



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

EL ANÁLISIS DE FALLA EN EL DISEÑO MECÁNICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A :

KARINA SÁNCHEZ GALICIA

DIRECTOR DE TESIS

DR. ARMANDO ORTÍZ PRADO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA.

A Dios,
por sus enseñanzas y amor.
"Busque a Jehová, y el me oyó,
y me libró de todos mis temores". Salmo 34.4

A mis padres,
por su gran esfuerzo, dedicación, amor y paciencia.
Siempre serán mi motivo para seguir adelante.

A mis hermanos,
por su compañía y cariño, en especial a Mari por su apoyo y confianza.

A Edgar,
por todos estos años que estuviste a mi lado,
sobre todo por los sueños y momentos compartidos, por creer en mi y darme tu amor.

AGRADECIMIENTOS.

Al Dr. Armando Ortiz Prado, por sus conocimientos, experiencia, apoyo y aportaciones a este trabajo. Sobre todo a la confianza y paciencia que me brindo en mi formación académica y personal.

A todos los que integran la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales, por las facilidades brindadas y por las aportaciones a este trabajo. A su aceptación y amistad durante mi estancia en dicha unidad.

Al Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz, al M. en I. Antonio Zepeda Sánchez, al Ing. Jorge Luís Romero Hernández y al Ing. Ubaldo Eduardo Márquez Amador por las sugerencias y respaldo brindado a esta tesis.

A mis inolvidables amigos: Abraham, Alejandro, Álvaro, Ana, Billy, Cesar, Cecilia, Erika, Gabriel, Gabo, Luis Alberto, Marco, Omar, Paco y Paola. No importa el orden en el que estén, todos representan algo esencial e importante en mi vida y en mi formación, sobre todo por todos los momentos buenos y malos que pasamos juntos. Por las experiencias vividas dentro y fuera de la facultad, pero seguro que las que vienen serán mejores.

A mis cuñadas, y a mí querida sobrina Danahi que llegaron a ser el complemento de mi familia. Por que a pesar de todo sigamos juntos apoyándonos y cuidándonos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a todos los profesores quienes me enseñaron y formaron como Ingeniero y como persona.

ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Diseño mecánico

Análisis de falla

Consideraciones de diseño

2. INCONVENIENTES EN EL DISEÑO

Generalidades

Concentradores de esfuerzo

Inadecuada selección del material

Fallas ocasionadas por esfuerzos residuales

Fallas en la elección de los procesos de manufactura

Mecanismos de fractura

3. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO

Caso I. Falla en un motor de combustión interna

Caso II. Falla de barra estabilizadora de suspensión

Caso III. Falla de muelle Z de suspensión trasera neumática de autobús para servicio urbano

4. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA PARA EL ESTUDIO DE CASOS EN ELEMENTOS MECÁNICOS

Metodología

Análisis de falla de los casos

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

OBJETIVO:

Estudiar la importancia del análisis de falla como un elemento de retroalimentación, teniendo en cuenta los inconvenientes que se presentan y sus efectos en la generación de fallas antes y durante el servicio de los elementos, determinando así, las fallas prematuras causadas por deficiencias en el diseño.

Por lo cual en este trabajo se presentaran algunas recomendaciones en el diseño que conlleven a evitar cualquier tipo de falla en los nuevos elementos, señalando el valor de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales de la Facultad de Ingeniería al solucionar problemas que se han presentado a industrias de índole público y privado.

PRÓLOGO.

El análisis de falla es una técnica utilizada en la industria, en aseguradoras y en el ámbito académico para encontrar las causas que llevaron a un elemento a fallar. Se tiene un problema cuando hay una desviación entre las expectativas y el desempeño del elemento diseñado, pero tomando en cuenta las acciones correctivas necesarias se impedirán la reincidencia de estas fallas.

En este trabajo se muestran algunos de los inconvenientes más comunes en cuanto a la mecánica y el diseño de los componentes. El análisis llevado a cabo permite tener un amplio panorama de las deficiencias en el diseño, errores en el ensamble y defectos de manufactura.

Dentro de las consideraciones en el diseño se previenen problemas repetitivos; identificando los riesgos, asumiendo que se pueden tener errores al tomar una elección. Por lo tanto la importancia del análisis de falla en el diseño evita los problemas antes de que sucedan. Si bien es cierto, no existe la perfección de un elemento, pero al menos se puede aproximar a una vida útil lo más larga posible, de alta calidad y sin alguna consecuencia catastrófica.

Los casos estudiados en este trabajo presentan una falla, las cuales al ser analizadas determinaron los modos de falla presentes que permiten conducir a la implementación de medidas correctivas para que dichas fallas no se repitan. En este trabajo se presenta el análisis de falla y simultáneamente se presentan los pasos más relevantes que se deben seguir en la metodología para el análisis de falla.

El análisis de falla en el diseño es de gran importancia en la actualidad debido a la demanda de máquinas de elevada producción, silenciosas y ergonómicas. Para satisfacer las necesidades requeridas algunos ingenieros sustituyen piezas con productos de bajo costo, ideando proyectos que resultan inseguros y peligrosos para la vida humana. El problema radica en relacionar la resistencia de un elemento con las cargas externas que se le apliquen, dando lugar a esfuerzos internos en el elemento; previniendo el riesgo en el uso del producto, el ingeniero de diseño debe tener la seguridad de que esos esfuerzos nunca excederán la resistencia calculada.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES.

En diferentes épocas y lugares han ocurrido accidentes por inconvenientes de diseño. Las pérdidas en algunos casos son humanas, producen daños ambientales y generan pérdidas económicas que pueden afectar a la población, a la empresa, al cliente, al personal, etc. Encontrar la causa de la falla proporciona datos con los que se tomarán precauciones en cuanto a su diseño y operación así como su mantenimiento.

Las teorías, modelos, consideraciones y predicciones hechas durante la etapa de diseño son puestas a prueba en su ambiente de trabajo. Las fallas que ocurren durante su servicio traen consigo evidencias, que al analizarse muestran las deficiencias en el sistema, ya sea por una mala selección del material, el proceso de manufactura o las consideraciones de operación.

La tecnología demanda sistemas mecánicos cada vez más pequeños y ligeros, con lo cual se ha maximizado la relación resistencia-peso dando como resultado la presencia de fallas imprevistas debido al límite de diseño al que se llega. La relación beneficio / costo, es resultado de mejoras en el diseño y en la confiabilidad de los sistemas con lo que los resultados del análisis de falla son suficientes para una inversión importante en este campo.

Cuando un sistema y/o mecanismo presenta falla, se deben estudiar los aspectos funcionales relativos al diseño y a los parámetros de servicio, como la carga estática, los esfuerzos de servicio y las condiciones de ensamble. Además de tomar en cuenta las condiciones ambientales a las que está expuesto, como fluctuaciones de temperatura o la presencia de agentes corrosivos. Por último, se deben tener declaraciones del personal de campo con relación al testimonio del operador.

Una falla es la diferencia entre las expectativas por las que el sistema fue diseñado y su desempeño, que al no cumplir con su función se examina a detalle; así el análisis de falla da una visión completa del problema determinando las causas de falla y sus posibles soluciones.

Los problemas de diseño siempre están sujetos a determinadas restricciones y experiencias, todo diseño tiene un propósito concreto: obtener un resultado final al que se llega por una acción o creación de algo real físicamente. ¹

Los ingenieros de diseño incorporan: a) el diseño para manufacturar y ensamblar, b) diseño para calidad, c) diseño para ciclo de vida y d) el diseño de costos. De acuerdo a los materiales que satisfacen los requerimientos de seguridad, confiabilidad y costo de producción. El diseñador toma en cuenta la posibilidad de falla en el mecanismo, pero también las medidas para evitarlas totalmente o reducir los daños en caso de que fueran inevitables.

El análisis de falla tiene varios pasos que se deben seguir con el fin de localizar con precisión la raíz del problema, identificando las causas de falla que afectan su funcionamiento, e indicando las acciones correctivas necesarias. Los cambios en el diseño se dan para la corrección del problema eliminando toda posibilidad de reincidencia y el incremento de presupuesto.

En México no se tiene una amplia historia de desarrollo tecnológico e industrial, ya que cuando se presenta una falla en algún equipo lo más sencillo es esperar alguna indicación o simplemente sustituir la pieza, aumentando los costos y la probabilidad de que vuelva a presentarse el problema. Con el estudio del análisis de falla se prevén las fallas y sus causas, con lo que su rediseño beneficia en todos los aspectos innovando materiales y mejoras en el diseño.

1.2 DISEÑO MECÁNICO.

Como definición general el diseño es un proceso creativo que empieza por los requerimientos del sistema, de modo que cumpla con las características deseadas por las que el sistema ha sido diseñado. Dentro del diseño se observan las normas, fabricación, usos, ensamble, etc.

Las consideraciones técnicas del diseño de partes mecánicas se centran en 2 áreas:

- 1) La relación de esfuerzo-deformación-resistencia que involucran las propiedades globales de un elemento sólido

¹ Shigley, J., Mitchell, L., Diseño e ingeniería mecánica.

2) los fenómenos superficiales como fricción, lubricación, desgaste y deterioro provocado por el ambiente en el que se encuentra operando.

Cumpliendo con propiedades y diferentes exigencias mecánicas, funcionales, laborales y ambientales, la seguridad de un sistema, es responsabilidad del ingeniero que lo ha diseñado, ya que, deben hacerse evaluaciones respecto al ciclo total de vida del sistema o producto, desde su diseño hasta que se desecha, descubriendo hechos de alto riesgo, figura 1.1.

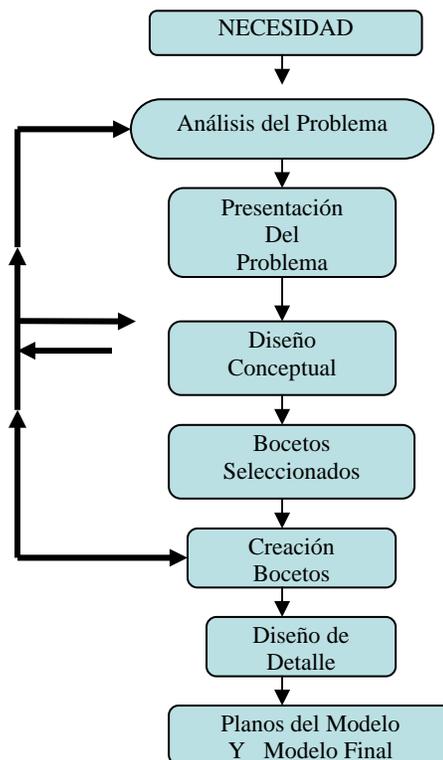


Figura 1.1. Modelo de Diseño.

1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE DISEÑO.

El resultado final en el proceso de diseño del sistema depende de la ingeniería y sus variables, como capacidad de manufactura y clasificación del material. La construcción y costo depende de la demanda y competencia en el mercado, algunos productos se consideran estáticos o dinámicos^{II}:

^{II} NFO Evbuomwan, S. Silvaloganathan and A. Jebb, Proc Instn Mech Engrs., Vol. 210

- a) Productos de diseño estático. Estos diseños ya han sido evaluados y probados, no se les han realizado adaptaciones y/o modificaciones ya que su demanda en la industria y campo laboral es continúa, cumple con todas las necesidades por las que fue diseñado conservando sus características originales.
- b) Productos de diseño dinámico. Los diseños dinámicos tienen una vida limitada ya que evolucionan con nuevos requerimientos e innovaciones de mayor tecnología, logrando un diseño más ligero, con dimensiones mínimas y en algunos casos más estético.
- c) Productos de nuevo diseño. De acuerdo a las ideas y necesidades presentadas, así como a las investigaciones realizadas que el demandante o empresa establezcan se elabora un prototipo del sistema o pieza que se requiera.

Cuando se cumple con el objetivo por el cual fue diseñado el elemento se busca de manera simultánea la manera de no causar contaminación, reducir al mínimo el consumo de energía y la generación de ruido.

1.2.2 FACTORES ECONÓMICOS.

La consideración del costo es importante en el proceso de tomar decisiones en el diseño, ya que el costo de material y mano de obra aumentan periódicamente, por lo que no se debe definir un costo fijo en la presentación del modelo diseñado. Una cotización aproximada en cuanto al costo final del mecanismo o elemento a diseñar es suficiente, asegurando la confiabilidad y seguridad del sistema, ya que una gran inversión se encuentra en riesgo o hay vidas humanas de por medio. Las tolerancias en el diseño influyen de muchas formas en la rentabilidad del producto final. El término tolerancia abarca desde la variación de las dimensiones y los límites para la rugosidad de la superficie, como la variación de las propiedades mecánicas producidas por tratamientos térmicos y otros procesos.

Cuando se comparan dos o mas prototipos, se considera el número de piezas de cada diseño, si los dos cumplen con la misma finalidad es probable que el que tenga menor costo sea el de menor número de partes. Las razones económicas siempre deben prevalecer en cualquier caso de prevención de falla, así como en la evaluación de la confiabilidad ya que involucra estimar cómo varían los costos de diseño, producción y mantenimiento en función de la confiabilidad, cuando se tiene un proyecto con una planeación adecuada el costo y confiabilidad del producto son óptimos, figura 1.2.

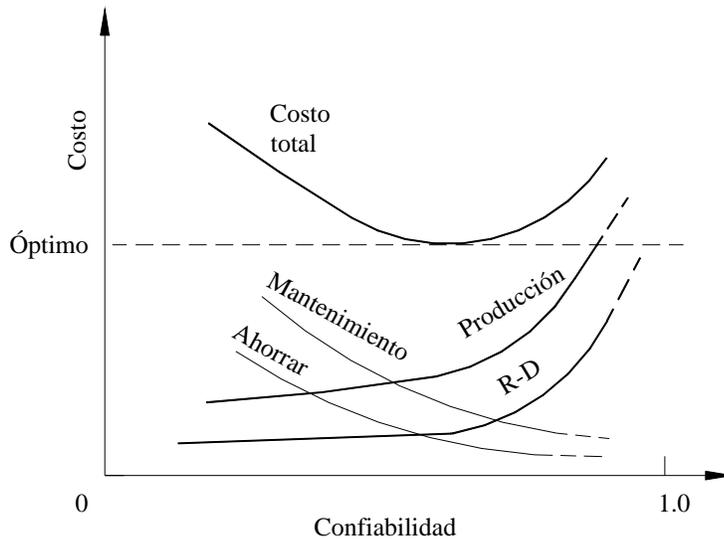


Figura 1.2. Relación costo total- confiabilidad. ^{III}

1.3 ANÁLISIS DE FALLA.

El objetivo del análisis de falla es investigar y analizar las causas por las cuales el sistema ha fallado, para así tomar una decisión que corrija y prevenga dichas fallas. Las evidencias obtenidas durante el análisis sirven para prevenir el comportamiento en el diseño, tomando en cuenta las deficiencias que se presentan con el tiempo, evitando accidentes y costos innecesarios.

Con el análisis de falla se determinarán las causas por las cuales han fallado algunos elementos mecánicos debido al mal diseño, estos casos serán presentados en el capítulo 4. Se dice que una pieza ha fallado cuando deja de ser operable, cuando deja de realizar su función satisfactoriamente o tiene serios deterioros a tal grado que se vuelve inestable e inseguro.

Una fractura se define como la culminación del proceso de deformación plástica. Presentándose como la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un estado de cargas.

^{III} Cerrud, S., Jacobo, V., Ortiz, A., Schouwenaars, R., Análisis de Falla.

La curva de falla conocida como “perfil de tina de baño” define tres zonas de falla que relaciona la frecuencia de falla contra el tiempo de servicio. Como se observa en la figura 1.3 la primera zona es el objetivo de esta tesis en la que muestra las fallas prematuras causadas por las deficiencias en el diseño, errores en el ensamble y defectos de manufactura. Un buen diseño minimiza la presencia de fallas en esta primera zona y extiende el tiempo de servicio aumentando la confiabilidad del sistema o pieza.

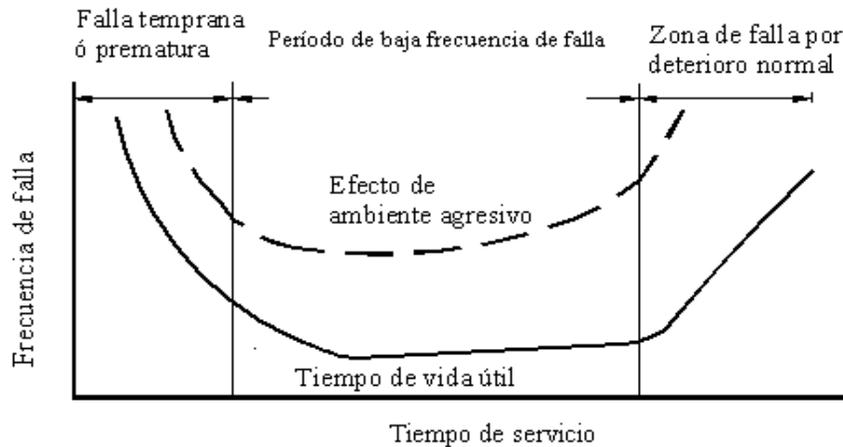


Figura 1.3. Curva de frecuencias de falla.

El primer paso para el análisis de falla es detectar las partes dañadas, y obtener toda la información posible que se haya recolectado.

Las evidencias recolectadas pueden mostrar una fractura en la superficie, aunque no todas son visibles ya que podemos localizar las solicitaciones en el interior de la pieza. Dentro del examen visual se considera también el sitio y lugar donde la pieza o mecanismo ha fallado realizando observaciones y tomando fotografías.

Conocer los datos del elemento mecánico antes y durante la falla, así como los antecedentes del diseño, exponen un panorama general del análisis permitiendo definir las partes que serán seleccionadas para realizar un examen detallado:

- Los ensayos no destructivos tienen por objeto obtener información de defectos en la superficie así como en el interior del elemento que falló.
- Para identificar el tipo y naturaleza de la fractura se hacen estudios fractográficos.

- Las pruebas destructivas aseguran que la calidad del material cumpla con las especificaciones en lo que se refiere a su composición química, su microestructura, etc.

Después de recabar toda la información se realiza un análisis de los datos para obtener conclusiones de la causa de falla y dar recomendaciones para su prevención.

Analizar la falla usando herramientas y técnicas apropiadas permite determinar el origen de la falla; la presencia y localización de concentradores de esfuerzos, el patrón de propagación de la fractura, la orientación de los esfuerzos, la presencia de contaminantes, modo y mecanismos de falla.

Realizar un análisis microscópico del elemento que falló da información referente al tratamiento térmico, deformación, líneas de flujo, inclusiones, porosidad. El uso del microscopio electrónico de barrido (SEM), por su poder de resolución, permite estudiar las superficies de fractura directamente sin preparación metalográfica y observar características más complejas como estriaciones de fatiga, su separación y tasas de crecimiento de grietas.

El analizador de energía dispersa (EDAX) nos permite realizar un análisis químico del material identificando las segregaciones, agentes corrosivos, inclusiones que contribuyeron a la falla. Existen también otras técnicas para el análisis de la superficie como líquidos penetrantes, inspección a bajos aumentos; los cuales detectan contaminantes corrosivos en la superficie de fractura debido a las condiciones de servicio y corrosión.

Cuando se analizan elementos mecánicos es necesario conocer las propiedades mecánicas (esfuerzo de cedencia, ductilidad, resistencia máxima) del elemento que ha fallado para determinar si el material cumplió con las propiedades que fueron demandadas por el diseñador. En la mayor parte de los casos los datos requeridos son obtenidos de un ensayo de tracción, los cuales son valiosos para el diseñador, por ejemplo, en la mayor parte de las estructuras de ingeniería civil la deformación elástica se presentara en mayor o en menor medida, por lo que es importante conocer el esfuerzo de cedencia del material para definir la carga máxima a la que este puede ser empleado.

En términos generales, las fallas se pueden atribuir a una causa o combinación de éstas, es decir, debido a la inadecuada selección de los materiales, su operación, manufactura, el mantenimiento y la exposición a un ambiente hostil los cuales no fueron considerados en el diseño.

Los ingenieros han diseñado con la suposición de que los mecanismos son fabricados de manera ideal con material adecuado pero esta idea es errónea ya que estudios en metalurgia y ciencia de materiales demuestran que no existen materiales perfectos, por eso, sin importar que tan bueno sea el diseño y la fabricación de los materiales siempre existirán defectos, debido a esto las tolerancias cerradas dentro de la producción son el objetivo del diseñador y del fabricante.

1.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

Las consideraciones que influyen en el diseño del elemento o sistema son llamados factores de diseño, en ocasiones ciertos factores serán críticos y si satisfacen las condiciones, ya no será necesario considerar los demás. Algunos son:

1. Resistencia
2. Confiabilidad
3. Condiciones térmicas
4. Corrosión
5. Desgaste
6. Fricción
7. Procesamiento
8. Utilidad
9. Costo
10. Seguridad
11. Peso
12. Ruido
13. Forma y Tamaño
14. Flexibilidad
15. Rigidez
16. Acabado de superficies
17. Lubricación
18. Mantenimiento

Varios de los factores se refieren a las dimensiones, procesos de ensamble, de fabricación y propiedades del material.

El término *factor de diseño* es utilizado para evaluar la condición de seguridad de un elemento. La utilidad más usual del factor de diseño se tiene cuando se compara el esfuerzo con la resistencia a fin de evaluar el grado de seguridad, teniendo en cuenta dos efectos que comúnmente no están relacionados:

- Cuando son fabricadas una gran cantidad de piezas a partir de diversas existencias de material, ocurren variaciones en la resistencia de las diferentes piezas por una diversidad de razones, como su procesamiento, el trabajo en caliente o en frío y su configuración geométrica.
- Cuando la pieza es ensamblada, se presentan variaciones de carga que experimenta la pieza, ocasionando esfuerzos inducidos, con lo cual el fabricante y el diseñador no tienen control.

El uso de códigos y normas que son utilizadas en el proceso de diseño y ensamble de mecanismos es esencial, ya que al tener medidas y tamaños estándares en piezas como tornillos, pernos, sujetadores, uniones, etc., permiten localizar repuestos en casi cualquier parte, minimizando costos y fallas.

El propósito de un código es obtener un grado específico de seguridad, eficacia, eficiencia, buen funcionamiento y calidad. Sin embargo su empleo no implica seguridad absoluta en la operación. Esta cualidad es imposible de obtener ya que en ocasiones se presentan sucesos inesperados con los que el diseñador piensa que es imposible que existan, considerando que son altamente improbables.

Se han creado sociedades y organizaciones que establecen especificaciones necesarias para formular normas y códigos de seguridad o de diseño. Algunas normas y códigos indican la naturaleza de la norma o código establecido. Las principales que interesan a los ingenieros mecánicos son:

Aluminum Association (AA)

American Gear Manufacturers Association (AGMA)

American Institute of Steel Construction (AISC)

American Iron and Steel Institute (AISI)

American National Standards Institute (ANSI)

American Society of Mechanical Engineers (ASME)

American Society for Metals (ASM)

American Society of Testing and Materials (ASTM)

American Welding Society (AWS)

Anti-Friction Bearing Manufacturers Association (AFBMA)

Industrial Fasteners Institute (IFI)

National Bureau of Standards (NBS)

Society of Automotive Engineers (SAE)

La medida estadística de la probabilidad de que un elemento mecánico no falle cuando se encuentra en servicio se llama confiabilidad. El producto terminado es responsabilidad del ingeniero que lo diseñó, por lo que al haberse fabricado y ensamblado adecuadamente y cuando las condiciones de operación son las óptimas, el fabricante y el consumidor tendrán la confiabilidad de que el elemento no presente defectos que propicien alguna falla.

Dentro del diseño en ingeniería un punto esencial que se debe tomar en cuenta es detectar algo que puede considerarse como "mala ingeniería". Si es posible se corrige la deficiencia llevando a cabo los ensayos suficientes para determinar el problema y conocer el origen de la falla.

Lo mejor para impedir defectos de fabricación es aplicar las normas de ingeniería en el análisis y diseño, en el control de calidad, realizar pruebas y análisis adecuados. En la publicidad suelen hacer promesas por encima del elemento para lo cual fue diseñado, el ingeniero de diseño debe examinar detenidamente la información que se va a proporcionar con el fin de eliminar tales ofrecimientos.

CAPÍTULO 2.

INCONVENIENTES EN EL DISEÑO.

2.1 GENERALIDADES.

Las principales causas de falla son debidas a factores como el diseño, selección del material, proceso de manufactura, montaje, almacenamiento, condiciones de servicio, sobrecargas o daños mecánicos. Debido a que las fallas se presentan en cualquier parte del mecanismo a través del análisis de sus causas, se adquiere experiencia al proponer un diseño, determinando la mejor decisión.

Los errores cometidos durante el diseño, causantes de que se presenten fallas en los mecanismos o elementos fabricados son:

Tamaño y forma de los elementos. Las deficiencias en el diseño que se cometen con más frecuencia son la presencia de concentradores de esfuerzo, generadas por las características geométricas al tener una mala decisión de radios, de cambios de sección o por no haber precisado las dimensiones y tolerancias, siendo limitadas en la intersección de muescas mecánicas y radios de filete.

Las muescas, provocan que el esfuerzo en un elemento cargado se incremente abruptamente en su raíz. A los elementos cargados elásticamente la magnitud del incremento de los esfuerzos en la raíz de la muesca está en función del tamaño, del contorno y ángulo de la muesca.

Material. La selección del material se realiza de acuerdo con los requerimientos de la pieza o mecanismo, considerando las propiedades del material y la posibilidad para manufacturarlo, así como el comportamiento dentro del medio ambiente en el que va a operar.

Es común que se cometan errores en el diseño al no considerarse determinadas propiedades tanto mecánicas, eléctricas o químicas que al ser puestas en servicio presentarán problemas.

Aunque es poco usual que el material no corresponda con lo especificado, es común que imperfecciones del material sean la causa o uno de los factores que induzcan a la falla.

La generación de propiedades anisotrópicas, de heterogeneidad en el material, los cambios en la orientación de esfuerzos residuales son causas latentes que pueden producir efectos dañinos en el producto terminado o durante su servicio.

Las imperfecciones pueden favorecer el crecimiento de una fractura o disminuir la resistencia del material, ya que actúan como concentradores de esfuerzo; así mismo en algunos casos favorecen la corrosión.

Procesos de manufactura. Los procesos de trabajo en frío y operaciones relacionadas a estos como el embutido profundo, estirado, doblado y laminado producen una gran cantidad de esfuerzos residuales. Dichas operaciones en ocasiones son causa de alteraciones produciendo microfisuras o macrogrietas, afectando la resistencia y confiabilidad del material. Los efectos en la superficie y los cambios metalúrgicos causados por el proceso tienen influencia en la resistencia a la fatiga, resistencia máxima y resistencia a la corrosión.

Los procesos de corte, punzonado y troquelado producen esfuerzos residuales, asperezas y fracturas en los bordes; las cuales se convierten en concentradores de esfuerzos. La soldadura puede producir fallas por distorsión, esfuerzos remanentes, sensibilización por efecto de la precipitación de carburos entre otros inconvenientes.

