



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de falla en elementos mecánicos de sujeción

Camila Lorena Díaz Cortés
Oswaldo Enrique Yazo Salgado
Danny Alexander Ayala Pineda

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

Análisis de falla en elementos mecánicos de sujeción

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 nuestros hijos, a nuestras familias y a los que vieron en nosotros la capacidad de lograr objetivos sin rendirse.

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. Diagrama de esfuerzo-deformación.	6
2-2. Diagrama S-N o Diagrama de Wholer.	7
2-3. Algunos tipos de fluctuación de carga.	8
3-1. Esquema de sujetador.	13
3-2. Comportamiento estructural.	14
4-1. a). Perno de Diámetro (1/2)". b). Perno de 3/8".	22
4-2. a). Micrografía borde de falla a 100x. b). Micrografía falla a 100x	23
4-3. a). Micrografía borde de falla a 100x, b) Micrografía borde exterior de falla a 100x, (c) Micrografía de falla a 100x, d) Micrografía de inicio de falla a 100x.	23
4-4. Micrografía óptica perno 1/2" con ataque químico a). 100X, b) 200X, c) 500X, d) 1000X.	24
4-5. Micrografía óptica perno 3/8" con ataque químico a). 100X, b) 200X, c) 500X, d) 1000X.	24
4-6. Dureza Rockwell, Punta de diamante; 150Kgf, 39HRC, perno 1/2".	25
4-7. Dureza Rockwell, Punta de diamante; 150Kgf, 20HRC, perno 3/8".	25
4-8. Análisis perno de diámetro 1/2", Zona I-Inicio; Zona II-Propagación, Zona III-Fractura.	26
4-9. Análisis perno de diámetro 3/8", Zona I-Inicio; Zona II-Propagación, Zona III-Fractura.	26

Resumen

En el presente estudio se efectuó el análisis de falla a dos (2) elementos de aplicación cotidiana como son los pernos de sujeción. El primer perno presentó fractura en el vástago en la zona sin rosca, el segundo perno se encontró con fractura en la zona de rosca. El objetivo del estudio es determinar el modo de falla presente en cada uno de los pernos analizados. Mediante la realización de análisis visual, análisis metalográfico y pruebas de dureza, con equipos disponibles en la Universidad los Libertadores, se identificaron características propias del material y se evidenciaron marcas características de fallas típicas presentes en la zona de fractura de las muestras, con lo cual se logró determinar el modo de falla causante de la ruptura de los elementos.

Se encontró que el modo de falla en el primer perno fue fractura frágil a torsión, producida por altos ciclos de trabajo, evidenciando poca deformación plástica, múltiples opciones de inicio-fin de grieta, superficie de falla con zonas rugosas, nucleaciones y alta dureza. El segundo perno fallo fue *fractura dúctil a flexión* producida por sobrecargas puntuales, evidenciando alta deformación plástica, marcas de playa definidas, superficie de fallo con zonas planas, poco ásperas y una dureza media.

Palabras clave: Pernos, Tornillo, Fatiga, Fractura.

Abstract

In the present study, the failure analysis was carried out on two (2) elements of daily application such as fastening bolts. The first bolt had fracture in the stem in the area without thread, the second bolt was found with fracture in the thread area. The objective of the study is to determine the mode of failure present in each of the bolts analyzed. Through the realization of visual analysis, metallographic analysis and hardness tests, with equipment available at the Universidad del Libertadores, characteristics of the material were identified and characteristic marks of typical faults present in the fracture zone of the samples were evidenced. it was possible to determine the failure mode that caused the breaking of the elements.

It was found that the failure mode in the first bolt was fragile to torsion fracture, produced by high work cycles, evidencing little plastic deformation, multiple crack start-end options, surface failure with rough areas, nucleations and high hardness. The second failure bolt was a *ductile bending fracture* produced by punctual overloads, evidencing high plastic deformation, defined beach markings, failure surface with flat areas, little rough and a medium hardness.

Keywords: Bolts, Screw, Fatigue, Fracture.

Contenido

Resumen	x
1. Objetivos	2
1.1. Identificación del problema	2
2. Introducción	3
2.1. Mecánica de fractura	4
2.2. Fatiga	5
2.3. Límite de resistencia a la fatiga	6
2.4. Tensiones fluctuantes	7
2.5. Criterio de falla por medición de fatiga	9
2.6. Resistencia a la fatiga por torsión	9
2.7. Torsión carga combinada y otros esfuerzos	10
2.8. Características de la fatiga (Propagación de Grietas)	10
2.9. Rapidez de la grieta	11
2.10. Modelos de fractura	11
2.10.1. Método Fatiga-vida	11
2.10.2. Método Esfuerzo-vida Fatiga de ciclo alto (HCF)	11
2.10.3. Método Deformación-Vida	12
2.10.4. Método mecánico de la fractura lineal-elástica (LEFM)	12
3. Elementos de sujeción	13
3.1. Funciones, estructura y fabricación	13
3.2. Posibles fallas en los sujetadores	13
4. Procedimiento de análisis	15
4.1. Metodología	15
4.2. Inspección Visual	17
4.3. Perno de Diámetro (1/2)", Perno de cuna del sistema de suspensión	17
4.4. Perno de Diámetro 3/8", Perno de rueda, Eje delantero	17
4.5. Análisis Metalográfico de las muestras	17
4.6. Micrografía Perno de Diámetro (1/2)"	18
4.7. Micrografía Perno de Diámetro (3/8)"	18

4.8. Metalografía Perno de Diámetro (1/2)"	18
4.9. Metalografía Perno de Diámetro (3/8)"	19
4.10. Ensayo de dureza Rockwell	19
4.11. Mecanismo de falla perno 1/2"	20
4.12. Mecanismo de falla perno 3/8"	20
5. Conclusiones	27
Bibliografía	28

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis a dos pernos de sujeción $\phi 1/2''$ y $\phi 3/8''$ obtenidos de talleres automotrices las cuales presentan algún tipo de falla con el fin de determinar la modo de falla.

2.2. Objetivo Específicos

- Recopilar información bibliográfica teórica acerca de estudios sobre análisis de falla relacionados con las herramientas manuales de torsión analizadas.
- 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 modo de falla con el fin de emitir un concepto técnico para evitar la falla de componentes similares debido a la misma causa.

1.1. Identificación del problema

A raíz de las investigaciones realizadas acerca del tema de fatiga en los materiales, nuestro proyecto utiliza dos piezas mecánicas, se realiza una inspección visual, se identifica el modo de falla y posteriormente se realizan diferentes pruebas con equipos necesarios para así poder determinar resultados aproximadas de sus fallas.

El análisis realizado, hace parte de una macro investigación que aporta diferentes elementos con diferentes tipos y modos de falla, para nuestro caso particular se direccionó a la falla por fatiga-fractura, no se tienen en cuenta diferentes tipos de posibles fallas como la corrosión o afectación por temperaturas, ya que la institución no cuenta con los equipos para este tipo de ensayos.

2 Introducción

El análisis de elementos mecánicos a causas de falla por fatiga inicia hacia el siglo XIX cuando se incrementó la fabricación de medios de transporte y estructuras con materiales metálicos por su alta resistencia, sin embargo al presentarse fallas sin razón de dichos materiales se inició el estudio de la fatiga para determinar por qué fallaban e implementar procedimientos de diseño para poder evitar o minimizar las fallas en la vida de servicio.

Según los registros cronológicos el primero en incorporar el término de "Fatiga" fue el Matemático e Ingeniero francés Jean-Victor Poncelet, 1839 concluyendo que las fallas por fatiga tenían una apariencia frágil y se pensaba que el material se había cansado después de pasar cierto número de ciclos [8].

