



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de falla de pernos de acero

Wilder Stiven Peña Rojas
Jorge Alejandro Cortes Pineda

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

Análisis de falla de pernos de acero

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 y ciencias básicas

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

4-1.	a) Fractura transversal de los pernos. b). Superficie de fractura de los pernos.	15
4-2.	a) Celda de sujeción y Tolva de la báscula de transporte neumático. b). Corte transversal del perno para análisis y Perno cortado.	16
4-3.	a) Banco de pulido y Disco de pulido. b). Probetas pulidas a brillo espejo y Ataque químico con Nital.	17
4-4.	a) Microscopio óptico y Durómetro.	17
4-5.	a) Microestructura Perno #1-100X. b). #1-200X. c). #1-500X d). #1-1000X.	18
4-6.	a) Microestructura Perno #2-100X. b). #2-200X. c). #2-500X d). #2-1000X.	19
4-7.	a) Durezas Rockwell-C.	19
4-8.	a) Fatiga en el perno #1 y b). #2.	20

Resumen

En este proyecto se presenta el análisis de falla de dos pernos que estaban situados en una tolva de pesaje que fijaban una celda ARC, en la planta de GERFOR SAS. Estos dos pernos fueron llevados al laboratorio metales y tratamientos térmicos de la universidad los libertadores, para realizarle el estudio de fractura, cual presenta una fractura transversal. Se realizó un corte transversal, se pule con diferentes calibres de lija y se realizó un ataque químico con Nital al 10 % para una preparación metalográfica en una sección longitudinal mediante un microscopio óptico a un aumento de imagen de 100x, 200x, 500x y 1000x, por otra parte, se realizó ensayo de durezas central, externa y lateral en escala rockwell, esto se realiza con el fin de identificar el tipo de fractura y el acero, finalmente se encontró fractura por fatiga en el interior del perno y marcas de playa donde se inició la falla y se produjo la fractura.

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

Abstract

In this project the analysis of the failure of the two in a PVC plant in the GERFOR SAS plant is presented. These two bolts were taken to the laboratory of metals and heat treatments of the university liberators, to perform the study of fracture, which presents a transversal fracture. A transversal cut was made, it can be used with different sanding calibers and a chemical attack was carried out with 10 % for a metallographic operation in a longitudinal section by means of an optical microscope at an image magnification of 100x, 200x, 500x and 1000x, On the other hand, a test of central, external and lateral hardness was performed on the rockwell scale, this was done in order to identify the type of fracture and steel, finally fracture was found by fatigue inside the bolt and beach marks. Where the fault began and the fracture occurred.

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

Contenido

Resumen	x
1. Objetivos	2
2. Fractura mecánica	3
2.1. Comportamiento de fractura	3
2.1.1. Fractura dúctil	4
2.1.2. Fractura dúctil a tracción	5
2.1.3. Fractura dúctil a flexión	5
2.1.4. Fractura frágil	6
2.1.5. Fractura frágil a tracción	7
2.2. Fractura por fatiga	7
2.2.1. Apariencia de fractura por fatiga	7
2.2.2. Fractura intergranular	8
2.3. Agrietamiento frágil intergranular	9
2.4. Falla en pernos	9
3. Fatiga de los pernos	11
3.1. Tipos de fatiga	12
3.2. Fatigas en tornillos	12
3.3. Fatiga de uniones atornilladas cargadas a cortante	13
3.3.1. Tornillos No Pretensados	13
3.3.2. Tornillos Pretensados	14
3.4. Concentración de Tensiones Alrededor de los Agujeros	14
3.4.1. Tornillos No Pretensados	14
3.4.2. Tornillos Pretensados	14
4. Procedimiento de análisis	15
4.1. Inspección Visual	15
4.2. Metodología	15
4.3. Resultados y Análisis	17
4.4. Análisis metalográfico	19
4.5. Análisis de falla	20

Contenido	1
5. Conclusiones	21
Bibliografía	22

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a pernos de acero que presentan algún tipo de falla con el fin de determinar la causa probable de falla.

2.2. Objetivo Específicos

- Obtener dos pernos de sujeción que hayan sufrido diferentes tipos de fallas y recopilar información bibliográfica acerca de estudios sobre análisis de falla relacionados con los componentes mecánicos obtenidos.
- Realizar pruebas de laboratorio tales como inspección visual, análisis metalográfico y análisis de dureza, bajo normatividad internacional que permitan evidenciar las posibles causas raíz de fallo.
- Determinar las posibles causas de fallo de las piezas seleccionadas mediante la aplicación de la metodología del análisis de causa raíz con el fin de emitir un concepto técnico para evitar la falla de componentes similares debido a la misma causa.
- Elaborar un artículo científico en el cual se plasmen los aspectos más relevantes de la investigación, para su posterior postulación en alguna revista indexada en pubindex.