El maquinado y esmerilado, con frecuencia provocan esfuerzos residuales y superficies rugosas. El desbaste y esmerilado severo son una fuente de sobrecalentamiento y en consecuencia pueden ablandar algunos puntos localizados, produciendo fisuras.

Pueden ocurrir diversos inconvenientes al someter la pieza a un tratamiento térmico como; sobrecalentamiento, no alcanzar la temperatura austenítica, no dar el revenido adecuado, gradientes de temperatura excesivos. Los problemas más comunes son la presencia de grietas por temple, transformaciones posteriores al temple, descarburación, formación de capas gruesas de óxido, esfuerzos residuales, etc.

Las deficiencias en el diseño provocan fallas catastróficas en el servicio, destacando la necesidad de coordinar los esfuerzos de los ingenieros para eliminar las condiciones que hacen un componente vulnerable a la falla desde el diseño.

2.2 CONCENTRADORES DE ESFUERZO.

El estudio de fracturas en elementos estructurales requiere del análisis de los defectos en los extremos de las grietas o fisuras, los cuales actúan como concentradores de esfuerzos, ya que al aplicar una fuerza externa a un cuerpo elástico que contiene una grieta, el material justo delante de la grieta es sometido a esfuerzos de tracción (σ). Igualmente se presentan esfuerzos de corte (τ) sobre planos a 45° respecto al plano de la grieta. Obteniendo el valor del esfuerzo admisible o el de fluencia en el vértice de la grieta, aunque el esfuerzo medio se mantenga en valores inferiores. Por lo tanto la fractura se puede presentar cuando es excedido el valor del esfuerzo de fluencia en el vértice de la fisura o grieta.

Dentro de la relación de esfuerzos, se presume que la sección transversal de un componente permanece constante y no existen irregularidades en el elemento; pero al diseñar una máquina es difícil que no se tengan algunos cambios en las secciones transversales de los elementos. Toda discontinuidad en el componente de la máquina altera la distribución de esfuerzo en el contorno de la característica, cambiando el estado de esfuerzo.

El uso de factores elásticos de concentración de esfuerzo indica el valor de la carga media que produciría fluencia o deformación plástica en el elemento, se puede efectuar el análisis de las cargas que actúan sobre una pieza, causando fractura por fatiga. Pero cuando las grietas son muy agudas el análisis de esfuerzos no conduce a criterios útiles para el diseño. Si el esfuerzo en la raíz excede al de cedencia del material entonces se presenta flujo plástico, disminuyendo lo agudo de la muesca, reduciendo la concentración de esfuerzos en la raíz de la misma.

En la figura 2.1 se muestra un elemento que falló por concentración de esfuerzo.



Figura 2.1. Falla en el barreno, actuando como concentrador de esfuerzo.
(Placa condilea para fracturas en fémur).

Cuando se tiene la presencia de muescas, originadas accidental o intencionalmente, la localización de una fractura ocurre casi siempre donde se inician éstas. Es importante saber que muchas estructuras fabricadas con materiales dúctiles pueden fracturarse rápidamente si existen concentradores de esfuerzo de magnitud suficiente.

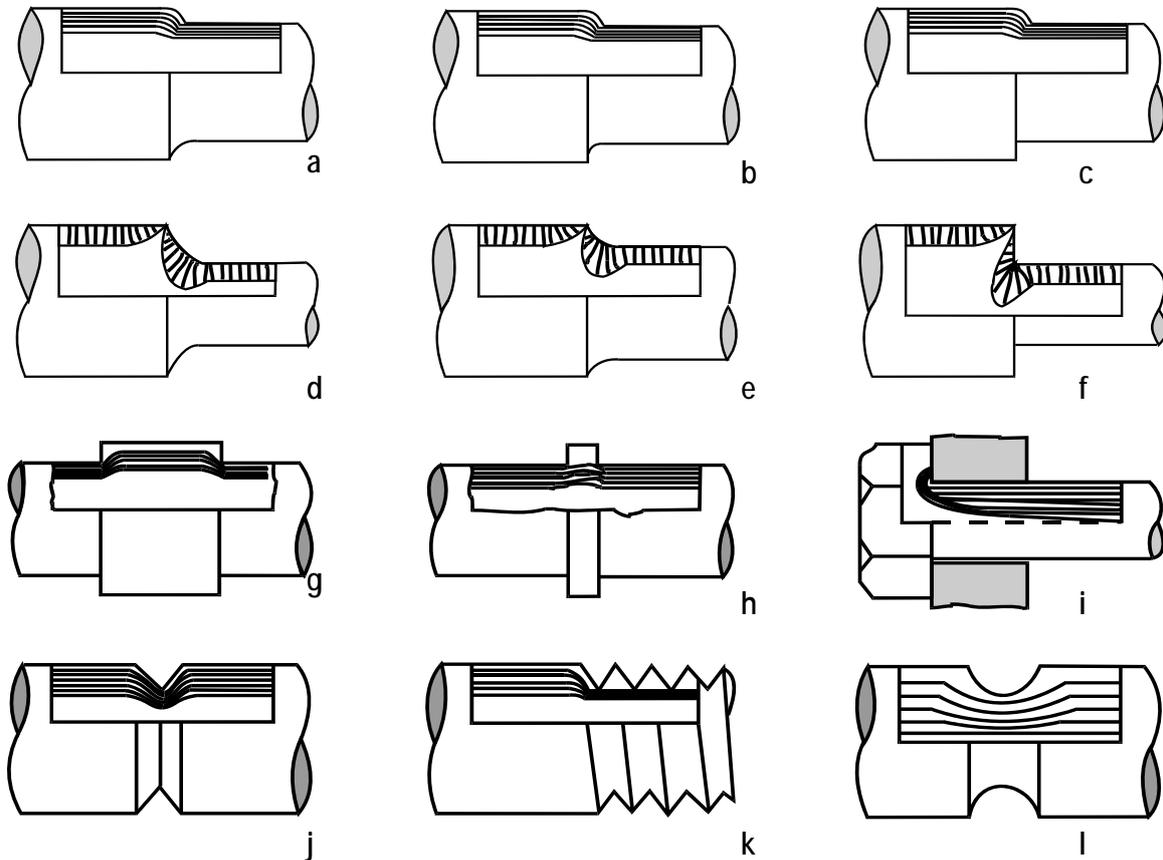


Figura 2.2 Efecto del aumento en los esfuerzos debido a la concentración y distribución de los mismos por algunos cambios de forma en los componentes

La figura 2.2 muestra el aumento en los esfuerzos típicos localizados en elementos que se encuentran en servicio; como se puede apreciar las diferentes formas geométricas de estos componentes producen un efecto de concentración de esfuerzo considerablemente mayor que el que hace un hilo continuo debido al flujo de esfuerzos. El efecto de una ranura o canal sobre la concentración de esfuerzo (l) es menos severo que el de una muesca afilada (j, k). Por lo que se puede observar que el factor principal que determina la concentración de esfuerzos es la relación entre el radio de la muesca y el diámetro del modelo donde inicia ésta.

2.2.1 Secciones reducidas.

Los concentradores de esfuerzos producidos por muescas en el diseño, tales como entrantes agudas deben evitarse, las esquinas muy acentuadas concentran los esfuerzos de modo que las grietas por fatiga o por corrosión puedan nuclear más fácilmente.

La localización de concentradores de esfuerzos intensos existe en una región muy pequeña cerca de la ranura (figura 2.3.a). Se observa el efecto de la presencia de concentradores de esfuerzo, el uso de flechas representa la dirección del esfuerzo principal.

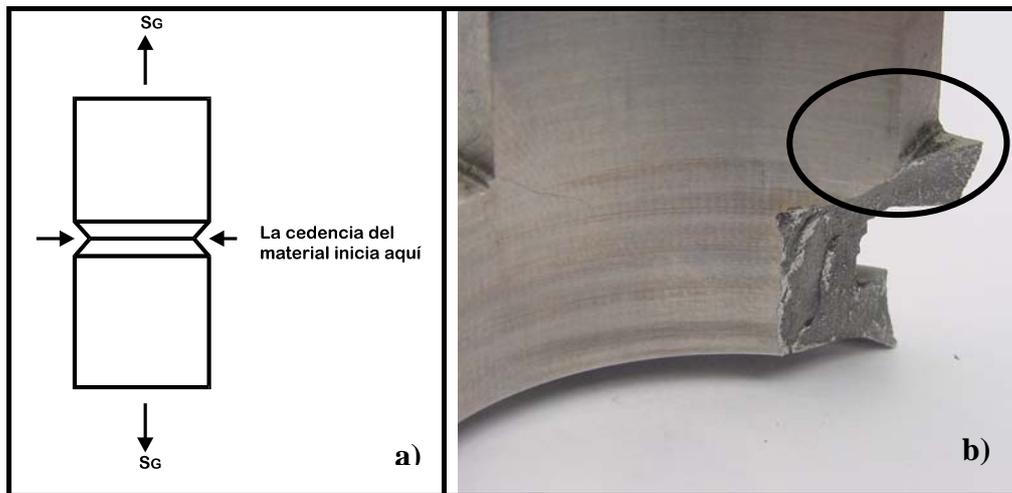


Figura 2.3 a) Un diagrama con muesca sujeta a tracción presenta cedencia primero en el área de la muesca, b) fractura de un punzón.

2.3 INADECUADA SELECCIÓN DEL MATERIAL

La selección de un material esta basada tanto en la capacidad de servicio del material como en el costo del mismo y de su procesamiento. Un diseñador necesariamente se encuentra interesado en las propiedades para conocer la resistencia de los materiales antes de poder calcular los tamaños y formas requeridos para soportar las cargas, las propiedades químicas para afrontar las condiciones corrosivas y otras propiedades para satisfacer otros requisitos funcionales.

Se produzca o no la fractura del material, tanto en el proceso de fabricación, como durante su manipulación y deformación plástica, se generan en su seno zonas con inconvenientes tales como: tamaño de grano excesivo, inclusiones, segregación, entre otros.

En algunas situaciones donde la fractura dúctil es la condición bajo la cual se presenta la falla, la resistencia a la tracción y a la cedencia no son solo criterios inadecuados para evitar las fallas sino

también podrían llevar a la selección de un material que con el tiempo presentará un comportamiento inadecuado.

El uso de un material con alta resistencia a la tracción con frecuencia es perjudicial en piezas donde existen demasiados concentradores de esfuerzo favoreciendo la fractura frágil, fatiga y corrosión.

Es importante distinguir entre resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia ya que en los materiales dúctiles puede haber una diferencia importante entre estas propiedades, mientras que en los materiales frágiles prácticamente no existe.

La relación de resistencia con respecto al peso de los metales livianos, el grafito y ciertos plásticos muestran propiedades favorables, así la rigidez específica o la relación del módulo de elasticidad a la densidad se emplea como índice de selección cuando la deflexión es importante.

La tabla 2.1, muestra las principales propiedades que limitan las diferentes etapas en el diseño mecánico, las propiedades del material en el producto final pueden ser diferentes a las propiedades de la materia prima original, ya que pueden modificarse a conveniencia, dentro de ciertos límites, durante y debido a los procesos de fabricación de los productos; o bien, mediante un diseño adecuado. Una vez manufacturado el producto, es recomendable realizar pruebas de análisis de falla para evaluar su desempeño en servicio, el cual puede depender no solo de las propiedades de los materiales, sino de la forma, geometría y diseño del producto.

Tabla 2.1. Propiedades de los materiales que limitan el diseño

CLASE	PROPIEDAD	SIMBOLO
General	Costo relativo	C_R
	Densidad	ρ (kg/m^3)
Mecánica	Módulo elástico	E, G, K (GPa)
	Resistencia (cedencia/máxima/fractura)	f (MPa)
	Tenacidad a la fractura	G_C (kJ/m^2)
	Tenacidad a la fractura en def. plana	K_{Ic} ($\text{MPa m}^{1/2}$)
	Capacidad de amortiguamiento	η (--)
	Índice de fatiga	f (--)
Térmicas	Conductividad térmica	λ (W/m K)
	Difusividad térmica	a (m^2/s)
	Calor específico	C_p (J/kg K)
	Punto de fusión	T_m (K)
	Temperatura vítrea	T_g (K)
	Coefficiente de dilatación térmica	α ($^{\circ}\text{K}^{-1}$)
	Resistencia al choque térmico	T ($^{\circ}\text{K}$)
Resistencia a la termofluencia	-- (--)	
Desgaste	Constante de desgaste Archard	K_A (MPa^{-1})

En el caso del acero el incremento de porcentaje de carbono aumenta las propiedades de resistencia, pero afecta las propiedades de soldabilidad, principalmente su tenacidad. Asimismo la composición

química del acero tiene influencia sobre la temperatura de transición y la velocidad crítica de enfriamiento.

2.3.1 Resistencia en la superficie.

Comúnmente el ingeniero de diseño debe resolver casos en los que dos elementos de máquina trabajan en contacto entre sí por rodamiento, deslizamiento o una combinación de contacto de las anteriores. Si se requieren máquinas de vida larga y satisfactoria, entonces es necesario conocer la resistencia superficial de los materiales.

Cuando dos superficies ruedan, o se deslizan haciéndolo una contra otra con suficiente fuerza, posiblemente ocurrirá una falla por picadura después de cierto número de ciclos de operación, el deterioro superficial por causas mecánicas, implica la pérdida de material causando problemas de desgaste lo que lleva a una fractura inevitable.

En un estudio de análisis de falla se demuestra que los esfuerzos de Hertz, número de ciclos, acabado superficial, dureza, grado de lubricación y temperatura influyen en la resistencia.

2.4 FALLAS OCASIONADAS POR ESFUERZOS RESIDUALES

Las estructuras y los componentes se diseñan para soportar los esfuerzos impuestos de manera externa, aunque estos no son necesariamente los únicos esfuerzos activos. A consecuencia de las operaciones de manufactura, también pueden presentarse esfuerzos internos o esfuerzos residuales, confinados en el elemento.

Cuando el material presenta una ductilidad limitada se genera un riesgo, ya que cualquier defecto superficial se propagaría mucho antes provocando que el elemento falle en tensión o presente fatiga por cargas menores.

Los esfuerzos internos se pueden reducir por calentamiento a alta temperatura (recocido para alivio de esfuerzos). La resistencia de los materiales disminuye a altas temperaturas; por lo que los esfuerzos internos se reducen hasta el límite de fluencia, que prevalece en la temperatura de recocido, esto puede tener consecuencias indeseables.

Los esfuerzos residuales se pueden eliminar por medios mecánicos, es decir, deformando el cuerpo para inducir un esfuerzo que exceda el límite de fluencia, también puede ser suficiente con

deformaciones pequeñas, que incluyen vibraciones. Si los esfuerzos residuales no son simétricos, pueden generar distorsión cuando la carga mecánica o vibración, cambie el equilibrio de fuerzas.

Los procesos de manufactura, comúnmente minimizan los esfuerzos residuales o introducen una distribución favorable de estos. Ya que los esfuerzos de compresión retrasan la fractura, se inducen esfuerzos residuales de compresión en la superficie de una parte de manera que la resistencia a la tensión y especialmente a la fatiga, se incrementen.

2.5 FALLAS EN LA ELECCIÓN DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

Existen fallas originadas debido a imperfecciones en el material. Tanto los defectos internos como los superficiales pueden reducir la resistencia del material, ya que brindan zonas preferenciales para la propagación de la fractura al actuar como concentradores de esfuerzo, o dan inicio a ataques por corrosión. El ingeniero debe diseñar para compensar los defectos o detectar su presencia y rechazar el material o corregir la falla. Los defectos en ingeniería de materiales se clasifican en las siguientes categorías:

2.5.1 Inconvenientes provenientes de la solidificación.

Las categorías en las que se dividen este tipo de problemas son la contracción, la segregación y la porosidad. Muchos de estos defectos se pueden evitar mediante un correcto diseño de la pieza fundida, sus coladas y mazarotas.

Algunos de los defectos que se presentan durante la solidificación son producto de la contracción que sufre el material al pasar del estado líquido al sólido. Las fisuras en caliente son defectos que ocurren durante el enfriamiento o justo después de la solidificación presentando una morfología irregular con superficies muy oxidadas.

Las fracturas en caliente ocurren por esfuerzos internos causados por la contracción limitada por el mismo molde, esfuerzos internos provocados por enfriamiento diferencial debida a la geometría de la pieza y debidas a la alta temperatura de vaciado.

Las fisuras en frío son continuas en contraste con las que se producen a alta temperatura. Las causas son:

- Falta de alimentación de metal líquido durante la solidificación de la pieza
- Cambios de sección imprevistos

- Inconvenientes en la obtención de solidificación direccional
- Deformación del molde
- Composición del material
- Elevada temperatura de vaciado con relación a la de solidificación

Los defectos debidos a la presencia de gases en el metal líquido se presentan en forma de cavidades esféricas o semiesféricas, siendo superficiales o interiores, causados principalmente por:

1. Humedad excesiva.
2. Gases provenientes de la combustión de los recubrimientos del molde.
3. Baja permeabilidad de la arena debida a la composición de la mezcla de moldeo ó a un excesivo apisonado.
4. Diseño inadecuado de los respiraderos.
5. Corazones con baja permeabilidad, duros, con falta de cocimiento, mala ventilación o húmedos.
6. Vertederos fríos o húmedos.
7. Metal líquido con elevada cantidad de gas en solución debido a prácticas inadecuadas de fusión y desgasificado.
8. Llenado interrumpido el cual produce absorción de aire de la atmósfera.
9. Sobrecalentamiento del material.
10. Presencia de materiales oxidados en contacto con el metal líquido.

La presencia de porosidad es causada principalmente por la evolución del hidrogeno durante la solidificación, así como la presencia de humedad o ingredientes generadores de gas en los moldes son causa también de microporosidades con aspecto de picaduras.

Cuando se presenta la falta de llenado, ocurre que dos flujos de metal a la temperatura de solidificación se encuentran dando lugar a un pliegue o zona de unión donde se puede diferenciar ambos flujos, observándose un aspecto de una fractura pero con filos redondeados, las causas son:

1. Fluidez insuficiente del metal
2. Temperaturas bajas de vaciado
3. Vaciado interrumpido
4. Secciones delgadas, mal diseño y distribución de las coladas y alimentadores

2.5.2 Defectos inducidos durante el procesamiento primario.

Laminación de barras. Las barras laminadas de aleaciones ferrosas y no ferrosas después de ser fundidos los lingotes son laminados en caliente, siendo los extremos del lingote la parte más propensa a defectos. En el proceso de laminación los defectos que se suelen presentar son:

Inclusiones. En su mayoría formadas por óxidos, orientadas en dirección del laminado (figura 2.4).

Costuras. Se trata de una discontinuidad longitudinal al eje de laminación, este defecto se presenta cuando un borde de la pieza es doblado hacia el interior formándose un pliegue. También se pueden presentar fracturas en la superficie de la barra laminada debidas al gradiente térmico.

Inclusiones no metálicas. Si el metal fundido no se encuentra limpio, los lingotes laminados presentaran discontinuidad producto de la presencia de inclusiones de silicatos, sulfuros y óxidos. En las barras de acero, la inspección mediante partículas magnéticas revela estos defectos en forma de líneas rectas discontinuas. Estas inclusiones no siempre son causa de rechazo del material y el límite de aceptación dependerá del uso del acero.

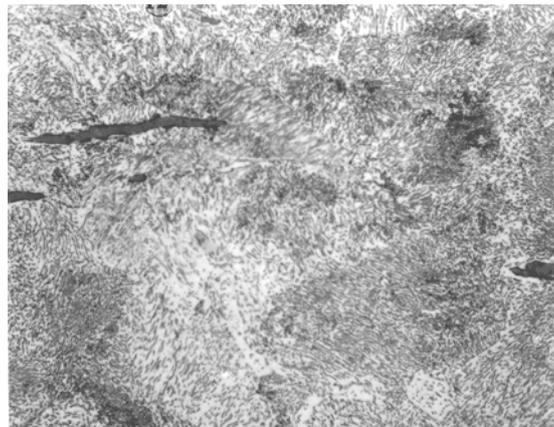


Figura 2.4. Inclusiones alargadas en el sentido de la laminación.¹

Delaminación. Este defecto se localiza en hojas metálicas, debido a la concentración de porosidad y rechupes que se aplastan durante el laminado, no logrando soldar sus superficies debido a que se encuentran oxidadas.

Formación de escamas. Se presenta en productos laminados o extruídos de algunas aleaciones de aluminio bajo ciertas condiciones de temperatura. El defecto tiene el aspecto de depósitos de corrosión, con una dirección de ataque a lo largo del límite de grano (paralelo a la dirección de deformación). Esto resulta en la formación de una hoja que se separa del material. Este defecto es susceptible al

¹ Fernández, R., Campos, R., Determinación de las causas de ruptura del cigüeñal de una prensa, Pág. 151

crecimiento cuando la deformación llega al nivel crítico con respecto al tamaño de grano en comparación con su ancho.

Forja. Durante el proceso se pueden presentar los siguientes defectos; tamaño de grano excesivo, juntas frías, falta de llenado, incrustaciones de cáscaras de óxido y fisuras, entre otros:

Doblez. Este defecto ocurre debido a superficies que son dobladas hacia el interior de la pieza en una etapa subsecuente de deformación. Dado que estas superficies se encuentran oxidadas no podrán soldar por efecto de la presión, por lo que se presenta una discontinuidad en la pieza.

Flujo inadecuado. Producida por una operación mal diseñada, debida a la geometría inicial del material, mala colocación de la pieza en la estampa o por la geometría de las formas intermedias, falta de continuidad en la fibra, lo que influye de manera negativa en la resistencia y tenacidad de la forja. Provocadas cuando existen desviaciones mayores de las líneas de flujo. Este cambio abrupto en la dirección de las fibras tiende a formar un punto de reentrada que sirve como fuente potencial para fractura prematura por fatiga debido a la anisotropía de las propiedades mecánicas.

Fracturas por temperatura. Son causadas por gradientes de temperatura generados a partir de un enfriamiento irregular, siendo evidentes en aceros aleados (comúnmente en Ni-Cr-Mo) debido a su extrema sensibilidad al choque térmico. Este tipo de fracturas pueden evitarse enfriando la pieza hasta los 550 °C y manteniendo a esta temperatura por un tiempo suficiente antes de llevarla a temperatura ambiente. Se pueden presentar tanto en las preformas como en la pieza terminada sobre todo a lo largo de la línea de rebaba, también se dan por una temperatura de forja excesiva o insuficiente.

Se observa un aspecto de cáscara de naranja en la superficie de metales trabajados en caliente en donde se ha presentado un excesivo crecimiento de grano.

Extrusión. Los principales defectos que se observan en piezas que han sido extruídas son: delaminación, discontinuidades longitudinales, excesivo crecimiento de grano en la zona perimetral, marcas longitudinales, fusión incipiente del material y fracturas por sobrecalentamiento. En ocasiones se presentan defectos como segregación, inclusiones, porosidad, rechupes internos producto de la contracción; defectos que en muchos de los casos provienen de la fundición, aumentando la probabilidad de falla del componente durante el paso de extrusión del material.

Fisuras perimetrales. Es la presencia de una serie de fracturas superficiales discontinuas orientadas en dirección transversal. Provocadas por el sobrecalentamiento producto de la energía necesaria para la

deformación, dando lugar a una fusión del material (efecto combinado de presión y velocidad de extrusión excesivas).

Discontinuidades. Se presentan en la sección transversal del material, de forma que se presenta una coextrusión. La discontinuidad se traduce en una menor resistencia y en la mayoría de los casos en la imposibilidad de empleo del perfil producto de la extrusión. Este defecto es generado cuando se extruye en su totalidad el lingote debido a que la superficie (oxidada, con grasa, etc.) pasa a ocupar un lugar en el interior del perfil.

Ampollas. Defecto común de las aleaciones de aluminio se presentan pequeñas burbujas en la superficie causadas por:

1. Gas atrapado durante la fundición
2. Oxidación a alta temperatura
3. Sobrecalentamiento en el tratamiento térmico
4. Grasa o aceites en las herramientas de extrusión o en la superficie del lingote

De acuerdo a sus características, existen tres tipos de ampollas, cuando se abren con una herramienta punzo-cortante, pueden mostrarse un color distintivo: gris, café oscuro o negro, y blanco. Estas diferencias en color ayudan a determinar el origen de las ampollas.

El primer tipo de ampollas se asocia con un calentamiento a alta temperatura (tratamiento de disolución). El segundo tipo ocurre por una lubricación incorrecta que provoca que la superficie del metal se rompa y se separe de la parte sub-superficial, los lubricantes que quedan atrapados bajo la superficie se evaporan durante el proceso, causando las ampollas localizadas casi siempre en los extremos o en las porciones de extrusión con flujo rápido.

El tercer tipo de ampollas es más complejo pero se cree que tiene que ver con la concentración del hidrógeno en las imperfecciones de red, proveniente del proceso de fundición y favorecido por la expansión de los gases atrapados.

Grano perimetral grueso. Se presenta como una capa periférica que ocurre durante la máxima deformación a corte. Las capas de grano grueso se forman ya sea de manera espontánea durante la extrusión o producto de los continuos calentamientos. La zona de extrusión altamente deformada favorece la aparición del grano perimetral grueso y se distingue claramente de la región central menos deformada, por una capa asimétrica en forma de media luna.

Marcas perimetrales. Se presentan frecuentemente cuando durante el proceso se presentan paros o cambios imprevistos de velocidad, esto da lugar a la aparición de marcas perimetrales de tipo anular.

2.5.3 Defectos inducidos durante el proceso secundario.

Soldadura. Las características del metal en la zona del cordón de soldadura (de existir fusión en el proceso) corresponden a la microestructura de una pieza proveniente de fundición, razón por la cual los defectos que se producen en la soldadura son parecidos a los de fundición.

Los defectos mas comunes son porosidad y microporosidad, escoria atrapada, inclusiones, agrietamiento del metal base, agrietamiento del metal de soldadura, penetración incompleta y falta de fusión. En el caso de soldaduras a tope, la falta de fusión y penetración constituye un gran problema, ya que afecta de manera negativa la resistencia de la unión y generando un efecto de muesca. Otro defecto es el conocido como undercut, defecto que actúa como una muesca en la zona de unión de las piezas debido a la falta de habilidad del soldador.

Fracturas. Las fisuras pueden ser longitudinales o transversales a través del cordón como se puede observar en la figura 2.5, en la interfase metal fundido – material base y en la zona adyacente a la de fusión. Las fracturas son causadas por gradientes térmicos o por la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento. En ocasiones este problema se presenta por errores en la técnica de soldadura, por ejemplo; temperatura muy elevada, mal ajuste de los bordes, elementos de sujeción que imponen restricción excesiva, precalentamiento y enfriamiento mal planeados, falta de habilidad del soldador, etc.



Figura 2.5. Fractura a través del cordón.