Para 1871 August Wohler Publico resultados de muchos años de investigación, donde concluye que todos los materiales poseen un "proceso estocástico" lo que significa que es imposible predecir exactamente cuándo fallará la pieza, pues son varios los factores que afectan su vida de servicio" e incorpora el término de "Límite de resistencia a la fatiga" y el diagrama S-N. (Esfuerzo vs Número de ciclos) con el cual se representa ensayos a diferentes materiales sometidos a tensiones cíclicas hasta su punto de rotura, entre ellos el acero, además observo que los materiales después de haber fallado y al ser analizado tenía la misma resistencia y ductilidad bajo cargas de tensión que el material original [8].

Todas las maquinas poseen cierta cantidad de elementos que cumplen con una función y son sujetadas de accesorios que permiten la unión y la distribución de cargas para poder ejercer una función determinada, estos elementos son llamados elementos de sujeción; estos elementos pueden clasificarse en permanentes (soldadura, remaches) o desmontables (pernos, tornillos), dependiendo de su funcionalidad.

El material de fabricación de estos elementos juega un papel importante dependiente del fin último de utilidad, o simplemente por otros factores como los ambientales a las que están expuestas etc. inicia con la selección del tipo de acero como los aceros aleados; usados por su mayor resistencia, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, templeabilidad y resistencia en caliente, aceros al carbono y aceros inoxidable; usados por su alto nivel de resistencia a la corrosión [7].

El acero al carbono es el material más utilizado para la fabricación de estos elementos y la proporción de carbono y el tratamiento térmico determinan sus propiedades en cuanto a resistencia mecánica y dureza, la causa más recurrente de fallo es por fatiga y fractura, ya sea por fracturas súbitas, por deformación, entre otras, limitando su vida útil. "La fatiga y la fractura, al igual que otras formas de degradación del material como la corrosión y el desgaste, son comúnmente preocupaciones que a menudo limitan la vida de los materiales de ingeniería [6].

Se deberá tener presente diversos factores de diseño, vida de servicio, movimientos a los que estará expuesto como cíclico, vibraciones forzadas de amplitud constante y estándar de calidad que se deberá realizar a los productos para poder tener certeza de su efectividad. Con ayuda de FMAE (Failure Mode and Effect Analysis/ Análisis de modo y efecto de la falla) se podrá mitigar la falla en los componentes, pues este podrá identificar los modos de falla de cada elemento, determinar posibles fallos, clasificar sus efectos sobre el funcionamiento del sistema, identificar como se puede detectar el modo de falla respecto al tiempo de operatividad y sus correcciones a tiempo antes del fallo abarcando desde la pieza más pequeña como al funcionamiento de la misma en conjunto de todo un sistema operando. [5]

A pesar de que se ha avanzado mucho hecho, el desarrollo de procedimientos de diseño para evitar fallas debido a la aplicación de cargas repetidas sigue siendo una tarea desalentadora. Implica la interacción de varios campos de conocimiento, a saber, ingeniería de materiales, ingeniería de fabricación, análisis estructural (incluidas las cargas, el estrés, la tensión y el análisis de la mecánica de fractura), inspección no destructiva y evaluación, ingeniería de confiabilidad, tecnología de prueba, reparación y mantenimiento de campo y procedimientos de diseño integral [6].

El análisis de falla en todas las piezas en general y para determinar las causas de ruptura es un proceso detallado de observación, inspección y uso de diferentes técnicas para su análisis en laboratorio para poder evidenciar rasgos, características, identificar su estructura, analizar su diseño y fabricación, dependiendo del servicio prestado por el elemento y su vida útil de trabajo.

2.1. Mecánica de fractura

Muchos estudios de falla por fatiga se han realizado en elementos estáticos y con materiales homogéneos, sin embargo es importante resaltar que en la vida cotidiana todo está bajo cargas dinámicas y que todos los elementos, que a pesar de los cuidados de fabricación, estos quedan con pequeños defectos o grietas difíciles de percibir; generando fracturas progresivas, e inclusiones que pueden ser abundantes o mínimas que modifican su estructura y afectan su límite de resistencia a la fatiga; la ciencia de la mecánica de fractura se creó para explicar

y predecir el fallo repentino tratando de minimizarlos. Las fracturas que sufren los materiales se clasifican en dos tipos: Fracturas frágiles y Fracturas dúctiles y sus características varían según a los esfuerzos a los que estén sometidas. El objetivo principal del estudio de la mecánica de fractura es desarrollar metodologías (analíticas y experimentales) para evitar tales fracturas, ya que están asociadas con impactos económicos masivos y frecuentemente implican pérdida de vidas. [6].

“En un material dúctil, el que se alcance el esfuerzo último de tensión no representa que ocurrirá su ruptura real, la fractura frágil, por otro lado empieza con una ruptura altamente localizada”; Defectos desde el corte, muescas o discontinuidades. La fractura frágil se define como la fractura que tiene lugar en tensiones inferiores al rendimiento neto de la sección con muy poca deformación plástica observable y una absorción de energía mínima. Dicha fractura se produce de manera muy abrupta con poca o ninguna advertencia y puede tener lugar en todas las clases de materiales [9].

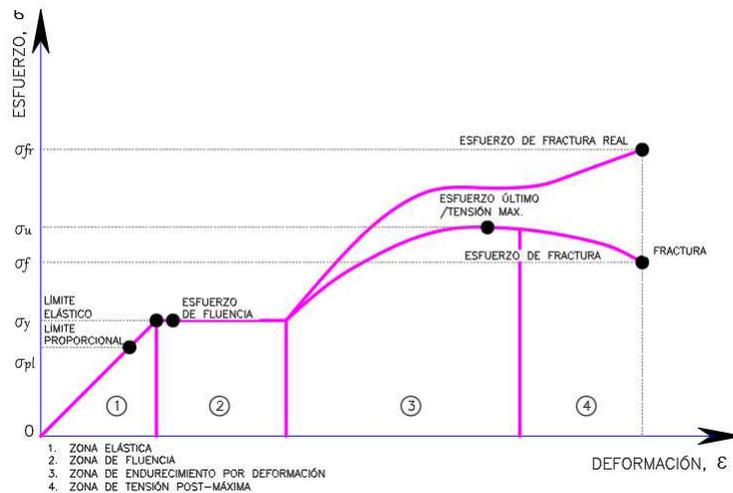
2.2. Fatiga

Según la norma de estandarización industrial incluidas en la ASTM E1823-13 “Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing” define la fatiga en 3 etapas:

- La primera etapa el “Inicio”; Se presenta con un cambio de estructura permanente que corresponde a los primeros cambios que tiene un material macro-estructuralmente, asociada a la deformación plástica.
- La segunda etapa, “propagación”, Es un cambio progresivo, llamadas marcas de playa; que corresponde a las macro-grietas y fisuras con tamaños parecidos al grano de material causando la propagación de las mismas en dirección de las tensiones principales.
- La tercera etapa, “Colapso”, Es un cambio localizado, cuando se propaga la grieta provocando la falla en el material.

No se tiene tiempo exacto de duración de cada etapa, pues depende de diferentes factores como el material, carga al que está sometido el material, diseño, exposición ambientales, entre otras (Figura 2-1) [6].

- Zona elástica; Cuando al retirar la carga; la probeta regresa a su forma y tamaño real, el límite elástico corresponde a la tensión máxima para que el material vuelva a su estructura inicial.
- Zona de fluencia; cuando el material sigue deformándose bajo una carga constante y trabaja elásticamente.