2 Fractura mecánica

La fractura en un elemento mecánico se empieza generando grietas, se puede definir la separación de una pieza sólida que es sometido en un esfuerzo en dos o más partes. La fractura puede ser clasificada como dúctil o frágil, en algunas ocasiones ambas fracturas pueden ocurrir en el mismo material, pero por lo general son totalmente dúctiles o son frágiles. En términos de apariencia de fractura del mecanismo de falla, se puede determinar por medio de la parte visual y la microscópica, entre los diversos tipos de fractura esta la presencia o ausencia de la macro deformación plástica se puede determinar a simple vista o mediante el uso del micrómetro de maquinista, o microscopio de medición. Diferencias en algún atributo dimensional de las partes (como ancho o espesor) esto nos ayuda con el fin de determinar la macro deformación de la fractura que presenta el mecanismo después de asegurar debido a que ambos puntos de medición tenían la misma dimensión antes de la fractura.

2.1. Comportamiento de fractura

En algunos casos las fallas pueden ser mayores por causa del tipo de material o mal diseño. El material puede estar en una condición inadecuada y por esto puede llegar a ser agravado mediante el crecimiento de grietas que causa esta misma, para alcanzar su propio tamaño crítico hasta llegar a su fractura final. A medida del crecimiento de grietas empieza el proceso de agrietamiento a lo largo de la vida útil hasta llegar a mecanismos de fatiga, agrietamiento por corrosión bajo tensión, fluencia y agrietamiento inducido por nitrógeno. Por medio de los sonidos se utilizan para determinar un análisis de falla que es causada por el agrietamiento.

Un material cuando llegue a su fractura final suele haber sufrido por un manejo brusco y se produce su ruptura o fractura intergranular. Unos de los mecanismos de fractura más común es fractura dúctil la cual se define por nivel macroscópico o microscópico. También es importante la fractura que es dominada frágil que se percibe por una perspectiva de ingeniería macroscópica, mientras que el subyacente metalúrgico es por un microscopio, estos mecanismos pueden dominarse dúctil o frágil, para los metalúrgicos el corte a menudo se conoce como fractura frágil y la rotura de hoyuelos se considera fractura dúctil [1].

Desde el punto de vista de ingeniería las fallas que ocurren por ruptura de hoyuelos se someten a muy poco plástico (microscópico) de deformación. Por general las fallas estructurales suelen

ser más preocupantes por la fractura frágil debido a que se inicia por defectos de muescas, las grietas resultan por medio del mecanizado, temple, fatiga, fragilización por hidrógeno y metal líquido. La fractura frágil se produce por la corrosión y también por estrés. La fractura dúctil macroscópica es relativamente infrecuente, aunque los mecanismos microscópicos de la fractura dúctil en última instancia pueden conducir a la fractura frágil macroscópica. La mayoría de veces la fractura dúctil macroscópica suele a partir de sobrecargas como resultado de que la parte haya sido sub-diseñada, la fractura dúctil también puede ser el resultado de ser sometida a condiciones de carga y ambiente [4].

2.1.1. Fractura dúctil

La fractura dúctil se presenta después de que el material es sometido a una deformación plástica excesiva, la cual es un tipo de fractura que aparece en algunos materiales que presenta una zona de deformación plástica considerable.

Macroscópicamente, la fractura dúctil presenta unas particularidades que le permiten ser identificado inmediatamente, unas de las características que se puede visualizar es la deformación plástica que empieza sobre la formación del cuello, deformación plástica permanente, elongación del material y reducción del área transversal. Al ponerla en una probeta en tensión de materiales dúctiles, la superficie de la fractura presenta un aspecto fibroso. Otra consideración importante la carga máxima y la carga de fractura no es la misma, esto se presenta debido a que el material se deforma plásticamente alcanza su carga máxima y después empieza a ceder hasta el punto de fractura [6].

Este tipo de fractura tiene una característica muy diferente a la fractura frágil la cual presenta este tipo de características:

- Existe una deformación plástica o bruta en una región de la fractura dúctil.
- Se presenta en solo una región de ruptura final que puede tener de origen de fractura frágil o fatiga.
- La fractura dúctil es aquella q presenta un esfuerzo cortante que excede la resistencia del corte.

La superficie de una fractura dúctil no es necesariamente relacionada con la dirección del estrés principal de tensión, como lo es en una fractura frágil. Una fractura dúctil comienza cerca del centro de la sección reducida en tracción cargada y luego se extiende a la superficie de la zona del cuello, antes de que la fractura llegue a la superficie puede llegar de cambiar la dirección alrededor de un ángulo de 45° , se genera una fractura oblicua la cual es llamado labio cortante, donde genera una fractura por tracción de metal dúctil. Esta fractura oblicua es útil para el estudio de muchas fracturas, ya que representa el final del proceso de fractura

en esa ubicación. Fractura extensible de Una sección relativamente delgada de un metal dúctil puede ser una fractura totalmente inclinada. Un ejemplo muy común de este tipo de fractura en un laboratorio es realizar la prueba a tensión, donde la formación de fractura se define en 3 pasos [8]:

- Formación del cuello de botella y concentración de esfuerzos en la parte central de la probeta.
- Los esfuerzos hacen que el material empiece a deformarse y al mismo tiempo la fractura empieza a propagarse.
- La fractura llega a la superficie y aparece de forma total provocando la falla de la probeta.

2.1.2. Fractura dúctil a tracción

Este tipo de fractura se caracteriza por elemento mecánico que está sometido a cargas paralelas, la cual implica una reducción de diámetro de cualquier pieza mecánica, además de esto presenta un alargamiento de geometría de esta misma donde se revela unas condiciones de deformación previa que deriva en un grado falla la cual puede alcanzar una fractura.

