



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de falla de punzones de taladro para asfalto y concreto

Manuel Fernando Yaruro Barranco

Alvaro Escobar Serna

Luis Miguel Arenas Muñoz

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D. C. , Colombia

2018

Análisis de falla de punzones de taladro para asfalto y concreto

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

Ingeniero Mecánico

Director:

Magíster en Ingeniería Mecánica - Ing. Edwin Darío Cendales Ladino

Línea de Investigación:

Análisis de falla, fractografía e ingeniería de superficies.

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D. C. , Colombia

2018

Dedicatoria

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

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

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

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Lista de Figuras

2-1.	Variación de la resistencia a la fatiga con la temperatura.	10
4-1.	a). Punzones utilizados en el presente estudio. b). Proceso de corte de los punzones.	20
4-2.	Corte realizado en el punzón de concreto y asfalto.	21
4-3.	a). Microscopio metalográfico OLYMPUS GX 41- Máquina de pulido b). Máquina de pulido con discos y lacado metalográfico.	21
4-4.	Equipo utilizado para la medición de dureza.	22
4-5.	a). Mediciones de dureza sobre la sección del punzón de concreto b). Mediciones de dureza sobre la sección del punzón de asfalto.	23
5-1.	a). Punzón para asfalto microestructura a 100X b). Microestructura a 200X c). Microestructura a 500X d). Microestructura a 1000X	25
5-2.	a). Punzón para concreto microestructura a 100X b). Microestructura a 200X c). Microestructura a 500X d). Microestructura a 1000X	26
6-1.	a). Zona de fractura Punzón para concreto b). Zona de fractura Punzon para asfalto	28

Resumen

En el presente proyecto se realizó el análisis de falla para dos diferentes componentes mecánicos, en este caso un punzón de taladro para remover asfalto y un punzón de taladro para remover concreto. En el análisis de falla que se llevó a cabo inicialmente se hizo la identificación e inspección visual de los diferentes componentes, paso seguido realizamos el análisis metalográfico para identificar el contenido de constituyentes en su microestructura y así poder saber que material era cada componente e identificar las causas de las fallas generadas, como tercer paso se realizó ensayo de dureza Rockwell con la ayuda de los diferentes equipos suministrados por la Fundación Universitaria Los Libertadores. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir el método por el cual se presenta la falla en cada uno de los diferentes componentes.

Punzón, concreto, asfalto, inspección, análisis, metalografía, dureza, falla, fatiga.

Abstract

In the present project, the failure analysis was carried out for two different mechanical components, in this case a drill punch to remove asphalt and a drill punch to remove concrete. In the failure analysis that was carried out initially was made the identification and visual inspection of the different components, step followed we carried out the analysis metallographic to identify the content of constituents in its microstructure and thus to know that material was each component and identify the causes of the failures generated, as a third step was performed Rockwell hardness test with the help of the different equipment provided by the Fundación Universitaria Los Libertadores. From the results obtained it can be concluded the method by which the failure is presented in each one of the different components.

Keywords: Punch, concrete, asphalt, inspection, analysis, metallographic, hardness, fail, fatigue.

Contenido

Resumen	x
1. Objetivos	2
2. Introducción	3
2.1. Causas de las Fallas	4
2.2. Generalidades de la Fatiga	5
2.3. Etapas de Fallas por Fatiga	7
2.4. Límite y Resistencia a la Fatiga	8
2.5. Efecto de la Temperatura	9
2.6. Fatiga a Temperatura Baja	10
2.7. Fatiga a Temperatura Alta	10
2.8. Modelos de Falla por Fatiga	10
2.9. Factores que Modifican la Resistencia a la Fatiga	11
2.10. Factor de Seguridad a la Fatiga	12
3. Relación entre Fatiga y Fractura	13
3.1. Características de las Fracturas por Fatiga	13
3.2. Fractura y Fatiga-Propiedades de los aceros estructurales	14
3.3. Tenacidad a la Fractura	15
3.4. Fatiga-Crecimiento de grietas	15
3.5. Comportamiento de la vida de fatiga	15
3.6. Resistencia a la fatiga por corrosión	16
3.7. Resistencia a la fatiga y microestructura de las aleaciones ferrosas	16
3.8. Propiedades de fatiga y fractura de los aceros fundidos	17
3.9. Correlaciones entre Estructura y Propiedades	17
3.10. Fractura Frágil y Fatiga	18
4. Procedimiento de análisis	20
4.1. Inspeccion Visual	20
4.2. Ensayo de Dureza Rockwell	21
4.2.1. Punzón para Concreto	22
4.2.2. Punzón para Asfalto	23

5. Análisis Metalográfico	24
5.1. Metalografía Punzón para Asfalto	24
5.2. Metalografía Punzón para Concreto	25
6. Análisis de Falla	27
6.1. Punzón para Asfalto	27
6.2. Punzón para Concreto	29
7. Conclusiones	30
Bibliografía	31

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a un punzón para concreto y un punzón para asfalto 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 publintex.

2 Introducción

Cuando un producto ingenieril cesa de realizar una o más de sus funciones, mucho antes del fin de su vida útil, se dice que ha fallado. Estas fallas pueden causar pérdidas de vidas, paradas imprevistas de planta, incrementos de los costos de mantenimiento y reparación. En razón de sus aspectos legales, los resultados de los análisis de fallas pueden ser usados como base de litigaciones y reclamos de seguros [6].

Los informes de los análisis de fallas pueden ser leídos por una vasta audiencia, incluyendo expertos y neófitos. De aquí que los informes tienen que ser claramente escritos evitando el uso de un lenguaje impreciso. Por otra parte, al poder ser usados también en ámbitos judiciales, es imperativo usar los términos técnicos correctos con definiciones claras para evitar confusiones. El perfil del analista de fallas debe incluir un adecuado conocimiento de varias disciplinas, particularmente en ciencia e ingeniería de materiales. Esto define el carácter multidisciplinario del análisis de falla.

El análisis de falla es un examen sistemático de la pieza dañada para determinar la causa raíz de la falla y usar esta información para mejorar la confiabilidad del producto. El análisis de falla está diseñado para: a. Identificar los modos de falla. b. Identificar el mecanismo de falla. c. Determinar la causa raíz. d. Recomendar métodos de prevención de la falla.

Cuando el material de un componente mecánico falla, este no puede cumplir la función para el cual fue diseñado. Esto se puede observar con la presencia y crecimiento de grietas dando como resultado la rotura del mismo. Muchos componentes pueden ser sometidos a cargas variables y cargas estáticas, cuando un componente tiene gran carga estática, él mismo puede fallar si esta carga se repite muchas veces. Mientras que las cargas variables producen grietas a medida que se repiten, por tal motivo se produce la fractura del componente, a esto le llamamos fatiga.

Las fallas en los materiales pueden ocasionar altos costos, económicos, en la parte de producción y también la vida de los operarios, es por esto que se debe realizar un análisis el cual nos arroje un resultado y nos proporcione información del porque falló el material, ya que a partir de estos resultados se puede identificar en que parte estamos errados al momento de realizar los diseños de la pieza y la selección del material.