(a)

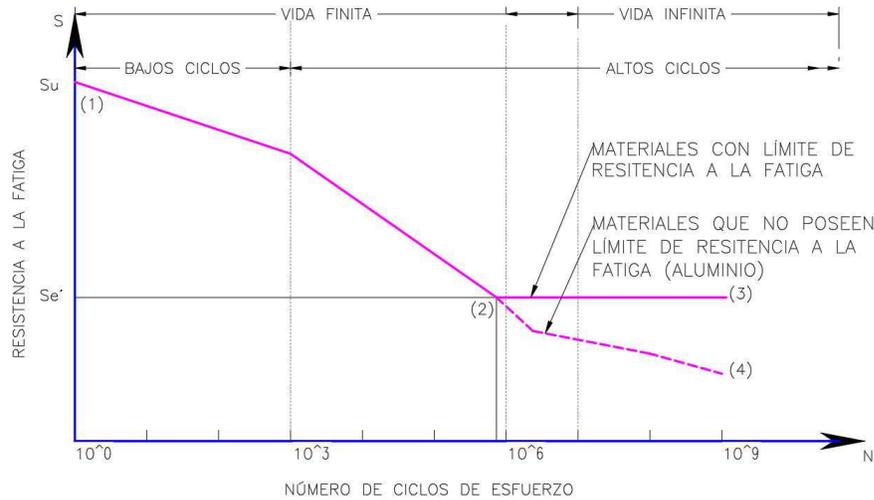
Figura 2-1: Diagrama de esfuerzo-deformación.

- Zona de endurecimiento por deformación; como su nombre lo indica, se refleja su deformación plástica y endurece el material.
- Zona de tensión post-máxima o también llamada zona de estricción, el material es menos denso hasta llegar al punto de fractura.

2.3. Límite de resistencia a la fatiga

El Ingeniero August Wohler realizó pruebas con elementos bajo flexión giratoria donde se obtuvo el diagrama de S-N (Esfuerzo vs el número de ciclos) donde se podía demostrar el esfuerzo o resistencia máxima de los materiales, llegando a la conclusión que para todos los elementos cuanto menor era su esfuerzo aplicado sobre la probeta mayor sería su vida de servicio, ver Figura 2-2.

Una pieza no fallará o sufrirá fractura si el esfuerzo al cual es sometida no supera el rango Se' (Límite de resistencia a la fatiga), el comportamiento de los aceros se presenta como lo indica la Figura 2-3. "Diagrama S-N o Diagrama de Wholer" y la tendencia es representada por la curva; es constante desde que no supere los 10^6 ciclos del esfuerzo que produce la falla, lo que nos indica que la vida infinita de una pieza es directamente proporcional al esfuerzo y al número de ciclos al que está siendo sometida; a menor esfuerzo que Se' , la pieza no fallará; por el contrario cuando a los niveles de esfuerzo superan el Se' se presentará fallo a cierto número de ciclos, este se conoce como vida finita; la pieza sufre la falla después de ser sometida a una carga repetitiva, cuando la pieza es sometida a límites inferiores al del Se' y



(a)

Figura 2-2: Diagrama S-N o Diagrama de Wholer.

esto no produce una falla estamos hablando que la pieza se encuentra en su rango del límite de fatiga [4].

2.4. Tensiones fluctuantes

El límite de resistencia a la fatiga se define como una tensión fluctuante, "A menudo los esfuerzos fluctuantes sobre la maquinaria adoptan la forma de un patrón sinusoidal debido a la naturaleza de algunas máquinas rotatorias. Sin embargo, también ocurren otro tipo de patrones, algunos muy irregulares." Los materiales pueden fallar a fatiga en cualquier momento, ya sea por cargas estáticas o cargas repetitivas y se deberá diseñar bajo el "Límite de Resistencia a la Fatiga" asegurando que no fallará la pieza en su vida de servicio [?].

En la Figura 2-3, algunos tipos de fluctuación de carga, representan diferentes tipos de variación/Fluctuación de carga: La figura (a) Carga completamente reversible o ciclo invertido y su valor medio será cero; representa cuando el elemento está dispuesto a cargas repetitivas como el eje de un vehículo y se deberá diseñar la pieza a base de resistencia al fatiga, sufrirá un efecto de flexión durante cada revolución. La figura (b) Carga reversible o esfuerzo repetido, representa cuando la curva sinusoidal va desde cero a un máximo y representa un sistema de vibración forzada a una estructura que ya posee una transmisión de cargas constantes. La figura (c) representa la carga al azar con esfuerzo promedio constante o esfuerzo fluctuante donde todos sus valores de las componentes son diferentes a cero.

Se relaciona con el tiempo y las cargas que causan la falla, se mantienen con una amplitud constante en máquinas rotatorias en el transcurso del tiempo y en equipos de servicio la

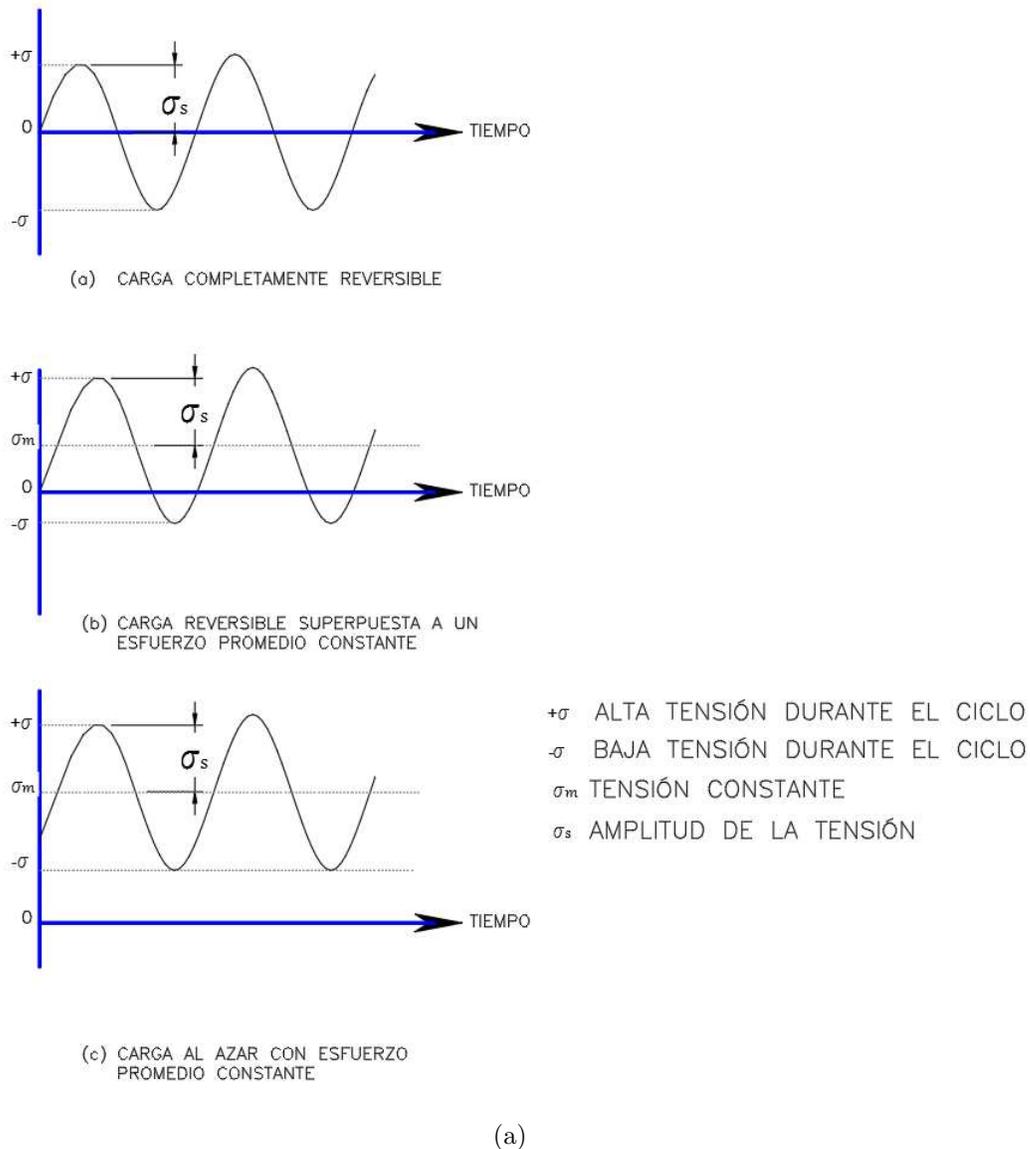


Figura 2-3: Algunos tipos de fluctuación de carga.

amplitud puede ser variable y la frecuencia cambia con respecto al tiempo, cuando el ambiente no es corrosivo la forma de onda de la función carga tiempo no tiene ningún efecto en la falla por fatiga, en presencia de corrosión la grieta tiene un crecimiento continuo independientemente a la carga a la cual está sometida, en máquinas rotatorias se presenta un esfuerzo repetido donde presenta un inicio, un valor medio y un punto máximo que es igual a la componente alternativa, esto se conoce como un esfuerzo fluctuante.