Para identificar este tipo de falla en un perno se observa un desgarre periférico en la zona de fractura por ende ocupa la mayor parte de la circunferencia externa del perno, en los lados se observa una textura fibrosa y se determina el desprendimiento de material en la parte central [15].

Hay varios tipos de elementos involucrados uno de ellos es bajo grado de tornillo esto favorece el tipo de fractura dúctil a tracción, la cual se considera el grado de tornillo o perno que es un parámetro del tipo de acero y por ende se han sometido a esfuerzos de fluencia y esfuerzo de ruptura presentado por la misma pieza, siendo la mayor resistencia mientras mayor sea el grado de tornillo. La presencia de cargas cíclicas de un perno implica que se está sometiendo a cargas menores intermitentes a las soportadas por el perno y generan un esfuerzo más al sistema [5].

2.1.3. Fractura dúctil a flexión

Este tipo de falla se proviene cuando se aplica una carga lateral perpendicular en un perno, la cual se deforma de una manera que el perno se empieza a desviar respecto a su diseño inicial, iniciando curvas de una forma perceptible, empieza a coger dicha curvatura que cada vez va a ser mayor hasta llegar a una separación del material y finalmente la fractura.

Esta falla se identifica al observar una curvatura sobre la circunferencia del perno donde se encuentra una dirección de carga aplicada, también se observa una zona fibrosa en la zona de fractura [10].

Se involucra por un factor de fluencia del material que el perno es sometido a cargas laterales, la cual se deriva una situación de deformación del perno cuando se somete a altos esfuerzos de flexión. También es sometido a altas temperaturas donde está situado el material que compone el perno. Lo que se había nombrado anteriormente que son los esfuerzos cíclicos laterales se generan cargas aplicadas como esfuerzos adicionales que compone el material al perno esto a pesar de que las cargas sean menos a la que soporta el perno [9].

2.1.4. Fractura frágil

Este tipo de falla ocurre durante un proceso en el que se presenta una separación de planos atómicos bajo tensiones normales, este tipo de fractura es asociado con materiales de alta resistencia y de baja ductilidad, esta falla se presenta en materiales no cristalinos por medio de temperaturas muy bajas. Hay dos formas en las que se presenta una fractura frágil: Inicio de la fractura a nivel intergranular y Propagación de la fractura.

En una pieza mecánica se puede presentar una fractura frágil debido a varias propiedades mecánicas uno de los factores que se involucra en esta falla fue por temperatura, tasa de carga, concentradores de tensión y dimensiones, si hay una baja temperatura las sustancias tienden a reducir ductilidad de los metales, preferiblemente aquellos materiales que poseen un cuerpo centrado en una estructura cúbica lo que resulta fractura frágil. [7].

Las pruebas de impacto aumentan, la cual genera un aumento de estrés en un estado triaxial más severo dentro del material y por lo tanto la probabilidad es mayor a que ocurra una fractura frágil. La superposición de altos esfuerzos hidrostáticos del material reduce los niveles de triaxialidad, si aumentamos la ductilidad en la pieza que se va a probar las altas cargas aplicadas va a haber una probabilidad de una deformación plástica más compleja, debido a que los procesos de cizallamiento son dependientes lo que resulta un comportamiento frágil.

Las regiones de acero divididas con micro algas bajo carbono que fácilmente se puede identificar por regiones planas en la superficie de fractura, donde las partes del acero se presentan en regiones alternas que consisten en áreas de escisión y micro huecos donde evidencian un modo mixto de propagación de grietas, en otras situaciones la fractura llegar a tener intergranularmente debido a que el límite de grano es un camino muy débil para la propagación de grietas, en este tipo de fractura ocurre cuando el proceso de fragilidad deriva en un límite de grano más débil para la propagación de grietas que el núcleo de grano como un tratamiento térmico inadecuado o por factores del medio ambiente. [2].

2.1.5. Fractura frágil a tracción

La podemos caracterizar por ser factor de una carga uniaxial en el eje x del cuerpo del perno, donde se puede observar la zona de fractura con una textura intergranular de una formación mínima de tamaño de escalones moderados, la cual se caracteriza un material frágil. Se involucra a cargas cíclicas paralelas en el eje del perno por dichas cargas que son menores a una carga máxima que es soportada por el material de una pieza mecánica que finalmente culmina en una fractura frágil por esfuerzos generados [6].

2.2. Fractura por fatiga

Este tipo de fractura se considera el tipo de fractura más grave en piezas de maquinaria porque ocurren en servicio normal, sin sobrecargas, bajo condiciones normales y condiciones de operación. Este tipo de fractura son serias porque son insidiosas quiere decir que con frecuencia son furtivos y no da advertencia de que puede llegar a fracturarse, este tipo de falla ocurre por ambientes corrosivos u otras condiciones, donde aumenta la posibilidad de fracturá por fatiga.