2.1. Causas de las Fallas

En ingeniería, cuando se están identificando las causas del por qué un material falla pueden ser bastantes, pero ante todo esto va enlazado al error humano, implicado por descuido, negligencia y omitiendo factores importantes que se deben tener presente [1]. Es por esto que mencionaremos algunas fallas:

- Selección no apropiada del material: Esta causa de falla se evidencia cuando no identificamos cual es el comportamiento ideal del material con el que estamos fabricando el componente industrial. La selección de material puede verse afectado por algunos criterios de rendimientos, sus propiedades, propósitos en los cuales se van a aplicar; es por esto que debemos estar muy atentos a la selección apropiada para el nuevo diseño.
- Diseño: Se dice que un componente tiene falla por diseño cuando no se tuvo en cuenta las condiciones en las cuales dicho componente estará operando. El proceso de diseño se torna dinámico así como la selección del material adecuado ya que van de la mano teniendo en cuenta como lo son la geometría y dimensiones de los componentes.
- Manufactura con defectos: Esta causa de falla se presenta a menudo por la no conformidad de las especificaciones, insatisfacción por parte del usuario y el no cumplimiento de las normas. Cuando se incumplen las especificaciones de fabricación, el cliente no siente la satisfacción necesaria de la calidad del componente obtenido. Cuando un componente tiene un defecto de manufactura, este debe ser desechado de la línea de producción ya que no cumple con los requisitos mínimos. Los defectos de manufactura también se pueden evidenciar cuando tenemos uniones soldadas y fundiciones, en estas podemos observar grietas y partes porosas, en las cuales hay concentración de esfuerzos que pueden ocasionar la ruptura del componente o de la unión.
- Tratamientos térmicos defectuosos: Cuando no se toman los cuidados necesarios al momento de realizar un tratamiento térmico, en el material se pueden producir imperfecciones tales como grietas muy pequeñas que lo pueden conllevar a una falla. En el caso de las aleaciones de aluminio térmicamente de alta resistencia las trayectorias de estas grietas son intergranulares, ya que los tratamientos térmicos para llevar a cabo una alta resistencia en ningún momento eliminan el potencial electroquímico de los centros de grano.
- Montaje: Cuando se tienen maquinas las cuales requieren de precisión al momento del ensamble, todos sus componentes deberán estar dentro de las tolerancias requeridas, para que no se presenten desalineaciones.
- Mecanizado: Durante el mecanizado de algún componente, si este posee marcas, grietas y puntos blandos puede haber presencia de desgaste progresivo del material. Por lo tanto se debe solicitar suficiente material para así poder eliminar imperfecciones de

las superficies tales como zonas descarburadas, vueltas y costuras. Al momento de mecanizar, también se debe tener en cuenta las condiciones del material ya que es un punto importante.

2.2. Generalidades de la Fatiga

Debemos interpretar que la fatiga es el deterioro de los metales y este termina por producir la fractura final. La fatiga es una de las principales causas de las fallas en la industria, considerando así que los elementos mecánicos están siendo sometidos a diferentes acciones de fuerzas internas y externas llamadas cargas dinámicas y estáticas, ya que estas pueden generar esfuerzos repetidos y fluctuantes sobre un componente [5].

En el caso de los metales se da por tipos de cargas variables y repetidas ya que la carga máxima puede causar falla en el componente por ende es menor que la carga estática de ruptura. La falta de deformación es una de las características más importantes de las fallas por fatiga del componente comienzan en la superficie y progresa inicialmente de una manera lenta; después que la minúscula muesca o fisura ha crecido considerablemente por la tensión, rotación o flexión, la fractura se llega a cabo en el componente. Las grietas que se presentan en la pieza se originan en alguna discontinuidad de la superficie; son de forma fina y pueden llegar a ser difíciles de identificar por las personas encargadas ya que son de un tamaño macroscópico. La falla por fatiga puede ser observada más fácilmente en las zonas donde el material puede llegar a ser más propenso a deformaciones plásticas, por ende se pueden observar porosidades, concentraciones de esfuerzo e inclusiones en el mismo. Estas anteriores pueden ser las causantes de que las probabilidades de deformación de fisuras aumenten [10].

Cuando hablamos de fracturas por fatiga en los metales, se pueden identificar tres zonas en las cuales la superficie fracturada da origen a la grieta. Como primer punto observamos que la superficie tiende a tener una superficie suave la cual posee marcas, dando como resultado que la grieta se ha extendido lentamente. El segundo punto es una zona menos lisa, en la cual la grieta ha sido extendida en varios puntos a la vez. El tercer punto es una zona donde ha ocurrido finalmente la fractura del componente ya que no soportó la aplicación de carga. Esta zona de ruptura se puede caracterizar por tener una apariencia cristalina la cual indica que la fractura fue de forma frágil y también puede poseer una apariencia fibrosa la cual indica que la fractura fue de manera dúctil [6].

Cuando sometemos mecanismos a la aplicación de cargas, se dice que podemos tener el riesgo de identificar una fractura por fatiga. Para poder llevar a cabo la inspección de una manera efectiva debemos detectar el daño en la etapa inicial del proceso de fatiga. Actualmente existen diferentes métodos para la detección de grietas, estos pueden tener diferentes ventajas según sus aplicaciones [5].

Los métodos más utilizados son:

- Métodos penetrantes: Los métodos penetrantes para detección de grietas se pueden llevar a cabo a partir de dos tipos. El primero puede hacer metiendo difusión de un líquido en la zona donde se formó la grieta y el segundo depositando un material fluorescente, el cual da mejoría al momento de contraste ayudando a que la grieta sea más fácil de detectar a simple vista, los materiales fluorescentes son mucho más sensibles que los tintes. Adicional a estos dos métodos penetrantes, también está el siguiente método que es sumergiendo la zona que se va a examinar en aceite caliente, limpiar la superficie y después cubrir con tiza. Cuando el aceite sale de la grieta, este mancha la tiza y es ahí donde se puede detectar la grieta.
- Métodos magnéticos: Los detectores de grietas magnéticas funcionan dependiendo de la distorsión que se lleva a cabo en un campo magnético que puede detectar grietas transversales y grietas longitudinales.
- Métodos ultrasónicos: Los métodos ultrasónicos para detección de grietas dependen de la transmisión o reflexión de ondas elásticas en el metal.
- Métodos eléctricos: Al utilizar los métodos eléctricos de detección de grietas, tenemos dos grandes ventajas que son: el primero es que podemos detectar defectos debajo de la superficie y como segunda ventaja tenemos que la prueba la podemos realizar en un tiempo más corto cuando se tienen tubos de longitudes largas.

Las fracturas por fatiga pueden ocurrir después de que el componente se haya sometido a una gran cantidad de ciclos, es por eso que el estudio de la fatiga en los metales se suele dividir en tres categorías:

- Fatiga de gran número de ciclos: Este tipo de fatiga aparece cuando las tensiones nominales responsables de la fatiga son muy pequeñas.
- Fatiga de bajo número de ciclos: Esta fatiga ocurre cuando la deformación plástica en cada ciclo es visible.
- Fatiga térmica: La fatiga térmica es utilizada para describir una falla que puede ocurrir en metales cuando la temperatura fluctúa sin restricción al material. Este tipo de falla se da a raíz de tensiones internas creadas por expansión térmica. Esta enlazada con la fatiga mecánica y poseen la misma fuente de daño, donde hay presencia de tensiones aplicadas de diferente origen, en el caso de la fatiga térmica las tensiones aparecen en los ciclos térmicos. Para poder analizar la fatiga térmica debemos identificar los métodos descritos anteriormente. La fatiga térmica también se le atribuye a las fallas de cobertura causadas por esfuerzos repetidos de manera térmica, los cuales incluyen los gradientes de temperatura y limitaciones para prevenir la expansión de partes metálicas.

2.3. Etapas de Fallas por Fatiga

Cuando una grieta o fisura se desarrolla en un elemento mecánico que está sometido a fatiga, estas grietas son muy pequeñas y son difíciles de conocer su tamaño a simple vista, pero hay instrumentos o herramientas metalográficos que ayudan a observar estas grietas pequeñas como microscopios electrónico de barrido y de efecto túnel. Como primera medida tenemos las micro fisuras, que luego que aumentan su tamaño se convierten en macro fisuras hasta superar la resistencia a la fractura [11].