Las ondas analizadas teniendo en cuenta el esfuerzo del tiempo en servicio son utilizados para realizar pruebas en la industria automotriz donde se simulan varias superficies y curvas,

tomando mediciones con traductores, medidores de deformación y acelerómetros datos con los cuales se alimentan las computadoras de los vehículos, donde se analizan posteriormente [8].

2.5. Criterio de falla por medición de fatiga

Se utiliza el sistema de Wohler que consiste en aplicar una carga de flexión en una viga giratoria logrando así variaciones de esfuerzo en el tiempo, con este método se obtiene datos de deformación o de mecánica de fractura y de esfuerzo, en algunos materiales no se tiene información acerca de (k_a) Resistencia de la fatiga, así que se debe estimar un valor de resistencia estática disponible.

Para esfuerzos cortantes y normales la resistencia a la ruptura es diferente debido a la resistencia a la fatiga pues si comportamiento depende de cómo se le esté aplicando la carga a la cual será sometida, así mismo la carga axial aplicada y la flexión son generadores de esfuerzos normales.

Cuando se somete las piezas a cargas variables, el límite de resistencia a la fatiga para vida finita constituye propiedades fundamentales para el mejoramiento de su diseño y corregir las fallas que puedan ser provocadas por los ciclos a los que la pieza está sometida.

2.6. Resistencia a la fatiga por torsión

En la ingeniería es común encontrar elementos sometidos a torsión. Las aplicaciones más frecuentes se encuentran en los ejes de transmisión de potencia, los materiales dúctiles generalmente fallan a cortante por lo que cuando un elemento estructural de sección transversal circular se somete a torsión este fallara a lo largo de un plano perpendicular a su eje longitudinal.

Uno de los esfuerzos importante en la resistencia por fatiga es el esfuerzo cortante por torsión, el cual se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal, de un elemento constructivo o prisma mecánico como pueden ser ejes o en general elementos donde una dimensión predomina sobre las otras dos aunque es posible encontrarla en situaciones diversas.

La torsión se caracteriza geoméricamente porque cualquier curva paralela al eje de la pieza deja de estar contenida en el plano inicialmente formando por las dos curvas en lugar de eso una curva paralela al eje se retuerce alrededor de él.

2.7. Torsión carga combinada y otros esfuerzos

El torque que se aplica a una pieza se conoce como el momento al que se somete con una carga con respecto a un eje. Comúnmente las piezas que se ven afectadas por esta tendencia son las que su vector está paralelo al eje del esfuerzo como los tornillos.

Los esfuerzos combinados variables o también llamados esfuerzos multi-axiales se generan cuando hay un momento de flexión y torque sobre un eje giratorio, existen varios casos de estos esfuerzos como lo es, el esfuerzo complejo, en cual las cargas son asincrónicas; que no se realizan al mismo tiempo y aleatorias; el esfuerzo simple se da cuando la dirección de la carga del esfuerzo es constante en el tiempo.

Los esfuerzos residuales, son cuando una pieza o material se deforma plástica y no uniformemente, quedan esfuerzos que son perjudiciales al ser de tracción pero benefician a la pieza si son por compresión ya que por esto no permiten la formación de grietas y de esta manera la falla por fatiga, el proceso del recocido y algunas veces el laminado son algunos ejemplos de esto.

La resistencia a la fatiga aumenta debido a los esfuerzos residuales de compresión que se introducen a los esfuerzo por diferentes técnicas, algunas de estas son el pre-esforzado mecánico y los tratamientos térmicos y el graneado.

2.8. Características de la fatiga (Propagación de Grietas)

Al realizar pruebas microscópicas los metales no son homogéneos ni isotrópicos, (Un elemento estructural presenta propiedades invariables.) las grietas se presentan en los materiales menos dúctiles con mayor rapidez, debido a que son más vulnerables a la grieta, cuando el material presenta una resistencia de influencia menor a la estándar de 46ksi y 58ksi (320 MPa o 3 200 kg/cm² y 405 MPa o 4 100 kg/cm²) de este se genera una fluencia local como concentración de esfuerzos [8].

El incremento de esfuerzos para iniciar una grieta se origina debido a los vacíos o inclusiones que tiene el material en un área determinada, con una concentración de esfuerzos muy grande se desarrolla una zona plástica en el origen de la grieta cada vez que esta sea sometida a un esfuerzo, el crecimiento de la grieta es originado por el esfuerzo de tensión creciendo normalmente en los planos de esfuerzo de tensión, cuando el material está expuesto a una mayor amplitud de esfuerzos esto causa un crecimiento superior en la grieta en el ciclo de trabajo, si el material presenta algún tipo de corrosión, la propagación de la grieta es mayor a comparación de un material en óptimas condiciones, debido a la pérdida de material causado por la grieta este se va a corroer rápidamente, este proceso se le denomina fátiga por corrosión.

“Se utilizan tres modelos de falla por fatiga, cada uno de los cuales tiene un lugar y un propósito. Ellos son: el procedimiento de esfuerzo-vida (S-N), el procedimiento deformación-vida (ϵ -N) y el procedimiento de la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM).” cada modelo es utilizado dependiendo de la aplicación estructural, la cual se está analizando [8].

Cuando la ruptura de los materiales es por ciclos repetitivos frecuentes o ciclos bajos de esfuerzos a los cuales están expuesto el material durante su ciclo de vida se le conoce como el régimen de fatiga (fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas).

2.9. Rapidez de la grieta

“Si se hace un seguimiento experimental del crecimiento de una grieta en relación con el número de ciclos, para un esfuerzo de fatiga constante, usualmente se observa que la tasa de crecimiento de grieta aumenta con el aumento de longitud de ésta. También, bajo determinadas condiciones de ensayo, por lo general al aumentar el esfuerzo de fatiga aumenta la tasa de crecimiento de grieta”

2.10. Modelos de fractura

2.10.1. Método Fatiga-vida

Dependiendo de la vida requerida de la pieza, esta se puede diseñar para que soporte ser sometida a cargas repetitivas, hay algunos materiales a los cuales no se le puede aplicar este método debido a que no presentan un límite de fatiga.

2.10.2. Método Esfuerzo-vida Fatiga de ciclo alto (HCF)

Se espera que el ensamble dure por más de aproximadamente 10^3 ciclos de esfuerzo. El modelo funciona mejor cuando las amplitudes de la carga son predecibles y consistentes durante la vida de la pieza. Se trata de un modelo con base en el esfuerzo”. Se busca determinar la resistencia de fatiga para cada material en específico, teniendo en cuenta las amplitudes de carga durante día vida de la pieza, de modo que los esfuerzos cíclicos se mantengan por debajo a la fatiga del material manteniendo a los esfuerzos y las deformaciones en la zona elástica previniendo así la fluencia local que inicie la grieta. Este diseño se utiliza para piezas de vida infinita que mantengan una carga cíclica baja. (Como aceros o polímeros u otros materiales que estén expuestos a estos esfuerzos).