Defectos del maquinado. Cada proceso de maquinado produce inconvenientes diferentes, los cuales se pueden traducir en falla de los elementos. Además, el maquinado genera o libera esfuerzos

residuales, que pueden dar lugar a la presencia de fisuras en la pieza, afectando desde luego la resistencia del material, así mismo en componentes delgados, se puede generar distorsión de la pieza.

Fracturas debidas al esmerilado. Se aprecian comúnmente en piezas de acero templado. El calentamiento intenso que se genera en el esmerilado produce esfuerzos térmicos severos en el material, desarrollando fracturas superficiales durante o después del esmerilado, dichas fisuras también pueden presentarse con posterioridad al temple. Las fracturas muestran un patrón de red que corre en dirección paralela y en ángulo recto a la dirección de trabajo. El calor excesivo se puede generar por parámetros incorrectos del esmerilado, como la velocidad de la rueda, velocidad de alimentación, tipo de rueda, profundidad de corte y refrigerante. Se deben también a la presencia de constituyentes duros como la cementita o carburos de aleación los cuales dan lugar a una red gruesa. Se localizan también inconvenientes por la baja conductividad térmica de materiales como los aceros de alto carbono y los inoxidable.

Las quemaduras de esmerilado se identifican como decoloración superficial en varios tonos de color paja, café o azul causadas por la formación de una capa delgada de óxido en la superficie de trabajo. El grosor de la capa depende del aumento en la temperatura.

Esfuerzos residuales. Son causados por gradientes térmicos generados durante el maquinado o por efecto de la deformación plástica que sufre el material en la zona de corte, vistos en forma de distorsiones. La distorsión esta relacionada con la distribución de los esfuerzos residuales, su magnitud y la localización del material removido. Su desarrollo depende del tipo de herramienta, las características del corte y las condiciones de enfriamiento impuestas a la superficie maquinada.

En las piezas templadas presentan un gran inconveniente las distorsiones ya que pueden resultar de la remoción asimétrica del metal en secciones delgadas.

Defectos por sobrecorte. Se encuentran con frecuencia en operaciones de maquinado químico y se deben a la filtración de la solución bajo la máscara de protección.

Superficie rugosa. Defecto generado en el maquinado químico de estructuras de grano grueso. Si las condiciones de ataque no son adecuadas, se puede generar una superficie con una rugosidad excesiva. La superficie es afectada por ataque en el límite de grano debido a que el reactivo, por cuestiones termodinámicas; es más agresivo en esta región.

Cuando hay una severa deformación local, la estructura de grano puede modificar el ataque ocasionando una profundidad de corte y superficie irregular.

Ataque intergranular. Durante el maquinado electroquímico se presentan defectos superficiales microscópicos tales como ataque intergranular y picaduras, causados principalmente por ataque preferencial o selectivo a ciertos constituyentes precipitados en el límite de grano. El ataque intergranular es causado por diferencias de potencial entre el límite de grano y el cristal.

Tratamiento térmico. Las piezas de materiales ferrosos y no ferrosos pueden recibir un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades mecánicas. Dependiendo del tratamiento, se aprecian varios defectos, reduciendo su tenacidad y resistencia del material afectando su vida útil; así mismo condiciones de calentamiento no adecuadas (temperatura, tiempo o atmósfera) se traducirán en descarburización en aceros, excesiva oxidación que afecta el acabado y microestructuras no deseadas.

Defectos presentes en aleaciones de aluminio. La presencia de fracturas y el deterioro microestructural se presentan en aleaciones sensibles al tratamiento térmico, mayormente como consecuencia de temperaturas y tiempos excesivos en el tratamiento de disolución. En casos extremos, aparecen ampollas en la superficie pudiéndose presentar una fusión eutéctica a lo largo de los límites de grano.

El deterioro por temperatura es debido a:

1. La distancia junto a los elementos calefactores.
2. Fallas en el control de equipo provocando que la temperatura del horno se dispare.
3. Distribución no uniforme del calor dentro del horno causado por una mala circulación del aire.
4. Desajuste de los sensores de temperatura del horno.

La presencia de ampollas es resultado de varios factores como el sobrecalentamiento dado por errores en el tratamiento térmico o por el procesamiento, otro factor es la presencia de poros resultado de gases disueltos en la fundición original y el ingreso de partículas extrañas en el proceso de fabricación.

La oxidación a elevadas temperaturas y la formación de discontinuidades en los límites de grano son otros defectos comunes en estos materiales, debido a que la atmósfera del horno se encuentra contaminada con vapor de agua, sulfuros o iones amoníaco y por la exposición prolongada a altas temperaturas. La presencia de cavidades son provocadas por la formación de hidrógeno atómico, producido por la reacción del polvo con las superficies de aluminio.

La decoloración o presencia de manchas en la superficie ocurren por la presencia de contaminantes en el medio de temple u horno (aceites o grasas). Igualmente son causadas porque la pieza no fue limpiada debidamente o por la descomposición de sales volátiles (fluoruros).

La distorsión es debida a la geometría compleja de la pieza, de la agresividad del medio de temple, de un proceso mal desarrollado y de una disposición inadecuada de las piezas en el horno.

Dentro del tratamiento térmico algunas veces no se logran obtener las propiedades mecánicas deseadas en las aleaciones de aluminio. En el caso de tratamientos térmicos de endurecimiento por precipitación, propiedades a tracción menores de lo esperado en combinación con una baja ductilidad pueden deberse a fallas durante el tratamiento de disolución o sobre-envejecimiento. La inspección metalográfica de la pieza puede confirmar el deterioro.

Cuando el esfuerzo de cedencia y la resistencia máxima del material se encuentran por debajo de lo esperado y combinada con una elevada capacidad de deformación plástica, el inconveniente se puede deber a:

1. Envejecimiento inadecuado.
2. Bajo porcentaje de elementos endurecedores.
3. Tratamiento de disolución mal aplicado.
4. Retardado en el temple.
5. Temperatura de procesamiento por debajo de lo recomendado (en perfiles de AlCu extruídos).

Defectos en el acero. La presencia de fracturas de temple en piezas de acero son causadas por los cambios de volumen durante los ciclos de calentamiento o enfriamiento, por esfuerzos internos de origen térmico o debido a etapas anteriores de deformación, por excesivas temperaturas de tratamiento, por segregación, inconvenientes en el revenido, medios de temple inadecuados o contaminados y por cambios bruscos en su geometría.

La presencia de grietas de temple sigue comúnmente un patrón intergranular asociado con la presencia de óxido en su interior.

La descarburización ocurre por la pérdida de carbono de la superficie del acero cuando reacciona con la atmósfera oxidante del horno. Se pueden evitar utilizando una atmósfera controlada o con un recubrimiento de níquel antes del tratamiento térmico y evitando la permanencia a altas temperaturas.

El sobrecalentamiento del acero origina una estructura de granos muy burda, en casos severos se denomina como estructura de Widmanstätten, cuya característica es la fragilidad. El crecimiento excesivo de grano da lugar a una disminución de la tenacidad. Una estructura con este defecto se puede regenerar mediante un normalizado o una combinación de normalizado con recocido. El embutido de acero con grano grueso da lugar a una superficie de apariencia rugosa conocida como "cáscara de naranja".

Las quemaduras se producen cuando se calienta el metal a una temperatura muy alta, cercana a su punto de fusión, causando un daño permanente por efecto de oxidación intercrystalina o por fusión incipiente, la presencia de quemaduras se detecta por la presencia de superficies negras o grumos de óxido a simple vista. El examen microscópico la revela como fracturas intergranulares cubiertas de óxidos, así como por cavidades en el límite de grano.

Efectos negativos de los tratamientos térmicos en las propiedades mecánicas. Estos efectos son causa de inconvenientes, la determinación de las causas del problema permite realizar las modificaciones al tratamiento, algunas de las causas son:

- Composición química del material.
- Historia del producto.
- Microestructura.
- Tipo, tamaño, distribución de temperaturas y atmósfera del horno.
- Velocidad de calentamiento y enfriamiento.
- Temperatura del medio de enfriamiento y tiempo de permanencia.
- Medio de temple.
- Técnica de temple.

Las aleaciones endurecidas por envejecimiento, por trabajo en frío o templadas y revenidas pierden su resistencia en temperaturas altas.

Un punto importante en los metales es la gran diferencia que existe entre las condiciones de recocido, laminado en frío y con tratamiento térmico siendo una ventaja única de los metales, ya que una pieza se puede formar en la condición blanda y más tarde puede ser endurecida durante la operación de formado.

Inadecuada selección de acabados. Los diferentes tipos de acabados influyen en el servicio del elemento, ya que al no tener la superficie deseada provoca concentradores de esfuerzos, cuando se requiere de aislar el elemento y no hay un buen recubrimiento induce a la corrosión prematura.

2.5.4 Fallas a consecuencia de daños en servicio.

Los inconvenientes surgidos durante la instalación tienen su origen en fallas triviales del operador al inicio de la vida útil de la pieza, estos no interfieren en la operación normal de las partes ensambladas, pero si pueden provocar la aceleración del daño y por lo tanto la falla imprevista del elemento. En general son problemas de ajuste e inconvenientes en la alineación del sistema.

Algunos de los defectos más usuales son las especificaciones inadecuadas o imprecisas, uniones no uniformes o mal aplicadas cuyo efecto favorece la fatiga en el punto de concentración de esfuerzos. El desalineamiento agrega carga adicional causando sobreesfuerzos y sobrecalentamiento, favorece la fatiga. La corrosión bajo esfuerzo puede tener su primer origen en la deformación excesiva.

Las fallas producto de las condiciones de servicio no especificadas se traducen en fallas por sobrecarga, disminución de la vida útil del elemento debido a una menor resistencia a la fatiga o también por desgastes no considerados en la etapa de diseño, por deformación no especificada producto de la fluencia del material y por pérdidas de espesor efecto de la corrosión, entre otras.

El deterioro que la pieza sufre durante su servicio se puede deber a muy diversas causas como; la degradación en contacto con el medio ambiente, corrosión bajo tensión, fragilización por hidrógeno, formación de fases frágiles por efecto de la temperatura de servicio, pérdida de propiedades mecánicas o químicas por efecto de la permanencia a elevadas temperaturas por periodos prolongados, deformación permanente por efecto de fluencia lenta.

2.6 MECANISMOS DE FRACTURA.

Los criterios de diseño basados en el esfuerzo máximo admisible o esfuerzo de fluencia no son suficientes para analizar estructuras fisuradas. La mecánica de fractura se divide en Lineal Elástica y Elastoplástica, de acuerdo con criterios basados en el tamaño de la zona de fluencia que presenta la punta de la grieta.

Considerando los mecanismos comunes de fractura para los metales cuando son sometidos a un esfuerzo se tienen:

1. Fallas por sobrecarga.
2. Fallas por distorsión.
3. Fallas por fatiga.
4. Fallas por corrosión.
5. Fallas por fluencia o deformación.
6. Fallas por desgaste.

Los modos de falla más comunes son deformación plástica, fractura, fatiga, fluencia y corrosión.

- **Fractura dúctil.** Ocurre normalmente en forma transgranular en los metales que presentan ductilidad y tenacidad satisfactorias. Se puede observar una gran cantidad de deformación, inclusive con estricción, en el elemento que falla. La deformación plástica ocurre antes de la fractura final y se debe a sobrecargas.

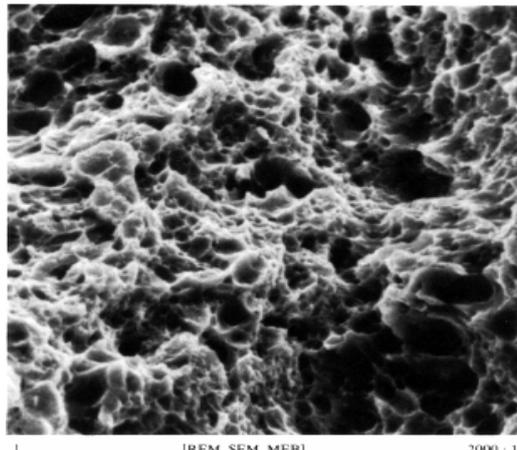


Figura 2.6. Imagen de una fractura de copa y cono.^{II}

En las secciones metálicas gruesas comúnmente se encuentran evidencias de estricción, con una parte importante de la superficie de fractura presentando una cara plana donde nuclea primero los microporos y coalescen, al igual que un pequeño labio de corte, donde la superficie de la fractura se encuentra a 45° respecto del esfuerzo aplicado. El labio de corte, indica que ocurrió un deslizamiento.

^{II} N. Carthage and V. Hauser, Selective Decapsulation of Epoxy Encapsulated Integrated Circuits, AT&T, Vol. 68. 1982, Pág. 7

El estudio de la superficie de la fractura a grandes aumentos, revela una superficie rugosa, siendo estas huellas de los microhuecos producidos durante la fractura. En el labio de corte, las rugosidades tienen forma ovalada (equiaxiales) o alargada en dirección al centro de la barra de tensión donde inicio la fractura. (Modelos: constitutivas elásticas, cinemáticas no lineales.)

- **Fractura frágil.** Ocurre en los metales de alta resistencia o en los de baja ductilidad y tenacidad. Los metales incluso fallan de modo frágil a bajas temperaturas, en secciones gruesas, con altas proporciones de deformación, o cuando los concentradores de esfuerzo tienen un efecto significativo.

Se observa una fractura frágil cuando la falla es causada por un impacto. Se puede apreciar poca o nula deformación plástica. El inicio de una grieta ocurre en las pequeñas rayaduras que causan una concentración de esfuerzos, propagándose fácilmente a lo largo de planos cristalográficos específicos, por agrietamiento o clivaje. En ocasiones sigue una trayectoria intergranular, especialmente cuando la segregación o las inclusiones debilitan los límites de grano.



Figura 2.7. Fractura por cargas de torsión cíclicas.



Figura 2.8. Muestra de un acero 1045 templado y revenido.^{III} La microfotografía electrónica muestra la zona híbrida típica de una fractura semifrágil.

Cuando se trata de fractura frágil la superficie de la fractura es plana y perpendicular al esfuerzo aplicado en una prueba de tracción. Si la falla ocurre por clivaje, cada grano fracturado es plano y orientado, proporcionando una apariencia cristalina.

Una característica común de la fractura es el patrón galoneado, causado por frentes de grieta, propagándose por diferentes niveles en el material que se extienden desde el origen de la grieta con un patrón de marcas superficiales radiales. Ayudando a identificar la naturaleza frágil del proceso de falla y su origen:

- Origen: defectos locales en el material a nivel microestructural.
- Modo de falla: extensión de la fisura de manera continua.
- Factores que influyen: bajas temperaturas, cargas dinámicas, habilidad del material para absorber energía.
- Modelos: deformaciones plásticas pequeñas en el vértice de la grieta.

^{III} Cerrud, S., Jacobo, V., Ortiz, A., Schouwenaars, R., Análisis de falla, Pág.50.

- **Fractura por fatiga.** La fractura ocurre en un proceso de tres pasos: 1) la nucleación de una grieta, 2) la propagación cíclica de la grieta, 3) la falla catastrófica de la pieza. Las grietas se nuclean en los sitios de esfuerzo más alto y de menor resistencia local, comúnmente en zonas que están sobre o cerca de la superficie, donde el esfuerzo es máximo, incluyen también los defectos superficiales como rayaduras o picaduras, esquinas agudas debidas a un diseño deficiente o a una impropia fabricación, inclusiones, límites de grano o concentración de dislocaciones.

En el origen de la grieta debido a la concentración de esfuerzos, la grieta se propaga un poco más durante cada ciclo hasta alcanzar la capacidad de carga del metal remanentemente, creciendo espontáneamente.

Las fallas por fatiga se caracterizan por dos áreas distintas. La primera se debe al desarrollo progresivo de la grieta, en tanto que la segunda se origina en la ruptura repentina:

Cuando la falla se presenta por fatiga la superficie de la fractura, en particular cerca del origen normalmente es tersa, haciéndose más áspera conforme avanza la grieta y puede volverse fibrosa al final de su propagación. Como se puede apreciar en la figura 2.9.



Figura 2.9. Superficie de fractura.

Los exámenes macroscópico y microscópico realizados muestran una superficie de fractura con marcas de playa y estrías. Las marcas de playa se forman comúnmente cuando hay cambios de carga durante el servicio o cuando la carga es intermitente, en algunos casos permitiendo que haya tiempo para la oxidación dentro de la grieta. Las estrías pueden mostrar la posición del origen de la grieta después de cada ciclo.

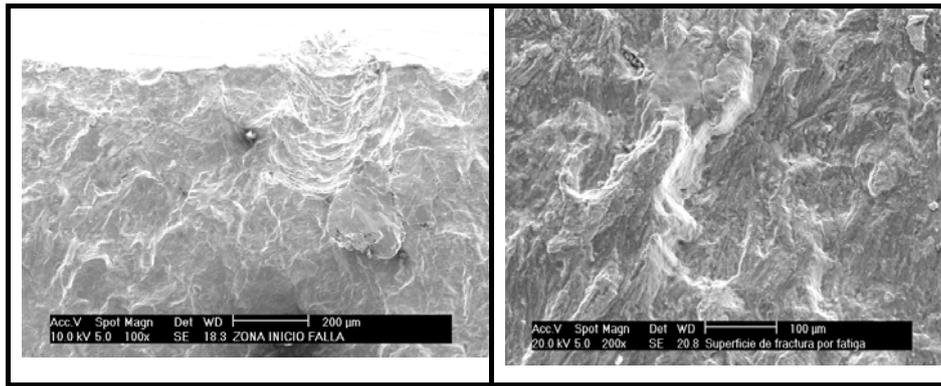


Figura 2.10. “Estructura de panal”, típica de rupturas bajo carga oscilatoria y en este caso por fatiga (inicio de la fisura).^{IV}

- **Termofluencia y ruptura por esfuerzo.** Un metal sufre deformación plástica a temperaturas elevadas aun cuando el esfuerzo aplicado este por debajo del punto de fluencia nominal. Las fallas por termofluencia presentaran deformación o distorsión excesiva de las partes metálicas, incluso si no ha ocurrido la fractura.

Las fracturas por esfuerzo incluyen la estriación del metal durante la termofluencia terciaria y la presencia de varias fisuras que no produjeron la fractura final. Las fallas de ruptura por esfuerzos son generalmente transgranulares ocurriendo a velocidades de termofluencia altas, tiempos cortos de la ruptura y temperaturas relativamente bajas de exposición.

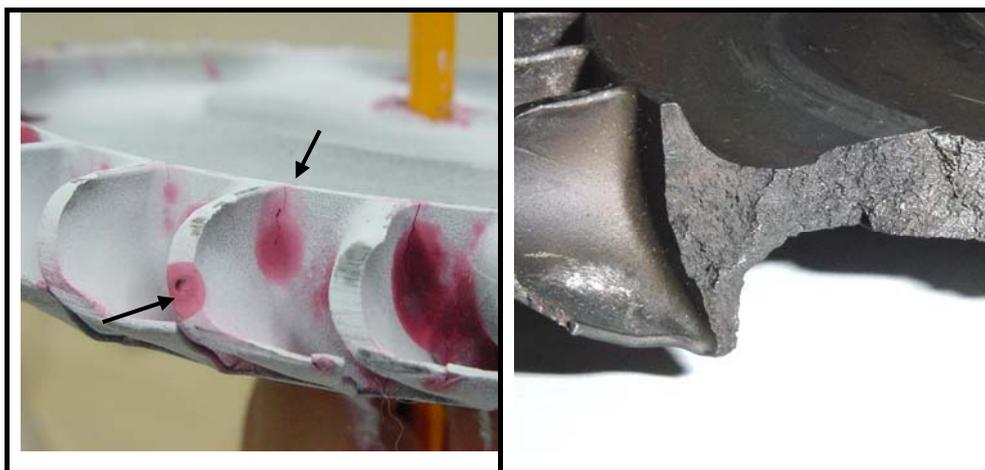


Imagen 2.11. Rotor de turbina con presencia de grietas después de varios ciclos lo que llevo a la fractura.

^{IV} Fernández, R., Campos, R., Determinación de las causas de ruptura del cigüeñal de una prensa, Pág. 153

Las fallas del tipo *frágil* normalmente son intergranulares, presentan poca estricción ocurriendo, estados triaxiales de carga, procesos de carga/descarga y temperaturas altas:

- Origen: estructura microscópica.
- Propagación de plasticidad: fluencia de una parte considerable del objeto estructural.
- Caracterización: límite de fluencia, superficies de fluencia.
- Modelos: constitutivas no lineales, cinemáticas lineales.

Se pueden observar granos equiaxiales cerca de la superficie de fractura, la falla ocurre comúnmente por la formación de huecos en la intersección de tres límites de grano y la precipitación de huecos adicionales a lo largo de los límites de grano, a través de los procesos de difusión.

- **Fracturas por corrosión.** Ocurren por debajo del valor de fluencia del metal, debido al deterioro por un medio corrosivo.

La ubicación en donde se inician las grietas puede identificarse por la presencia de un producto de la corrosión.



Figura 2.12. Falla en pernos por corrosión.

La velocidad de corrosión (v_c) se mide en unidades de pérdida de espesor en el tiempo. Una velocidad inferior a 25 micras/año representa una elevada resistencia a la corrosión (con excepción de implantes en el organismo, donde por condiciones de rechazo ésta deberá ser menor a 5), en aplicaciones industriales se considera aceptable hasta valores inferiores a 500 micras/año, dependiendo de la aplicación del sistema.

CAPÍTULO 3.

CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO.

Los casos que se presentan en el estudio de análisis de falla de elementos mecánicos son variados, para establecer el factor o elemento que propicia la falla es necesario conocer las propiedades del material y las normas de diseño definidas.

Cuando se va a diagnosticar una máquina o elemento mecánico se emite un juicio sobre la eficacia y eficiencia de su proceso y, cuando una de ellas es defectuosa, se identifican las entidades que originan el problema proponiendo acciones correctivas durante el rediseño.

En cuanto a la falla de los casos que se presentan se comprueba la conveniencia de no menospreciar el diseño de un sistema mecánico, aun cuando este pueda parecer sencillo, dando como resultado un inminente fracaso por el exceso de confianza. Situación que se demuestra en el diseño original del elemento.

A continuación se presentan breves descripciones de algunos problemas mas significativos durante el servicio, los cuales se pudieron corregir o tomar las consideraciones necesarias de cada elemento para evitar la falla.

Tabla 3.1. Elementos con consecuencias durante el servicio.

ELEMENTO	PROBLEMA	CAUSA
CASCOS REMACHADOS	Problema estructural por la aparición de grandes grietas, colapsando la estructura. Diseño inadecuado de uniones, lo que produjo concentradores de esfuerzos.	El incremento en el porcentaje de carbono en los aceros. Afectando las propiedades de soldabilidad y tenacidad.
BUQUE SOLDADO	Fractura iniciada en el cordón de soldadura en la unión de la base de una guía y la plancha de cubierta. Discontinuidades, vértices en ángulo recto, grietas superficiales bajo el cordón y deficiente unión de la soldadura con el metal base.	La temperatura de transición dúctil frágil (TTDF) del material era de 10°C, la temperatura al ocurrir la falla era de 2°C. Geometría inadecuada de los entalles en el diseño de las soldaduras.

ELEMENTO	PROBLEMA	CAUSA
RODILLOS	Enfriamiento desigual y distorsión.	Desalineamiento de soportes.
ALABE DE TURBINA.	Control de claros relacionados con el diseño y la instalación.	Roce de la punta del alabe debido a la alineación.
TURBINAS DE GAS: - alabes	Fractura intergranular, oxidación, fatiga por bajo ciclaje y alto ciclaje, fatiga térmica.	Condiciones extremas en el limite de diseño de alabes y chumaceras, ataque ambiental, reconstrucción inadecuada.

A continuación se presentan los datos que se obtuvieron de los tres casos en estudio, los casos presentados fueron seleccionados, ya que el objetivo fundamental de esta tesis es demostrar la importancia del análisis de falla en el diseño.

3.1 CASO I. FALLA EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Se analizó la fractura suscitada en dos bielas de un motor de una Mini-Van. Se proporcionaron el motor y las bielas las cuales se encontraban montadas en el motor de acuerdo al ensamble de la agencia figura 3.1.



Figura 3.1. a) Vista inferior donde se aprecia la fractura en el depósito de aceite provocada por un fragmento de la biela 4 que al ser golpeada por el cigüeñal se proyectó hacia este, b) la superficie y geometría muestran que el golpe fue por dentro.

Después de desensamblar el motor y ver que todo se encontrara en las condiciones con las que se había presentado la falla, se identificaron las dos bielas que presentaban fractura (2 y 4) figura 3.2, se observa el impacto que provoco el fragmento de la biela 4 fracturando los soportes de la charola que va al interior del depósito, asimismo el segmento de biela lado cigüeñal golpeó la charola del semicarter deformándola y perforándola como se puede ver en la figura 3.3.



Figura 3.2. Fractura de la biela 2.



Figura 3.3. Charola del Semicarter.

Para el caso analizado son relevantes las condiciones bajo las cuales se suscitó la falla, los antecedentes de servicio del vehículo, antecedentes con relación a los procesos de fabricación, material y métodos de inspección, entre otros. Con los datos recabados se puede obtener una hipótesis del modo de falla.

Consideraciones en el diseño:

- La función de las bielas en el motor, es considerada como un elemento móvil, que une el pistón con el cigüeñal. Se encarga de recoger la fuerza de la combustión y transmitirla al cigüeñal, transformando el movimiento lineal del pistón en rotatorio.
- Tamaño y forma de los elementos; la biela se divide en tres partes, la cabeza es la unión con el cigüeñal, el pie es la unión con el bulón del pistón y el cuerpo es la estructura que une la cabeza con el pie. Para colocar la biela en el cigüeñal se divide la cabeza en dos partes que se unen por tornillos.
- Selección del material, el acero empleado en la fabricación de la biela es muy particular en función de su elevado contenido de cobre, el cual influye en la tenacidad y resistencia del material.
- Presenta un proceso de granallado en la biela para mejorar la resistencia a la fatiga, además de ser producida por pulvimetalurgia.

El objetivo del estudio es determinar la secuencia de eventos que sucedieron para dar lugar a la fractura de las bielas y con esto definir las causas fundamentales de la falla.

3.2 CASO II. FALLA DE UNA BARRA ESTABILIZADORA DE SUSPENSIÓN.

Se entregaron tres barras de torsión, las cuales sufrieron una fractura durante su servicio, las barras estaban identificadas con datos referentes a la fecha y kilometraje acumulados. Erróneamente en la clasificación de dos barras los datos descritos son iguales, sin embargo esto no influyó en el estudio de análisis de falla realizado.

A continuación se muestran las imágenes de las tres barras, se puede obtener una hipótesis con respecto al modo de falla. En los tres casos la fractura tuvo características similares, y se puede asumir que fue por fatiga (figuras 3.4 a 3.6), sin embargo se demostrara dicha hipótesis por medio de un análisis de resultados.



Figura 3.4. Barra 1, la fractura se presentó en el cambio de sección.