Las etapas de fallas por fatiga están divididas en cinco etapas que son:

- Ciclo de deformación plástica antes de la iniciación de presencia de grietas: Es la etapa en la cual se llevan a cabo los primeros cambios micro estructurales, debido a una amplitud de deformación plástica alternante suficientemente alta y se eleva la densidad de dislocaciones, esto genera micro fisuras que conlleva a zonas con daños irreversibles. Cuando se presentan dislocaciones en la superficie aparecen pasos deslizantes presentes en muchos planos. Es por esto que la resistencia a la falla por fatiga para las aleaciones es mayor.
- Iniciación de una o más micro grietas: En la segunda etapa se da la formación de micro grietas y se puede observar fisuras en el componente, conllevando esto a una alta probabilidad de que una grieta se propague totalmente. Estas grietas pueden ocurrir en bandas de deslizamiento, en los límites de grano y en la interfaces de las inclusiones. La iniciación de micro grietas ocurre más fácilmente si existen precipitados frágiles y débiles. Los límites de grano son más susceptibles para que haya grietas por fatiga.
- Propagación de micro grietas para formar una macro grieta: Cuando las micro grietas estén en el proceso de propagación, estas obtienen una longitud característica que puede ser observadas con la ayuda de algún instrumento. Se dice que la longitud inicial de las grietas pueden ser alrededor de $0.1 \mu\text{m}$ o menos, por lo tanto se debe utilizar un instrumento de con resolución menor de $0.1 \mu\text{m}$. Para estos casos la mejor herramienta que nos ayuda a visualizar estas micro grietas durante la deformación por fatiga son los microscopios tipo túnel. Como consecuencia de la tensión y deformación hasta llegar al límite de fatiga, las micro grietas inicialmente presentadas crecen hasta alcanzar la forma de macro grieta. Esta propagación eventualmente causa falla de material por fractura.
- Propagación de macro grietas: En la cuarta etapa la longitud de la macro grieta es de algunos milímetros y es más fácil poderla visualizar y así poder conocer el control de la velocidad bajo la condición de que solo el rendimiento a pequeña escala se produce en la punta de la grieta. Como factor importante que genera la propagación de macro grietas es que produce inestabilidad, llevando a una fractura y/o falla total de la pieza.

- Falla final: Después de haber transcurrido las cuatro etapas anteriores llegamos a la última etapa de la falla por fatiga que es la falla final, que es cuando el material sufre la fractura. Teniendo en cuenta que el tiempo de las etapas consideradas anteriormente pueden tener variaciones dependiendo el tipo de material, geometría, cargas aplicadas, irregularidades y temperatura. Se debe considerar que el distinguir estas etapas resulta difícil en varias ocasiones.

2.4. Límite y Resistencia a la Fatiga

El límite es el máximo esfuerzo invertido el cual puede llegar a ser repetido indefinidas veces en una probeta normalizada y pulimentada que va girando sometida a una flexión sin que esta llegue a presentar una falla o rotura [1].

La resistencia es también una propiedad basada en pruebas de flexión giratoria sobre una probeta normalizada y pulida. Las cargas aplicadas pueden ser estáticas y alternas combinadas. Es importante tener en cuenta que se puede desarrollar diagramas esfuerzo-deformación y llegar a una resistencia a la fatiga para carga axial, torsión y otros tipos de flexión. Las resistencias a la fatiga por flexión dependen del tamaño de la muestra de fatiga, disminuyendo con el aumento en el tamaño. La resistencia a la fatiga debe estar relacionada con el número de ciclos y resistencia a la tracción y esto se muestra para las aleaciones de un conjunto de metales [15].

- Hierro y acero: Para los aceros al carbono el comportamiento a la fatiga la curva S-N tiende a llegar al límite de fatiga y este valor está entre 10⁵ y 10⁷ millones de ciclos, mientras que para los aceros aleados el límite de fatiga es menos distintivo y se hace necesaria realizar más pruebas de fatiga en tiempos más prolongados. Es por eso que para determinar el límite de fatiga se deben tener en cuenta los siguientes valores: 20 millones de ciclos para aceros de 60 toneladas/pulgada² resistencia a la tracción, 40x10⁶ ciclos para aceros de 80 toneladas/pulgada² resistencia a la tracción y 100-300x10⁶ ciclos para aceros de 110 toneladas/pulgada² resistencia a la tracción, si los valores de ciclos recomendados son los óptimos el valor a la resistencia a la fatiga será el adecuado.
- Aleaciones de aluminio: Estas aleaciones están divididas en dos grupos: bajo y mediano, los cuales dependen de su resistencia a la aleación. El primer grupo presenta buenas propiedades con lo que tiene que ver con la tracción de materiales y tienden a volverse de forma horizontales cuando las longitudes son largas las cuales pueden mostrar un límite de fatiga.
- Aleaciones de magnesio: Este tipo de aleaciones son muy utilizadas característicamente como fundiciones ya que poseen una baja densidad. Este tipo de aleaciones son menos

susceptibles a la corrosión y la corrosión-esfuerzo. Si identificamos el comportamiento del magnesio obtenemos que este tipo de aleaciones mostrar un límite de fatiga distintivo, pero la curva en cuanto a la resistencia al estrés puede ser menos distintiva frente a las aleaciones de aluminio. Como dato numérico se dice que este tipo de aleaciones tienen una resistencia a la fatiga de más o menos 10 toneladas/pulgada², base de 108 millones de ciclos y el índice de resistencia oscila entre 0-3 y 0-5 del esfuerzo último. Por otro lado, la resistencia a la fatiga de las aleaciones de magnesio puede llegar a verse afectada por la estructura de los componentes y tensiones internas.

- Aleaciones de Cobre: Las aleaciones de cobre poseen una relación más variable frente a los demás metales en cuanto a la resistencia a la fatiga y a la resistencia a la tracción, ya que la resistencia a la fatiga puede llegar a ser influenciada por una serie de factores como lo son: la composición de la aleación, el grado de trabajo y el tamaño de grano. Como dato numérico tenemos que el cobre tiene una resistencia a la fatiga de 6 toneladas/pulgada². Las aleaciones de cobre pueden ser utilizadas como alambre, plancha o flejes de sujeción.
- Aleaciones de Níquel y titanio: Para las aleaciones de Níquel se dice que la resistencia a la fatiga esta entre 0.3 y 0.5 cuando están siendo sometidas a 108 millones de ciclos, estos valores pueden llegar a ser inferiores comparados con valores altos de resistencia a la tracción. Este tipo de aleaciones de Níquel poseen un comportamiento similar al de las aleaciones de cobre. Por otro lado, las aleaciones de titanio son mejores que los aceros frente a la resistencia a la tracción. En un diagrama S-N, podemos observar que este tipo de aleaciones tienden a tener una forma horizontal en longitud, sin embargo este tipo de aleaciones de titanio frente a la fragilización de hidrógeno puede llegar a ser susceptible, pero estos factores no afectan su resistencia a la fatiga.

2.5. Efecto de la Temperatura

A medida que disminuye o aumenta la temperatura, las propiedades físicas y mecánicas de los componentes tienen a cambiar el módulo y el límite de elasticidad. Es por eso que para los diferentes materiales la falla por fatiga ocurrirá en cualquier punto de temperatura por debajo del punto de fusión. A partir de los experimentos desarrollados se ha evidenciado una gran relación resistencia-esfuerzo durante todas las temperaturas presentadas, teniendo en cuenta que cuando hay temperaturas altas en pocas ocasiones se puede llegar al límite de fatiga. A continuación se dará una explicación de cómo se presenta la fatiga a temperaturas bajas y temperaturas altas [6].

2.6. Fatiga a Temperatura Baja

Cuando hay reducción de temperatura en componentes mecánicos, la resistencia a la fatiga se incrementa; para llegar a esta conclusión se deben hacer diseños bajo condiciones de la temperatura del aire para cada material obteniendo como resultado, lo que se puede observar en la siguiente tabla:

Material	Valor promedio del radio		
	-40°C	-78°C	- 186°C a - 196°C
Acero al carbón	1.20	1.30	2.57
Aleación de Aceros	1.06	1.13	1.61
Fundición de Aceros Aleados		1.22	
Acero Inoxidable	1.15	1.21	1.54
Aleaciones de aluminio	1.14	1.16	1-69
Aleaciones de titanio		1.11	1-40

Figura 2-1: Variación de la resistencia a la fatiga con la temperatura.

El aumento en la resistencia a la fatiga a bajas temperaturas es menor cuando las concentraciones de estrés están presentes, en otras palabras, los metales son generalmente más sensibles a muescas a bajas temperaturas.

