microfisura. Por otra parte, si la grieta esta creciendo en el material en algunos granos adyacentes, la restricción en los desplazamientos de deslizamiento aumenta debido a la presencia de los granos vecinos. La tasa medida de crecimiento disminuyo el incremento de la longitud de la grieta cuando el punto de la grieta se acerco al primer límite del grano. Después de penetrar a través del límite de grano la tasa de crecimiento de grietas aumento durante el crecimiento en el siguiente grano, pero disminuyo nuevamente al acercarse al segundo límite del grano. Después de pasar el límite del grano, la microfisura continúo creciendo con una tasa de crecimiento constante.

El frente de la grieta debe seguir siendo coherente frente a la fisura, la grieta no puede crecer en cada grano de forma arbitraria y cualquier tasa de crecimiento independientemente del crecimiento de grietas en los granos adyacentes. Esta continuidad evita grandes gradientes de la tasa de crecimiento de grietas a lo largo del frente de fisura, tan pronto como la cantidad de granos a lo largo del frente de la grieta se vuelva suficientemente grande, el crecimiento de grietas ocurre como un proceso más o menos continuo a lo largo de todo el frente de la grieta [10].

3.7. Fractura y fatiga de los aceros estructurales

La propagación de grietas por fatiga de los aceros estructurales a menudo se considera relativamente insensible a los cambios entre grados. Sin embargo, se ha demostrado que la limpieza del acero tiene una influencia significativa en el comportamiento de la velocidad de crecimiento de la grieta por fatiga dentro de un acero [2].

3.7.1. Comportamiento de la vida de fatiga

En general la fatiga se clasifica como de ciclo bajo o ciclo alto, la fatiga de ciclo bajo está más relacionada con el análisis de la deformación plástica localizada, que es esencialmente la causa del inicio de la ruptura por fatiga. Como tal, el comportamiento de fatiga bajo el ciclo generalmente se determina a partir de pruebas de fatiga basadas en tensión. Este método es útil porque proporciona una base para relacionar el comportamiento de fatiga de los componentes con regiones localizadas de deformación plástica en muescas u otros detalles de diseño.

La fatiga de alto ciclo de los aceros a menudo se expresa por un límite de fatiga, que es el valor del estrés por debajo del cual el acero puede presumiblemente soportar una cantidad finita de ciclos. El límite de fatiga no debe confundirse con la resistencia a la fatiga, que es la tensión de resistencia bajo carga de fatiga durante un número específico de ciclos. La resistencia a la fatiga se usa cuando los materiales lo hacen no tiene un límite aparente de fatiga. En gran medida, el límite de fatiga depende de la resistencia a la tracción (inde-

pendientemente si el fortalecimiento es logrado a través del trabajo en frío, la aleación de solución sólida o el endurecimiento por precipitación, el endurecimiento por transformación).

Sin embargo, el límite de fatiga como una relación de la resistencia a la tracción final depende de varios factores, como el material, la carga y el medio ambiente. Bajo ciertas condiciones por ejemplo, fatiga por corrosión, ciertas condiciones del material o tensión superficial, no se puede observar un límite de fatiga en un acero, si se observa un límite de fatiga, normalmente ocurre por encima de 106×10^6 hasta los 108×10^6 ciclos [2].

3.8. Fatiga de contacto de aceros endurecidos

La fatiga de contacto es el agrietamiento de una superficie sometida a tensiones Hertzianas alternantes producidas bajo condiciones combinadas de carga rodante y deslizante. Además del agrietamiento, la fatiga por contacto puede dar lugar a alteraciones microestructurales, incluidos cambios a la austenita retenida, el estrés residual y la morfología martensítica. Cuando las fuerzas de tracción son insignificantes, este fenómeno se conoce como fatiga de contacto rodante.

La fatiga de contacto se encuentra con mayor frecuencia en rodamientos y engranajes de elementos rodantes, donde las tensiones superficiales son altas debido a la concentración de cargas que se repiten muchas veces durante el funcionamiento normal. El mecanismo de fatiga de contacto se puede entender en términos de varias fuentes de concentración de estrés, o aumento de estrés, dentro del campo de estrés hertziano macroscópico. La ubicación del inicio de fatiga de contacto depende de la carga normal aplicada, la magnitud de la tracción superficial, el tipo de ubicación y la ubicación de los elevadores de tensión, lo que resulta en la iniciación de la fatiga superficial o subperiférica.