En el diseño de piezas de régimen de alto ciclaje es utilizado este modelo, el cual consiste en la variación de esfuerzos sean conocidos y consistentes, estos procesos ocurren en las máquinas rotativas, en este modelo se limitan los esfuerzos a valores menores a los críticos, siendo fácil de aplicar [8].

2.10.3. Método Deformación-Vida

Con este modelo se brinda una representación del inicio de la grieta, "El modelo basado en la deformación brinda una imagen razonablemente precisa de la fase de inicio de la grieta", se toma también en cuenta las variaciones de carga durante los ciclos de vida, como sobrecargas que pueden afectar o no en la zona de falla del material, con este método se puede manejar combinaciones de temperatura y fatiga, este método es aplicado para vida finita donde se crea una fluencia local por razón de los esfuerzos cíclicos. Este método es de los más avanzados ya que se emplean con una computadora (partes mecánicas de vehículos de alta gama que permiten analizar mediante sus dispositivos electrónicos).

En piezas de régimen de bajo ciclaje, donde se basa en bajas deformaciones para predecir el inicio de grietas se aplica este proceso el cual es bastante complejo para lo cual se necesita de un computador para ejecutarlo [8].

2.10.4. Método mecánico de la fractura lineal-elástica (LEFM)

"Es modelo de la fase de propagación de la grieta del proceso. Este método se aplica a problemas de LCF, de vida finita", podemos determinar la vida útil que le queda al material que ya presenta grietas, en piezas donde ya se evidencia la falla, debido a altos esfuerzos cíclicos que se ejercen en la pieza. Es utilizado en la industria aeronáutica y aeroespacial pues soportan grandes carga pero no repetitivas durante su vida de servicio.

3 Elementos de sujeción

3.1. Funciones, estructura y fabricación

Su función es mantener unido las partes de algún elemento o máquina, las principales características de los sujetadores son: 1. Proporcionar la fuerza de unión 2. Transferir la carga de un elemento a otro La correcta instalación (no presentar movimiento entre los elementos unidos) y torsión necesaria según fabricante es clave para que el perno resista y garantizar su vida útil, de lo contrario fallará.

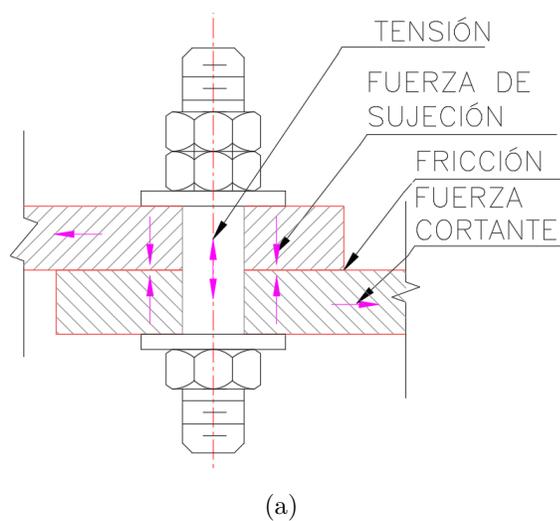


Figura 3-1: Esquema de sujetador.

Los pernos se fabrican en varilla de acero laminado las más pequeñas conformadas por "moldeado en frío" y a partir de $1 \frac{1}{4}$ " "Moldeado en caliente" Su comportamiento estructuras está bajo a compresión, tracción, cortante y flector.

3.2. Posibles fallas en los sujetadores

Comúnmente los sujetadores presentan cambios de sección drásticos, que aumentan la concentración de esfuerzos en el caso de los sujetadores se presentan mayor tensión en el radio bajo la cabeza y salida de la rosca (primera rosca bajo la tuerca); donde se presenta mayor fallo bajo cargas cíclicas. Para las uniones con sujetadores se distinguen dos casos: Cuando

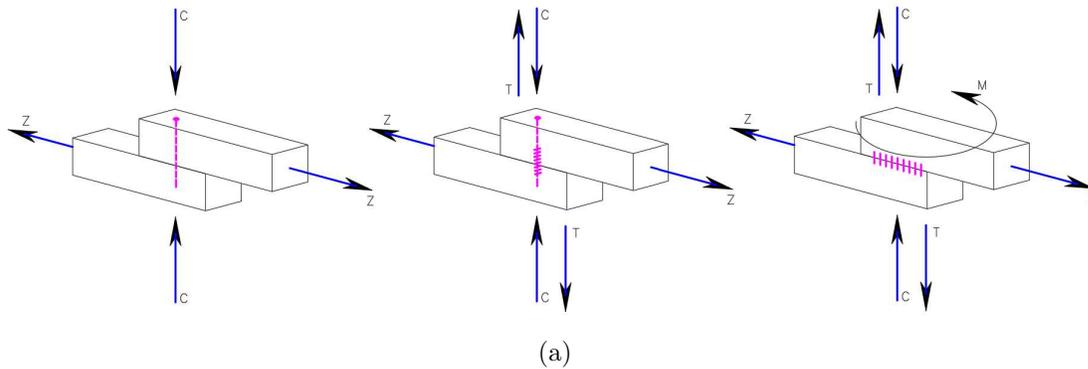


Figura 3-2: Comportamiento estructural.

la carga esta aplicada axialmente denominada carga a tracción y cuando es perpendicular al eje del tornillo denominada a carga cortante”

Para las uniones con sujetadores se distinguen dos casos: Cuando la carga esta aplicada axialmente denominada carga a tracción y cuando es perpendicular al eje del tornillo denominada a carga cortante” Además de las fallas de forma o diseño se presentan también fallas como sobrecargas, par de torsión incorrecto, ”relajamiento de la unión debido a los residuos entre las caras de unión, material inadecuado de la empaquetadura, arandelas mal endurecida, superficies de contacto rugosas, entre otros. La fuerza de ”precarga” y de sujeción se pierde y el perno debe soportar toda la carga externa.”.

4 Procedimiento de análisis

4.1. Metodología

La metodología que se uso para la realización del análisis de falla consta de 11 pasos en los cuales se busca dar respuesta a las causas y modos de falla de los elemento mecánicos de sujeción a estudiar, esta metodología es planteada en el bibliografía especializada, donde el autor sugiere que esos deben ser los pasos para un correcto análisis de falla. Dichos pasos son [10]:

- 1. Recopilación de datos y antecedentes - Selección de muestras.
- 2. Examen previo de la pieza dañada (examen visual y conservación registro).
- 3. Ensayos no destructivos.
- 4. Ensayos mecánicos (Pruebas de dureza).
- 5. Selección, identificación, conservación y / o la limpieza de las muestras (y la comparación con las piezas que no han fallado).
- 6. Examen, análisis y documentación fotográfica macroscópica (Superficies de fractura, grietas secundarias, y otros fenómenos de superficie).
- 7. Examen y análisis microscópico.
- 8. Examen y análisis de las muestras metalográficas.
- 9. Determinación del mecanismo de fallo.
- 10. Análisis de la mecánica de la fractura.
- 11. Análisis de todas las pruebas, la formulación de conclusiones, y escribir el informe (incluyendo recomendaciones).

Estos pasos se explican brevemente a continuación [10]:

- 1. Recopilación de datos y antecedentes: Es importante conocer toda aquella información sobre la pieza que permita establecer parámetros de servicio en campo, así como información bibliográfica sobre fallas en piezas similares.