2.7. Fatiga a Temperatura Alta

Cuando se aplican cargas estáticas durante suficiente tiempo a un componente mecánico a altas temperaturas, este componente presenta una deformación de fluencia, la cual puede conllevar a la fractura del material. Una de las condiciones que se debe tener en cuenta para los materiales sometidos a altas temperaturas es que deben resistir suficientes cargas estáticas para dar altas fuerzas de fluencia. Muchos de estos materiales metálicos son a la vez altamente resistentes a la fluencia y resistentes a la fatiga [9].

2.8. Modelos de Falla por Fatiga

Para poder interpretar los modelos de falla por fatiga, es conveniente tener en cuenta los regímenes de fatiga, ya que existen elementos que son sometidos a esfuerzos cíclicos, podemos encontrar dos tipos de régimen de fatiga que son: fatiga de bajo ciclaje (LCF) y fatiga de alto ciclaje (HCF):

- **Fatiga de bajo ciclaje (LCF):** Se denomina de bajo ciclaje ya que este no soporta más de 103 millones de ciclos según el material. El tipo de experimentos LCF frecuentemente están siendo aplicados a los respectivos niveles de estrés. Por lo general, tales experimentos finalizan cuando la rigidez de la muestra que arroja en su resultado una disminución pronunciada debido al inicio de la propagación de grietas inestable. Con esto experimento se puede identificar la evolución del daño con las condiciones de carga de las estructuras.
- **Fatiga de alto ciclaje (HCF):** Se denomina de alto ciclaje ya que este soporta más de 103 millones de ciclos según su material. Existen tres modelos de fatiga. *Procedimiento de vida-esfuerzo* Es el procedimiento más antiguo y adecuado para diseñar piezas con régimen de alto cilindraje, en los cuales la variación de los esfuerzos es consistente y conocida, que es común en máquinas rotativas. *Procedimiento de vida-deformación* Procedimiento que se basa en las deformaciones de los objetos, generalmente es aplicado de situaciones de bajo ciclaje para así poder pronosticar futuras grietas, suele ser muy complejo, por lo cual se hace necesaria la utilización de computador. *Procedimiento de mecánica de fractura elástica lineal (LEFM):* Suele ser el más utilizado para el estudio que se lleva a cabo en la etapa de propagación de la grieta. Para sintetizar un poco más esta parte, la propagación de las grietas se pueden llevar a cabo de tres maneras: la primera es cuando la carga normal está con respecto al plano de fisuración, esta primera la podemos llamar (modo de apertura). La segunda es cuando la carga de corte se encuentra en dirección del avance de la fisura, la podemos llamar (modo de corte en plano). Y como tercera es cuando la carga de corte se encuentra en dirección perpendicular y así podrá generar la grieta, esta tercera la podemos identificar como (modo de corte anti plano).

2.9. Factores que Modifican la Resistencia a la Fatiga

En los diferentes elementos de la ingeniería no siempre la variación de los esfuerzos es igual a lo que puede suceder en una flexión giratoria, es importante tener en cuenta que hay distintos casos de variación de un esfuerzo [1].

- **Estado superficial:** Este tiene efecto sobre la resistencia, ya que, a mayor rugosidad de un material, la resistencia disminuirá, puesto que estas irregularidades en la superficie reaccionan como pequeños esfuerzos que llevarán a una grieta de manera más apresurada a lo estimado.
- **Tamaño de la pieza:** Es importante destacar que en las secciones críticas los elementos del gran tamaño inciden sobre su resistencia, esto debido a la alta probabilidad de defecto en el volumen que soporta unos esfuerzos mayores.

- Temperatura: En efecto las propiedades de un material pueden variar considerablemente según la temperatura a la que se encuentran expuestos y por ende la resistencia puede llegar a reducirse.
- Efectos varios: Existen diferentes factores, como lo son: la corrosión, proceso de manufactura, esfuerzos residuales, recubrimientos, entre otros, que modifican la resistencia de los elementos.
- Tipo de carga: Esta define el comportamiento de resistencia debido al tipo de carga que se someterá el elemento, dependiendo de si es un esfuerzo cortante o normal, o si es una carga axial o flexión.
- Concentradores de esfuerzos: Estos suelen ser discontinuos en los elementos o piezas, estos suelen llevar a un aumento en los esfuerzos.

2.10. Factor de Seguridad a la Fatiga

Este estará dependiendo directamente de como vayan a ser originadas las cargas sobre el elemento o pieza a diseñar y al mismo tiempo este incide en el elemento sobrecargado por un sistema [11].

- Cargas Combinadas: Es común que en las partes de máquinas se experimenten varios tipos de cargas al mismo tiempo que producen simultáneamente esfuerzos variables debidos a tracción-compresión, flexión y/o torsión.
- Rotura Por Fatiga: Esta tiene inicio en minúsculos defectos o concentradores de tensión. Cada ciclo conduce a un avance frente a una grieta hasta que el elemento no está en capacidad de soportar la carga, el principio y avance de una grieta depende de las características de resistencia que presenta un material, de su estructura y de las pruebas a las cuales ha sido sometido durante su etapa de fabricación.
- Estados De Fatiga- Deformación plástica: Cuando un componente mecánico está siendo sometido a cargas estáticas la superficie no reduce la resistencia a menos que el material sea muy frágil. En las zonas que contenga una pequeña cantidad de rendimiento el grado de estrés provocara redistribución alrededor de toda la superficie y se reducirá la magnitud de estrés concentrado. Así es que paso a seguir es que el material tiende a seguir deformándose durante cada ciclo. Durante estos ciclos los materiales tenderán a deformarse plásticamente según las condiciones a las cuales están sometidos. Esta tensión cortante llega a producir dislocación permanente en la pieza que se afecta por oxidación llevando a la aparición de extrusión e intrusión, este estado tiene grietas de tamaño microscópico.

3 Relación entre Fatiga y Fractura

Es concurrente que las fallas se repiten. Sin embargo, cuando hay falla de las piezas el problema aumenta debido a esto dado que producen problemas en los equipos. Los operadores, diseñadores y fabricantes no quieren que estas fallas sigan repitiéndose. Las consecuencias y costos de fractura, agrietamiento, corrosión y mal funcionamiento del equipo no son deseados. A lo largo de los años, los casos analizados han demostrado que ocurren fallas. La historia también ha demostrado que las comunidades de ingeniería han respondido para evitar el fracaso de ocurriendo nuevamente algunas de las fallas estructurales históricas que han ocurrido en el siglo XX [15].

Fatiga es el proceso de cambio estructural permanente, localizado progresivamente, que se produce en un material sometido a condiciones de tensiones fluctuantes y tensiones en algún punto o puntos y que pueden culminar en grietas o fracturas completas después de un número suficiente de fluctuaciones. Hay dos grandes categorías en fractura son: fractura dúctil y fractura por fragilidad. las fracturas dúctiles son caracterizadas por una extensa deformación plástica antes y durante la propagación de grieta. Por otro lado, la fractura frágil tiene lugar en situaciones de estrés debajo de la resistencia neta de la sección neta, con muy poca deformación plástica observable y una absorción mínima de energía [11].

Las fallas por fractura ocurren sin previo aviso, esto puede suceder en cualquier clase de material es fundamental que la ingeniería invierta más en mantenimiento y revisión de estas componentes para que haya un óptimo rendimiento en las partes mecánicas, es importante destacar que aparte del impacto económico también se pierden vidas debido a las fallas por fractura, agrietamiento, corrosión y mal funcionamiento del equipo mecánico [6].

3.1. Características de las Fracturas por Fatiga

Si una pieza mecánica se somete a cargas repetidamente de alta magnitud, una grieta por fatiga o grietas, eventualmente se formarán en algunas regiones altamente esforzadas, generalmente en la superficie y avanzará gradualmente a través del metal hasta que se complete la fractura. Las superficies fracturadas de las piezas que fallan por la fatiga generalmente tienen un aspecto característico por el cual puede ser reconocido. Usualmente hay dos o tres zonas que se pueden identificar en cada superficie fracturada alrededor de la región del punto de origen en la fractura de la superficie de la pieza. La zona donde se identifica la falla obtiene

una apariencia suave que muestra marcas conchoidales o de playa; es el área sobre la cual la grieta de la fatiga se ha extendido relativamente lentamente. La segunda zona a identificar, es un área lisa, que se puede visualizar mediante unos patrones en los que la grieta se ha extendido más rápidamente, probablemente en varias regiones a la vez, de acuerdo a esto la superficie de la fractura es irregular. La tercera zona es el área de la fractura final ocurre cuando la sección se redujo tanto que el metal no pudo soportar la última aplicación de carga. Esta región puede tener un aspecto, o una apariencia fibrosa que indica una fractura dúctil [10].