Figura 3.5. Barra 2, la fractura se localiza en la zona recta del eje. La superficie es helicoidal



Figura 3.6. Barra 3, al igual que la barra 2 la fractura se presenta en la zona recta donde se encuentran los elementos de sujeción de la barra a la carrocería.

La fractura se presentó cuando las barras se encontraban en operación provocando la desestabilización de la carrocería, como se ha dicho la importancia en cuanto a la calidad y seguridad que tengan los elementos dependerá de un buen diseño. Con el estudio del análisis de falla se darán a conocer las causas que llevaron a la fractura.

Consideraciones en el diseño:

- La función de la barra de torsión, es el elemento más eficiente para almacenar energía y soportar mayor masa que cualquier otro tipo de suspensión. La estabilidad del conjunto depende directamente del balanceo de las fuerzas que existen, básicamente los extremos de la barra están sujetos a los ejes y la parte recta al chasis (figura 3.7). Su función es contrarrestar el efecto de la fuerza centrífuga cuando el auto o camión toma las curvas, siendo este factor el que determina la estabilidad del vehículo en circunstancias de manejo extremadamente sinuosas, además de permitir que se compense la adherencia de las llantas del vehículo que están en la trayectoria externa de la curva.



Figura 3.7. Disposición típica de una barra estabilizadora en un eje trasero

- Tamaño y forma del elemento, la barra estabilizadora, al ser un componente elástico, transfiera parte de la fuerza de extensión de la suspensión asociada a la rueda interna, hacia la rueda externa. Esto produce un efecto de endurecimiento de la suspensión asociada a la rueda externa, con la consiguiente disminución de la compresión que sufre y por ende una menor inclinación de la carrocería del vehículo.

La elasticidad asociada a la barra determina cuán efectiva es para contrarrestar la inclinación del vehículo. Esta elasticidad típicamente viene dada por el diámetro de la barra. Una barra muy elástica no transferirá mucha fuerza desde una rueda a otra, por lo que no será muy efectiva para impedir la inclinación. Una barra rígida transferirá mayor fuerza, pero esto impactará en el confort de conducción, ya que si una rueda circulando en línea recta pasa por sobre un obstáculo, perturbará más la rueda opuesta que una barra muy elástica.

- Selección del material, de acuerdo al trabajo a desempeñar se empleo un acero 5155 (AISI).
- Proceso de manufactura, forja.

3.3 CASO III. FALLA DE MUELLE Z DE SUSPENSIÓN TRASERA NEUMÁTICA DE AUTOBÚS URBANO.

Se presentaron 6 muelles Z, los cuales presentaban fractura aproximadamente a la mitad de este, a excepción de uno el cual fue proporcionado sin ningún daño aparente (figura 3.8).

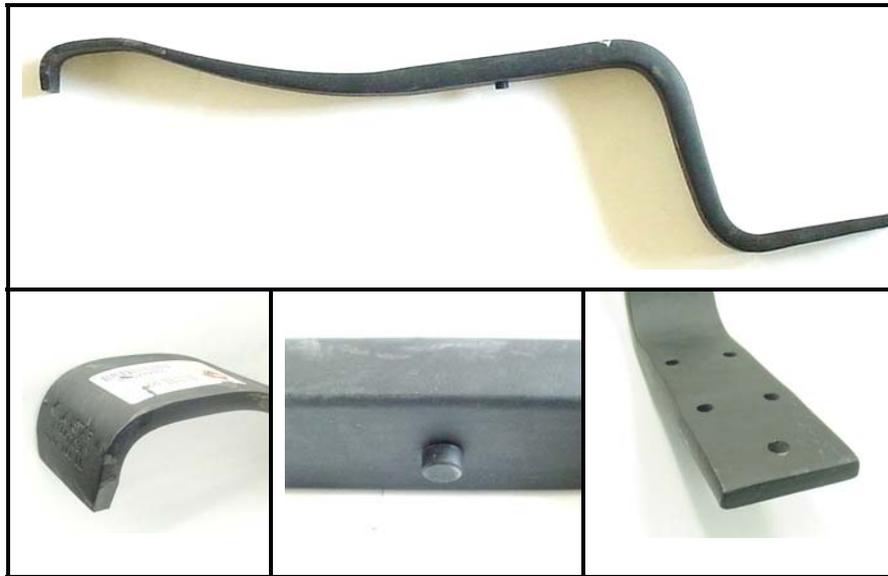


Figura 3.8 Muelle Z-3 sin falla, apreciando las medidas de ajuste del muelle.

En el diseño el perno central fue eliminado y cambiado por un barreno, permitiendo la instalación de un tornillo para sujetar una hoja adicional como medida para una prevención de falla, solución que como se puede valorar no funcionó, dados los muelles Z-1, Z-2, Z-4, Z-5 y Z-6.

En todos los casos hay evidencia de falla por fatiga, con marcas de playa iniciando en la parte superior de los muelles. Otro aspecto importante es la evidencia de desgaste y corrosión en las zonas críticas (figuras 3.9 a 3.13).



Figura 3.9 Muelle Z-1. Presenta fractura en la zona media del barreno central de sujeción. Existen evidencias de desgaste por ludimiento (fricción) en la superficie cercana a la fractura y en las zonas que delimitan la ubicación del refuerzo elástico (espesor constante).



Figura 3.10 Muelle Z-2. La fractura se encuentra en el extremo de mayor espesor, a unos 10 cm del barreno central de sujeción, en el límite de la zona de desgaste por ludimiento.



Figura 3.11 Muelle Z-4. Fractura en la zona del barreno, se aprecia el deterioro superficial por corrosión en las zonas de acoplamiento al eje.



Figura 3.12 Muelle Z-5. Fractura cercana a la zona de acoplamiento. El inicio de la falla por fatiga se aprecia en la superficie mostrada.



Figura 3.13 Muelle Z-6. La fractura en este muelle se da en el cambio de sección (zona recta y espesor constante a la zona curva de espesor decreciente).

Consideraciones en el diseño:

- La función de el muelle Z es servir de soporte principal a la cámara de aire y chasis; su función secundaria es la de actuar como muelle de constante elástica lo suficiente para no considerarse rígida. Esta sujeta rígidamente al eje motriz mediante pernos "U", el extremo izquierdo desliza dentro del soporte o "percha" que va al chasis y en el extremo derecho se instala la cámara de aire que es en realidad un resorte neumático, y es este componente quién absorbe parte de los movimientos propios del eje debido a la configuración del camino.

- Tamaño y forma, una de las características primordiales es que el espesor de la muelle (figura 3.14) en el lado izquierdo del eje tiene un perfil parabólico, que permite tener prácticamente el mismo esfuerzo en cualquier zona. Los limitadores de movimiento del eje trasero en sentido longitudinal y transversal son las barras de torsión aunque pueden llegar a existir cargas laterales y longitudinales, sobre la muelle Z, pero la carga principal es la que se aplica verticalmente en los extremos.

Una característica de estos muelles, es el perno central, el cual sirve como posicionador de la muelle, y la geometría en los extremos: al tener pestañas y barrenos diseñados para tener una fijación al chasis o bastidor.

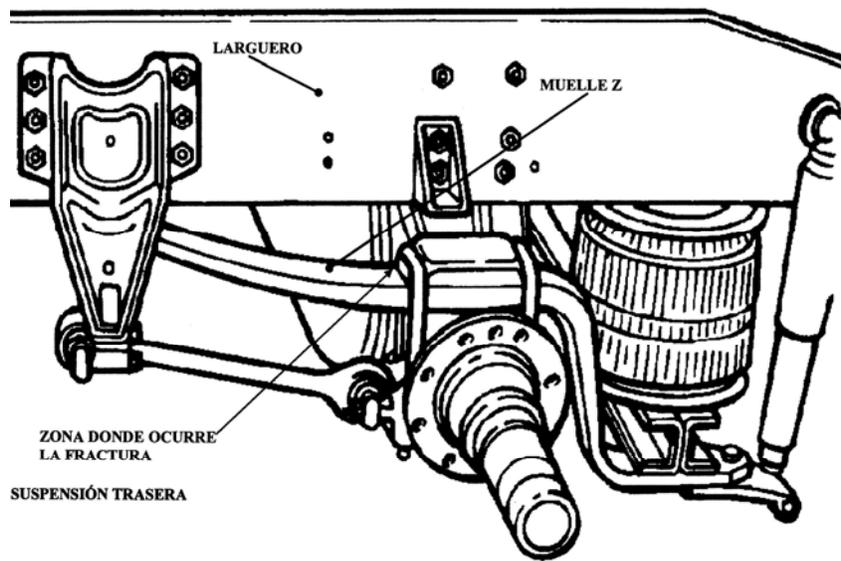


Figura 3.14. Disposición típica de un muelle Z en un eje trasero.

- Selección del material, el material empleado generalmente es un acero AISI 5160.
- Proceso de manufactura, el muelle Z es de acero forjado.

Después de conocer los aspectos generales en los cuales fueron entregados dichos muelles y tener una hipótesis del mecanismo de falla, se determinara la secuencia de eventos para los cuales dicho elemento a fallado, considerando el diseño y los datos recabados.

CAPÍTULO 4.

METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA PARA EL ESTUDIO DE CASOS DE ELEMENTOS MECÁNICOS.

4.1 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL TIPO DE FALLA.

En particular no hay un método específico con el cual se llegue a solucionar el problema, pero en base a los hechos y elementos fallados se puede obtener una hipótesis individual del mecanismo de falla. El investigador debe responder varias preguntas para orientarse en la estrategia de estudio: tipo de material (propiedades físicas, químicas y mecánicas del material), ¿cómo se fabricó?, tiempo de servicio, ¿para qué fue diseñado?, ambiente expuesto. Mientras más datos se tengan, la solución del problema será más rápida.

Cuando el problema es suscitado en la etapa de diseño se deben indagar:

- Las modificaciones en el diseño
- Cambios de tolerancias
- Modificación del procedimiento de análisis
- Propiedades del material

El diseño de un elemento concluye cuando se ha definido su estructura funcional y sus características de diseño; y estas propiedades determinan, la confiabilidad del proceso que se desempeña y el producto.

Cada caso resuelto tiene la metodología substancial del análisis de falla, primero se realizó una inspección preliminar (historia de la falla, efecto, material, proceso de manufactura y solicitaciones), generando una primera hipótesis acerca de la causa de la falla, después se realizó una inspección visual a detalle (geometría del elemento, aspecto de la superficie, dirección de la falla, diseño y manufactura), se consideró el tipo de pruebas de laboratorio para verificar la hipótesis y generar una tesis de las causas que llevaron a la falla y la secuencia de eventos que la favorecieron para establecer acciones correctivas y preventivas.

4.2 ANÁLISIS DE FALLA DE LOS CASOS.

4.2.1 Caso I Motor de combustión interna.

Se siguió la metodología del análisis de falla, para este caso consistió en:

- a) Información referente al funcionamiento del motor en cuestión.
- b) Identificación de las piezas falladas.
- c) Observación macroscópica de los elementos fallados y el daño causado en el motor ensamblado.
- d) Desensamble del motor para inspección de daño y recuperación de partes falladas que aun se encontraban montadas.
- e) Observación a bajos aumentos de: bielas fracturadas, metales de biela y bancada, pistones, camisas, cigüeñal y monoblock.
- f) Análisis de las superficies de fractura de las bielas falladas.
- g) Determinación del tipo de material de las bielas mediante análisis químico. (Se empleo la biela #3 como referencia).
- h) Determinación del perfil de dureza de las bielas (fracturadas y sin daño).
- i) Estudio metalográfico de microestructura (secciones transversales y longitudinales).
- j) Inspección por microscopía electrónica de barrido, tanto de las superficies de fractura como de las piezas metalográficas.
- k) Análisis de datos recabados.
- l) Conclusiones.

DATOS GENERALES.

Se obtuvieron los datos generales proporcionados por el personal de taller, igualmente se recabo toda información en cuanto a las características de operación del motor:

Motor de gasolina cuatro tiempos:

- 3.3-litros DOHC 24-válvulas VVT-i V6.
- 215 hp @ 5600 rpm potencia maxima.
- 222 lb.-ft. @ 3600 rpm par máximo.
- Kilometraje aproximado 28,800 Km.
- Lubricante empleado aceite multigrado 5 SW 15.

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA DE LOS ELEMENTOS DEL MOTOR.

La biela 4 al fracturarse y ser proyectada provocó la fractura del depósito de aceite, como se puede observar detalladamente el impacto fue desde el interior, el impacto fracturó los soportes de la charola que va al interior del depósito, la deformó y agujeró.

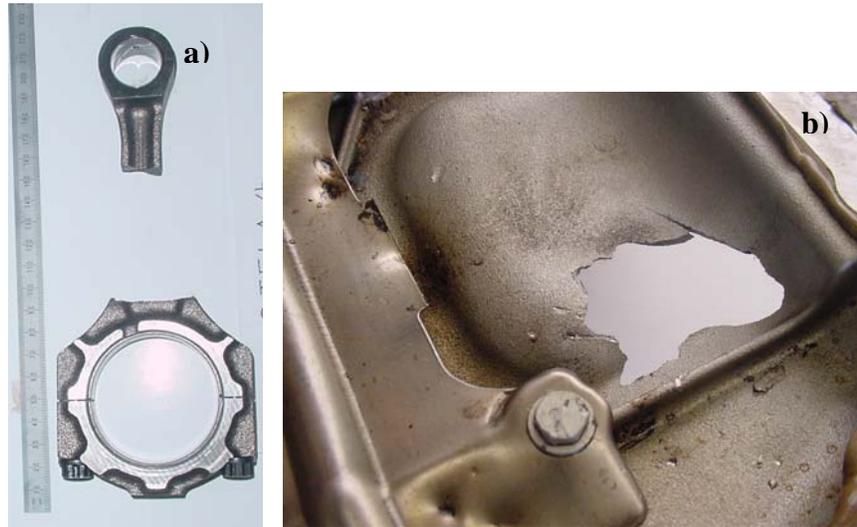


Figura 4.1. a) Biela 4 fracturada en 3 partes (el segundo pedazo quedó incrustado en el monoblock), b) Vista desde el interior del depósito de aceite.



Figura 4.2 charola deformada y con los soportes rotos.

Se observa claramente el golpeo de la biela ya fracturada sobre el monoblock. Asimismo se nota que no existe deterioro en los metales de bancada y que el lubricante se encuentra aparentemente en buen estado (figura 4.3).

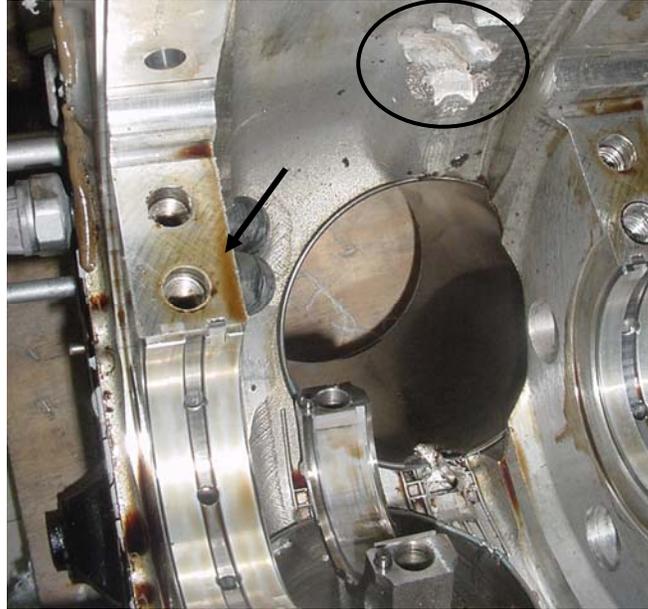


Figura 4.3 El fragmento de biela golpeo y deterioró el monoblock.



Figura 4.4 Pistón 2, la biela se fracturó en la parte media, en primera instancia por pandeo quedando en movimiento la parte sujeta al cigüeñal golpeando al monoblock hasta su fractura en la zona de cambio de sección, la cual coincide además con un barreno de lubricación.



Figura 4.5 Pistón y biela 4, la fractura es similar a la del pistón y biela 2, por las marcas observadas en la camisa y con base en sus menores propiedades mecánicas de la biela se puede concluir que ésta fue la primera en fracturarse.

PROCEDIMIENTO.

Las condiciones y antecedentes que propiciaron la falla, así como los antecedentes de servicio del vehículo, los procesos de fabricación, material y métodos de inspección, entre otros son fundamentales para realizar los siguientes estudios:

- A. Análisis Químico
- B. Dureza
- C. Fractografía
- D. Estudio metalográfico. Microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

A. Análisis químico.

El análisis fue realizado mediante espectroscopia de emisión óptica, tomando como referencia la biela sin daño (biela 3). Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.1. Composición química de biela muestra.

Elementos	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Al %	Co %	Cu %	Ti %	Pb %	Fe %
Composición	0.648	0.0176	0.1412	0.0104	0.0069	0.0226	0.0367	0.0173	0.0090	0.0024	1.642	0.002	0.0056	97.4

Se aprecia un elevado contenido de cobre en la composición del acero empleado en la fabricación de la biela.

B. Dureza.

Para conocer las propiedades mecánicas de las bielas se obtuvo la dureza de las bielas fracturadas y relacionarlas con la biela de referencia, esto de acuerdo a la norma ASTM E18-98. Los resultados se presentan en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2. Dureza Rockwell escala C para las tres bielas.

Pieza 2 Fracturada	Pieza 3 Referencia	Pieza 4 Fracturada
27.6	29.1	22.5
26.1	30.3	22.5
25.1	29	19.1
27.7	28.2	22.4
29.3	29.4	20.8
27.16	29.2	21.46

Considerando la relación de dureza Rockwell con Brinell y a partir de la relación de ésta con el límite de cedencia se estima que las bielas tienen una resistencia del orden de:

Tabla 4.3. Resistencia de bielas.

Pieza 2 Fracturada	Pieza 3 Referencia	Pieza 4 Fracturada
92 Kg/mm ²	97 Kg/mm ²	83 Kg/mm ²

C. Fractografía.

Se realizó la inspección de la superficie de fractura en tres etapas:

1. Revisión a 1X de los elementos para determinar zonas con características particulares que proporcionen información con respecto al tipo de fractura y zonas(s) de inicio, para una inspección a mayor detalle.
2. Observación a bajos aumentos (6.3 a 32X), ésta se realizó mediante estereoscopio, con la finalidad de determinar zonas características, zona(s) de inicio de falla y así proceder a su inspección mediante microscopía electrónica de barrido.
3. Inspección mediante microscopía electrónica de barrido.



Figura 4.6 Biela 2 se observa la fractura frágil favorecida por el barrenado de lubricación.



Figura 4.7. La superficie de la biela 2 muestra el efecto de granallado proceso que se le ha aplicado para mejorar su resistencia a la fatiga.



Figura 4.8. Superficie de fractura de la biela 2 que después de desprenderse se incrustó en el monoblock. Se observa claramente que la fractura (frágil) se inició en el lado izquierdo de la imagen y corresponde con el sentido de rotación del cigüeñal.



Figura 4.9. Zona de fractura de la biela 2 correspondiente al lado del pistón, se observa la deformación producto de los golpes recibidos por este vástago una vez que la biela se fracturó.

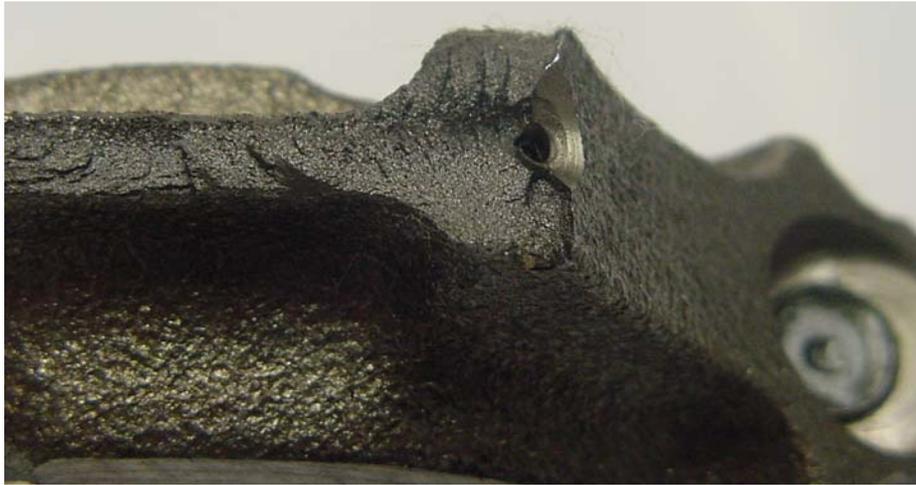


Figura 4.10. Superficie de fractura biela 4 lado cigüeñal. De forma similar la fractura inicia en el barreno de lubricación.



Figura 4.11. Superficie de fractura lado del pistón (biela 4).

D. Estudio metalográfico.

El tipo de microestructura en conjunción con el alto contenido de cobre muestra que la biela ha sido producida por un proceso de pulvimetalurgia. La porosidad que se halla está difundida y se presenta en la fase aglomerante.

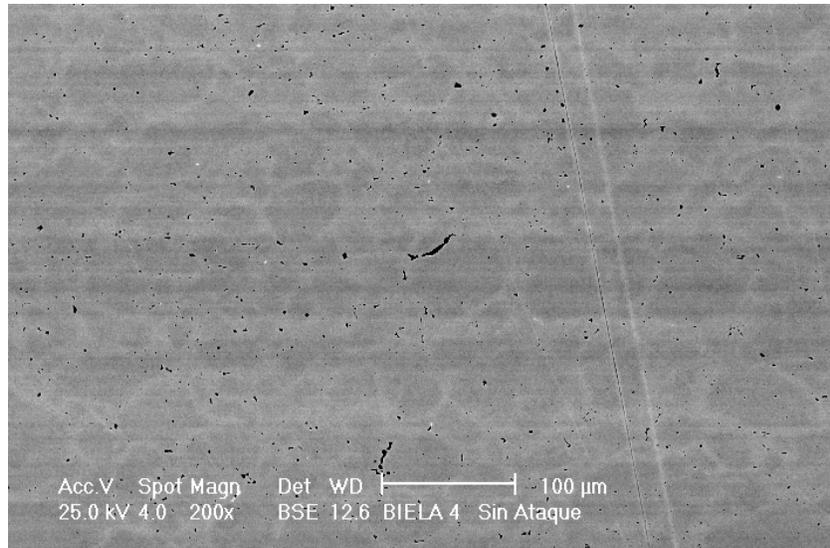


Figura 4.12. Biela 4 sin ataque, se observa claramente porosidad así como una red en tono claro que rodea a los cristales de perlita.

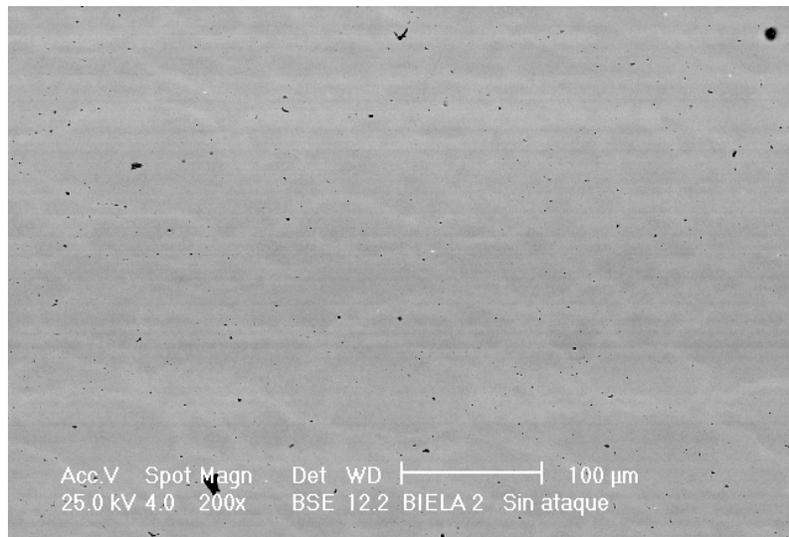


Figura 4.13 Biela 2, la microestructura es similar con la observada en la biela 4 aunque el grado de porosidad es menor.

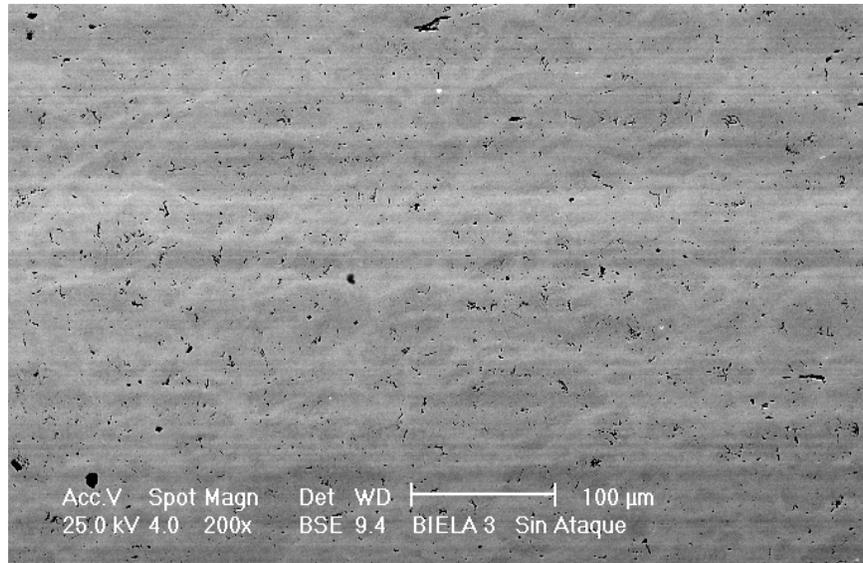


Figura 4.14. Biela 3 la porosidad es similar a la observada en las imágenes anteriores.

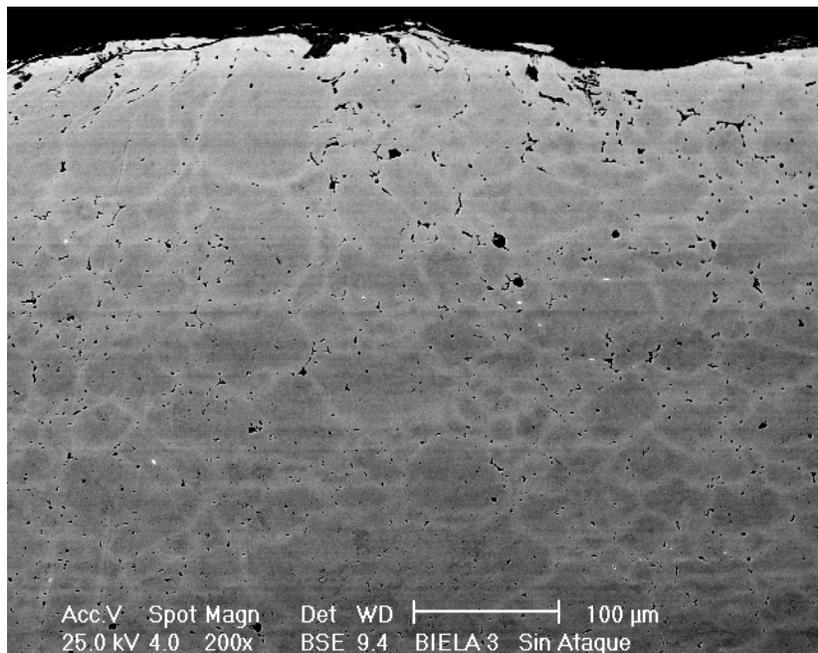


Figura 4.15. Biela 3, resulta evidente el incremento de la porosidad hacia la superficie de la pieza, situación común en piezas provenientes de pulvimetalurgia, pero inadecuada para el tipo de servicio.