La iniciación de superficie es usualmente controlada por asperezas, óxidos, defectos y geometría, mientras que el inicio de la subperficie se debe a inclusiones, carburos, defectos y límites de grano. Factores materiales y ambientales junto con la carga, el contacto, la geometría, la microtopografía de superficie y las condiciones de lubricación son las principales variables que se combinan para determinar el modo predominante de daño por fatiga de contacto [1].

3.8.1. Cambios microestructurales de la fatiga de contacto

Las tensiones de contacto cíclico causan cambios microestructurales, que son importantes porque están relacionados con los niveles de estrés y la cantidad de ciclos, los cambios microestructurales generalmente observados en las microestructuras martensíticas de la fatiga por contacto se conocen como áreas de grabado oscuro, mariposas y bandas blancas. De estos tres

cambios microestructurales, el llamado bandas blancas se producen a partir de muchos ciclos (100 millones aproximadamente) después del grabado oscuro y las mariposas. Diferentes investigadores han utilizado diferentes términos para identificar y describir los varios cambios estructurales, pero la mayoría probablemente describa solo algunos cambios microestructurales diferentes. La distinción entre aceros endurecidos y carburizados también es importante.

Las alteraciones microestructurales son diferentes para aceros tipo 52100 que para aceros carburizados. Los carburos no disueltos en 52100 y el nivel superior de la austenita retenida en los aceros carburados contribuyen a esas diferencias. Diferencias adicionales como dureza y los gradientes de tensión residual que se encuentran en los aceros carburizados pueden influir en el tipo y la ubicación de alteraciones de la microestructura con respecto a los niveles de carga y ciclos de estrés [7].

3.9. Apariencia de fractura

La fatiga de acero endurecido bajo el estrés de contacto cíclico ha sido objeto de una amplia investigación utilizando análisis y métodos experimentales. Un número cada vez mayor de publicaciones ha revelado una gran variación de fatiga por contacto, resistencia de materiales similares cuando se prueba bajo diferentes condiciones de geometría de contacto, velocidad, lubricación, temperatura y deslizamiento en combinación con rodar.

Se ha reconocido la existencia de varios modos distintos de daño por fatiga de contacto, pero los factores que controlan la nucleación y la propagación de cada tipo solo se entienden parcialmente. El mecanismo básico de iniciación y propagación de fatiga por contacto es el mismo, independientemente de la aplicación, de modo que los cojinetes, engranajes y otros componentes con tensión de contacto fallen de la misma manera. Aunque las industrias de rodamientos y engranajes han utilizado una nomenclatura completamente diferente para describir la fatiga de contacto en el pasado, la nomenclatura actual utilizada por ambas industrias es muy similar.

La Norma Nacional Americana ANSI / AGMA 1010-E96 publicado en el año 1996 representa varios años de trabajo que hizo hincapié en la nomenclatura estandarizada para los modos de falla que es compatible con las industrias de engranajes y cojinetes. El origen y la apariencia de la fractura de un componente dañado por la fatiga de contacto es una función de los esfuerzos aplicados y la selección del material, con variaciones en los esfuerzos aplicados que resultan de factores ambientales [2].

3.10. Factores que influyen la vida por fatiga de contacto

Los factores que influyen en la vida útil de la fatiga por contacto de los rodamientos y engranajes de acero endurecido se pueden clasificar en general en cuatro categorías tales como material, lubricación y acabado superficial, precisión dimensional y condiciones ambientales. La influencia de varios factores, como la austenita retenida y la dureza, difícil de resolver típicamente, a medida que la austenita aumenta la dureza disminuye. Por lo tanto, la selección del material se basa principalmente en el rendimiento deseado, problemas tales como desgaste, fatiga, estabilidad dimensional, contaminación de escombros y experiencia pasada con un acero dado. Varios modos distintos de fatiga por contacto pueden causar iniciación de grietas y propagar independientemente a diferentes velocidades, por lo tanto, el fenómeno parece estar más influenciado por altamente condiciones localizadas que por las propiedades generales del material a granel. Las mediciones de fatiga de contacto en aceros endurecidos indican un aumento de la vida con el aumento de la dureza de los componentes, aunque hay un rango óptimo de dureza que depende de la aplicación para garantizar la vida máxima de fatiga de contacto.