Cuando se somete una pieza mecánica a cargas de compresión, algunos detalles de la superficie se pueden perder, debido a una secuencia de golpes en la superficie agrietada antes que ocurra la fractura completa, esto hace que en las áreas aparezca una apariencia pulida. Otras características de la falla por fatiga son las manchas u oxidación de una parte de la superficie fracturada, lo que se supone que una fisura ha estado por un tiempo. La falla por fatiga de los materiales y piezas de ingeniería es el resultado de una fractura progresiva causada por ciclos o cargas 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, a menudo la numeración en los cientos de miles y millones, da como resultado la iniciación y la propagación gradual de una grieta o grietas. 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 son o pueden estar sujetos a cargas variables durante su vida útil [5].

3.2. Fractura y Fatiga-Propiedades de los aceros estructurales

El uso de la mecánica de la fractura en el desarrollo de estructuras de acero ha sido un método creciente en los últimos 30 años. Las estructuras de acero pueden envolver una gran suma de mercados, como la construcción de puentes y edificios, buques, equipos de construcción, minería, y plataformas marinas y barcos. Aunque algunos de los fabricantes finales de estas estructuras tienen sus propias descripciones de acero, la gran parte de los fabricantes se basan en las especificaciones de ASTM, en particular para las propiedades de resistencia básica y composición química. Un usuario final que tiene una especificación de acero a menudo la basa en una calificación ASTM con alguna modificación [13].

3.3. Tenacidad a la Fractura

La tenacidad a la fractura corresponde con una series de pruebas que se hacen al material para medir la capacidad para resistir fuerzas que se apliquen sin causar su fractura, los materiales utilizados en los aceros pueden cubrir una amplia gama de productos químicos, características y espesores diferentes todo esto pueden tener un efecto significativo en las propiedades mecánicas de la fractura por lo cual se hacen pruebas de tenacidad del material. Las pruebas para caracterizar las propiedades mecánicas de fractura han estado en desarrollo por más de 30 años, la prueba CNV es la prueba de control de calidad más utilizada para evaluar durezas, métodos como la prueba de desgarró dinámico (DT) y la prueba de peso de caída para determinar la temperatura de transición dúctil-frágil del material [5].

3.4. Fatiga-Crecimiento de grietas

El proceso de propagación de grietas por fatiga de los aceros estructurales que presentan discontinuidades o entallas a menudo se considera relativamente insensibles a los cambios de temperatura. 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 [11].

3.5. Comportamiento de la vida de fatiga

La vida de la fatiga se clasifica en dos ciclos. ciclo de baja y ciclo de alta; el ciclo de baja está asociado con el modelado y análisis de la deformación plástica localizada. Es el inicio de la fisura de la pieza por fatiga, el comportamiento de fatiga de bajo ciclo se determina en pruebas de tensión, este método es muy importante debido que proporciona una base para relacionar el comportamiento de la fatiga.

La fatiga de ciclo alto a menudo se expresa por un límite de fatiga que es el valor de estrés por debajo del cual el acero puede soportar una cantidad infinitas de ciclos. En general, la curva de la vida útil (S-N) de los aceros con resistencias a la tracción por debajo de aproximadamente 1100 MPa (160 ksi) tiene límite claro de fatiga. En gran medida, el límite de fatiga depende de la resistencia a la tracción y es independiente de si el endurecimiento es logrado a través del trabajo en frío, por transformación, la aleación de solución sólida o por precipitación [10].

3.6. Resistencia a la fatiga por corrosión

Los efectos electroquímicos a los cuales está sometido un material son variables tanto en el inicio de la figuración por fatiga como en el crecimiento de las grietas por fatiga, los ensayos por fatiga/corrosión tiene por finalidad de medir la tasa de propagación de grieta por fatiga asumiendo un criterio seguro, que generalmente involucra las grietas que están presentes en el material antes del servicio o que las grietas han iniciado muy temprano en el material [1].

Los efectos de la corrosión en la vida de un material son muy importantes y útiles para evaluar los efectos de la corrosión en la vida de la fatiga. La combinación de carga de corrosión y fatiga puede provocar grandes reducciones de la resistencia a la fatiga a largo plazo e incluso eliminación de los límites de fatiga. Por ejemplo, el límite de fatiga del acero dulce se elimina en ambientes acuosos, dependiendo del potencial electroquímico. La fatiga por corrosión representa la eliminación de la fatiga los umbrales de grietas ante la presencia de un electrolito.

3.7. Resistencia a la fatiga y microestructura de las aleaciones ferrosas

Con las combinaciones de propiedades de los materiales disponibles de aleaciones ferrosas proporcionan una oportunidad de controlar la resistencia a la fatiga a través de la manipulación de la microestructura. Se ha obtenido un progreso importante en la comprensión de los daños que causan a estas aleaciones y se ha echo un enfoque más detallado para diseñar y desarrollar aleaciones para aumentar el rendimiento a frente a la fatiga [8].

El enfoque tradicional del diseño de la fatiga con aleaciones ferrosas, basado en los límites de resistencia y el criterio de vida infinita, han sido suplantados por enfoques basados en el comportamiento de vida finita que enfatizan los aspectos de deformación cíclica de la fatiga. Un elemento central de estos enfoques para predecir el rendimiento estructural en situaciones de servicio es un conjunto de propiedades que caracterizan la deformación cíclica y el comportamiento de fractura de una aleación. Estas propiedades, que están relacionadas con la resistencia de la aleación, la ductilidad y las características de endurecimiento por deformación, proporcionan una base cuantitativa útil para evaluar e interpretando la influencia de varias características micro estructurales en la resistencia a la fatiga del material.

3.8. Propiedades de fatiga y fractura de los aceros fundidos

La resistencia a la fatiga y a la fractura de las piezas coladas es de considerable interés para los ingenieros. En el pasado, la selección de materiales y el diseño del producto se basaban en los resultados de las pruebas de tensión, pruebas de fatiga y de impacto. Este método de diseño contra la fatiga y la fractura no siempre fue satisfactorio. En los últimos años, filosofías de diseño basadas en la fatiga de bajo ciclaje contra el comportamiento de la vida, la propagación de grietas y la fractura con base en la dureza se ha revelado como sólida y exitosa [12].

El comportamiento del agrietamiento debido a carga sostenida y agrietamiento por corrosión-esfuerzo, crecimiento de fisuras, comportamiento de fatiga de fluencia y la fatiga térmica también es importante para los diseñadores.

3.9. Correlaciones entre Estructura y Propiedades

Las piezas mecánicas fundidas de acero al carbono y de baja aleación se producen con una gran variedad de propiedades debido a que la composición y el tratamiento térmico se puede seleccionar para lograr combinaciones específicas de propiedades que incluyen dureza, resistencia, ductilidad, fatiga y tenacidad. Varios métodos de prueba están disponibles para evaluar la tenacidad de los aceros o la resistencia a fractura repentina o frágil. Estos incluyen la prueba de impacto Charpy V-notch, la prueba de caída de peso, la prueba dinámica de lágrima y procedimientos especializados para determinar la tenacidad a la fractura por deformación plana. Mayores niveles de tenacidad se obtienen cuando un acero es templado y revenido, en lugar de normalizado y templado; el temple, seguido del revenido, produce una tenacidad [1].