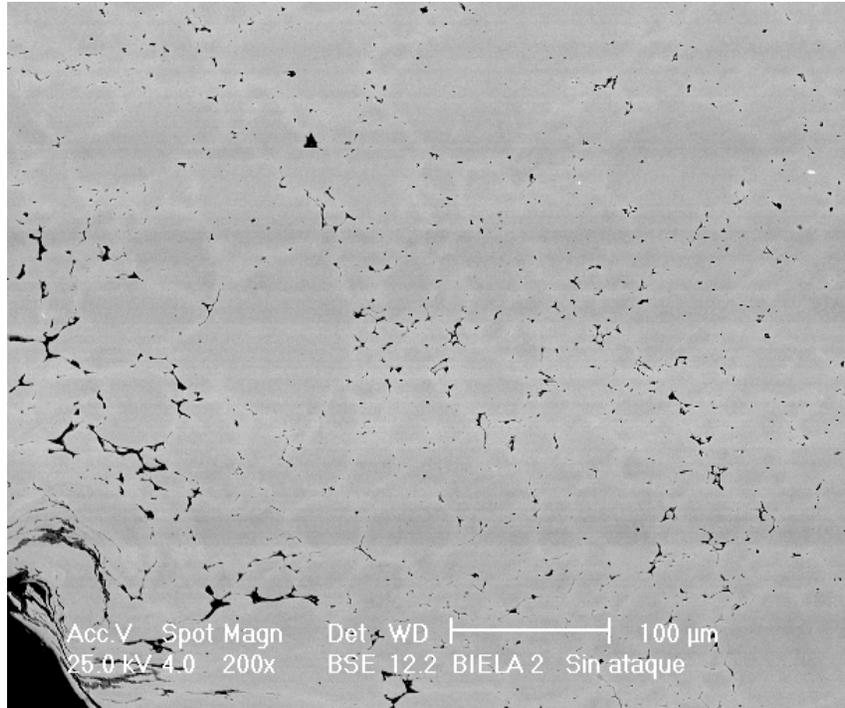


Figura 4.16. Biela 2, el granallado causa una deformación superficial en el material, la cual pretende mejorar la resistencia a la fatiga de la pieza sin embargo en conjunto con un elevado grado de porosidad en la superficie se favorece la presencia de microgrietas, situación que influye negativamente con relación al efecto buscado.

Porosidad.

Considerando las 3 piezas analizadas, se calculó la porosidad la cual fue máxima en la superficie; alcanzando hasta 1.8 % en volumen, mientras que en algunas zonas del centro se reduce hasta el 0.2%. Del muestreo realizado se encontró que la pieza 3 era la de mayor porosidad y la pieza 2 fue la menos porosa. En promedio la porosidad alcanzó un 0.9 %.

La combinación del granallado con la porosidad superficial se ha traducido en algunos casos en la formación de microgrietas que influyen negativamente en las propiedades mecánicas de la biela en particular de su resistencia a fatiga.

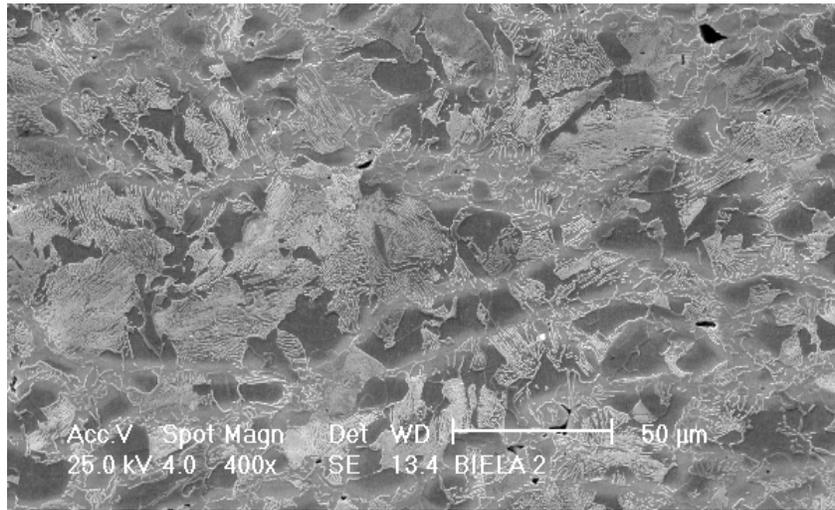


Figura 4.17. Biela 2 con ataque (Nital al 3%). Se observa estructura perlítica.

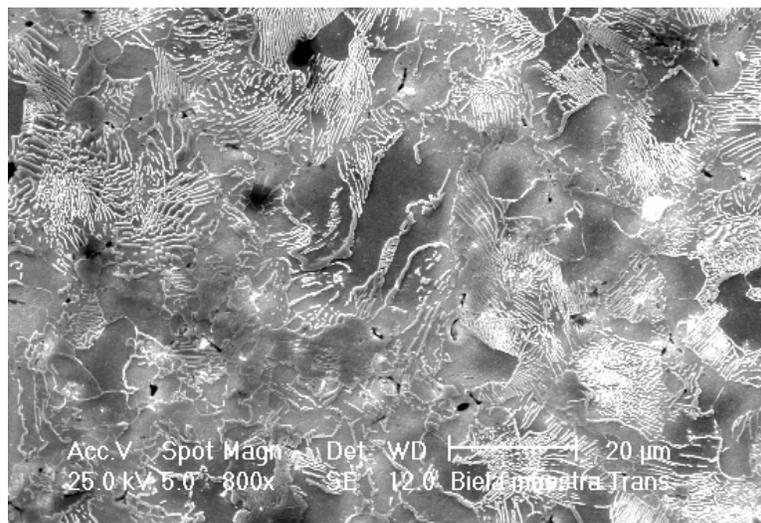


Figura 4.18. Biela 3 con ataque, la microestructura en todas las piezas es similar constando fundamentalmente de una perlita muy fina la cual solamente se revela a más de 500X.

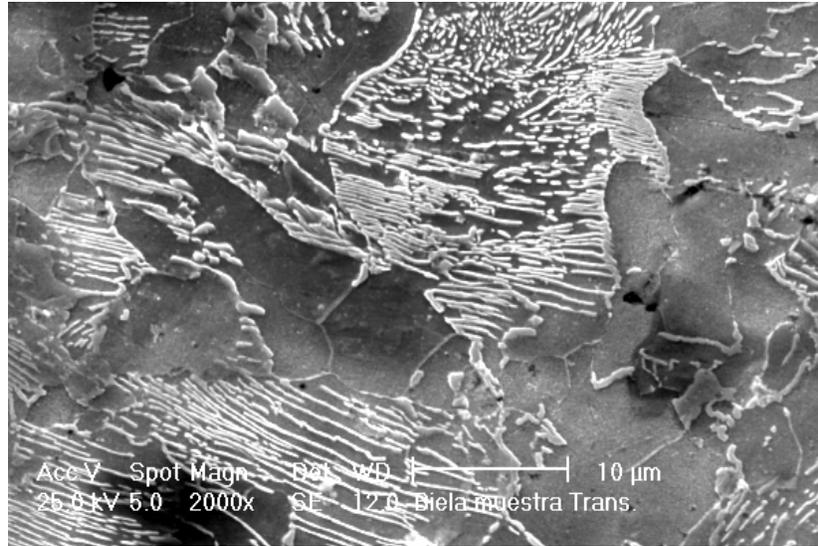


Figura 4.19. Biela 3 observada a 2000X.

CONCLUSIONES.

Dado que la biela cumple con los requerimientos dimensionales y con el modulo de elasticidad establecidos por el fabricante, se puede afirmar que la falla en estudio es atribuible a una sobrecarga externa.

Diseño:

La causa de sobrecarga sobre la biela del motor tiene que haber sido por efecto de un elevado régimen de revoluciones muy superior al de máxima potencia (5600 rpm) y en el rango critico de operación del motor, esta causa tuvo que ser prevista en la etapa del diseño.

En cuanto al depósito de carbón (hollín) en la superficie de pistones como entre los anillos se considera, de acuerdo a lo indicado en la literatura, como un iniciador de formación de lodos en el lubricante influyendo negativamente en las condiciones de lubricación del motor sobre todo cuando los periodos de cambio de lubricante son muy prolongados; se sugiere analizar la posibilidad de emplear aceite 10 SW 30 en lugar del 5 SW 15.

Manufactura:

De acuerdo a los datos obtenidos la porosidad de las bielas no fue la causa de la falla, aunque se debe considerar que la porosidad superficial es muy elevada y un factor que favorece la falla de la biela. Igualmente se debe conocer la microestructura que deberá aparecer después del sinterizado,

ya que se encontraron partículas de cobre, lo cual indica que durante el sinterizado no se alcanzaron las condiciones que permitieran la homogenización de la fase aglomerante de la mezcla.

Por otra parte el granallado aplicado a la biela (su función es poner a compresión la superficie y mejorar la resistencia a la fatiga) al combinarse con el elevado grado de porosidad superficial está generando microfisuras en la superficie, situación que influye de manera desfavorable en la resistencia a la fatiga de la biela y es contraria a la idea del diseñador al definir el granallado de la pieza.

En una pieza producida por pulvimetalurgia es usual la presencia de porosidad, cuya fracción volumétrica es función de la presión de compactado y de las condiciones de sinterizado. Si bien la porosidad se puede eliminar cuando la pieza es recompactada, ésta puede ser considerada como aceptable bajo condiciones perfectamente definidas que no influyan negativamente en las condiciones de servicio de la pieza producida.

La fractura de la biela se produce por la flexión generada por una sobrecarga y de acuerdo a lo observado en bielas y camisas la secuencia fue:

- a) Fractura de la biela 4 por sobrecarga, ésta se rompe alrededor de su parte media.
- b) Debido a la secuencia de encendido la siguiente biela en fracturarse es la dos, igualmente falla en su zona media.
- c) Debido a que el cigüeñal sigue girando las secciones de las bielas 2 y 4 (lado cigüeñal) previamente fracturadas, golpean al monoblock causando un deterioro severo, así como a la charola del semicarter. Generando una nueva fractura coincidente con el barreno de lubricación (figuras 4.6 y 4.10). Los pedazos que se desprenden de la biela 4 golpean al cigüeñal e impulsados por este fracturan al semicarter. El sector que se desprende de la biela 2 del lado cigüeñal al seccionarse ésta se incrustó en el monoblock.

4.2.2 Caso II Barra estabilizadora.

Para el desarrollo del análisis en este caso se tomó la siguiente metodología:

- a) Datos del funcionamiento de la pieza.
- b) Revisión dimensional de la barra de torsión.
- c) Determinación del tipo de material empleado, proceso de fabricación y tratamientos térmicos.
- d) Análisis de las superficies de fractura a bajos aumentos y mediante microscopía electrónica de barrido.
- e) Determinación del perfil de dureza en diferentes secciones transversales de las piezas proporcionadas.
- f) Estudio metalográfico en secciones transversales y longitudinales. Microscopía óptica y electrónica de barrido.
- g) Análisis del estado de esfuerzos mediante elemento finito.
- h) Determinación de la intensidad crítica de esfuerzos para las condiciones de falla.
- i) Resultados y conclusiones.

DATOS GENERALES.

Para el análisis de falla la empresa proporcionó tres barras de torsión, las cuales sufrieron fractura durante su operación. Los datos de la tabla 4.4 estaban indicados en las barras designadas con los números 1, 2 y 3.

Tabla 4.4 Identificación de las barras.

<i>Barra de torsión 1</i>	<i>Barra de torsión 2</i>	<i>Barra de torsión 3</i>
No. 808	No. 808	No. 812
Km 375,365	Km 375,365	Km 333,359
6/Sep/2004	6/Sep/2004	4/Sep/2004

Como se puede observar los datos de las barras 1 y 2 son iguales, por lo que se sospecha de un error en cuanto a la identificación, que no afecta los resultados.

OBSERVACIÓN MACROSCÓPICA.

En las siguientes imágenes (los dos extremos) se pueden observar las tres barras en las condiciones que fueron entregadas a la UDIATEM-FI.

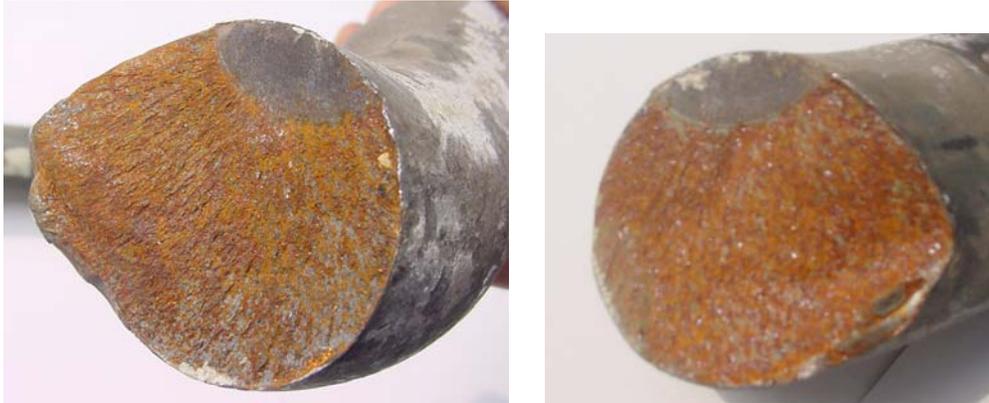


Figura 4.20 Barra 1 se observa el Aspecto de las superficies de fractura.



Figura 4.21 La barra 2 presenta la misma superficie de fractura.



Figura 4.22 La barra 3 al igual que las anteriores se observa que se trata de una falla por fatiga.

PROCEDIMIENTO.

El análisis de falla de las barras de torsión comprendió los siguientes estudios:

- A. Inspección mediante líquidos penetrantes
- B. Análisis Químico
- C. Perfil de dureza
- D. Fractografía
- E. Estudio metalográfico. Microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.
- F. Análisis de tenacidad de fractura.
- G. Análisis de esfuerzos mediante el método del elemento finito.

A. Inspección mediante líquidos penetrantes.

Se comprobó que no existen otras grietas superficiales, tanto en las zonas en donde se sujetan las barras de torsión al chasis (figura 4.23) como en los cambios de sección (figura 4.24). Se demostró que el deterioro por corrosión es superficial debajo de los hules de sujeción. No existe evidencia de que a partir de esta zona se generen grietas de fatiga.

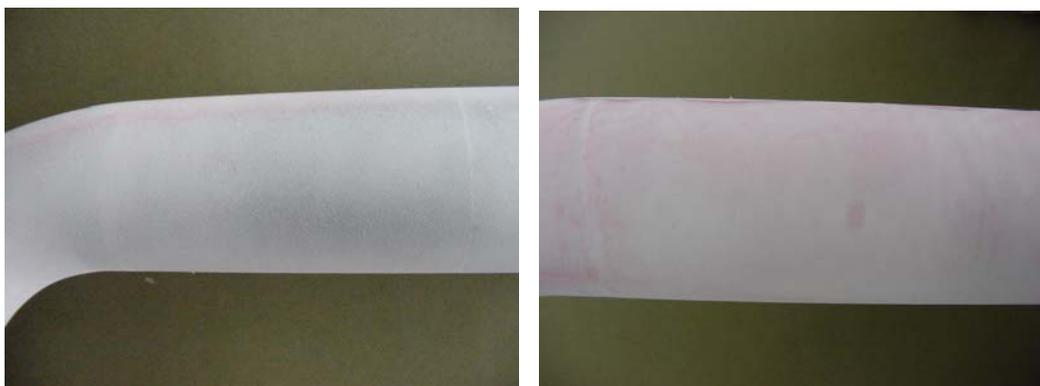


Figura 4.23 Zona de sujeción de la barra al chasis.



Figura 4.24 No hay presencia de grietas superficiales.

B. Análisis químico.

Se efectuó el análisis químico de las barras de torsión mediante espectroscopia de emisión, se realizaron tres colectas de datos en cada una de las muestras provenientes de las barras de acero.

Tabla 4.4. Composición química Barra 1

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Fe
PROM.	0.510	0.246	0.956	0.015	0.011	1.160	El resto

Tabla 4.5. Composición química Barra 2

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Fe
PROM.	0.519	0.287	0.978	0.016	0.010	1.118	El resto

Tabla 4.6. Composición química Barra 3

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Fe
PROM.	0.500	0.258	0.952	0.019	0.012	1.155	El resto

De acuerdo con los datos obtenidos y considerando la designación AISI (tabla 4.7), así como los aceros comerciales de éste tipo, se puede concluir que el material corresponde a un acero 5155. Sin embargo, es necesario mencionar que el material de las barras de torsión no presenta una correspondencia al 100% con el AISI 5155, ya que éstas tienen un contenido de cromo superior en un 30% a lo establecido en la norma AISI.

Tabla 4.7. Designación aceros AISI

Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
	%	%	%	%	%	%	%
AISI 5155	0.51-0.59	0.15-0.35	0.70-0.90	0.35 Max	0.40 Máx	0.70-0.90	EL RESTO
AISI 5160	0.56-0.64	0.15-0.35	0.75-1.0	0.35 Max	0.40 Máx	0.70-0.90	EL RESTO

C. Perfil de durezas.

Se obtuvo el perfil de dureza (Rockwell C) de cada una de las barras fracturadas (tabla 4.8), esto de acuerdo a la norma ASTM E 18-98. La recolección de datos se realizó del centro de la pieza hacia la periferia como lo muestra la figura 4.26.

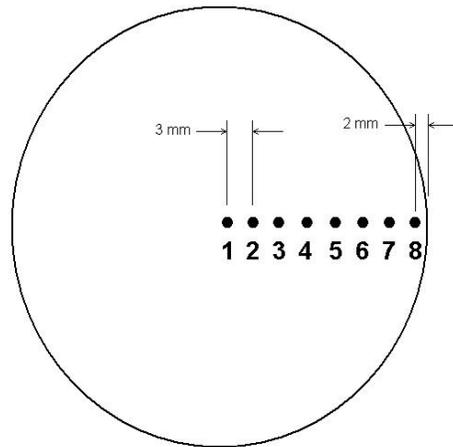


Figura 4.26. Esquema de toma de lecturas de dureza para cada barra.

Tabla 4.8. Perfil de dureza escala Rockwell C

Evento	Barra 1	Barra 2	Barra 3
1	43.0	40.4	48.7
2	43.2	40.0	46.6
3	43.2	41.4	45.9
4	43.0	42.1	47.3
5	43.5	42.4	47.4
6	44.1	42.8	47.4
7	43.8	42.4	47.2
8	44.2	41.9	46.1

Se observan variaciones en los valores de dureza de las tres barras bajo análisis, es conveniente mencionar que en cada una de éstas el perfil de durezas es prácticamente uniforme lo que indica un tratamiento térmico de alta calidad. Por otra parte los datos de dureza son congruentes con la función de la pieza por lo que es de esperarse una microestructura de martensita revenida o bainita, esto de acuerdo a las peculiaridades del tratamiento térmico.

D. Fractografía.

Se realizó el examen en tres etapas:

1. Revisión a bajos aumentos (1X). El objetivo es identificar zonas con características particulares que proporcionen información con respecto al tipo de fractura y zonas(s) de inicio, las cuales sean factibles de una inspección con mayor detalle.
2. Inspección a bajos aumentos (6.3 a 32X), ésta se realizó mediante estereoscopio, con la finalidad de determinar zonas características y zona(s) de inicio de falla.
3. Inspección mediante microscopía electrónica de barrido. Permite precisar las particularidades de la falla.

Del aspecto macroscópico de la fractura y las condiciones de servicio (barra sometida a torsión con cargas variables en el tiempo, cortante puro en la sección recta) se establece que se trata de una fractura generada por cargas cíclicas (fatiga), en la que al alcanzar la grieta un tamaño crítico y se combina con las sollicitaciones producto del servicio de la pieza, se suscita el corrimiento frágil de la fisura (ondas elásticas que se desplazan a través del material). En el caso de las barras 2 y 3, la superficie de fractura está a 45° con respecto al eje de la pieza, situación que comprueba el estado de sollicitaciones bajo el cual se produce la falla.

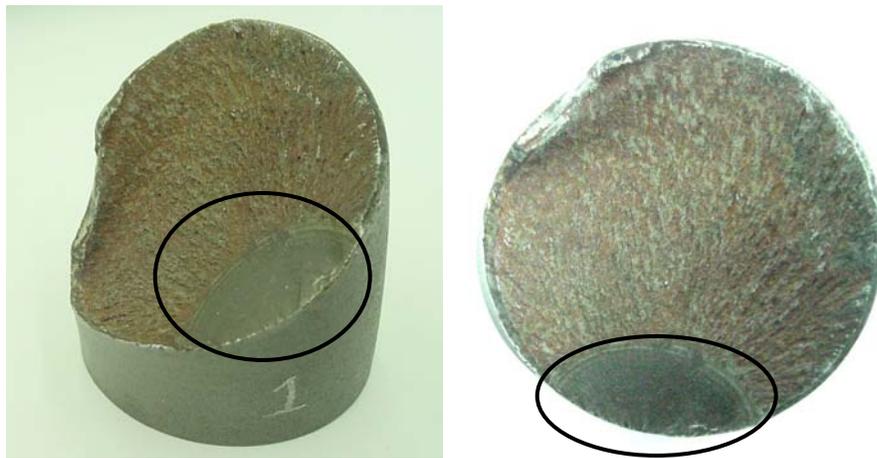


Figura 4.27. Imagen de zona de fractura Barra 1.

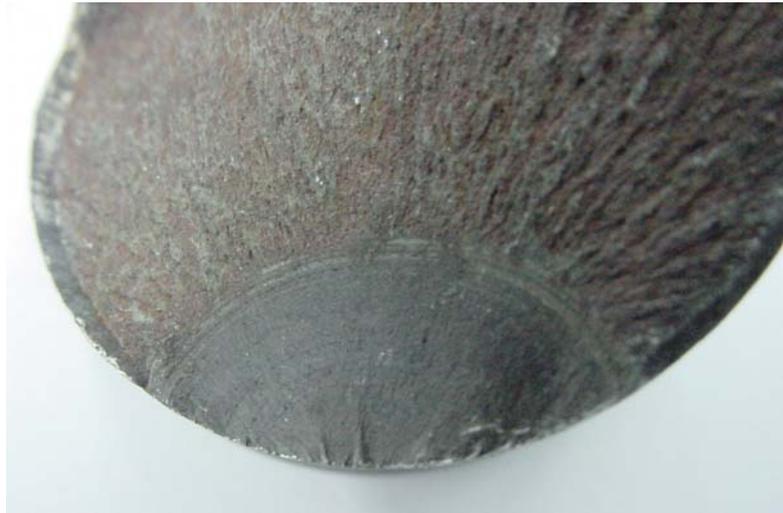


Figura 4.28. Barra 1. Se trata de una fractura frágil cuyo origen se encuentra en una grieta producto de la fatiga a la que es sometida la barra.

En la barra 2, se observa que el inicio de la grieta de fatiga corresponde con una zona de aplicación de presión (indentación). No se aprecia evidencia de movimiento relativo por lo cual se considera que esta sujeción equivale a un empotramiento de la barra, lo mismo se puede indicar con respecto a la barra 3.



Figura 4.29. Zona de fractura Barra 2. Resulta evidente el efecto de la presencia de elementos (1) que realizan una presión puntual sobre la barra, se supone que esto es debido a condiciones de montaje.

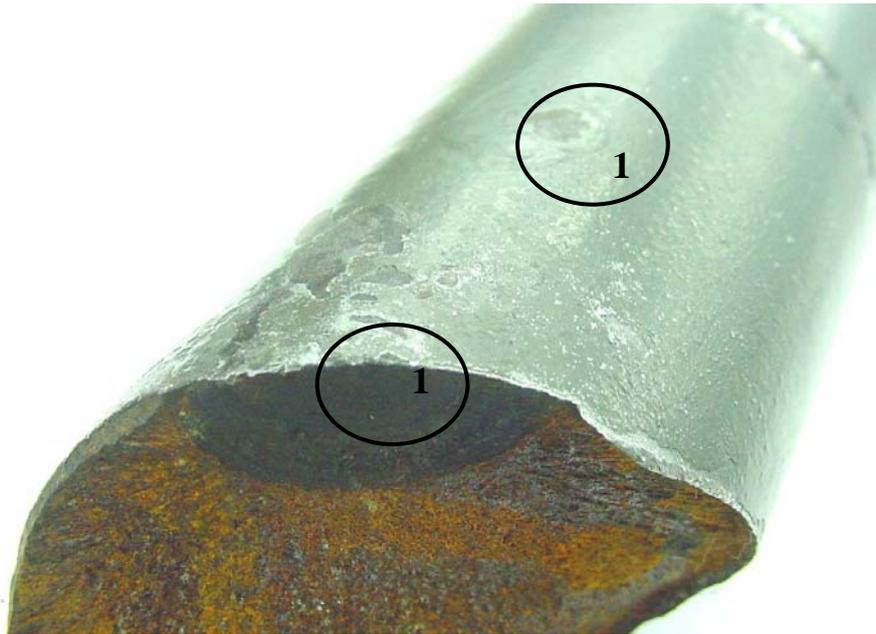


Figura 4.30. Barra 2, el inicio de la grieta de fatiga corresponde con el punto de aplicación de una carga puntual.



Figura 4.31. Barra 2 la grieta al superar los 10 mm. de longitud se combina con la sollicitación aplicada a la barra, alcanzando la intensidad crítica de esfuerzos para el material.



Figura 4.32. Barra 3. El punto de aplicación de carga coincide con el origen de la grieta de fatiga.

La inspección mediante microscopía electrónica de barrido, no se encontró mayor evidencia con excepción de presencia de porosidad (figura 4.33), la cual favorece el corrimiento de la grieta, esto sobre todo en la barra 1.



Figura 4.33. Zona de fatiga de la barra 1, se observa que la grieta en su crecimiento intercepta una serie de discontinuidades.