- 2. Examen previo de la pieza dañada: Un examen visual preliminar permite al ingeniero reconocer lo que ha sucedido en la pieza pudiendo reconocer el principio de falla, posibles causas, corrosión, y elementos que le podrán advertir por donde pueden inclinar su investigación.
- 3. Ensayos no destructivos: Son una serie de técnicas que no realizan daños en la pieza, en las cuales se puede determinar grietas, fisuras o fallas que a simple vista no se pueden detectar, el empleo de estas técnicas permite la observación clara del posible inicio y/o la bifurcación que pudo sufrir las grietas en la pieza.
- 4. Ensayos mecánicos: Son una serie de técnicas en las cuales se puede determinar distintas propiedades del material que ha fallado tales como: dureza, resistencia máxima, elasticidad, tenacidad entre otras las cuales permitirán al investigador obtener una amplia vista de posibles causas en el fallo.
- 5. Selección, identificación, conservación y / o la limpieza de las muestras: Se realiza un proceso de selección de partes en la cuales se desarrollarán los siguientes pasos de la metodología.
- 6. Examen y análisis y documentación fotográfica macroscópica: Ya localizado las áreas a revisar donde probablemente se encuentren rastro de las fallas se realizan fotografías macroscópicas donde se observará y documentará todo aquello que sea evidencia.
- 7. Examen y análisis de las muestras metalográficas: Preparación y pulido en piezas a estudiar.
- 8. Examen y análisis microscópico: En base al paso anterior, se identifican zonas en las cuales sea prioridad realizar análisis de microscopio en el cual se visualizará la microestructura de la falla en el material. Posiblemente se encontrarán muchas de las respuestas del modo de falla en este paso.
- 9. Determinación del mecanismo de fallo: A partir de las pruebas se puede determinar el mecanismo e fallo tales como: Distorsión o deformación no deseada, Fractura, corrosión y/o Desgaste.
- 10. Análisis de la mecánica de la fractura: Se intenta determinar la serie de hechos por los cuales ocurre alguna de las 4 o combinación de los mecanismos de fallo.
- 11. Análisis de todas las pruebas, la formulación de conclusiones. En base a todas las pruebas y conclusiones, se genera un informe en el cual se argumente la causa raíz de fallo de las piezas estudiadas, así como una serie de recomendaciones las cuales buscan que no vuelvan a ocurrir fallos en piezas idénticas a las estudiadas.

4.2. Inspección Visual

Las piezas analizadas fueron tomadas de CART CENTER SERVICE; un taller de mantenimiento ubicado en la ciudad de Bogotá, los elementos hacían parte del sistema de sujeción de amortiguación y sujeción del chasis, presentaban fractura en el vástago y se realizó análisis detallado de la sección fracturada; para poder llegar a la posible causa raíz de su falla.

La inspección visual "VT" es un ensayo no destructivo, de bajo costo y es uno de los más básicos, mas no menos importante, nos ayuda a interpretar ensayos posteriores; según la sociedad americana de ingenieros mecánicos ASME (The american society of Mechanical Engineers) sección V, "pruebas no destructivas" , se recomienda que la inspección visual tenga un ángulo de observación de 30° y la distancia de observación no debe superar a 600 mm, en ocasiones se pueden utilizar lentes de aumento, linternas, para inspeccionar superficies internas y para inspecciones poco accesibles como tanques se utilizan componentes remotos como fibroscópios, o sondas adaptadas a una cámara digital con esto podemos determinar el estado general de la pieza, identificando características o rasgos de su falla.

4.3. Perno de Diámetro (1/2)", Perno de cuna del sistema de suspensión

Según la figura 4-1-a, se puede observar que su fractura tiene poca deformación plástica, la superficie es netamente rugosa con diferentes zonas donde posiblemente se propago la grieta hasta su fractura final, el cuerpo o vástago del perno no está en buenas condiciones; tiene desgastada la superficie, tiene un color grisáceo oscuro, textura áspera y porosa.

4.4. Perno de Diámetro 3/8", Perno de rueda, Eje delantero

Según la figura 4-1-b, se puede observar que la fractura tiene alta deformación, se identifica claramente marcas radiales, el borde presenta una textura afilada y se observa dos tipos de zona una con textura plana-lisa y otra zona con textura rugosa-ligera.

4.5. Análisis Metalográfico de las muestras

El análisis metalográfico de las muestras ayuda a caracterizar los materiales; nos permite estudiar la microestructura e identificar las propiedades del material mediante la correcta preparación de las piezas según ASTM E3-01(2017) "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens" (Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas)

muestra el paso a paso como realizar diferentes fases que debe pasar la muestra para obtener resultados acertados [1, 3].

Las dos piezas fueron preparadas previamente para eliminar cualquier residuo y dejar la superficie limpia mediante un proceso de pulido con lijas calibre 60-100-240-600-1000 por operaciones repetidas, adicionando agua fría constante sobre la lija para evitar el calentamiento y/o aumento de temperatura para no afectar su estructura. Posteriormente se realizó un pulido en disco de paño agregando agua con alúmina hasta lograr un brillo espejo óptimo. Finalmente la superficie de la pieza fue tratada químicamente sumergiendo la cara de brillo espejo en ácido Nítrico disuelto en alcohol etílico al 10 % (solución utilizada en aceros bajos en carbono), la acción se detuvo colocando la pieza bajo chorro de agua y secándola bajo aire caliente evitando el contacto directo con la superficie tratada.

Se utilizó un microscopio de platina invertida, OLYMPUS GX-41, junto una cámara de video y un monitor disponible en los laboratorios de la Fundación Universitaria Los Libertadores y mediante la inspección visual se definieron zonas importantes a analizar con el microscopio para poder determinar el tamaño, fronteras de grano, forma y distribución llegando a caracterizar el material y estudiarlo.

4.6. Micrografía Perno de Diámetro (1/2)”

La Figura 4-3 se pudo observar estriaciones e inicios de grietas las cuales pueden ser producidas por el funcionamiento del perno durante el ciclo de trabajo, las zonas son rugosas; características de una fractura frágil, las nucleaciones formadas son puntos críticos en los cuales se pueden presentar grietas al interior del material y posee una superficie es áspera visible.

4.7. Micrografía Perno de Diámetro (3/8)”

En la figura 4-4 podemos observar la formación de estriaciones anulares, se identifica la falla periférica e inicios de grietas las cuales pueden ser producidas por el funcionamiento del perno durante el ciclo de trabajo y/o sobrecarga, las zonas de textura que se identifican plana-lisa y rugosa-ligera son características de una fractura dúctil.

4.8. Metalografía Perno de Diámetro (1/2)”

En la Figura 4-5-d, se logra identificar claramente la microestructura donde predomina la perlíta en una matriz ferrítica por lo tanto su dureza es alta, (ver numeral 8.4 Ensayo de

dureza Rockwell)

4.9. Metalografía Perno de Diámetro (3/8)”

En la Figura 4-6-d, se logra identificar una zona de concentración de bainita (combinación de perlita y martensita), al lado izquierdo superior por el tamaño de grano notablemente más grande una concentración de martensita, por lo tanto su dureza es baja, (ver Ensayo de dureza Rockwell seccion 4.10), por los pequeños granos y la poca conformación de perlita nos da índices que su enfriamiento fue lento.

4.10. Ensayo de dureza Rockwell

Los ensayos de dureza proporcionan información del rendimiento del material, esta información nos permite conocer su resistencia a la deformación elástica, plástica o destrucción debido a una carga aplicada. Entre los diferentes tipos de pruebas se encuentran la dureza de Brinell, de Vickers y de Rockwell, siendo esta última tomada para nuestro análisis; mientras los otros análisis son más complejos, este nos da una medición directa y es apto para diferentes materiales.

Se considera como un ensayo no destructivo por el tamaño de huella que deja sobre el material, las unidades dadas son en HRC; donde HR identifica el ensayo tipo Rockwell y C la escala usada, ver tabla 1, se trabajó en escala C punta de diamante, utilizada para materiales duros y/o tratados térmicamente, la punta de diamante tiene 120° de punta redondeada y de radio 0.2-0.01 mm, el tamaño de la huella efectivo se relaciona con un número de dureza; cuanto más blando el material, mayor y más profunda la huella, y menor es el número de dureza [2].