La fatiga en los componentes de acero carburados es el resultado de las cargas cíclicas. La flexión produce las tensiones, que son extensibles en la superficie, disminuyen a medida que aumenta la distancia en el componente, y en algún momento se vuelven compresivo. Tal carga es una característica de los ejes giratorios y las raíces de los dientes del engranaje. Los materiales carburados se pueden considerar como compuestos que consisten en un dúctil y resistente núcleo y un núcleo fuerte, pero frágil. El comportamiento a la fatiga de tales materiales es el resultado de las interacciones entre los dos. En un enfoque razonable, el comportamiento de tal material puede ser aproximado estudiando cada uno de los constituyentes individualmente y luego combinando estos resultados para predecir el comportamiento del compuesto.

3.10. Fractura Frágil y Fatiga

En ocasiones, los aceros alcanzan a fracturarse de manera frágil debido a movimientos que no implican fuerzas repetidas y es suficientemente distinto a la fatiga. Esto está asociado al material utilizado para hacer cada una de las piezas mecánicas que sufren este tipo de fractura frágil. Este tipo de fallas presentan un problema serio en ingeniería por que puede producir una falla catastrófica, estos casos son muy probables que sucedan en estructuras de grandes magnitudes por fuerzas que actúan repentinamente. La teoría clásica de la fractura frágil es que hay una fractura frágil, en el que el metal se romperá de manera frágil, ya sea por escisión a través de los granos o a lo largo de los límites de grano. Siempre que el límite de fluencia de un metal está debajo de la tensión de fractura frágil, se considera un diseño seguro, sin embargo si la tensión de fractura frágil está por debajo la tensión de fluencia, la fractura frágil ocurrirá [15].

La susceptibilidad a la fractura frágil aumenta con una disminución de la temperatura y por un aumento en la velocidad de deformación, porque estas condiciones aumentan el esfuerzo de fluencia más que el esfuerzo de fractura frágil. La presencia de una muesca también aumenta la probabilidad de fractura frágil debido a las tensiones triaxiales producidas bajo carga en las proximidades de una muesca [14].

Se puede suponer que el acero es susceptible a la fractura frágil y esto hace que las fuerzas sean reducidas a fatiga pero en la práctica esto no es generalmente así. Otro aspecto de la interrelación de la fractura frágil y la fatiga es la posibilidad de que la aplicación de tensiones fluctuantes pueda aumentar la susceptibilidad a fractura frágil. A veces no tiene mucho efecto siempre que no haya grietas por fatiga, pero una vez se ha formado la grieta, la resistencia a la fractura frágil se reducirá mucho [5].

La propagación de grietas en la fatiga no siempre esta limitada a las tensiones fluctuantes en los componentes y estructuras para que nunca se produzcan grietas por fatiga. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo inspecciones periódicas de las piezas de servicio para asegurarse de que las grietas por fatiga no se propaguen para causar una falla completa. En estas circunstancias, se requiere información sobre la tasa de fatiga probable para que las grietas se propaguen. No hay una respuesta simple a este problema, porque la tasa de propagación de grietas depende del material, la presencia de los aumentos de esfuerzo y las condiciones de carga. Recientes investigaciones metalográficas han demostrado que las grietas por fatiga se pueden observar microscópicamente en una etapa muy temprana de vida del componente. Sin embargo, esto no es relevante para el problema práctico de detectar la fatiga en servicio. En una revisión de la propagación de grietas por fatiga en aleaciones, se busca distinguir entre micro-grietas y macro-grietas. La distinción entre los dos es arbitrario y para el presente propósito una macro grieta se considera que puede detectarse a simple vista o una lupa con la ayuda de detectores

de grietas magnéticas o tipo de tinte penetrante; esto corresponde aproximadamente a las grietas de fatiga de aproximadamente 0-0.01 pulgadas de longitud aproximadamente. No obstante la fatiga de una pieza mecánica genera grietas, que generalmente aumentan en toda la superficie de la pieza afectada generando que las regiones de fractura aumenten considerablemente y pueda ser expandida toda la falla en la pieza mecánica [7].

4 Procedimiento de analisis

4.1. Inspeccion Visual

El primer paso que se llevó a cabo durante esta inspección visual fue el estudio de piezas para realizar el análisis de falla por fatiga y fractura, se tuvo en cuenta dos punzones, uno de concreto y el otro de asfalto, los cuales se les realizó un proceso de corte y así poder obtener lo que podemos observar en la Figura 4-1-a y b.



Figura 4-1: a). Punzones utilizados en el presente estudio. b). Proceso de corte de los punzones.

El segundo paso a realizar después de haber identificado cuales componentes se iban a analizar, fue el corte de cada pieza en la parte donde se detectó la falla, en el punzón de asfalto se realizó un corte en la punta de la pala cerca de donde se produjo la fractura y en el punzón de concreto se realizó el corte en la base del punzón (Figura 4-2).

Seguido a esto se realizó una limpieza y desengrase de las piezas, luego se trabajó cada pieza por separado, iniciando con un pulido con varias lijas desde la más gruesa hasta la más fina según su tamaño de grano como lo son calibre 100, calibre 400, calibre 600 y calibre 1000 y, por último se utilizó el paño de pulido con alúmina. Una vez finalizado el proceso de pulido, se procede a desaparecer las rayas sobre la superficie, hasta alcanzar el pulido brillo espejo, ya alcanzado este nivel de pulido se puede llevar a cabo el análisis metalográfico de cada componente, cada vez que se hacia el cambio de lija se verificaba el estado de la superficie con la ayuda del microscopio OLYMPUS GX 41 (Figura 4-3). Para llevar a



Figura 4-2: Corte realizado en el punzón de concreto y asfalto.

cabo todas estas actividades, se tuvo en cuenta y se acataron las normas el reglamento de los laboratorios de la fundación Universitaria los libertadores con la supervisión de los monitores y docentes a cargo, los cuales se hizo uso de los elementos de protección personal como los son bata, guantes y gafas. Los equipos e instrumentos utilizados para elaborar dicho análisis fueron suministrados por el laboratorio de materiales y tratamientos térmicos de la fundación Universitaria los Libertadores, bajo la supervisión de monitores y docente a cargo.



Figura 4-3: a). Microscopio metalográfico OLYMPUS GX 41- Máquina de pulido b). Máquina de pulido con discos y lacado metalográfico.

4.2. Ensayo de Dureza Rockwell

El método de dureza Rockwell es seguramente una de las pruebas más utilizadas y extensas gracias a que es simple e independiente y que puede ser tomado para todas las tipologías de materiales con la herramienta llamada durómetro. La toma de la muestra se calcula por 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 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 configuro una carga principal 150 kg, el cual está ubicado en el laboratorio de tratamientos térmicos de la Fundación Universitaria los libertadores. Antes de llevar a cabo las pruebas de dureza con dicho equipo, se llevó a cabo una calibración previa para verificar su funcionalidad, para dicha calibración se utilizó el patrón 61.8 HRC (Figura 4-4). Es así como podemos verificar los resultados obtenidos en dicha prueba el cual arrojo el resultado óptimo. Es recomendable utilizar la normatividad internacional para este tipo de procedimientos que pruebas de dureza que es la ASTM E18-15 [3].



Figura 4-4: Equipo utilizado para la medición de dureza.

Se realizaron 3 mediciones en cada uno de los punzones, para todo esto se realizó el siguiente registro fotográfico.

4.2.1. Punzón para Concreto

- Muestra 1. Se inició con la medición en el centro de la pieza, arrojando como resultado 37.5 HRC.
- Muestra 2. Se tomó la medición en la mitad del radio de la pieza, dando como resultado 38.5 HRC.
- Muestra 3. Se tomó la medición en periferia de la pieza, arrojando el resultado de 41 HRC.