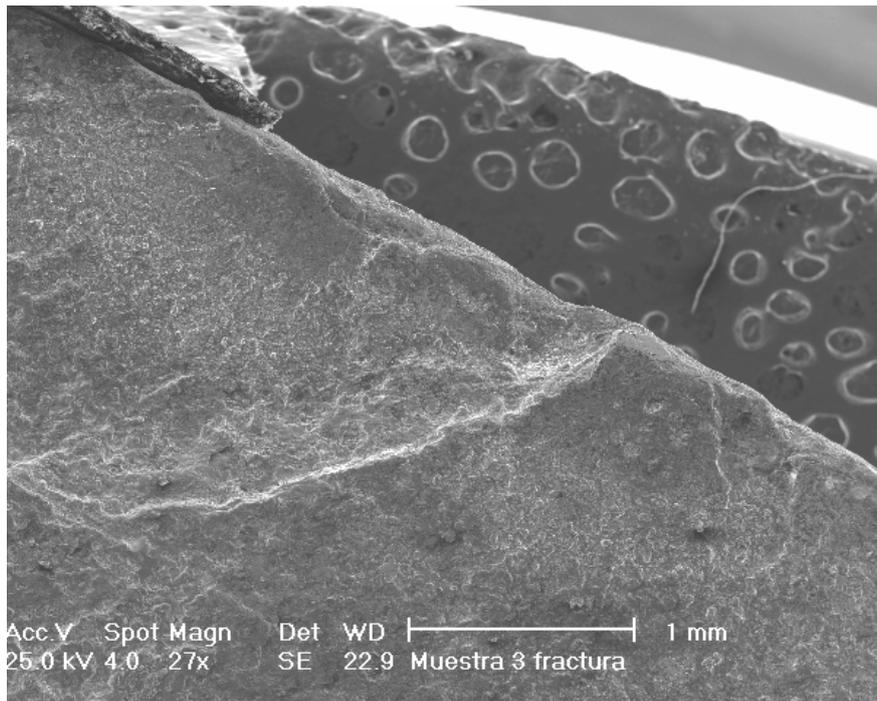


Figura 4.34. Barra 3, microscopia electrónica del inicio de falla.

Para el estudio metalográfico se prepararon, mediante procedimientos convencionales, muestras transversales y longitudinales de las piezas fracturadas, esto para diferentes secciones de las tres barras (figuras 4.35 a 4.43).

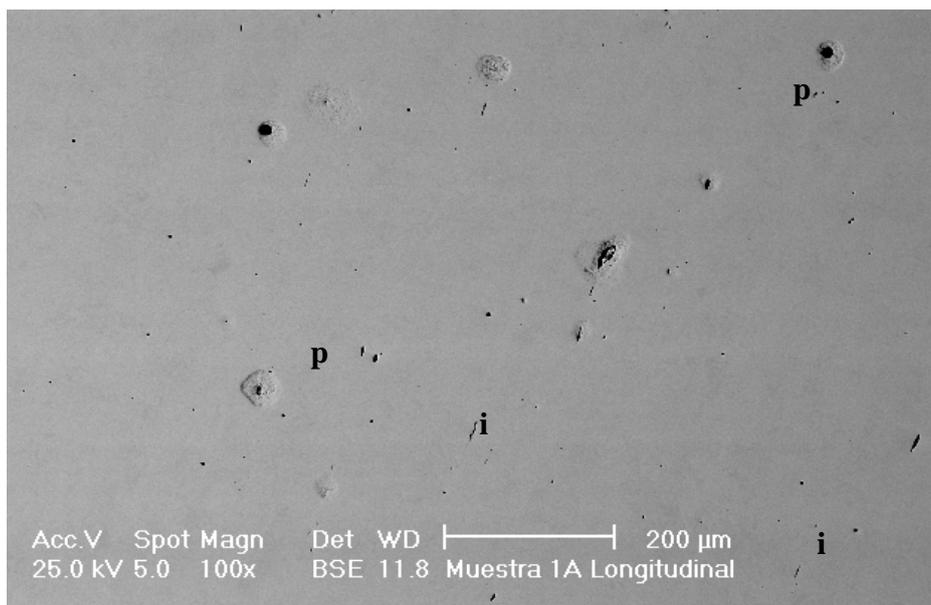


Figura 4.35. Sección longitudinal de la barra 1, sin ataque. Es evidente la presencia de algunas inclusiones (i) y porosidades (p). Zona alejada de la falla.

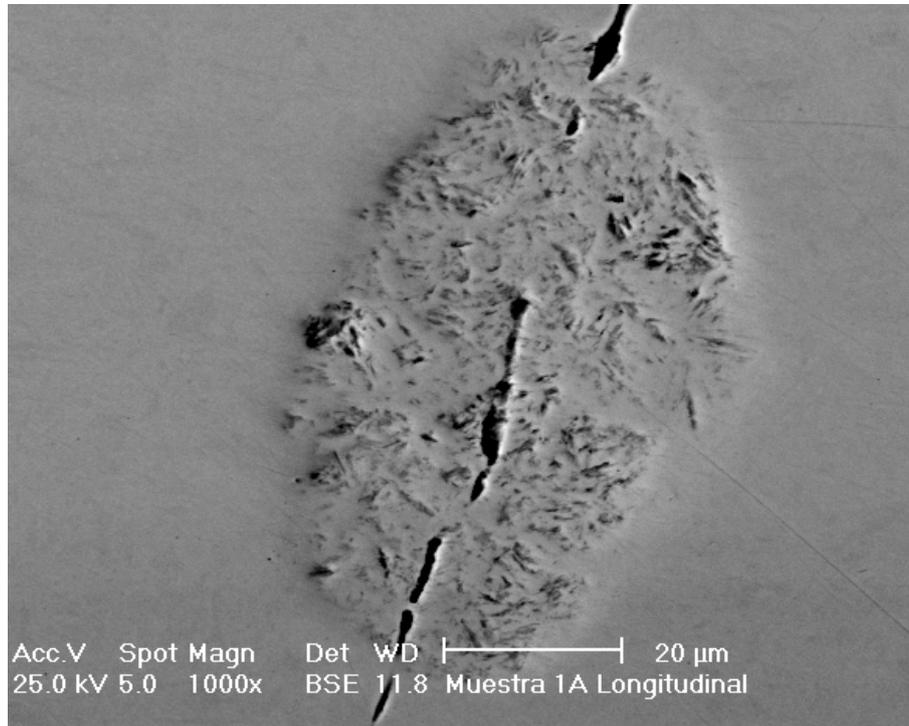


Figura 4.36. Barra 1, Inclusiones coincidentes con una heterogeneidad en el material.

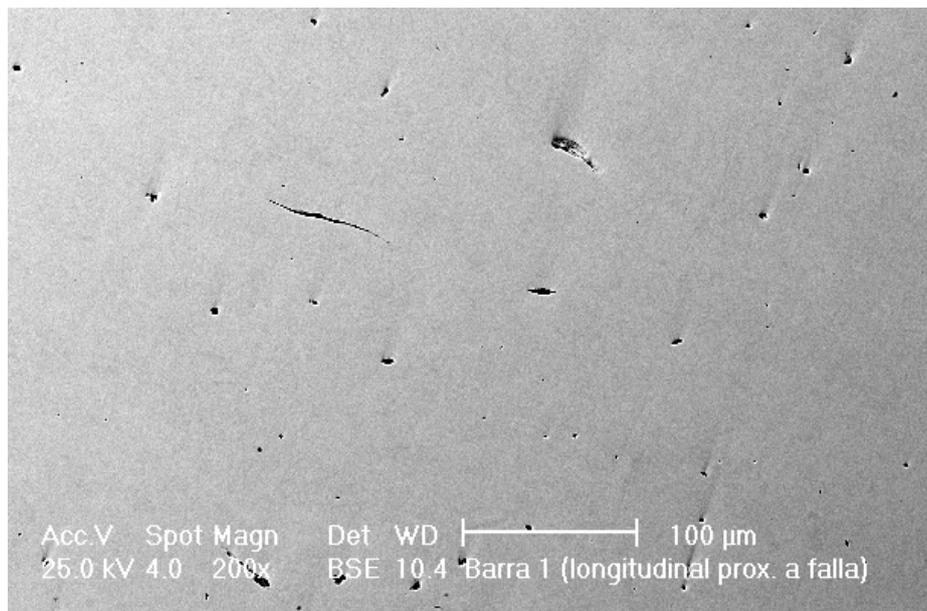


Figura 4.37. Barra 1, zona cercana a la fractura.

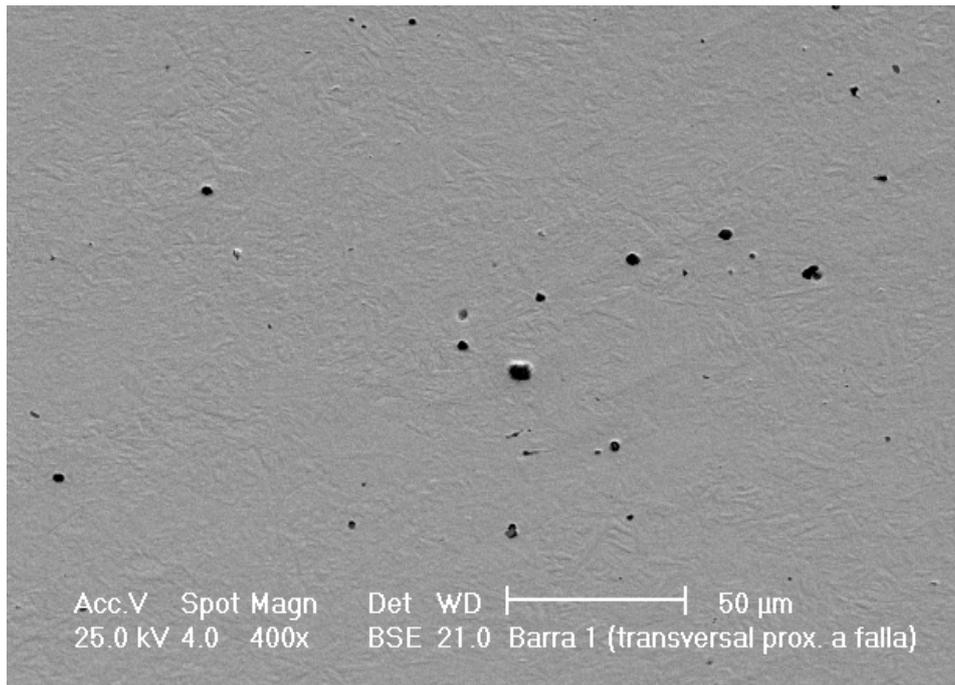


Figura 4.38. Zona cercana a la fractura, imagen obtenida con electrones retrodispersados.

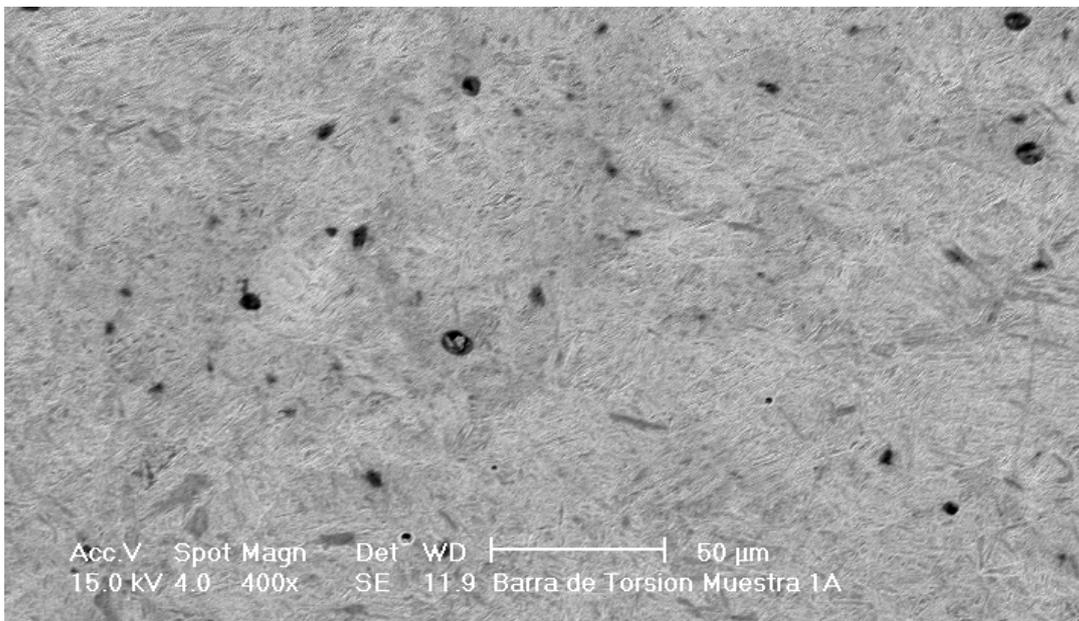


Figura 4.39. Sección transversal Barra 1. Muestra atacada con Nital al 5%, 10 s., la microestructura es aparentemente bainítica. Existe una gran densidad de discontinuidades en el material (porosidades).

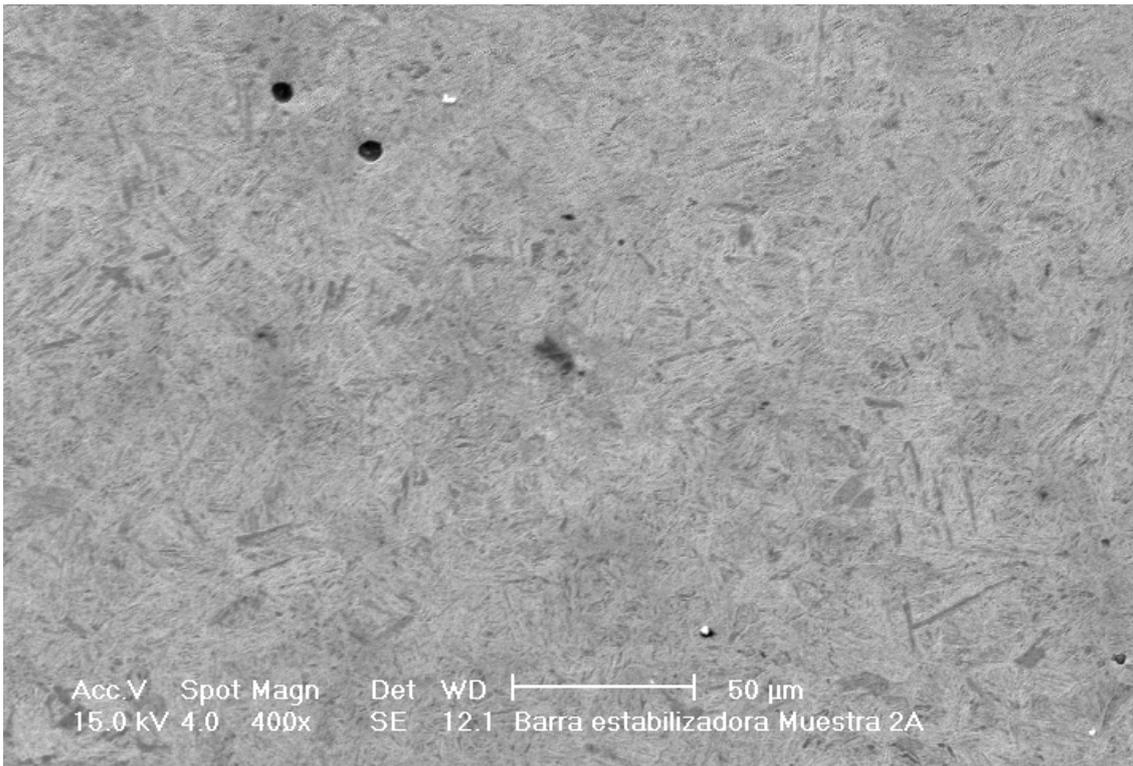


Figura 4.40. Barra 2, mismas condiciones de ataque, la microestructura es aparentemente bainítica, la presencia de (discontinuidades) poros en el material es mucho menor que la observada en la Barra 1.

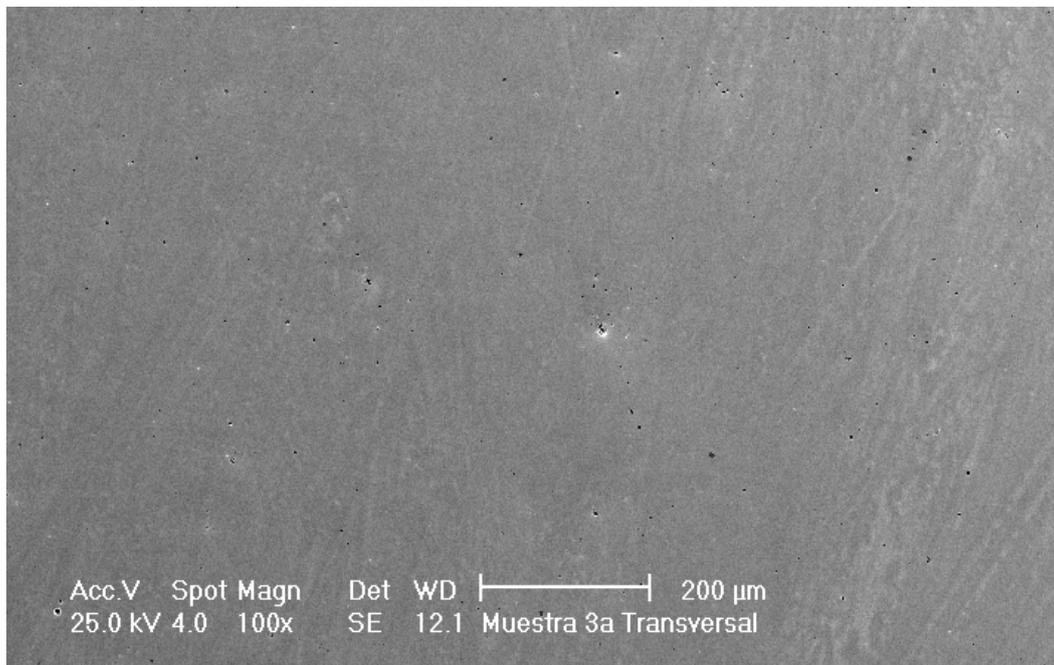


Figura 4.41. Barra 3, sección transversal, la presencia de discontinuidades es mucho menor que en la barra 1.

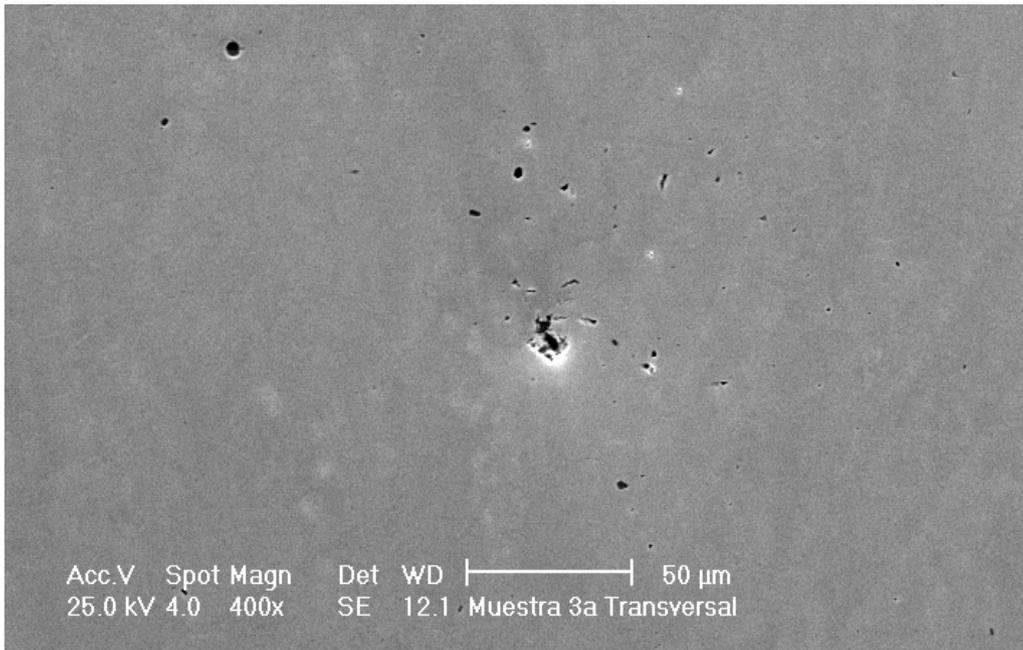


Figura 4.42. Barra 3, se requiere de mayores ampliaciones para evidenciar la presencia de defectos en el material.

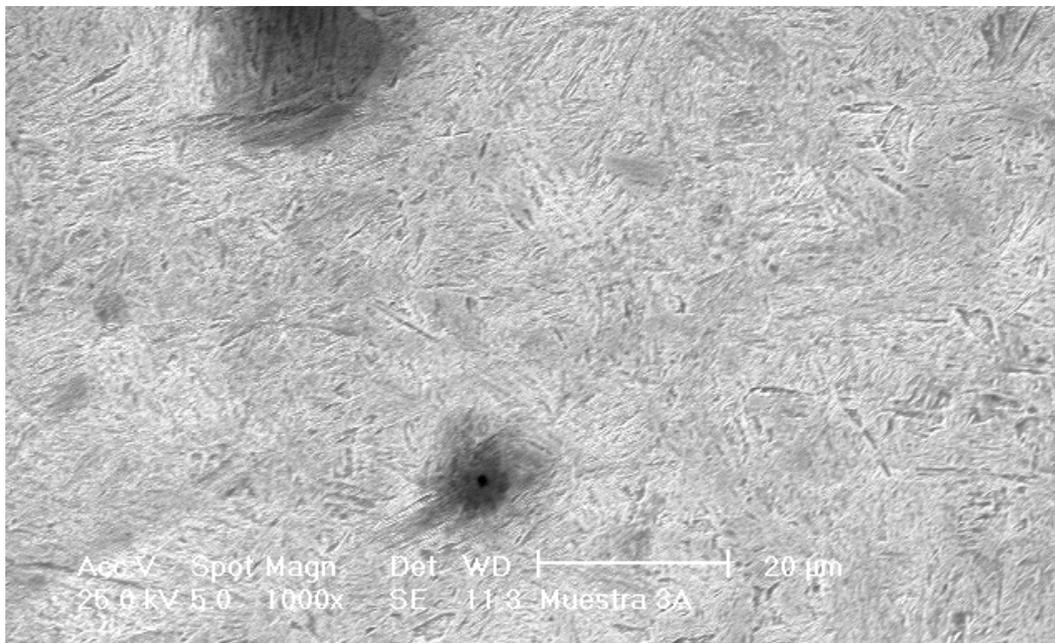


Figura 4.43. Barra 3, sección transversal, la microestructura es similar a la observada en las barras 1 y 2, el material es homogéneo y no se observan los defectos que caracterizan a la Barra 1.

F. Análisis de tenacidad de fractura.

Se consideraron los datos reportados en la literatura, los cuales indican que la intensidad crítica de esfuerzos $-K_{1c}$ (índice de tenacidad), para aceros de alta resistencia, se puede tomar de manera aproximada en $50 \text{ MN m}^{-3/2}$. Por otra parte se realizó la medición de las grietas de fatiga que dieron lugar a la fractura de las barras de torsión (tamaño de grieta $-a$) resultando éstas del orden de 0.011 [m] .

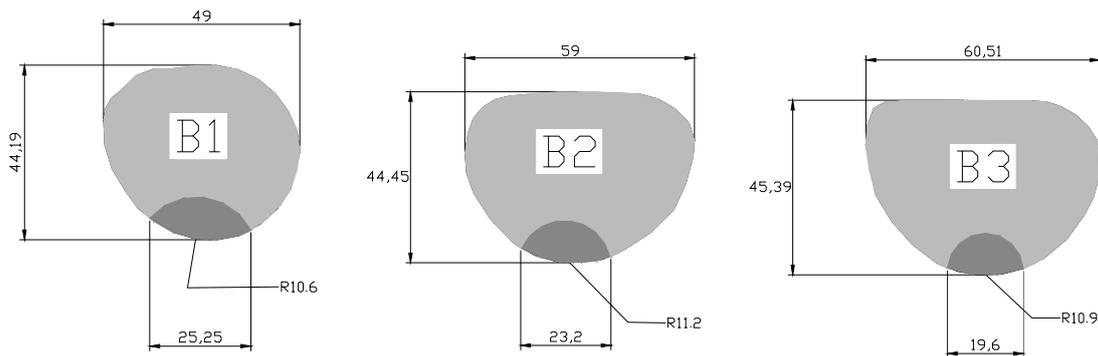


Figura 4.44. Dimensiones de las superficies de fractura. (Acotaciones en mm).

Mediante la ecuación (1) se determinaron los esfuerzos críticos para los valores extremos de K_{1c} .

$$\sigma = k_{1c} / (\pi a)^{1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_{50} = 268.9 \text{ [MPa]} \quad \sigma_{150} = 806.9 \text{ [MPa]}$$

Con lo anterior se consideró tomar el caso crítico de $\sigma_{150} = 806.9 \text{ [MPa]}$, y de esta manera obtener el momento torsionante, el cual se define como:

$$M_T = \sigma I_p / r \quad (2)$$

Donde I_p es el momento de inercia

Definida como $I_p = \pi r^4 / 2$ donde:

r =radio de la barra de 0.0225 [m]

Por lo tanto $I_p = 4.025 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^4\text{]}$.

Finalmente sustituyendo los valores en la ecuación (2)

$$M_T = 14314 \text{ [N m]}.$$

Considerando que se tiene una distancia de 0.38 [m] del punto de aplicación de la carga al punto de empotramiento, la fuerza aplicada es de 37668 [N]. Este valor se utilizará para el análisis mediante elemento finito.

Considerando una fuerza de 40 [KN] que se aplica homogéneamente sobre la mitad del área del barreno que es de aproximadamente $1.32 \text{ e}^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$, por lo que la presión ejercida sobre el barreno será de 30 [MPa] (figura 4.45).

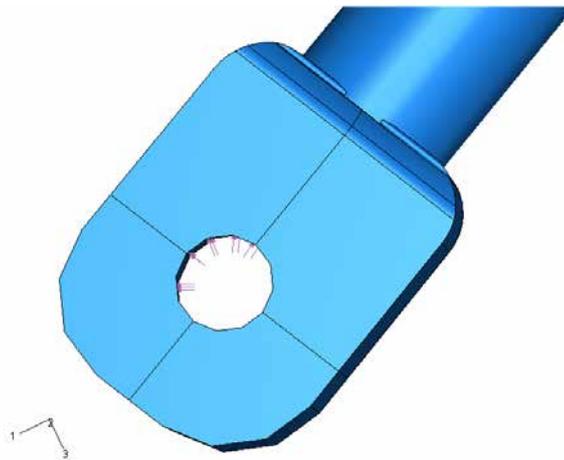


Figura 4.45. Zona de aplicación de la carga.

G. Análisis de esfuerzos mediante elemento finito.

Para el modelo se tomaron las siguientes consideraciones:

- 1) Por condiciones de simetría sólo se tomó en cuenta, para el estudio, la mitad de la barra, ya que los efectos son iguales en ambas secciones de la misma.
- 2) El material que se consideró para el modelo fue un Acero 5160H. Esto se realizó basándose en el análisis químico obtenido y considerando los materiales comúnmente utilizados para este tipo de elementos mecánicos.