Para nuestro ensayo se usó un durómetro referencia ”Brooks Inspection Equipment” disponible en los laboratorios de la Fundación Universitaria Los Libertadores método de dureza Rockwell, punta de diamante, los pernos fueron seccionados y preparados mediante la limpieza de las superficies y pulidos uniformes con el fin de que los resultados fueran más precisos.

Se colocaron las piezas una a una sobre la base de trabajo buscando una zona plana para que la punta de diamante quedara bien posicionada, inicialmente se cargaron a 15kgf con el fin de determinar el punto de partida para la medición posterior y tener una ubicación precisa para aplicar la carga total de 150 Kgf, según la norma ASTM E18 ”Métodos de prueba estándar para la dureza de Rockwell” la carga se debe retirar después de estabilizarse, este ensayo no requiere ningún cálculo adicional pues en el tablero indicador nos muestra la dureza respectiva.

Según la Figura 4-6, la dureza obtenida es de 39 HRC+-1, designa el material con una resistencia alta, es un material con tratamiento templado y revenido a entre 150°C -650°C mejorando su dureza con una resistencia máxima a la tensión de 1262 MPa y su límite elástico a la tensión es de 814 MPa aproximadamente.

Según la Figura 4-7, la dureza obtenida es de 20 HRC+-1, lo cual nos designa que el material es con una resistencia media, información que se confirmó con el fabricante dando la referencia del perno Grado 8.8 para uso estructural, normalizado permitiendo que el material tenga un material más fino y buenas condiciones de maquinabilidad, su límite elástico a la tensión es de 427 MPa y su resistencia máxima a la tensión de 745 MPa y aproximadamente.

4.11. Mecanismo de falla perno 1/2”

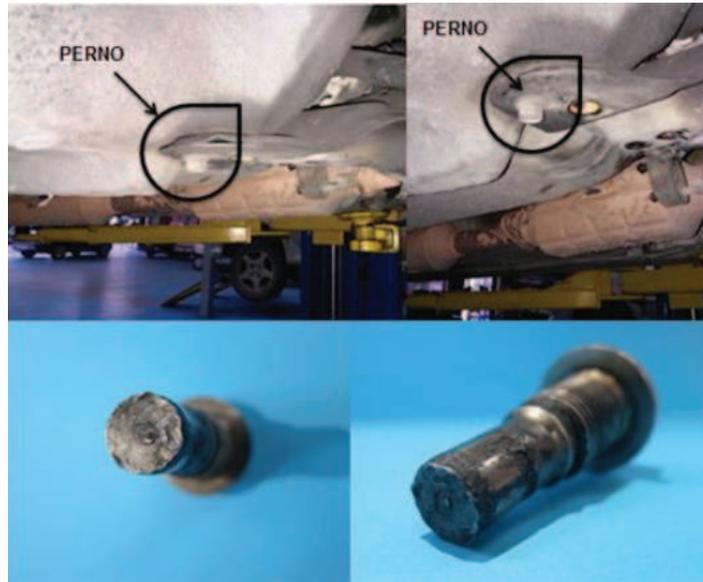
En la Figura 4-8 se observa fatiga frágil a torsión, (Ángulo de 90) es un material duro, con poca deformación plástica pues no presenta alargamiento ni adelgazamiento característica propia de una fractura súbita, al ser una fractura frágil desarrolla múltiples marcas de trinquete por donde la grieta puede iniciar en cualquier lugar con ausencia de concentración de esfuerzos.

La fractura es de tipo trans-granular pues hay varias zonas o superficie planas con textura áspera, rugosa con color grisáceo no muy brillante, posiblemente es debido a la combinación de cargas, ambiente de trabajo y/o materiales de fabricación. Aunque es difícil ver donde inicio la falla hay características que pueden dar rasgos de falla, el cuerpo del perno no se encontró en buen estado, tenía fisuras o incisiones posiblemente por mal ensamble o desgaste que posiblemente al aplicar la carga repetitivamente falló el material.

4.12. Mecanismo de falla perno 3/8”

En la Figura 4-9 se observa zonas de falla por fatiga Dúctil a flexión, es un material blando presentando una alta deformación plástica con un tipo de fractura de cono y copa (Ángulo de 45 °) las partículas del material tienen a deformarse antes de desprenderse en la zona de inicio, están presentes la concentración de esfuerzos donde se ve claramente el inicio y fin de fatiga se observa una textura plana-lisa y donde finaliza la fractura su color es más oscuro y áspero, son claramente visibles la propagación y la fractura final está rodeada de marcas de playa; con espaciamiento fino lo cual permite evaluar que la velocidad de propagación fue lenta bajo cargas uniformes. Con la concentración superior derecha que nos indica que este fue el área que soportó mayor esfuerzo mayor para su falla y su crecimiento es de forma

transversal, no centrado en la pieza.

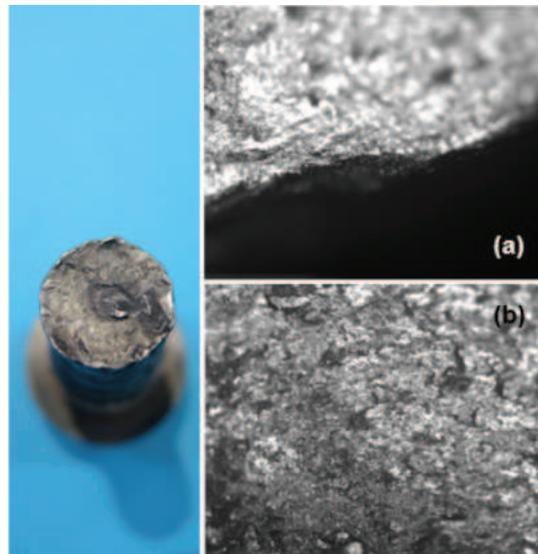


(a)



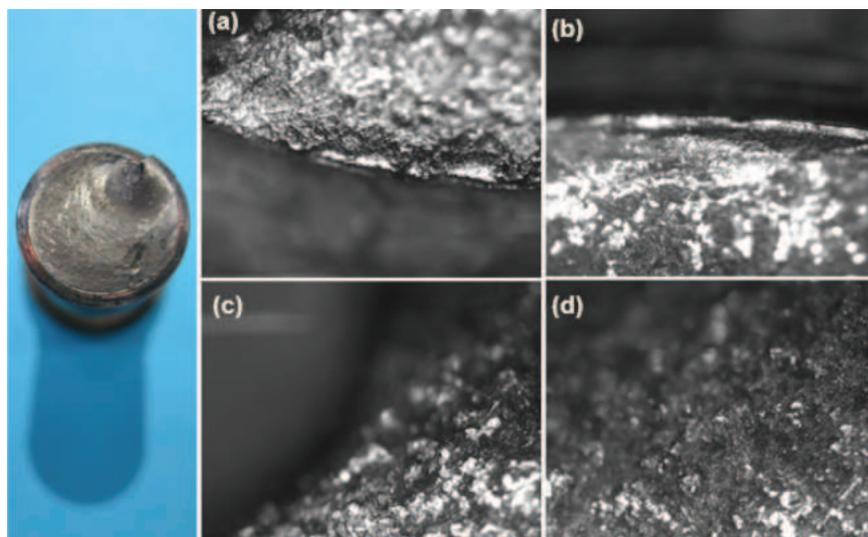
(b)

Figura 4-1: a). Perno de Diámetro (1/2)". b). Perno de 3/8".