Los factores distintos de una microestructura predominante martensítica que influye en la fatiga por contacto son inclusiones, carburos o otros precipitados duros de la segunda fase contenido de austenita retenida, productos de transformación no destructivos (NMTP), tamaño de grano, tensión residual, métodos de tratamiento térmico y tipo de acero. Las inclusiones no metálicas han demostrado ser las de más factor influyente en la vida de contacto del acero endurecido. De las inclusiones no metálicas presentes en el acero, la mayoría perjudicial de estos es la alúmina, seguido de los silicatos.

Los tipos y tamaños de inclusiones presentes en el acero se rigen principalmente por la práctica siderúrgica, y su frecuencia o severidad se conoce como limpieza. Un tipo de óxido que ha demostrado ser perjudicial para la resistencia a la fatiga por contacto se conoce como oxidación intergranular. Estos óxidos se forman a lo largo de la superficie de un acero durante la carburación de gas debido al potencial de oxígeno presente en la atmósfera carburante en combinación con la presencia de elementos que tienen una alta afinidad por el oxígeno, como el silicio, cromo y manganeso. Estos óxidos son importantes en aplicaciones tales como engranajes para los cuales la superficie de contacto final permanece en la condición de cementación [6].

4 Procedimiento de análisis

4.1. Inspección Visual

El primer paso, que se lleva a cabo para el reconocimiento visual fue el estudio de la pieza a la cual se le realizará el análisis de la falla por fatiga y estructura, se tuvo en cuenta un guía para macho para molde de inyección Ilustración 4-1-(a); el segundo paso, se realiza un corte transversal aproximadamente 3 centímetros atrás de la zona de falla, como se muestra a continuación en la Ilustración 4-1-(b).



Figura 4-1: a) Guía para macho para molde de inyección. b). Corte transversal guía para macho.

El tercer a seguir, se comienza con el pulido de la pieza para la eliminación de rayas de la superficie cortada, con lijas diferentes tamaños de grano los calibres utilizados para este proceso son calibre 40, calibre 60, calibre 100, calibre 240, calibre 320, calibre 600, calibre 1000, para finalizar con un pulido con paño y alúmina hasta obtener el pulido brillo espejo deseado.

Una vez obtenido el pulido deseado se lleva a cabo el análisis metalográfico de la pieza, el cual es realizado con los equipos e instrumentos proporcionados por el laboratorio de la Fundación Universitaria Los Libertadores, acatando el reglamento de este igualmente con la supervisión de monitores y docente a cargo.

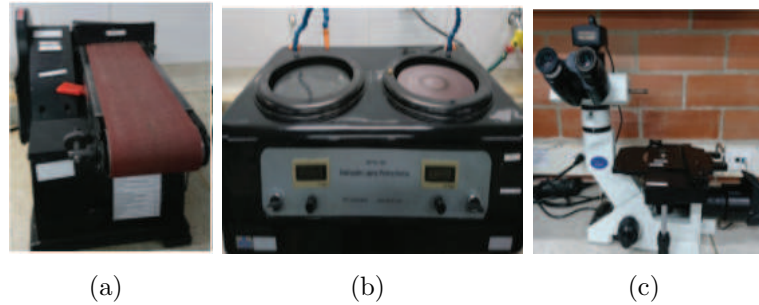


Figura 4-2: a) Máquina de pulido. b). Máquina de pulido con discos y lacado metalográfico. c). Microscopio metalográfico OLYMPUS GX.