Tabla 4.9. Composición química del acero 5160.

Componente	Wt. %
C	0.55 - 0.65
Cr	0.8
Mn	0.88
P	0.035 Máx
S	0.04 Máx
Si	0.23
Fe	El resto

Tabla 4.10. Propiedades mecánicas consideradas.

Propiedades para determinar las condiciones plásticas.	
Esfuerzo máximo $\sigma_{m\acute{a}x.}$	1170 [MPa]
Esfuerzo de cedencia σ_y	1070 [MPa]
Deformación máxima $\epsilon_{m\acute{a}x.}$	0.14
Propiedades para determinar las condiciones elásticas	
Módulo de Young E	205 [GPa]
Módulo de Poisson	0.29

- 3) Como condiciones de frontera se definieron dos casos: El primero de ellos considera restricción total de movimiento a la barra en su sección central, para el segundo caso se consideró un empotramiento puntual en la zona de sujeción de la barra.

Caso 1. Empotramiento de la barra central, es decir que no se le permite desplazamiento ni rotación en ninguno de los ejes de referencia (figura 4.46).

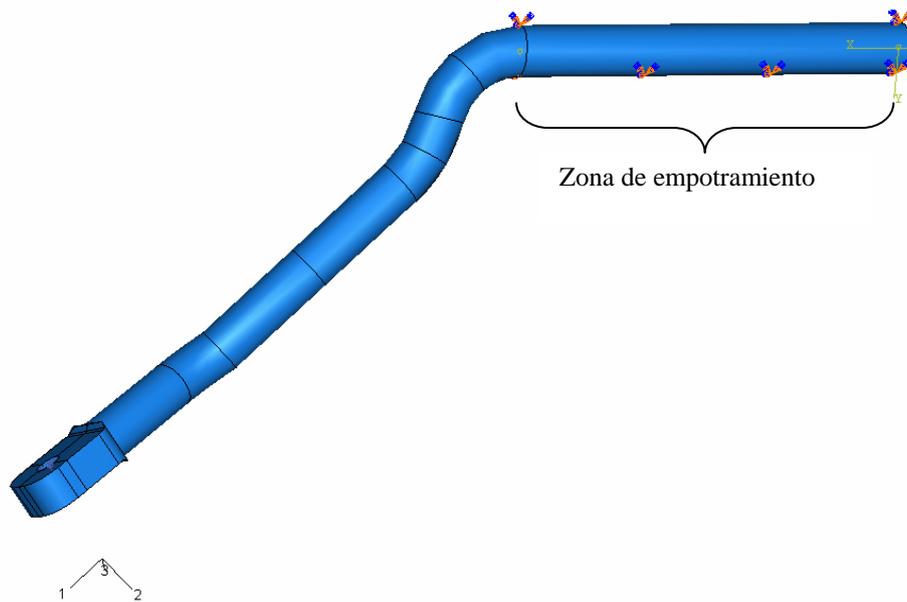


Figura 4.46. Zona de empotramiento en el caso de análisis 1.

Caso 2. Empotramiento puntual en las zonas donde se considera que la pieza esta sujeta al chasis, ya que mediante la observación de las piezas se consideró que estos puntos sirvieron como concentradores de esfuerzos que pudieron provocar la falla (figura 4.47).

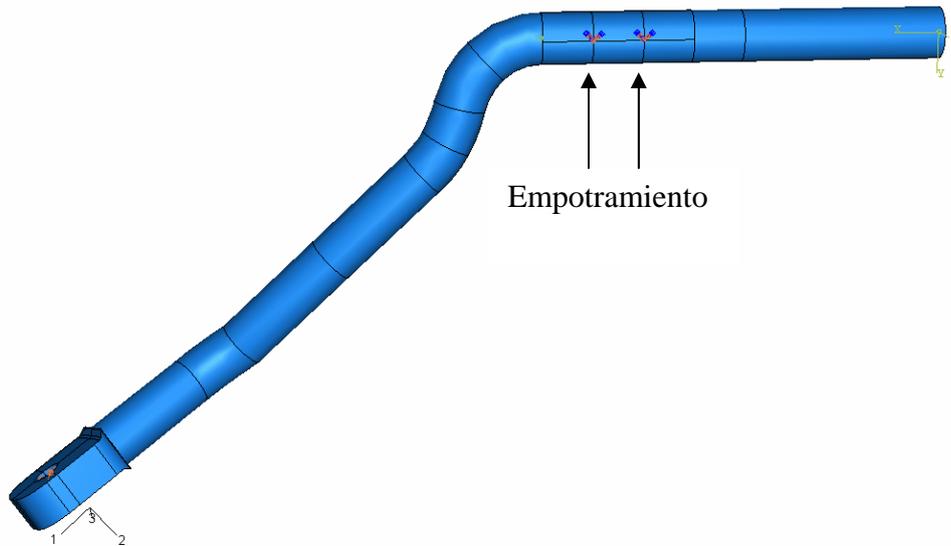


Figura 4.47. Zona de empotramiento en el caso de análisis 2.

- 4) Para la obtención de la carga a aplicar en el modelo, se emplearon los datos derivados del análisis de tenacidad de fractura para obtener las condiciones críticas de esfuerzo a las que trabaja la barra.
- 5) Análisis mediante elemento finito.

Para el caso 1 donde la barra central se encuentra completamente empotrada se obtiene la siguiente distribución de esfuerzos.

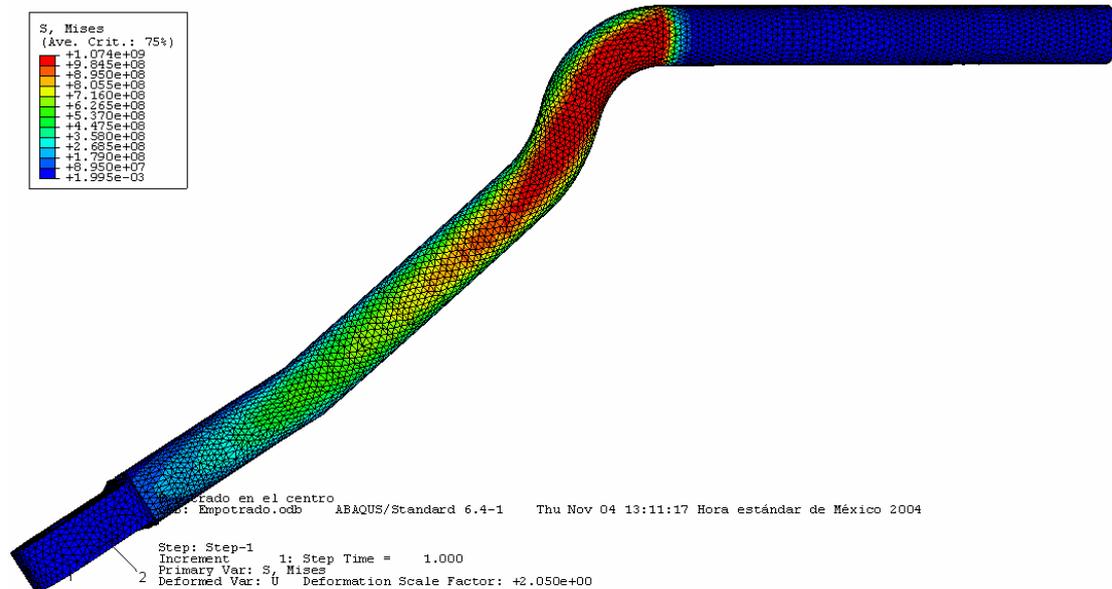


Figura 4.48. Análisis final.

Para el caso 2 donde la barra central se encuentra empotrada en cuatro puntos, se obtiene la siguiente distribución de esfuerzos.

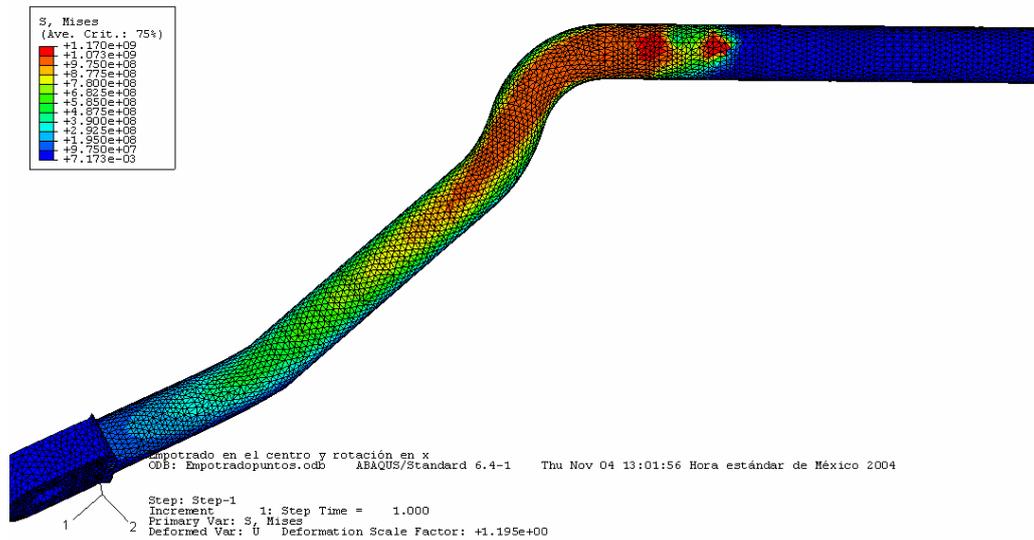


Figura 4.49. Análisis final. Empotramiento en 4 puntos. Resulta evidente que el punto de mayor concentración de esfuerzos coincide con el origen de la grieta a fatiga.

CONCLUSIONES.

La inspección de las superficies de fractura indica que la falla se debió a un fenómeno de fatiga.

Diseño:

En la barra 1 ésta inicia en una zona donde se combinan solicitaciones máximas con una gran cantidad de defectos (discontinuidades) del material. Por su parte en las barras 2 y 3 la grieta de fatiga tiene su origen en la zona donde se aplica una carga puntual a través de un perno que hace las veces de elemento de sujeción. Situación que es desfavorable en cuanto al objetivo de la barra, a la vez de generar un concentrador de esfuerzos que favorece el inicio de la grieta.

Manufactura:

La composición se considera adecuada para la función de la barra, lo mismo que el tratamiento térmico. Del estudio metalográfico se determinó que la calidad metalúrgica de la barra marcada como 1 es inferior en función de las discontinuidades observadas en ésta, se considera que la falla se presentó (barra 1) al combinarse una solicitación máxima con una serie de discontinuidades (poros) que reducen la confiabilidad y resistencia de la pieza.

Instalación:

Es necesario modificar el procedimiento de ensamble de la barra de torsión evitando la presencia de los pernos que producen el efecto de empotramiento de la barra, ya que esto a la vez de ser causa de la falla evita que la barra cumpla con su objetivo de diseño en cuanto a mejorar la estabilidad del vehículo. Esto es la barra deberá de tener libertad para su rotación y desplazamiento axial, las gomas de sujeción únicamente guían a la barra.

En cuanto al material se deberán de establecer procedimientos que eviten la presencia de defectos como los observados en la barra¹.

4.2.3 Caso III Muelle Z.

La metodología del análisis de falla, para este caso consistió en:

- a) Información referente a las muelles.
- b) Identificación de las piezas falladas.
- c) Observación macroscópica y microscópica de los elementos fallados.
- d) Análisis de las superficies de fractura.
- e) Determinación del tipo de material mediante análisis químico.
- f) Determinación del perfil de dureza.
- g) Estudio metalográfico de microestructura (secciones transversales y longitudinales).
- h) Inspección por microscopía electrónica de barrido, tanto de las superficies de fractura como de las piezas metalográficas.
- i) Análisis de datos recabados y conclusiones.

DATOS GENERALES.

Las muelles Z presentadas para análisis corresponden al tipo de placa de acero de espesor variable tipo parabólico, cuyo material común es un acero AISI 5160, el cual es un acero al cromo manganeso, de contenido medio de carbono, común en elementos mecánicos. En todos los casos hay evidencia de falla por fatiga, con las características marcas de playa iniciando en la parte superior de los muelles. Un aspecto importante, es la supresión del perno central, en las muelles fracturadas, debido a la práctica de un barreno que la atraviesa en todo el espesor para pasar un tornillo que sirve para sujetar una hoja adicional, para prevención de la falla, lo cual evidentemente no sucede. Se presentan evidencias de desgaste y corrosión en las zonas de unión con el eje del vehículo, es decir, la zona de aplicación de carga, representa sin duda factores potenciales de inicio de falla.

PROCEDIMIENTO.

El análisis de falla de los muelles Z comprendió los siguientes estudios:

- A. Inspección mediante líquidos penetrantes
- B. Análisis Químico por emisión óptica
- C. Perfil de dureza
- D. Fractografía
- E. Estudio metalográfico.
- F. Análisis de tenacidad de fractura.
- G. Análisis de esfuerzos mediante Método del Elemento Finito.

A. Inspección mediante líquidos penetrantes.

Se determinó que no existen otras grietas superficiales, tanto en las zonas de acoplamiento con el eje, así como en los cambios de sección, pero se detecta el deterioro superficial como resultado de corrosión localizada en las zonas de acoplamiento, adyacente al barreno de sujeción, lo cual es un indicativo de ser la zona donde se concentran mayores esfuerzos.



a)

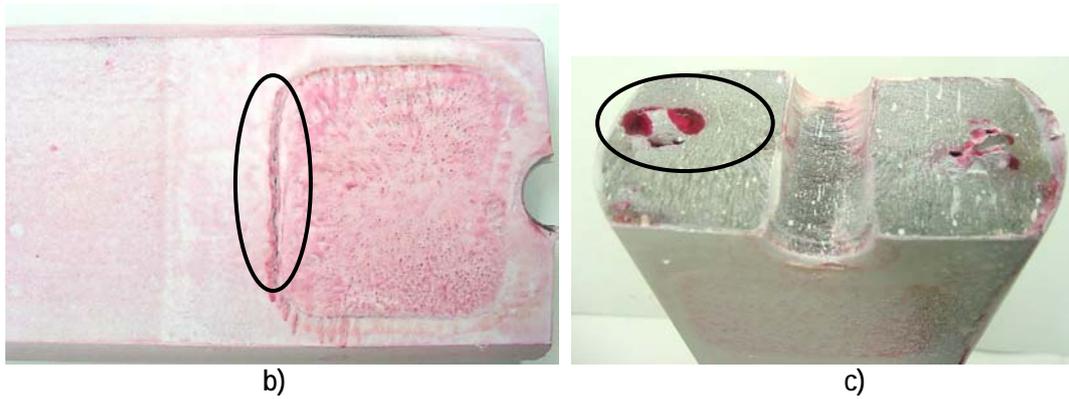


Figura 4.50. Muelle Z-1. Mediante líquidos penetrantes, tanto en la superficie de fractura como en las zonas adyacentes a la falla, se hace evidente el deterioro superficial por corrosión (a y b) así como la magnitud de los defectos internos del material (c).

En esta última observación se puede inferir que tales defectos están presentes en el material, aún antes de que ocurra la falla. Por otra parte es conveniente mencionar que el origen de la falla no se encuentra en estos puntos.

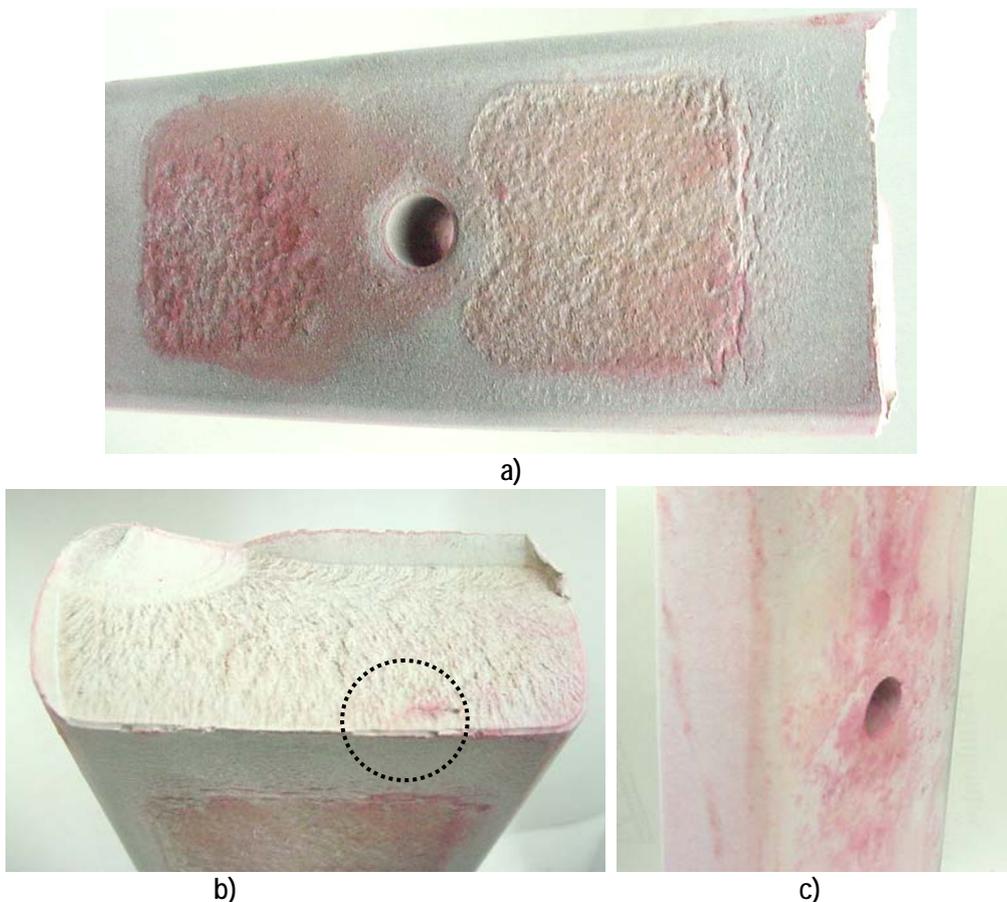


Figura 4.51. Muelle Z-2. De igual forma que en el caso anterior, se observa daño superficial por corrosión (a y c), así como defectos del material (b).

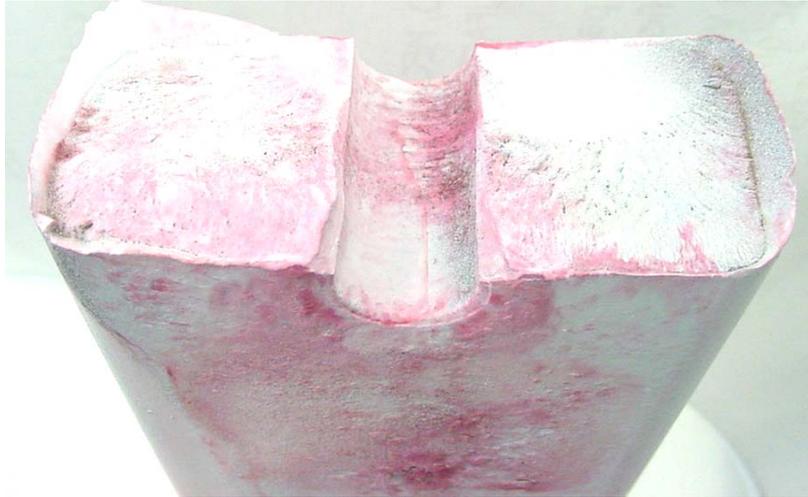


Figura 4.52. Muelle Z-4. Superficie de fractura. Es conveniente mencionar que los depósitos de productos de corrosión se produjeron con posterioridad a la fractura.



Figura 4.53. Muelle Z-5. Superficie de fractura, con evidencia de defectos en la estructura del material.



Figura 4.54. Muelle Z-6. Deterioro superficial por corrosión.

B. Análisis químico.

Se efectuó análisis químico a las muelles Z-1, Z-2 y Z-3, para determinar su composición, tanto en la superficie como en la sección transversal; esto mediante espectroscopia de emisión. Para lo anterior se efectuaron dos colectas de datos en cada una de las muestras provenientes de los muelles. Los resultados se presentan en las tablas 4.11 a 4.16.

Tabla 4.11. Composición química de Z-1 (Sección transversal).

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
PROM.	0.587	0.20375	0.866	0.01015	0.0228	0.935	0.06025

Tabla 4.12. Composición química de Z-1 (Superficial).

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
PROM.	0.40635	0.20495	0.8655	0.01015	0.02285	0.9125	0.0607

Tabla 4.13. Composición química de Z-2 (Sección transversal).

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
PROM.	0.6145	0.2223	0.9505	0.00595	0.01365	0.955	0.03595

Tabla 4.14. Composición química de Z-2 (Superficial).

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
PROM.	0.4614	0.2245	0.956	0.006	0.01295	0.961	0.03625

Tabla 4.15. Composición química de Z-3 (Sección transversal).

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
PROM.	0.65	0.2236	0.9055	0.00415	0.015	0.783	0.04765

Tabla 4.16. Composición química de Z-3 (Superficial).

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
PROM.	0.51035	0.22575	0.9145	0.0046	0.016	0.792	0.04815

La aplicación de aceros al cromo medio carbono, donde los AISI 5160 son de empleo regular (comúnmente denominado *acero para muelle*) de acuerdo a los datos del análisis químico, y considerando la designación AISI (tabla 4.17), se puede concluir que la composición del material varía sensiblemente en el contenido de carbono, aún en una misma pieza (superficial y transversalmente), de la misma forma que en el contenido de Cr (Z-3, respecto a 1 y 2) y Mn (Z-1, respecto a 2 y 3). Esto sin duda dificulta la definición del material en alguna de las designaciones AISI, sin embargo, aún cuando pudiera tratarse de un material con una designación diferente de la AISI es inaceptable la heterogeneidad manifiesta, la cual sin duda repercute en las propiedades mecánicas del producto final y en su adecuado desempeño. De

dichas variaciones la más importante por sus efectos es la que se refiere a la menor concentración de carbono en la superficie, lo que es un indicativo de descarburación durante el calentamiento previo al temple y por consecuencia es una condición a corregir en forma inmediata por el productor de las muelles Z.

Tabla 4.17. Designación aceros AISI

Acero	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
AISI 5155	0.51-0.59	0.15-0.35	0.70-0.90	0.035 Max	0.40 Máx	0.70-0.90	0.060 Max
AISI 5160	0.56-0.64	0.15-0.35	0.75-1.0	0.035 Max	0.40 Máx	0.70-0.90	0.060 Max

C. Dureza.

Se obtuvieron los perfiles de dureza (Rockwell C) de cada una de las piezas fracturadas, esto de acuerdo a la norma ASTM E 18-98. La recolección de datos se realizó tanto de manera superficial, como en sección transversal y longitudinal de las piezas.

De acuerdo a especificaciones de diseño, la dureza esperada debe estar en el rango de 415-461 HB (44.5-48.4 HRC), sin embargo, de acuerdo a lo observado, la dureza registrada esta por debajo del limite inferior recomendado, ya sea transversal o longitudinalmente.

D. Fractografía.

Se realizó la inspección en dos etapas:

1. Revisión de las secciones proporcionadas a bajos aumento (1X). El objetivo es identificar zonas con características particulares que proporcionen información con respecto al tipo de fractura y zonas(s) de inicio, las cuales sean factibles de una inspección con mayor detalle.
2. Inspección mediante microscopía electrónica de barrido. Permite precisar las particularidades de la falla.

Inspección a bajos aumentos.

La magnitud de la carga soportada esta en función de la longitud alcanzada por tales marcas, teniendo en esta muestra la mayor longitud. Por otra parte, lo que salta a la vista es un defecto singular, en forma de laminillas enclavadas en la parte media de la superficie de fractura (incluyendo la zona marcada al centro de la pieza); tales defectos son la evidencia de un material cuya microestructura presenta un arreglo en forma de bandas orientadas en el eje longitudinal del muelle, lo cual resulta un inconveniente en la calidad y las propiedades mecánicas del material.



Figura 4.55. Z-1. Superficie de fractura con las evidentes marcas de fatiga expandiéndose desde la parte superior del barreno central del muelle.

El papel que tiene el barreno central es de un concentrador de esfuerzos, en una pieza cuyo diseño original no lo contempla; sin embargo, la superficie interior del barreno presenta maquinado burdo, cuyo acanalado genera a su vez, concentradores de esfuerzo adicionales, de los que sin duda (como se muestra en esta figura 4.56) se originan grietas que al extenderse dan lugar a la falla.



Figura 4.56. Zona de inicio de falla (Z-1B, derecha). El inicio de falla se encuentra en una muesca en la superficie interior del barreno.



Figura 4.60. Vista superior del muelle 2 indicando el punto de origen de la falla, justo en el límite de las zonas de apoyo, que es la zona de mayor desgaste.

La falla se origina en la esquina superior derecha, con una extensión menor en el progreso de las marcas por fatiga, lo que implica una carga mayor antes de la fractura total.



Figura 4.61. Perspectiva general del origen de la falla. Se aprecia un desgaste considerable en la cara superior, como producto del movimiento relativo, lo cual resulta en un concentrador de esfuerzos y favorece el inicio de la grieta de fatiga.



Figura 4.62. Superficie de fractura "marcas de playa".



Figura 4.63. Muelle Z-4, superficie de fractura. Nuevamente los defectos internos del material. En este caso, el deterioro superficial por corrosión dificulta ubicar el origen de la fatiga, sin embargo, aún son visibles las aparentes marcas de maquinado al interior del barreno, así como un deterioro considerable por corrosión en la cara superior.



Figura 4.64. Muelle Z-5. Como en el caso de Z-2, la falla se origina por el contacto y movimiento relativo en la cara superior del muelle. Se presentan los defectos internos del material pero en menor grado.



Figura 4.65. Muelle Z-6. La falla se da en una zona un tanto separada de los puntos de apoyo, donde comienza el cambio de sección a un espesor menor. Las marcas de fractura sugieren discontinuidades del material en la zona señalada.