La fractura por fatiga comienza por pequeñas grietas que crecen por medio bajo la acción de estrés fluctuante donde se destaca por medio de un valor máximo menor que la resistencia a la tracción, la estructura es cristalina del metal bajo la acción de aplicaciones de carga repetitiva de bajo nivel este tipo de cambios en la estructura puede llegar a formar pequeñas grietas. También pueden llegar a formar grandes grietas siempre y cuando la carga cíclica continúa y eso puede conducir a la fractura de la pieza o estructura. Una vez iniciado este tipo de falla puede propagarse a altas tensiones y ciclos bajos o por tensiones bajas y ciclos altos. Puede llegar a tener diferentes características que puede ser parecido a la fractura frágil o dúctil dependiendo el tipo de material de la pieza o estructura que haya sido involucrado en las circunstancias de estrés o causas ambientales [1].

2.2.1. Apariencia de fractura por fatiga

Este tipo de apariencia de fractura por fatiga resulta por causa de ciclos o cargas fluctuantes la magnitud de una carga individual es muy pequeña para causar la fractura por completo de la pieza no dañada, pero el número de ciclos de cargas da como resultado la iniciación de la propagación gradual de una grieta o varias grietas. La falla por fractura se da cuando las grietas alcanzan un tamaño crítico, más que la fatiga causa una falla potencial mecánica ya que sus componentes pueden estar sujetos a cargas variables durante la vida útil, la

fatiga requiere comprensión del comportamiento de fractura del material particular sujeto al análisis de falla. Al menos alguno el conocimiento de las condiciones ambientales y de servicio suele ser necesario, la evaluación de las condiciones de carga [13].

2.2.2. Fractura intergranular

Es una falla que ocurre a partir de un límite de grano debilitado, parcialmente los límites en los materiales policristalinos son más fuertes que los granos individuales debido a que es procesado por debajo de un régimen de fluencia por temperatura. Estos límites de granos son interruptores por redes cristalinas de granos individuales, debido a que proporciona una fuente de fortalecimiento fijando los movimientos de las dislocaciones.

Sin embargo, los límites de grano es una región con muchas fallas, dislocaciones y vacío. Es un desorden atómico relativo del grano a diferencia con la disposición atómica más regular de los interiores del grano, donde proporciona un camino más fácil para la difusión relacionada con alteraciones de límites de grano que son una región de preferencia para la congregación y la segregación de impurezas [2].

Los límites de grano pueden ocurrir por precipitación de debilitación o la fragilidad debido a absorción de especies ambientales en los límites de grano. Además, las regiones de límite de grano también se ven debilitadas por temperaturas altas, debido a que el tipo de ruta de fractura predominante se vuelve fracturas intergranulares, pero también se observan fracturas intergranulares en metales de alta pureza a altas temperaturas. La fractura intergranular se conoce fácilmente de la escisión o la coalición de los micro huecos. Dentro de los Mecanismos de la fractura intergranular se encuentran [6]:

- El crecimiento de grietas se produce por la separación por tracción de átomos de decohesion.
- Movimiento de cizallamiento de átomos.
- Eliminación o adición de átomos por disolución o difusión.

En estos procesos pueden ocurrir preferentemente a lo largo del límite de grano por varios fenómenos como:

- Segregación de elementos de fragmentación en los límites de grano.
- Difusión más rápida de los elementos a lo largo de los límites de grano que a lo largo de los interiores de grano.
- Nucleación más rápida y crecimiento de precipitados en los límites de grano que en los interiores de grano.

- Mayor adsorción de especies ambientales en las regiones de límites de grano.

Uno de los mecanismos más complicados es el agrietamiento por apagado por los diversos mecanismos que producen debilitamiento de los límites de grano y tamaño de grano.

2.3. Agrietamiento frágil intergranular

Hay varios tipos de causas de fractura frágil intergranular que incluyen las partículas que son frágiles de segunda fase en los límites de los granos, la fractura donde no hay película visible y, debido a la impureza, segregación del átomo en el límite del grano. Además de la fragilidad ambientalmente inducida donde no existe un precipitado o soluto límite de grano [2].

2.4. Falla en pernos

La principal función que cumple los pernos es unir o ensamblar dos o varias piezas mecánicas entre sí, la cual transmiten una carga estática. La carga estática puede ser motivo por tensión, cizalladura, flexión o torsión ya pudo haber sido por separado o combinado, también por las fuerzas dinámicas son resultado de impacto o de la carga de fatiga cíclica incluido la vibración. Las fallas de cizallamiento se obtienen cuando la carga cortante se transmite en longitud. En la mayoría de los pernos presentan cargas grandes por los hilos y el diámetro es muy pequeño en lo que llamamos cuerpo-cabeza. La falla más común en pernos es fractura por fatiga, la parte más común donde se presenta la falla en los pernos es el primer hilo de cabeza-al pie, debido a que presenta mayor concentración de carga. Este tipo de falla por fatiga generalmente se presenta por esfuerzos elevados anormales de esfuerzo, pernos que ya vienen con defectos de grietas, picaduras, ranuras y por esta razón se cumple esta falla [3].

La fuerza principal que ejerce un perno es la tensión, debido a que cuando se le realiza un ajuste se establece un estiramiento, la tuerca presenta en la mayoría de ocasiones estrés y tensión en corte de los hilos, los dos elementos tienen roscas son inelásticos y la carga de par es uniformemente distribuida sobre los hilos que son conectados. Para obtener una mayor distribución uniforme de la carga a lo largo del perno roscado y minimizar la posibilidad de un material dúctil, la combinación habitual es proporcionar el material con alta resistencia a la tracción para el perno y material con buena ductilidad para la tuerca.