4.2. Ensayo de Dureza Rockwell

El método para determinar la dureza se realiza a través de un ensayo de dureza Rockwell, ya que es un procedimiento sencillo y muy simple. Para obtener un resultado, se mide la profundidad de penetración bajo la aplicación de una carga determinada con resultados de lectura directa. Las cargas están dadas en Newton (N), son medidas en Kilogramo-Fuerza (Kgf), bajo la normatividad ISO 6508 que tiene un rango de carga entre 15Kgf - 150Kgf y ASTM E18 (ASTM, E: ASTM E18-15 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials. En: Annual Book of ASTM Standards (2003)) que tiene un rango de carga entre 15Kgf - 150Kgf. El equipo utilizado para elaborar la prueba de dureza fue el durómetro marca Brooks Inspection Equipment la cual se configuró una carga principal 150 kg, el cual se encuentra ubicado en el laboratorio de tratamientos térmicos de la Fundación Universitaria los libertadores.

Se realiza dos mediciones a la parte superficial de la pieza, y no la parte interna (núcleo), ya que la pieza se fractura de tal forma que no deja hacer una medida correcta en la parte interna de esta.

4.2.1. Resultado de dureza

Durante el ensayo de dureza se realizaron cuatro mediciones de las cuales dos eran en el núcleo y dos eran en la superficie perimetral de la pieza, por deformidades en la sección de la pieza solo se tomaron las lecturas perimetrales relacionadas a continuación:

- Medición 1: Se toma en la superficie perimetral de la pieza, proyectando un resultado 60 HRC.
- Medición 2: Se toma en la superficie perimetral de la pieza, proyectando un resultado 70 HRC.

Se toma la lectura en HRC ya que las lecturas en HRB están fuera del rango, el durómetro Brooks entrega ambas lecturas y en las fuentes de bibliográficas este tipo de aceros se manejan en escala HRC.

5 Análisis metalográfico

Con el análisis metalográfico que llevamos a cabo para la probeta, nos permite identificar la estructura del material, es decir, podemos identificar los componentes del acero objeto de análisis para llegar a la conclusión si las propiedades del material eran las apropiadas para el tipo de trabajo al que estaba sometida la pieza o si fue sometido a un proceso correcto o incorrecto y así mismo determinar qué tan confiable es la pieza y también poder identificar cuáles las posibles fueron las causas para que dicho componente fallara. Se elaboro el análisis metalográfico teniendo en cuenta la normatividad Internacional (ASTM, E: ASTM E340-00 - Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys [4].) y (ASTM, E: ASTM E3-01 - Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens [3]).

5.1. Metalografía Guía Macho de Molde de Inyección

Al acabar de darle brillo espejo a la superficie de la pieza escogida de la guía de molde de inyección, aplicamos un reactivo que es Nital al 10 % (10 % de ácido nítrico y 90 % de alcohol etílico). El siguiente paso es llevar la pieza al microscopio metalográfico OLYMPUS para poder realizar el registro fotográfico de la microestructura de la pieza, tomados en varios aumentos dando resultado las siguientes microestructuras mostradas en la figura **5-1**.

Observando la Figura **5-1-c** se puede ver claramente la distribución de perlita y de las formas poligonales en la parte blanca es austenita, la proporción de áreas blancas y negras podemos determinar que el porcentaje de carbono en la pieza es equivalente a 48 % como se muestra en la Figura **5-2-a** donde se delimita el área del grano y se compara con el área de muestra, la presencia de austenita se justifica ya que se tiene un cierto porcentaje de cromo, níquel y manganeso lo que localiza el hacer en la familia de los SAE AISI 43XX.