(a)

Figura 4-2: a). Micrografía borde de falla a 100x. b). Micrografía falla a 100x



(a)

Figura 4-3: a). Micrografía borde de falla a 100x, b) Micrografía borde exterior de falla a 100x, (c) Micrografía de falla a 100x, d) Micrografía de inicio de falla a 100x.

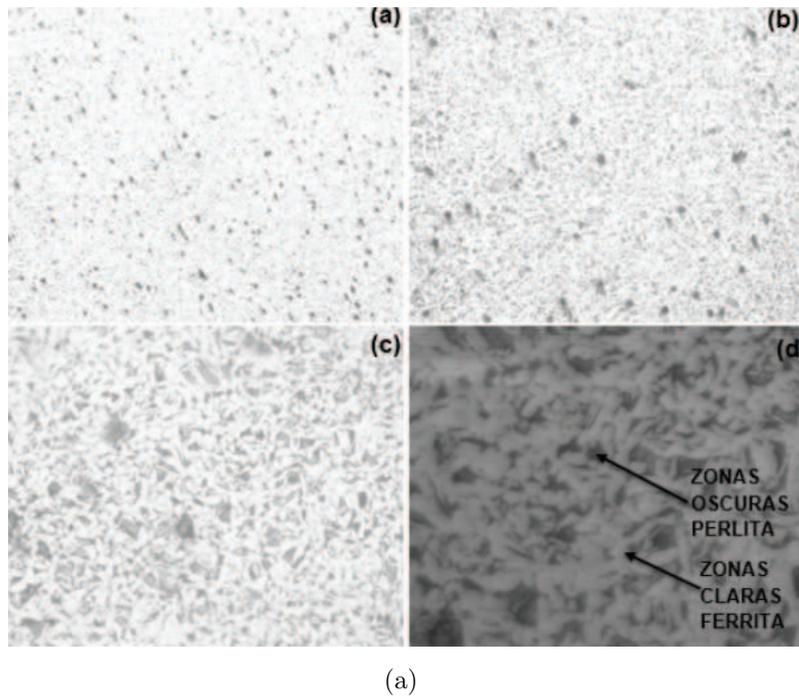


Figura 4-4: Micrografía óptica perno 1/2" con ataque químico a). 100X, b) 200X, c) 500X, d) 1000X.

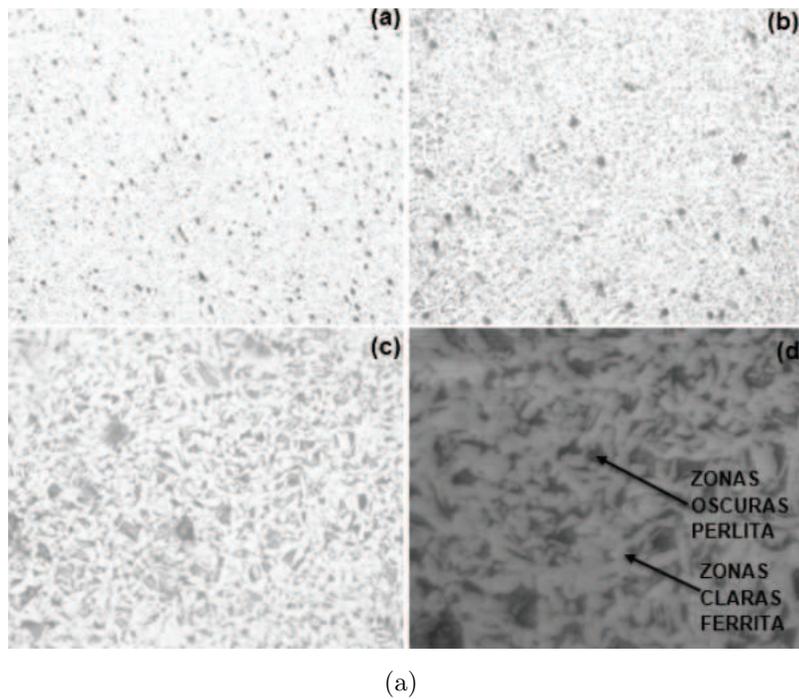


Figura 4-5: Micrografía óptica perno 3/8" con ataque químico a). 100X, b) 200X, c) 500X, d) 1000X.



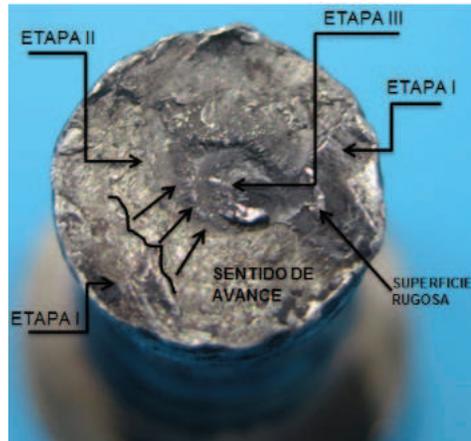
(a)

Figura 4-6: Dureza Rockwell, Punta de diamante; 150Kgf, 39HRC, perno 1/2".



(a)

Figura 4-7: Dureza Rockwell, Punta de diamante; 150Kgf, 20HRC, perno 3/8".



(a)

Figura 4-8: Análisis perno de diámetro 1/2", Zona I-Inicio; Zona II-Propagación, Zona III-Fractura.



(a)

Figura 4-9: Análisis perno de diámetro 3/8", Zona I-Inicio; Zona II-Propagación, Zona III-Fractura.

5 Conclusiones

- El estudio y análisis de las fallas, permite a los futuros ingenieros poder enfrentar situaciones reales, como es el caso de nuestro estudio "Fatiga - Fractura". Durante este proyecto, se realizaron actividades con elementos cotidianos, los cuales fueron expuestos a este tipo de falla, permitiendo indagar, estudiar y desarrollar habilidades para identificar características propias del material, analizar su microestructura y relacionar todos los aspectos del mismo; poniendo en práctica los conocimientos adquiridos en el transcurso de nuestro análisis y durante nuestros estudios profesionales. Lo anterior permitió definir las posibles causas raíz del fallo, cómo poder mitigarlas en el futuro.
- Mediante los análisis realizados para el estudio de la "Fatiga - Fractura" de los elementos de sujeción con características parecidas en su punto de ruptura que fueron tomados como muestra, se pudo identificar aquellos factores causales de falla mencionados anteriormente, lo cual nos permite tener presente como minimizar los causales de fallas en los elementos de sujeción quienes a pesar de ser componentes micro estructurales forman parte de componentes macro-estructurales. Se recomienda implementar un monitorio adicional para verificar la calidad de los materiales de fabricación, analizar el historia de falla de componentes similares o iguales para determinar si la falla evidenciada es recurrente o caso aislado, análisis de diseño para verificar que la vida útil del componente es adecuada para las condiciones de trabajo, entre otras.

Bibliografía

- [1] ASTM, E: ASTM E3-01 - Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2001)
- [2] 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)
- [3] ASTM, E: ASTM E340-00 - Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2013)
- [4] BUDYNAS, R.G. ; NISBETT, J.K.: *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (9a. ed.)*. McGraw-Hill Interamericana, 2012. – ISBN 9781456217938
- [5] CAMPBELL, F.C.: *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*. ASM International, 2012 (Ingeniería e ingeniería civil). – ISBN 9781615039760
- [6] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM Handbook: Fatigue and fracture*. ASM International, 1990 (ASM Handbook)
- [7] MILELLA, P.P.: *Fatigue and Corrosion in Metals*. Springer-Milan, 2012. – ISBN 9788847023369
- [8] NORTON, R.L.: *Machine Design*. Prentice Hall, 2014. – ISBN 9780133356717
- [9] SHANLEY, F.: *Mecánica de materiales*. Mc-Graw Hill, 1971
- [10] WULPI, Donald J.: *Understanding how components fail*. ASM international, 2013