En teoría de diseño podemos representar en una estructura rígida como ejemplo, donde el perno se comporta como un resorte cuando está sujeto a una carga, la cual se induce a tensión en el perno antes de que se encuentre cualquier carga de trabajo. Como la carga de trabajo se aplica, el perno precargado no encuentra una carga adicional hasta que la carga

de trabajo sea igual a la precarga en el perno. El punto de fuerza entre los miembros es cero a medida que se aplica más la carga de trabajo cíclica del perno [8].

3 Fatiga de los pernos

La fatiga es daño más común en las piezas de ingeniería, generalmente ocurren en las piezas que son sometidas a cargas cíclicas. La fatiga es un fenómeno complejo ya que representa el 80 % de los casos de fallas estructurales fue descubierto por primera vez en 1800 en la superficie de un eje de una locomotora. Los métodos de análisis de falla por fatiga son una combinación de la ingeniería y la ciencia, aunque con frecuencia no pueden proporcionar las respuestas que se necesitan. Ahí diferentes enfoques de como analizar la fatiga estos enfoques permiten predecir cuándo va a ocurrir, los tres métodos son [15]:

- Fatiga vida
- Deformación vida
- Mecánica de la fractura lineal elástica

Los fallos por Fatiga se producen en tres fases [14]:

- Fase 1 Iniciación: Una o más grietas se desarrollan en el material. Estas grietas pueden presentarse en cualquier zona del material, pero en general se presentan alrededor de una fuente de concentración de tensión y en la superficie exterior donde las variaciones de tensión son más elevadas. Las grietas pueden presentarse por múltiples razones: imperfecciones en la microestructura del material, ralladuras, muescas y entallas causados por las herramientas de fabricación o en medios donde se manipulan. En los materiales más frágiles el inicio de grieta puede presentarse por defectos en el material (poros e inclusiones) y por cambios geométricos.
- Fase 2 Propagación: Alguna o todas las grietas se extienden por efecto de las cargas cíclicas. Además, las grietas son de difícil detección, ya que generalmente son muy finas, aun cuando estén próximas a producir la falla de la pieza.
- Fase 3 Rotura: La pieza continúa su deterioro ya que la grieta sigue creciendo, quedando muy reducida la sección transversal de la pieza que es insuficiente para resistir la carga, produciéndose así la rotura por fatiga.

Los factores que influyen en una fatiga pueden agruparse en los efectos que generan el material de la pieza, la relación que existe entre la resistencia última del material con el límite de fatiga, la geometría, el tamaño de la pieza, Los esfuerzos residuales: esfuerzos compresivos, esfuerzos de tracción y los efectos medio ambientales.

3.1. Tipos de fatiga

- Fatiga térmica: Esto ocurre cuando a los metales se le aplica una serie de cargas térmicas con enfriamientos no homogéneos, esto induce gradientes térmicos que provocan tensiones en el metal, esto puede generar plastificación del material.
- Fatiga estática (corrosión fatiga): esto ocurre por efecto de las cargas cíclicas más un ambiente corrosivo que actúan conjuntamente sobre el metal y produce la fatiga de este, y hace que la vida útil del metal sea mucho más corta de lo esperado.

3.2. Fatigas en tornillos

Por lo general la tensión inicial del tornillo es constante hasta que la fuerza extrema de la tensión de montaje excede la fuerza del tornillo, los tornillos no se sobrecargarán si se cumple con la carga de trabajo calculada.

Estas cargas cíclicas y las funciones que cumplen llevan a que se dé la fatiga que es la repetición de ciclos de carga y descarga que debilitan las piezas a lo largo del tiempo incluso cuando las cargas inducidas están considerablemente por debajo de la tensión de rotura estática e incluso del límite elástico del material, o en una definición más específica como: Fallo debido a cargas repetitivas que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura [2].

Se han descrito los tornillos de carga y de anclaje o sujeción y se observa que los dos tipos de tornillos se comportan de manera distinta al esfuerzo. El rendimiento ante fatiga de un tornillo cargado axialmente no es bueno, distinto a cuando se trata de las uniones cargadas axialmente. En ese caso el rendimiento ante la fatiga depende de los detalles estructurales y del pretensado aplicado en el tornillo. Por esa razón se revisará las uniones atornilladas que tiene cargas a tracción en el tornillo y la rosca.

La rosca de un tornillo se comporta como una entalladura por lo que tiene una gran concentración de tensiones en su fondo. En la salida de la rosca y el lugar donde la rosca de la tuerca se engrana por primera vez con la rosca del tornillo se produce una mayor presión y fuerza porque la transición cabeza del movimiento del tornillo tiene alta concentración de tensiones. Estas tres secciones o emplazamientos de concentración de tensiones son la transición de la cabeza a la espiga, la salida de la rosca y la rosca de la tuerca. En estos emplazamientos en donde se inicia la fisura con mayor probabilidad, localizándose generalmente primero en el engrane entre el tornillo y la tuerca, exactamente en la rosca o engranaje por la transferencia de carga que se produce a la tuerca, momento en el que la fuerza de la carga no es distribuida completamente en ambas caras, ya que sólo la parte o cara de la tuerca que se encuentra en

el primer engranaje de la cara de la rosca a la estructura es mayor 2 o 4 veces a la carga que soporta el tornillo [11].