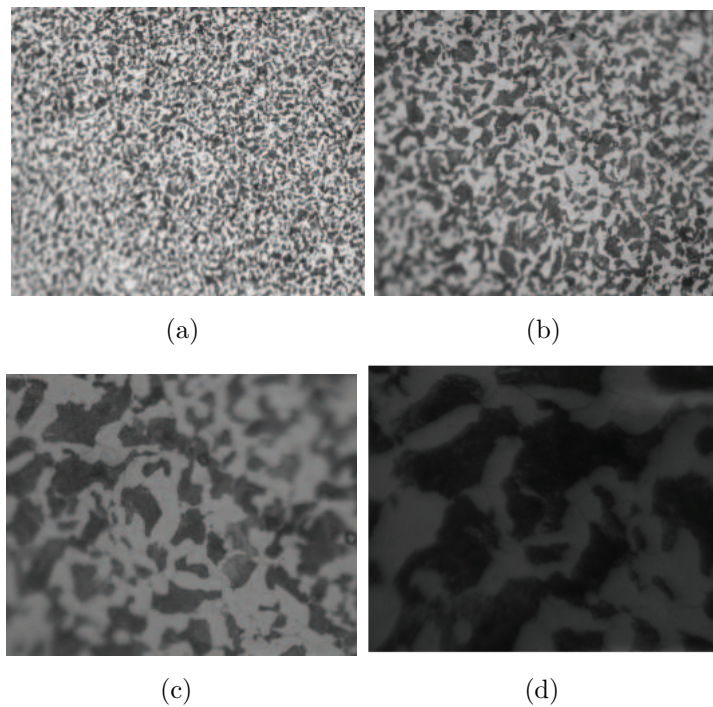


Figura 5-1: a) Guía para macho para molde de inyección microestructura a 100X. b) Microestructura 200X. c). Microestructura 500X. d). Microestructura 1000X.

Después de haber mirado los análisis metalográficos haces la prueba de dureza en la parte superficial de la pieza, dándonos el siguiente resultado:

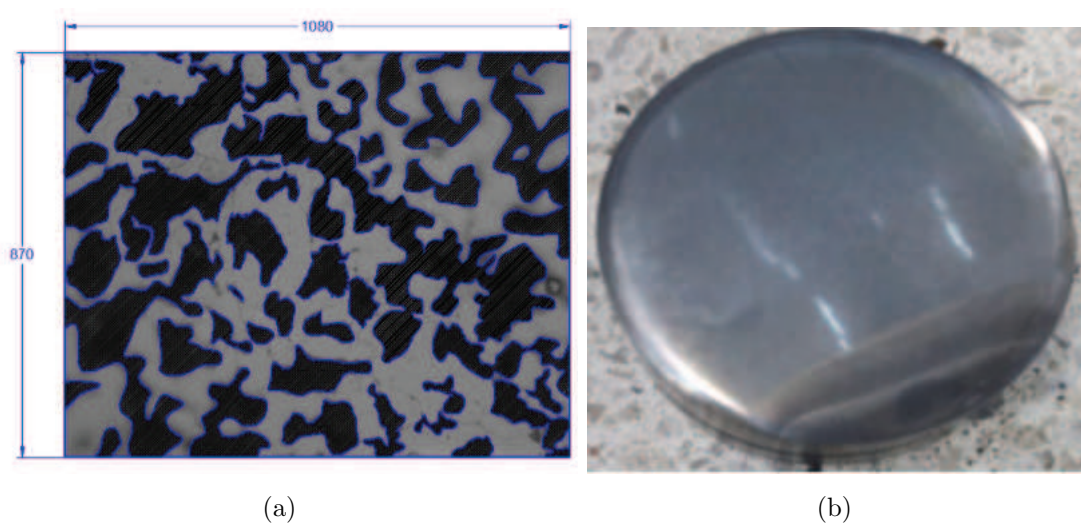


Figura 5-2: a) Área del grano. b) Pieza atacada químicamente.

En la Figura 5-2-b podemos observar un anillo en la parte perimetral de la pieza que muestra un tratamiento térmico para aumentar las propiedades mecánicas. A partir de las durezas

obtenidas, se observa que es un acero hipereutectoide ya que las durezas que nos muestra el durómetro BROOKS fueron durezas de un rango entre 60 HRC y 70 HRC. Es por esto por lo que se puede afirmar que es un acero 4340 normalizado. Este tipo de aceros se utiliza principalmente en engranajes y ejes de transmisión de potencia, tren de aterrizaje de aviones y otras partes estructurales y se utilizan para resistir rutinas cíclicas de alto esfuerzo.