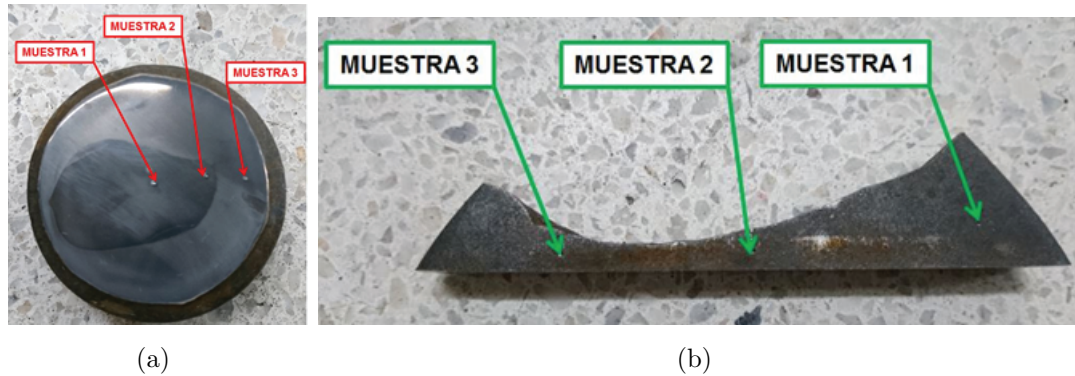


Figura 4-5: a). Mediciones de dureza sobre la sección del punzón de concreto b). Mediciones de dureza sobre la sección del punzón de asfalto.

4.2.2. Punzón para Asfalto

- Muestra 1. Se tomó la medición en el extremo mayor, dando como resultado 45 HRC.
- Muestra 2. Se tomó la medición en mitad del componente, dando como resultado 40 HRC.
- Muestra 3. Se tomó la medición en el extremo menor, dando como resultado 37 HRC.

5 Análisis Metalográfico

Con el análisis metalográfico que llevamos a cabo para las dos probetas, nos permite identificar los cambios estructurales de cada material, por lo tanto, podemos llegar a la conclusión si el material fue sometido a un proceso correcto o incorrecto y así mismo determinar qué tan confiable es el componente mecánico y adicional poder identificar cuáles fueron las causas para que dicho componente fallará. Para la obtención de un resultado confiable y satisfactorio, es recomendable siempre relacionar el material con su dureza y ductilidad, para una mejor selección del método de preparación. Para la elaboración del análisis metalográfico tuvimos en cuenta la normatividad Internacional ASTM E 340-00 Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys [4] y ASTM E 3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens [2].

5.1. Metalografía Punzón para Asfalto

Después de haber llevado la superficie de la sección del punzón que fue cortada a brillo espejo con la ayuda de los equipos anteriormente mencionados, aplicamos *Nital* en su composición al 10 % y se obtienen los siguientes resultados de la superficie:

El paso a seguir, llevamos la pieza al microscopio OLYMPUS para realizar registro fotográfico de la superficie atacada a diferentes aumentos dando como resultado las siguientes microestructuras:

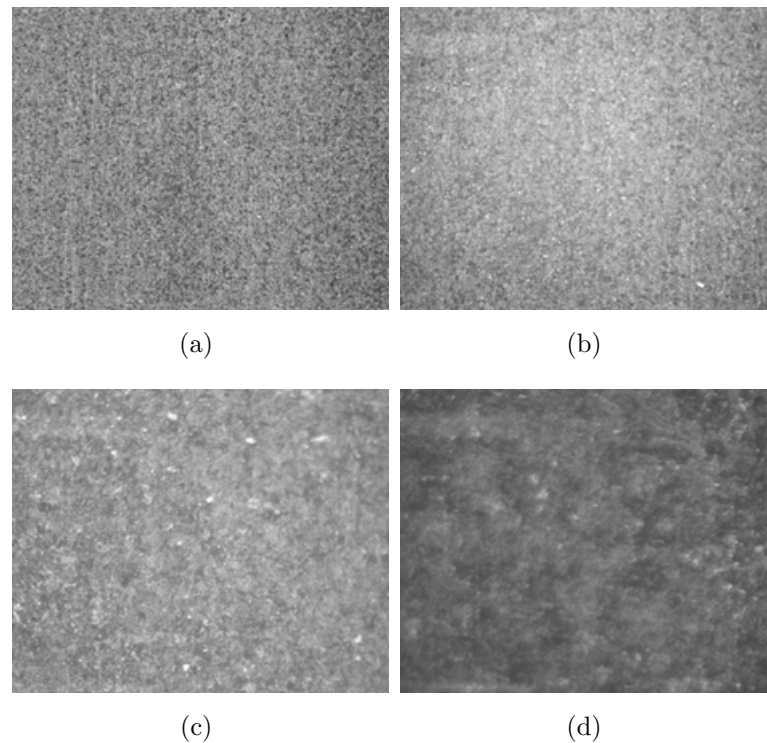


Figura 5-1: a). Punzón para asfalto microestructura a 100X b). Microestructura a 200X c). Microestructura a 500X d). Microestructura a 1000X

Para el análisis metalográfico del punzón de asfalto, se llevó a cabo un corte transversal a una distancia de 1 cm a partir de la zona de falla. Se realizan pruebas de dureza en la parte en la cual se desarrolló el corte ya que era difícil realizar las pruebas sobre la región afectada. A partir de las durezas obtenidas, se evidencia que dicho componente es de un material hipereutectoide ya que las durezas obtenidas con el durómetro BROOKS fueron durezas en el rango de 35 a 45 HRC. Es por esto que se puede decir que es un acero 1080 aproximadamente por su contenido de carbono. Este tipo de aceros son utilizados para actividades en las cuales sean sometidas a cargas de impacto. En la ilustración 5, tenemos registro fotográfico, donde podemos observar que en la microestructura del material del punzón de asfalto la superficie del material tiene presencia de carburos que son las zonas de color blanco y dicho material también en su estructura posee perlita y martensita revenida.

5.2. Metalografía Punzón para Concreto

Para el punzón de Concreto se llevó a cabo un corte superficial en la parte de la falla con el fin de obtener dos áreas o secciones, así creando dos superficies planas que permita llevar a cabo toma de dureza en el material al interior de la pieza y el análisis de la región afectada. Para dicho componente mecánico se maneja el mismo procedimiento que el punzón de asfalto

al cual se le aplica NITAL al 10 % para obtener la siguiente superficie de la pieza:
Llevamos la pieza al microscopio para realizar registro fotográfico de la superficie atacada a diferentes aumentos dando como resultado las siguientes microestructuras:

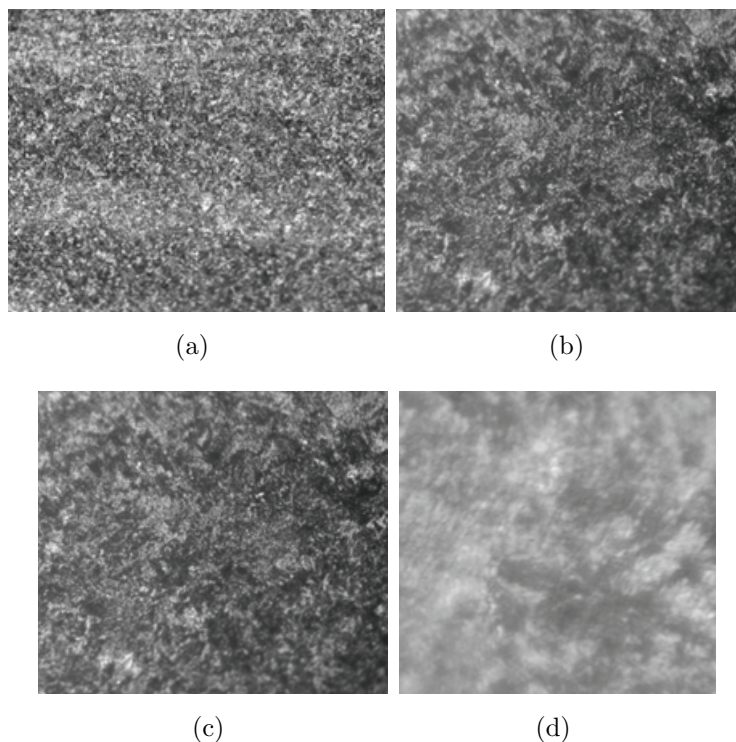


Figura 5-2: a). Punzón para concreto microestructura a 100X b). Microestructura a 200X
c). Microestructura a 500X d). Microestructura a 1000X

Para el análisis metalográfico del punzón de concreto, se dice que es un componente de material hipereutectoide. A partir de las durezas obtenidas por el durómetro, fueron durezas en el rango de 37 a 41 HRC. Similar al punzón de asfalto podemos deducir que puede ser un acero 1080 o 1090 de contenido de carbono. En este tipo de materiales se disminuye su dureza y aumenta su ductilidad ya que son materiales que son sometidos a cargas de impacto. En la ilustración 5-2, podemos observar que la microestructura de dicho componente presenta carburos de color claro y la estructura también tiene perlita o bainita que es una mezcla de ferrita y cementita.