Cuando se estudia la composición geométrica del tornillo, como la forma de la rosca, la distancia y la forma de los pasos, los módulos de elasticidad de los materiales se pueden evidenciar la diferencia de la distribución de cargas en donde la deformación plástica muestra las transferencias uniforme o no de las cargas. Ante la fatiga el comportamiento de la rosca puede suponerse como un comportamiento similar al de una soldadura con inicio de fisura en el fondo de la rosca por la afectación del nivel medio de tensiones, el material y en específico la calidad del material. Cuando la fisura por fatiga empieza se produce el nivel máximo de carga que produce la fluencia en el inicio de fisura o entalladura sin depender del nivel medio de carga, esto se ignora y se trata como excepción cuando la rosca es de laminación con tratamiento térmico lo que genera las tensiones de compresión residuales en el fondo y permite resistencia a la fatiga [4].

Para los tornillos de tracción según el euro código 3 la curva de cálculo de fatiga clasifica que la fatiga de amplitud constante en esos tornillos es de 26 MPa siendo la variable al límite de la fatiga o la media de 15 MPa. Para una rosca está calculada para transferir una fuerza de tracción de media y no se ve sometida a cargas de fatiga con una fuerza máxima superior a la mínima en kN bajo las circunstancias de nivel medio de cero y más de 10^6 ciclos, tendrá una resistencia a la carga de fatiga es muy baja en comparación con la resistencia estática de un tornillo.

3.3. Fatiga de uniones atornilladas cargadas a cortante

3.3.1. Tornillos No Pretensados

Para un tornillo no pretensado, las fuerzas se transfieren mediante el apoyo de las chapas contra la espiga del tornillo y, consecuentemente, mediante el cortante en la espiga del tornillo. (Gurney, 1968) Así mismo el autor señala que no es posible utilizar este tipo de unión cuando la carga que es variable se mueve y puede ocasionar que la carga en sus giros cambie su signo, puesto que la holgura entre los agujeros y la espiga permite que se produzcan grandes desplazamientos en múltiples ocasiones. La transferencia de carga en este tipo de unión está muy concentrada en el emplazamiento en el que la espiga se apoya contra los agujeros. (Gurney, 1968)

3.3.2. Tornillos Pretensados

En los casos en que los tornillos están pretensados, las fuerzas se transfieren mediante la fricción de las superficies de las chapas. Los Tornillos de Alta Resistencia (HSFG) son los tornillos que transfieren la carga mediante fricción. Con el fin de obtener el grado suficiente de las tensiones a compresión que permita la transferencia de la carga mediante fricción, se utilizan tornillos de alta resistencia y un apriete controlado. (Gurney, 1968) Frost et al (1974) refieren que la transferencia de la carga mediante fricción se produce en la totalidad del área en la que están presentes las tensiones de compresión, por el pretensado del tornillo así es que la transferencia de carga no está tan concentrada como en el caso de los tornillos no pretensados. Las uniones con tornillos HSFG también pueden utilizarse allí donde la carga variable cambia de signo.

3.4. Concentración de Tensiones Alrededor de los Agujeros

3.4.1. Tornillos No Pretensados

En el manual de construcciones de acero de ITEA (2016) se especifica que en el caso de los tornillos no pretensados se producirá una concentración de tensiones en los agujeros. La concentración de la tensión se produce como resultado del hecho de que hay un agujero en una chapa sometida a tensiones y la espiga del tornillo introduce la carga de manera muy concentrada.

3.4.2. Tornillos Pretensados

En el caso de los tornillos pretensados, no se produce una concentración de tensiones en los agujeros. Las tensiones pueden ser incluso menores que la tensión nominal porque, en el agujero, una parte de la carga ya ha sido transferida y la cabeza del tornillo y la tuerca reducirán la deformación del agujero [12].

4 Procedimiento de análisis

4.1. Inspección Visual

Estos pernos se encontraban sujetando una tolva de pesaje que fijaban una celda ARC, en la empresa GERFOR SAS, se enviaron al laboratorio de la universidad los libertadores para poder llegar a identificar la falla, se realizó un análisis visual macroscópico de los dos pernos fracturados, se observa que el perno #2 empieza a corroer cerca donde se presenta la falla, igualmente con el perno #1 y residuos de grasa en los hilos de los pernos (Figura 4-1-a y b).

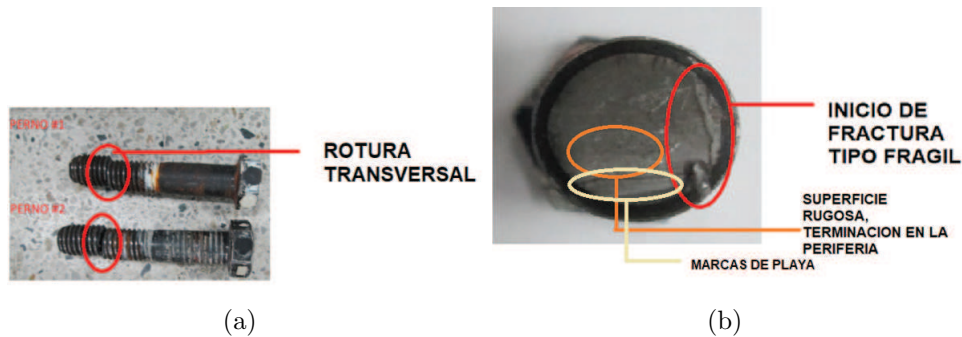


Figura 4-1: a) Fractura transversal de los pernos. b). Superficie de fractura de los pernos.