5.2. Análisis de falla

A continuación el análisis de falla de la pieza mecánica estudiada, con base en lo encontrado en esta pieza durante el reconocimiento visual, análisis metalográfico, de una hipótesis de lo que pudo haber ocurrido para que fallara. De la pieza sabemos de donde es como se muestra en la ilustración, para que fue diseñada y el trabajo que realiza. Se complementa con un concepto basado en la evidencia tangible que se obtuvo del análisis de la pieza. De la pieza mecánica a través del reconocimiento visual se determinó una falla por fatiga como se puede observar en la ilustración -a y b, que es una concentración de esfuerzo a la cual estuvo expuesta el material de la pieza, por cuenta de repeticiones de esfuerzo de cizalladura como se observa en la topografía de la falla.

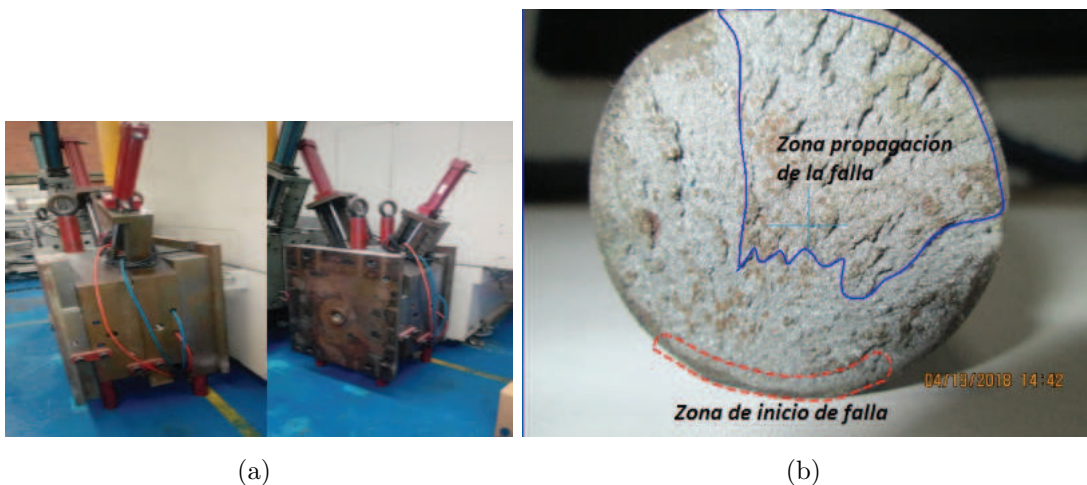


Figura 5-3: a) Molde de inyección YEE 6" X4". b). Zona de inicio y propagación de la falla.

La topografía de la falla nos muestra que empezó por el mecanizado del ducto de lubricación, el cual tenía fisura y con la repetición del trabajo hizo que se desprendiera grano como se puede evidencia en las líneas de propagación de las grietas que se observa en la ilustración.

5.3. Análisis causa de raíz

Después de hacer el respectivo análisis metalográfico donde se determino el tipo de aleación del elemento objeto de análisis y las propiedades mecánicas del mismo, se procede con el análisis de falla argumentado en las condiciones de trabajo reales del elemento y con base en los resultados generar una hipótesis sobre las causas del fallo. A continuación se evidencia en la Figura 5-4 el análisis de causa raíz por el método Ishikawa basados en las condiciones generales que pudieron dar origen a la falla.