6 Análisis de Falla

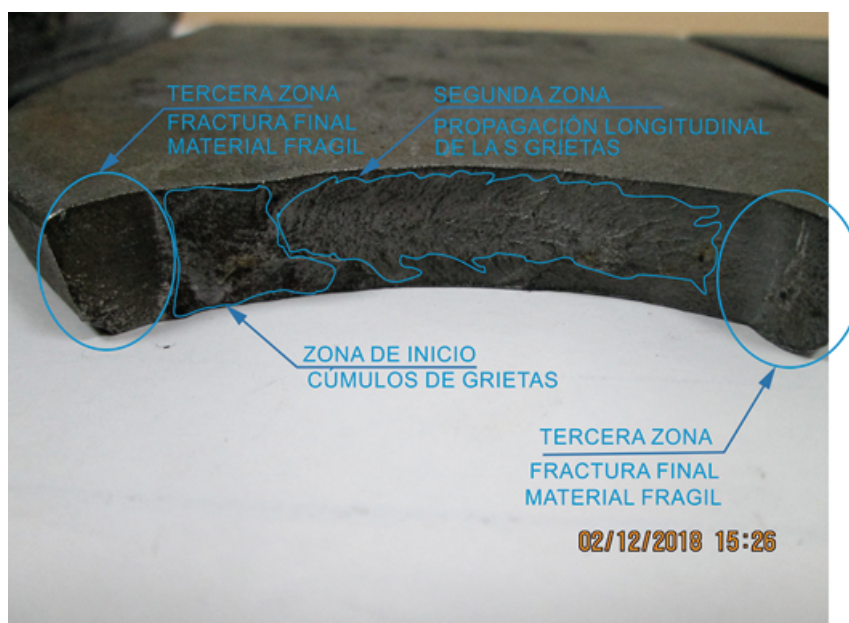
Se muestra a continuación los análisis de falla de las dos piezas mecánicas estudiadas, con base en lo encontrado en estos componentes durante la realización de la inspección visual, análisis metalográfico, de la misma manera se da un concepto técnico de lo que pudo haber ocurrido durante la falla. Solo se conoce las piezas y no se dispone del sistema total al cual pertenecieron, se expresa un concepto basado en la evidencia tangible que se obtuvo del análisis de la pieza. En las dos piezas mecánicas a través de la inspección visual se determinó una falla por fatiga como se puede observar en Figura **6-1**-a y b, que es una concentración de esfuerzo a la cual estuvo expuesta el material de la pieza, por cuenta de repeticiones de impacto como se observa en la topografía de la falla.

6.1. Punzón para Asfalto

El área que se puede observar en la Figura **6-1**-a se visualiza la propagación de grietas. La falla comenzó en un defecto externo posiblemente una deformación de ruptura que se fue corroyendo con el tiempo y el uso de esta pieza mecánica y se propagó al interior del material seguido del cambio de forma y dirección y se propagó por toda la superficie del componente. Se identificaron tres zonas, una de inicio, la segunda es de estabilización y la tercera es la fractura final. En la zona de inicio se puede evidenciar que el material es dúctil, dado que las características observadas en la superficie muestran que esta no es tan rugosa no tiene muestras de grietas en el área de la falla. En la segunda zona se muestra que las marcas o grietas están más cercanas entre ellas, como se señala en la figura **6-1**-a se supone que esta fue la zona de estabilización. En esta zona la propagación circular de las grietas forman unas estrías indicando posible esfuerzo torsor sobre el área transversal del punzón. Finalmente se observa una zona de ruptura súbita hacia el borde del área de sección transversal como se observa en la Figura **6-1**-b; esto nos indica claramente que la falla fue por fatiga.



(a)



(b)

Figura 6-1: a). Zona de fractura Punzón para concreto b). Zona de fractura Punzon para asfalto

6.2. Punzón para Concreto

La Figura 6-1-b muestra una fractura por fatiga de un punzón de asfalto, Se identificaron tres zonas, una de inicio, la segunda es de estabilización y la tercera es la fractura final. En la zona de inicio se puede evidenciar los cúmulos de grietas que se han dispersado en la segunda zona de estabilización, propagándose de forma longitudinal a la concentración del esfuerzo. En la zonas final del componente mecánico se observa que el material ha sufrido una fractura súbita debido que el la pieza en estos puntos evidencia fragilidad en el material. El tipo de propagación longitudinal de la falla se observa una imagen tipo de herringbone o marcas de espigas las cuales apuntan al inicio de la falla generalmente. Constantemente existe el peligro de fractura por fatiga en partes sujetas a cargas de impacto que generan esfuerzos al interior de la sección transversal acentuado en el defecto interno, con llevando a que el material cambie sus propiedades físicas comportándose con un material frágil.

7 Conclusiones

- El análisis de falla es una herramienta que nos permite evaluar y resolver las causas por las cuales se presenta una anomalía en cualquier material, siguiendo ciertos parámetros se podrá llegar a identificar los diferentes problemas de falla que puede tener un componente mecánico y en qué ambiente fue sometido a trabajo, permitiéndonos conocer las causas por las cuales se revelan los daños en las piezas estudiadas, para evitar que se vuelvan a presentar en el futuro.
- El trabajo realizado se llevó a cabo con una metodología de actividades para alcanzar los objetivos plasmados en este trabajo, con ayuda de los equipos de laboratorio de la fundación universitaria los libertadores se logró identificar gran parte del análisis de falla. Teniendo en cuenta inspección visual, análisis de la fractura, ataque químico, ensayos de dureza y observación metalográfica. no solamente existe este tipo de máquinas en universidad, en la universidad nacional se encuentra los laboratorios de metalurgia del instituto de ensayos e investigación de la universidad nacional de Colombia contando con equipos especializados de análisis metalográficos como es el microscopio de barrido (SEM) y un espectrómetro de masas que sería de gran ayuda contar con ellos o hacer un convenio con la universidad nacional y profundizar en estas investigaciones.

Bibliografía

- [1] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, W.T. ; SHIPLEY, R.J.: *ASM handbook*. Vol. 11: *Failure Analysis and Prevention*. ASM International, 2002
- [2] ASTM, E: ASTM E3-01 - Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2001)
- [3] 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)
- [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 (Ingenieria e ingenieria civil). – ISBN 9781615039760
- [6] DE CAMPOS FRANCESCHINI CANALE, L. ; TOTTEN, G.E. ; MESQUITA, R.A.: *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*. ASM International, 2008 (EngineeringPro collection). – ISBN 9781615030989
- [7] CARLSON, Carl S.: Understanding and applying the fundamentals of FMEAs. En: *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2014
- [8] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987
- [9] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM Handbook-Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International, 1992 (ASM Handbook v. 18). – ISBN 9780871703804
- [10] FORREST, P.G.: *Fatigue of Metals*. Elsevier Science, 2013. – ISBN 9781483160733
- [11] KRUPP, U.: *Fatigue Crack Propagation in Metals and Alloys: Microstructural Aspects and Modelling Concepts*. Wiley, 2007. – ISBN 9783527610679
- [12] RAMACHANDRAN, V: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005
- [13] STEPHENS, Ralph I. ; FATEMI, Ali ; STEPHENS, Robert R. ; FUCHS, Henry O.: *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons, 2000

- [14] WILSON, Paul F.: *Root cause analysis: A tool for total quality management*. ASQ Quality Press, 1993
- [15] WULPI, Donald J.: *Understanding how components fail*. ASM international, 2013