En esta imagen se visualiza las marcas de playa y grietas hasta llegar a la falla de fractura por fatiga, también se observa un desgarre periférico en la zona de fractura que ocupa la mayor parte de la circunferencia externa del perno, en los lados se observa una textura fibrosa y se determina el desprendimiento de material en la parte central.

4.2. Metodología

Se seleccionaron dos pernos que estaban situados en una tolva de pesaje que fijaban una celda ARC, por motivo de las vibraciones sufrieron falla por fractura. Se trajeron al laboratorio de metales y tratamientos de la universidad los libertadores para realizar un análisis de falla. Después de haber seleccionado los pernos realizamos un corte transversal con la cortadora de disco para obtener una probeta para tomar microestructura y dureza.

Después se realiza un pulido ala probeta donde se hizo el corte con diferentes tipos de lija de agua pasando de la lija con grano más grueso a la de grano más delgado en una forma longitudinal cambiando los grados de pulido para dejar la superficie totalmente lisa al final se brilla la probeta con la pulidora de tela para obtener un brillo espejo (Figura 4-3).

Después se realiza un ataque químico con nital al 10 % (el nital es una solución de alcohol y ácido nítrico), se deja actuar el nital por unos segundos, luego se lava con agua pura para retirar de la superficie el exceso de nital.

Se procede a secarla con un secador hasta tener la probeta completamente seca. Al tener la probeta totalmente seca se procede a observar la microestructura en un microscopio óptico marca Olympus con diferentes niveles de enfoque (a 100x, 200x,500x y 1000x) en donde se visualiza la microestructura de cada pieza, Con el programa *toup view* se visualiza las imágenes de la microestructura de las probetas. Después de tener la imagen de la microestructura procedemos a tomar las durezas de las probetas en escala Rockwell-C (HRC) (Figura 4-4).



(a)



(b)

Figura 4-2: a) Celda de sujeción y Tolva de la báscula de transporte neumático. b). Corte transversal del perno para análisis y Perno cortado.



(a)



(b)

Figura 4-3: a) Banco de pulido y Disco de pulido. b). Probetas pulidas a brillo espejo y Ataque químico con Nital.



(a)

Figura 4-4: a) Microscopio óptico y Durómetro.

4.3. Resultados y Análisis

Se realizó una inspección visual macroscópica para identificar la causa de la falla del perno fracturado (Figuras 4-5 y 4-6).

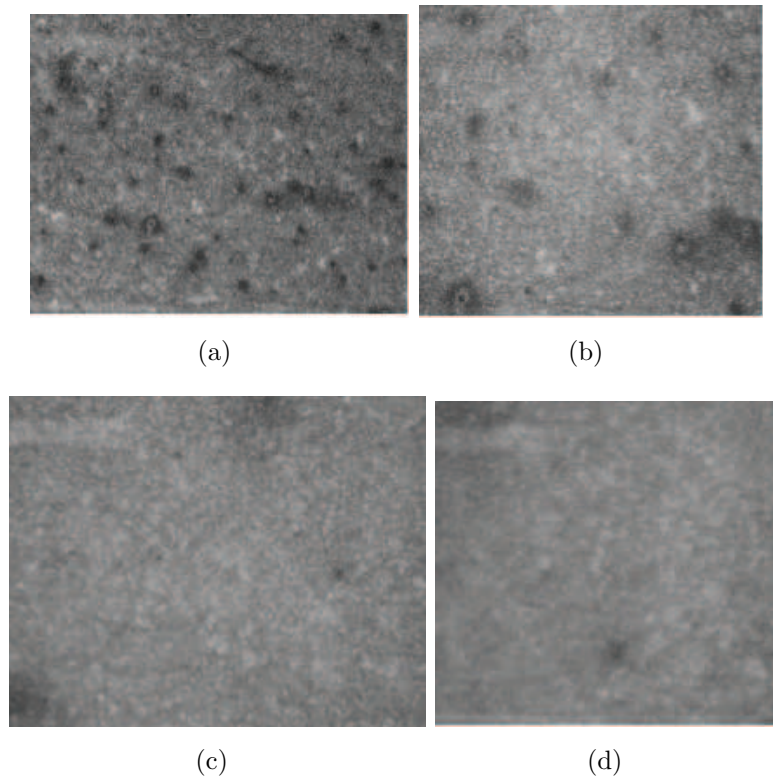


Figura 4-5: a) Microestructura Perno #1-100X. b). #1-200X. c). #1-500X d). #1-1000X.