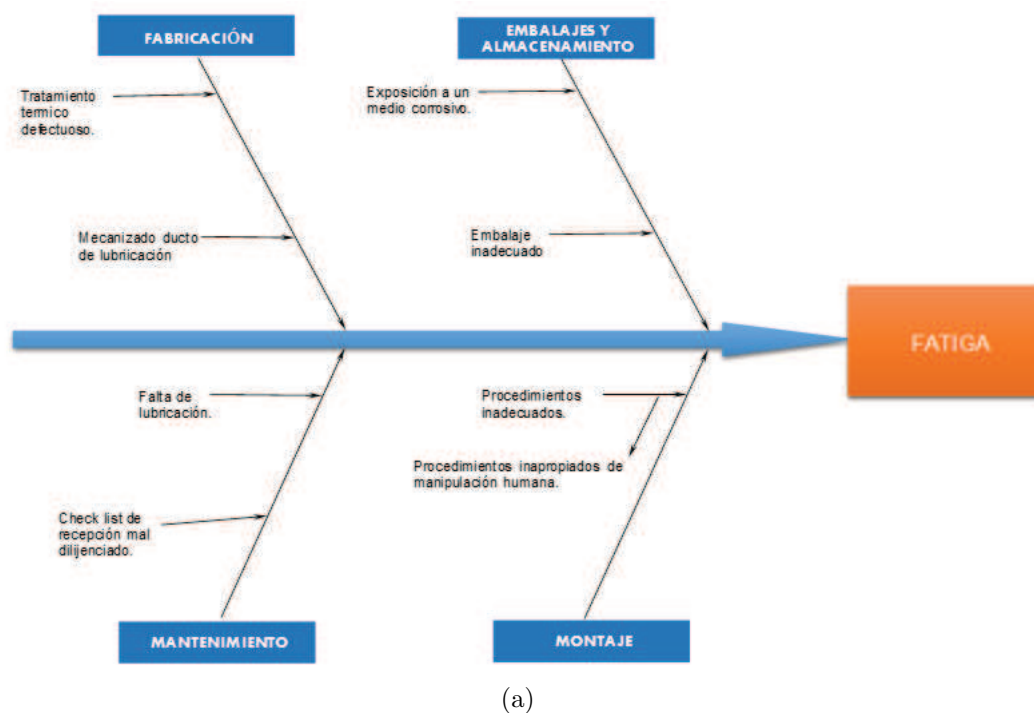


Figura 5-4: a) Análisis causa raíz.

6 Conclusiones

- Después de realizar este informe y analizar sus resultados, pudimos concluir que el análisis de falla es una herramienta indispensable dentro del diseño mecánico en ingeniería mecánica, la cual nos permite determinar en un ambiente controlado las diferentes condiciones de trabajo de los materiales de ingeniería, sus causas de falla de acuerdo a las especificaciones con las que se diseña y fabrican estos elementos, con estos análisis podemos prever en futuros diseños aquellos factores que pueden ocasionar una falla.
- Como resultado del análisis de falla y análisis de causa raíz se evidencian una serie de eventos que afectaron el desempeño de la pieza analizada tanto a nivel de diseño y fabricación en el origen del equipo, como en las condiciones de embalaje, almacenaje, mantenimiento y montaje en el lugar de destino. Todos estos factores aportaron de cierta manera en el funcionamiento del equipo, lo que desencadenó en una falla por fatiga.
- Como un aporte para nuestra vida profesional está el interactuar con profesionales de esta rama de la ingeniería, poner en práctica los conceptos teórico-Prácticos que hemos obtenido a lo largo de la carrera y generar competencias de trabajo en equipo y capacidad interpretativa.

Bibliografía

- [1] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, George F.: *ASM handbook*. Vol. 9: *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004
- [2] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, W.T. ; SHIPLEY, R.J.: *ASM handbook*. Vol. 11: *Failure Analysis and Prevention*. ASM International, 2002
- [3] ASTM, E: ASTM E3-01 - Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2001)
- [4] ASTM, E: ASTM E340-00 - Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2013)
- [5] CAMPBELL, F.C.: *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*. ASM International, 2012 (Ingeniería e ingeniería civil). – ISBN 9781615039760
- [6] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987
- [7] DAS, Amiya K.: *Metallurgy of failure analysis*. Vol. 132. McGraw-Hill New York, NY, 1997
- [8] FORREST, P.G.: *Fatigue of Metals*. Elsevier Science, 2013. – ISBN 9781483160733
- [9] MILELLA, P.P.: *Fatigue and Corrosion in Metals*. Springer-Milan, 2012. – ISBN 9788847023369
- [10] SCHIJVE, J.: *Fatigue of Structures and Materials*. Springer Netherlands, 2008. – ISBN 9781402068089
- [11] TAWANCY, H.M. ; UL-HAMID, A. ; ABBAS, N.M.: *Practical Engineering Failure Analysis*. CRC Press, 2004 (Mechanical Engineering). – ISBN 9780203026298