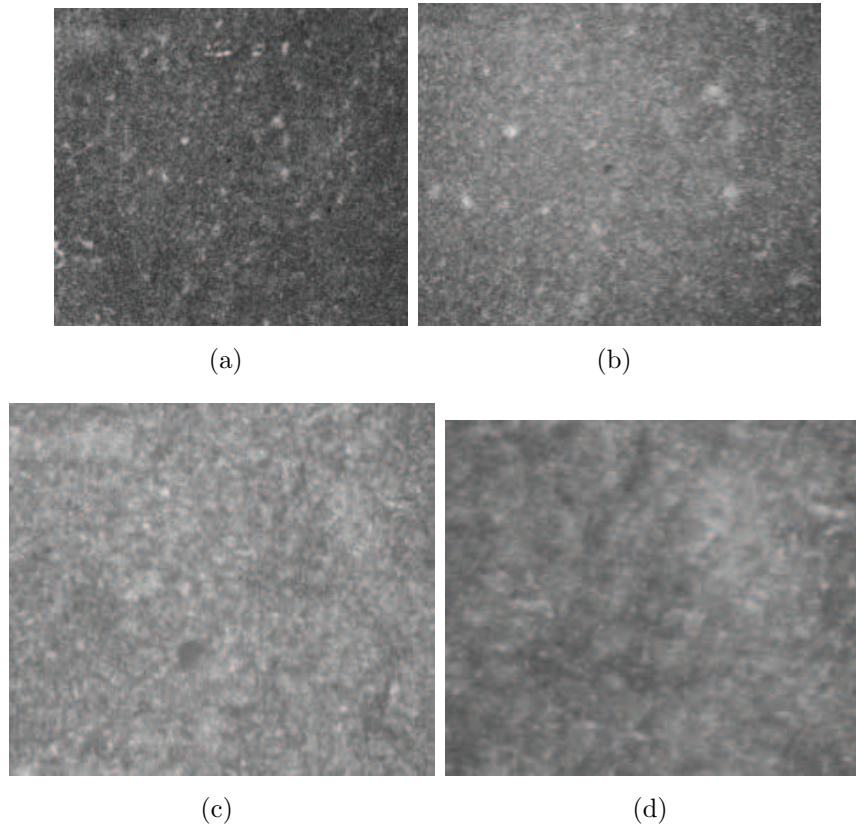


Figura 4-6: a) Microestructura Perno #2-100X. b). #2-200X. c). #2-500X d). #2-1000X.

4.4. Análisis metalográfico

Se tomó una probeta donde se observan el origen de la fractura, se prepara metalográficamente la probeta, se observó en un microscopio óptico ya atacada con Nital al 10 %, se observa un tratamiento térmico revenido para darle resistencia y se aumentó la ductilidad. En las imágenes muestra una estructura que en las zonas oscuras es martensita revenida y en las zonas más claras carburo de hierro. Las características que se visualizan indican desgaste adhesivo, como se inicia la falla del perno donde se puede notar un desgarramiento del material y rugosidad macroscópica. Finalmente se mide la dureza que se darán a continuación en la Tabla (4-7).

Nombre	LATERAL IZQUIERDA	DUREZA CENTRAL	LATERAL DERECHA
Perno #1	29 HRC	21 HRC	29 HRC
Perno #2	31 HRC	29 HRC	28.5 HRC

(a)

Figura 4-7: a) Durezas Rockwell-C.

4.5. Análisis de falla

Por medio del análisis visual y metalográfico se evidenció las siguientes zonas: Inicio, propagación y ruptura final. Las cuales todas están directamente relacionadas con las vibraciones, donde los pernos de acero AISI-SAE 4140 sujetaban estas celdas generando una fatiga y marcas de playa, mostrando así una fractura transversal progresiva con orígenes distribuidos a su alrededor y se presenta una superficie tersa. Obteniendo como resultado final una fractura por fatiga para ambos pernos (Figura 4-8 a y b).



Figura 4-8: a) Fatiga en el perno #1 y b). #2.

5 Conclusiones

- .En la ingeniería es muy importante realizar análisis de falla ya que en el campo de la ingeniería se presentan muchos casos de fractura de elementos mecánicos, al realizar un análisis de falla y dependiendo los resultados metalográficos podemos determinar el tipo de falla y si es problema del material no apto o las condiciones ambientales no son las adecuadas.
- Gracias al análisis de falla y su procedimiento se determinó a través de las imágenes metalográficas que en su microestructura estaban presentes unas marcas de playa y grietas, la cual indicaron que los pernos tuvieron fractura por fatiga debido a cargas cíclicas que fueron sometidos.

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] AVALONE, Ugene. ; BAUMEISTER III, Heodore. ; SADEGH, Lim: *Standard Handbook or Mechanical Engineers*. 11th Edition. McGraw-Hill, 1987
- [4] CAMPBELL, F.C.: *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*. ASM International, 2012 (Ingeniería e ingeniería civil). – ISBN 9781615039760
- [5] CARLSON, Carl S.: Understanding and applying the fundamentals of FMEAs. En: *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2014
- [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] HERSEY, M.D.: *Theory and research in lubrication: foundations for future developments*. Wiley, 1966 (Foundations for future developments)
- [10] KRUPP, U.: *Fatigue Crack Propagation in Metals and Alloys: Microstructural Aspects and Modelling Concepts*. Wiley, 2007. – ISBN 9783527610679
- [11] NOON, Randall K.: *Forensic engineering investigation*. CRC Press., 2000
- [12] RAMACHANDRAN, V: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005
- [13] SCHIJVE, J.: *Fatigue of Structures and Materials*. Springer Netherlands, 2008. – ISBN 9781402068089

- [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