E. Inspección mediante Microscopía Electrónica de Barrido.

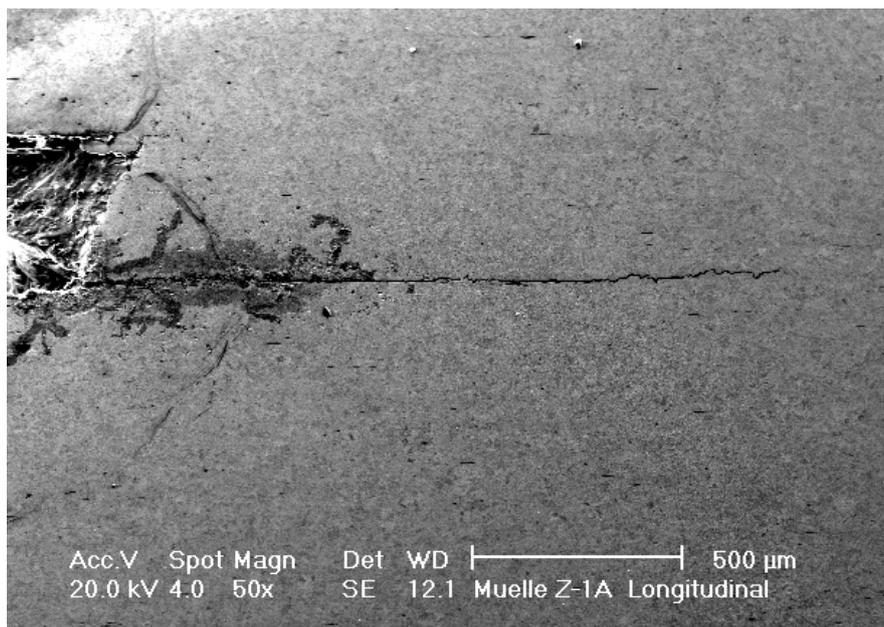


Figura 4.66. Al lado izquierdo se tiene la superficie de fractura y perpendicular a ésta, una grieta sigue en dirección longitudinal a través del material. Es factible existiera internamente antes de la fractura debido a la gran cantidad de inclusiones observadas, así como la estructura bandeada.



Figura 4.67. Z-1. Corte longitudinal. La diferencia de contrastes revela la estructura bandeada (parte superior, diferencia de grises). La estructura bandeada usualmente se genera en el proceso de conformado del metal por lo cual es necesario la aplicación de tratamiento térmico que permita la homogeneización y recristalización del material deformado.

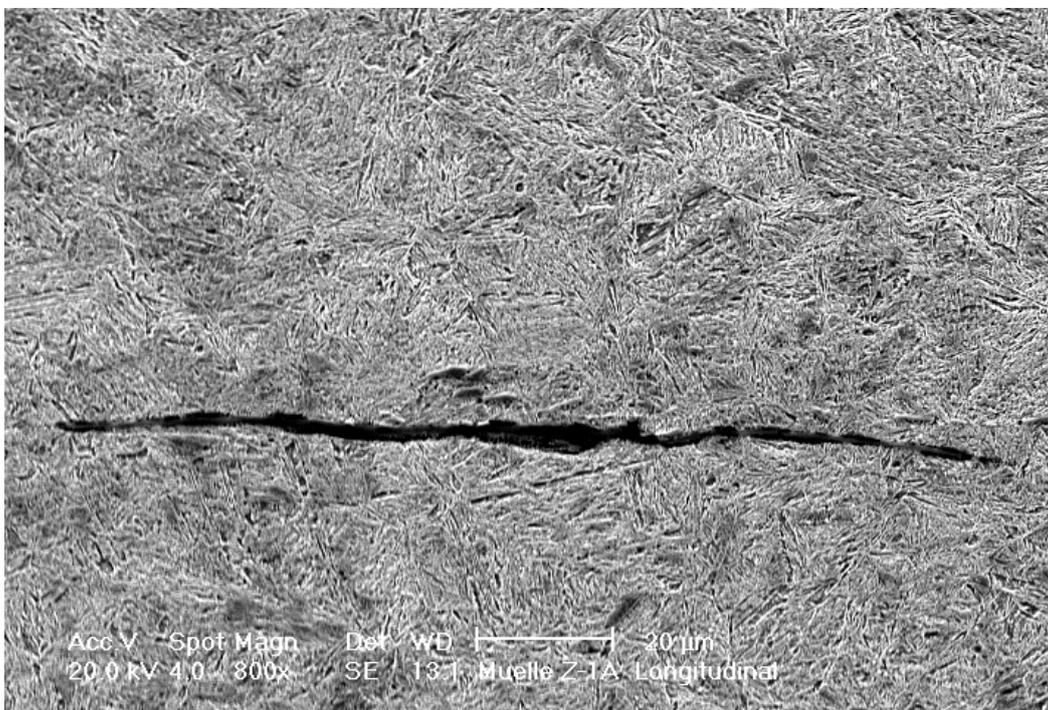


Figura 4.68. Z-1. Muestra atacada con Nital al 5%. Se aprecia una estructura bainítica fina, así como una discontinuidad de las que se muestran en la figura anterior. Aparentemente corresponde a una inclusión, lo cual afecta la continuidad del material así como las propiedades mecánicas de éste.

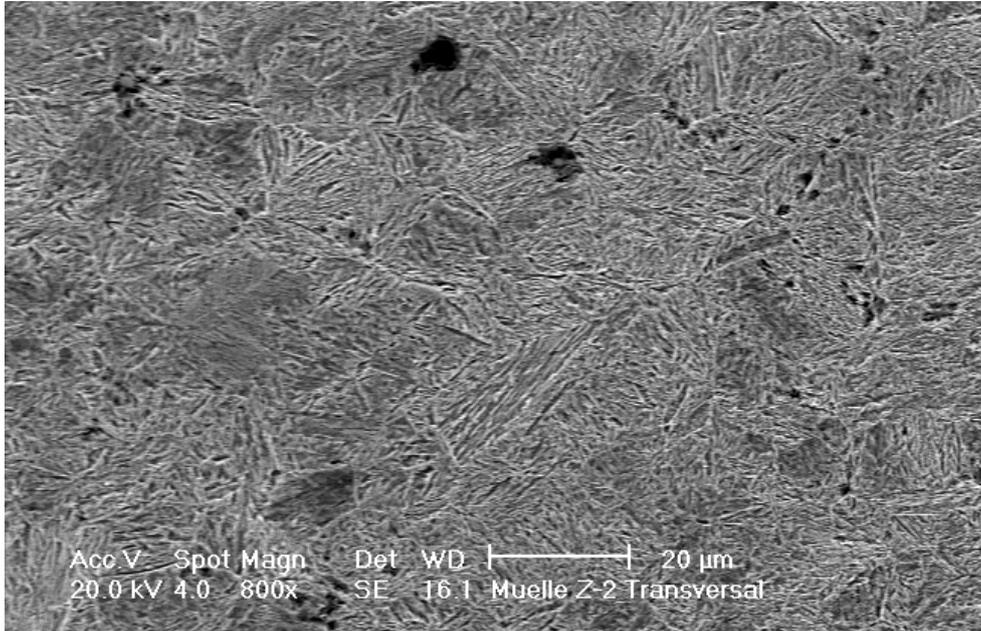


Figura 4.69. Muelle Z-2. Corte transversal paralelo a la superficie de fractura (aproximadamente a 3 cm de ésta). Bajo las mismas condiciones de ataque, se revela una estructura bainítica, con algunas inclusiones, con el inconveniente mencionado anteriormente.

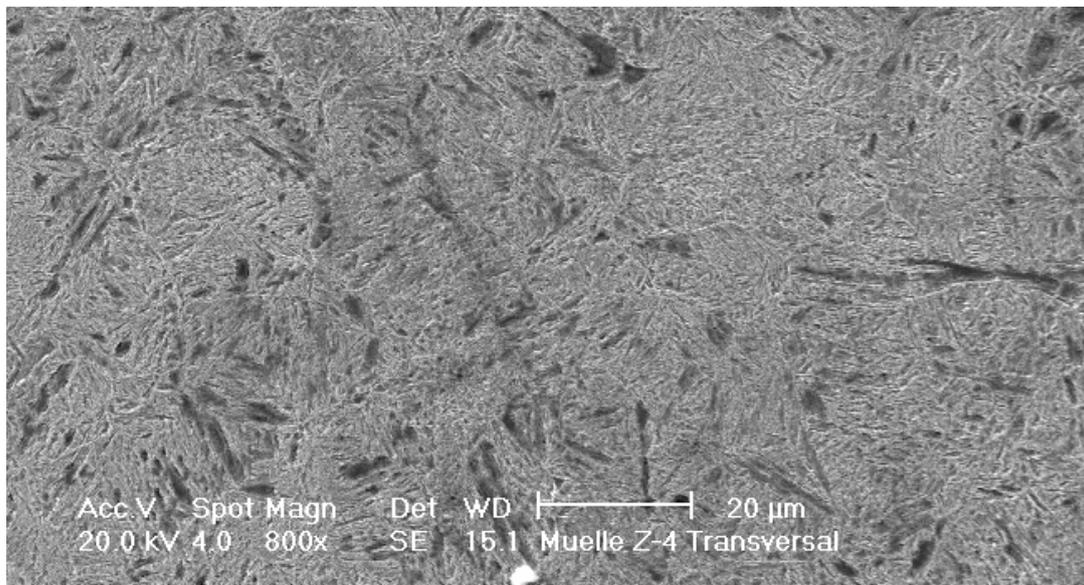


Figura 4.70. Muelle Z-4 Corte transversal paralelo a la superficie de fractura (aproximadamente a 3 cm de ésta).

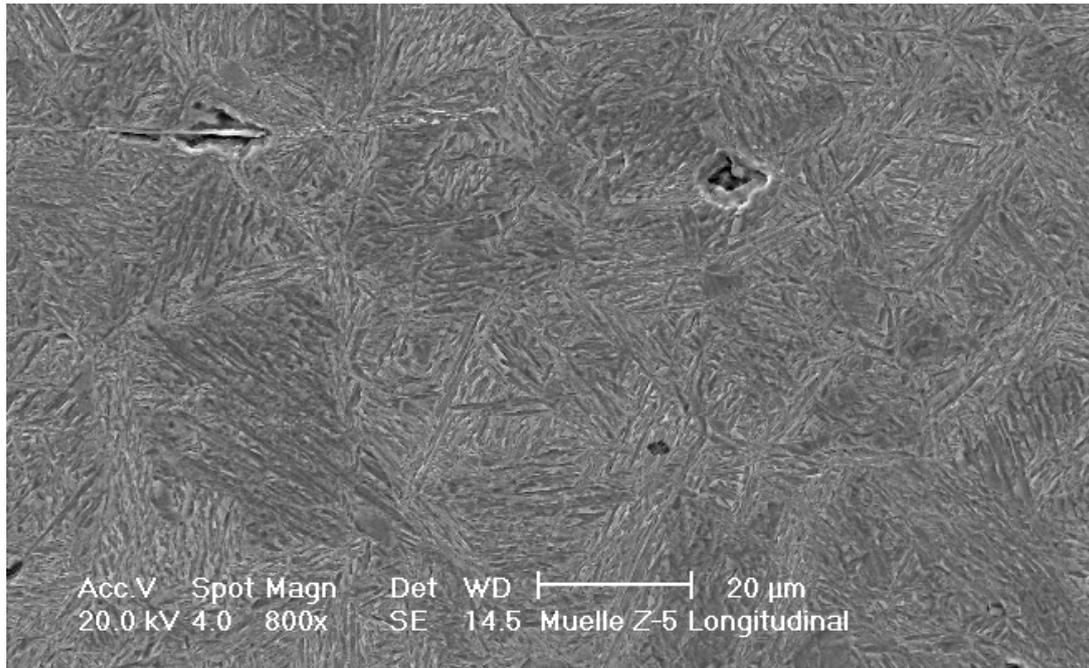


Figura 4.71. Muelle Z-5 Se muestra la misma estructura bainítica.

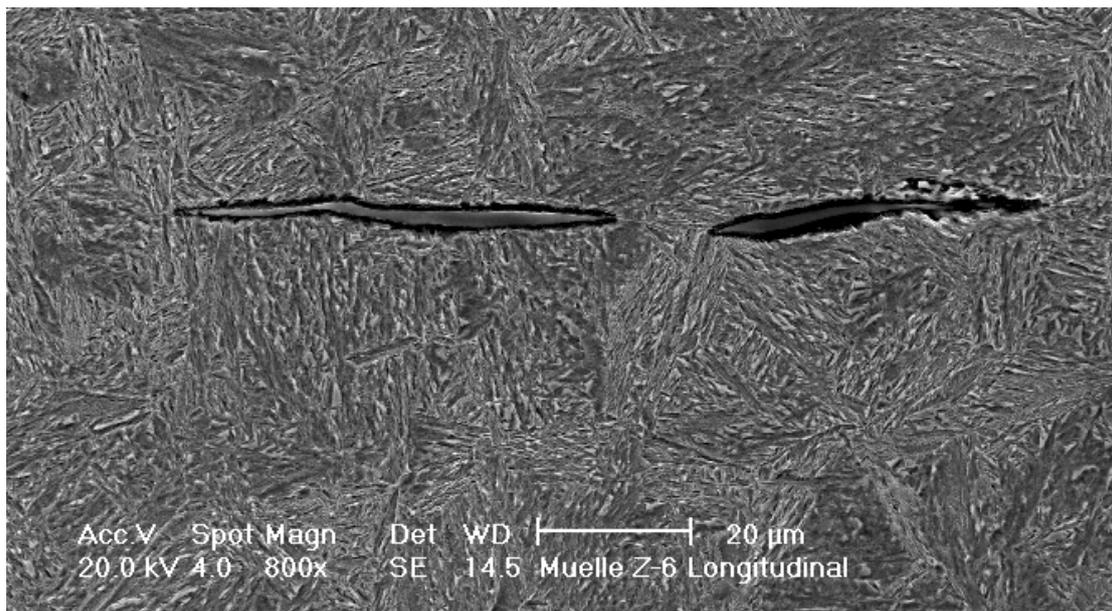


Figura 4.72. Muelle Z-6 Corte longitudinal. Se observa una cadena de inclusiones (sulfatos) en medio de una estructura bainítica.

Análisis de tenacidad de fractura.

Se consideraron datos reportados en la literatura, los cuales indican que la intensidad crítica de esfuerzos (K_{Ic} , índice de tenacidad), para aceros de alta resistencia, se puede tomar de manera aproximada en $50 \text{ MN m}^{-3/2}$.

Por otra parte, se realizó la medición de las grietas de fatiga que dieron lugar a la fractura de los mulles en cuestión (a , tamaño de grieta) resultando éstas del orden de 0.018 [m] para Z-1 y 0.016 [m] para Z-2 (figura 4.73).

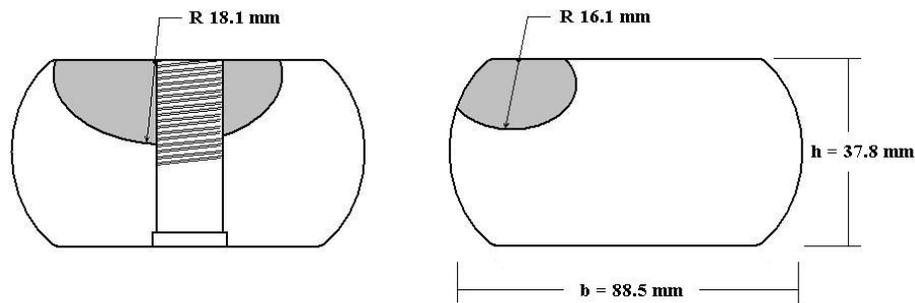


Figura 4.73. Esquema dimensional de las superficies de fractura.

Se determinan los esfuerzos críticos para los valores extremos de K_{1c} .

$$\sigma = k_{1c} / (\pi a)^{1/2} \quad (1)$$

Para Z-1, con $K_{1c}=50$ y $a = 0.018$ m
 $\sigma_{50} = 210.26 [MPa]$

Para Z-2, con $K_{1c}=50$ y $a = 0.016$ m
 $\sigma_{50} = 223.01 [MPa]$

Estos valores corresponden al esfuerzo necesario para el corrimiento de la falla por fatiga (zona gris en la figura), es decir, si se tratase de una zona de fatiga menor (por ejemplo 1 mm de radio), sería necesaria una carga mayor para que inmediatamente se suscite la fractura total de la pieza. Por otra parte, tratándose de una falla por fatiga, se está hablando de cargas dinámicas (en este caso cíclicas) en donde no es necesario alcanzar los valores nominales de resistencia del material para que un defecto, natural o inducido, actúe como concentrador de esfuerzos y por consiguiente como origen de la falla. Ahora bien, tales valores nominales de resistencia corresponden a un producto fiel a las especificaciones de diseño, así como a un material microestructuralmente adecuado, por lo que la alteración de estas condicionantes afecta sensiblemente tales magnitudes.

Los valores anteriores se consideran como casos críticos, para obtener el momento flexionante, el cual se define como:

$$M = \sigma I / c \quad (2)$$

Donde I es el momento de inercia de la sección transversal

$I = \frac{bh^3}{12}$, donde: b = ancho de la barra [m] y h = altura de la barra [m].

Por lo tanto $I = 3.98 \times 10^{-7} \text{ [m}^4\text{]}$, es decir, sustituyendo los valores en la ecuación (2)

$$M_f = 4.7 \text{ KN-m}$$

Esta magnitud es pequeña de acuerdo a las condiciones de servicio para las cuales está diseñada la pieza.

Análisis por el Método del Elemento Finito

Se le asignaron las propiedades típicas para un acero 5160 es decir:

Dentro del rango elástico:

Modulo de elasticidad [psi]	Relación de Poisson
2.97 E 7	0.29

Mientras que en la zona plástica:

Esfuerzo de fluencia [psi]	Deformación plástica
155000	0
170000	0.14

Para modelar las condiciones bajo las cuáles trabaja comúnmente la muelle, se consideraron las siguientes condiciones de frontera:

Zona 1: se refiere a la superficie superior señalada en la figura 4.74, donde los nodos tienen libertad de desplazamiento vertical y horizontal.

Zona 2: superficie superior de la zona señalada, donde los nodos están totalmente restringidos a cualquier movimiento.

Zona 3: superficie superior señalada en la figura, donde no se permitió movimiento en la dirección X y Z es decir que solo tienen movimiento en la dirección vertical (un grado de libertad).

Zona 4: punto en el cual se aplicó una fuerza de 17000 [lb_f], resultado de considerar que son muelles para 19000 [lb_f] y dividiendo la carga entre los dos lados de la carrocería lo que daría cerca de 10000 [lb_f], considerando que es una carga estática se le aumentó en un 70% por efectos dinámicos.

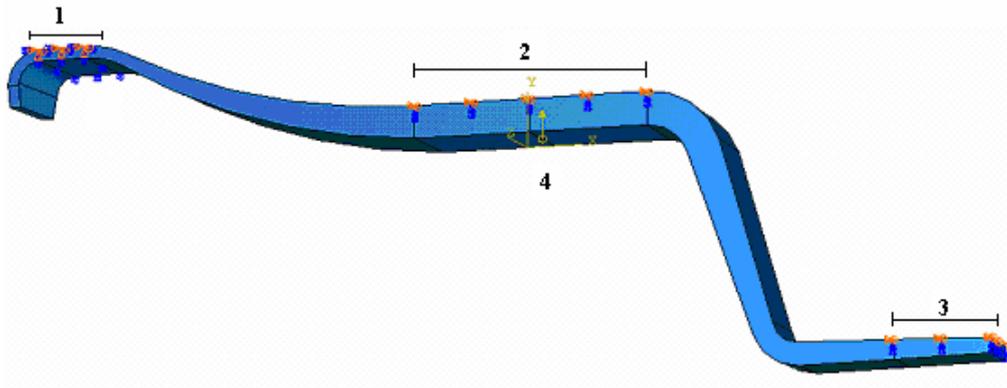


Figura 4.74. Condiciones de carga y frontera aplicadas sobre el modelo.

Se puede observar que el estado de esfuerzos en la parte superior de la pieza es bastante homogéneo, del orden de 65000 [psi], lo que demuestra que la falla se puede dar prácticamente en cualquier sección, es decir una característica particular como un mal montaje, un proceso de manufactura deficiente, un material con defectos, etc., puede ser la razón por la cual la pieza no cumpla con su función adecuadamente.

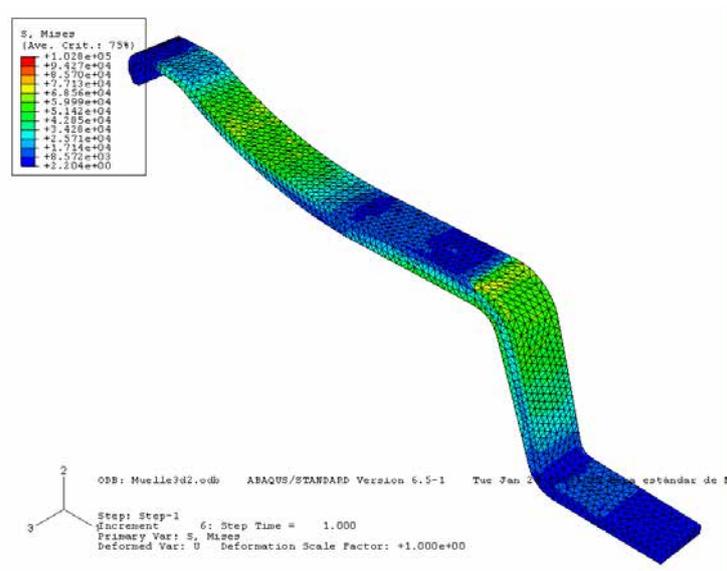


Figura 4.75. Estado de esfuerzos sobre la muelle z sobre la superficie superior.

En la figura 4.76 se observa que en la parte inferior izquierda existen ciertos puntos en los cuales los esfuerzos son del orden de 100000 [psi], lo cual se muestra como una zona crítica propensa a la falla, este lado de la muelle se encuentra el amortiguador, el cuál relaja las sollicitaciones y en consecuencia disminuiría el nivel de esfuerzos de la zona.

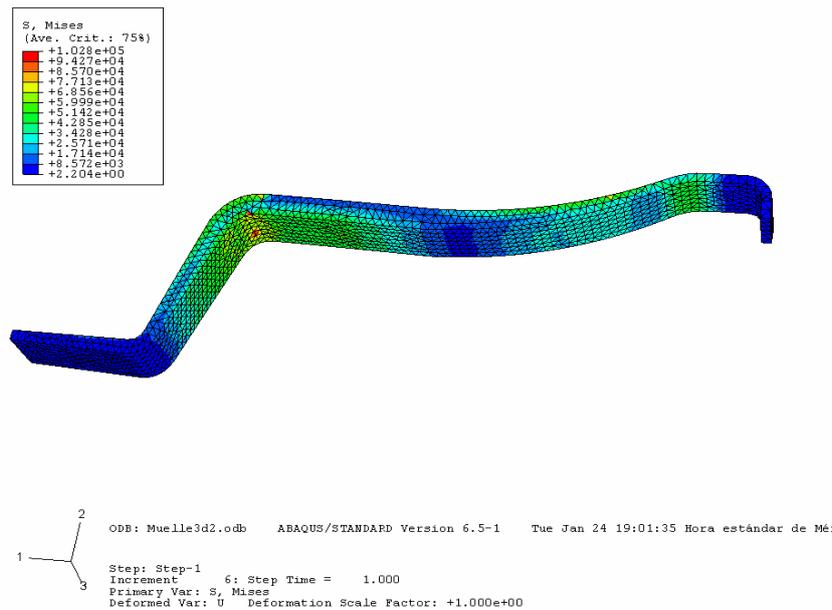


Figura 4.76 Estado de esfuerzos sobre la muelle z superficie inferior.

Conclusiones

Si bien la muelle Z ha sido diseñada con un factor de seguridad del orden de 2, con respecto a carga estática se encuentra al límite en lo que se refiere su resistencia a la fatiga. Esto representa un grave inconveniente para un elemento mecánico que evidentemente estará sometido a cargas cíclicas. Al inconveniente de diseño se adiciona un material de calidad deficiente y una manufactura regular que da lugar a la presencia de heterogeneidad en la composición y en las propiedades mecánicas. A lo anterior se suma el barrenado de sujeción realizado en campo, el cual actúa como concentrador de esfuerzos y es un factor que favorece la falla en algunos casos, asimismo el deterioro superficial de algunas de las piezas inspeccionadas indica movimiento relativo entre estas y sus elementos de sujeción, situación que también favorece la falla.

Al combinar el limitado diseño de la pieza, con un material de deficiente calidad, aunado con algunos problemas de la manufactura y las modificaciones realizadas en servicio se da lugar mezcla altamente conflictiva y a una relación de sinergia que solo puede resultar en la falla de estas piezas con una elevada frecuencia y en tiempos por demás cortos, en donde la grieta producto de la fatiga a flexión unidireccional crece rápidamente hasta alcanzar un nivel crítico de esfuerzos que da lugar a la fractura total del elemento.

Se sugiere instrumentar las siguientes acciones:

Diseño:

1. Incrementar el espesor de la muelle al siguiente valor estándar ($h= 1.75$ pg), esto disminuirá, de manera sensible el nivel máximo de esfuerzos, reduciendo la velocidad de crecimiento de la grieta en caso de generarse ésta.
2. No colocar elementos adicionales de refuerzo y por consecuencia evitar el barrenado de la muelle Z.
3. Resaltar las propiedades requeridas para el producto, de tal forma que se garantice el comportamiento previsto en el cálculo del elemento mecánico.

Manufactura:

1. Revisar las condiciones (temperatura y tiempo) de tratamiento, así como la atmósfera del horno de precalentamiento para el temple, de tal forma que se evite la descarburación, se elimine el bandeado y se garantice la homogeneidad de la temperatura de la pieza previa al temple.
2. Se debe garantizar el control del tratamiento de tal forma que exista uniformidad de propiedades de pieza a pieza.
3. Revisar las condiciones de revenido de tal forma que se alcancen las propiedades requeridas por el diseño.
4. Mejorar la calidad del acero empleado para la forja de las muelles Z, de tal forma que no solo se especifique composición sino la calidad en general, en donde ésta incluye tipo y densidad de inclusiones así como se considere inaceptable la presencia de bandeado en la estructura. El acero debe ser calidad automotriz dado que se trata de una pieza que va a ser sometida a notables sollicitaciones durante el servicio. Se recomienda establecer, en conjunción con el proveedor de las muelles Z un protocolo que garantice la calidad metalúrgica, las propiedades mecánicas y los acabados de las piezas.

Instalación:

1. No barrenar la pieza bajo ninguna circunstancia.
2. Asegurar la sujeción de tal modo que no exista frotamiento y por consecuencia deterioro por desgaste. Como se ha visto en muchos casos el inicio de la grieta de fatiga se correlaciona con el deterioro producto del movimiento relativo entre la muelle Z y sus elementos de sujeción, situación que debe evitarse. Por otra parte, el movimiento relativo provoca concentración de esfuerzos en el barreno, situación que favorece la falla.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En los casos estudiados la causa que llevo a la fractura de los elementos no fue estrictamente debida al diseño, sino que se correlacionan con aspectos de manufactura. Partiendo de que estos han sido diseñados al limite de acuerdo a su resistencia y que cualquier defecto (inclusión, heterogeneidad, discontinuidad), concentrador de esfuerzos (barreno, granallado, carga puntual), y/o deterioro por contacto dará inicio a la fractura.

Cumpliendo con el objetivo de esta Tesis al tener una retroalimentación del análisis de falla se puede asegurar que al tener el diseño de un elemento mecánico, aun cuando los cálculos cumplen satisfactoriamente con los requisitos, y que al ser puestos en servicio, la presencia de una falla es evidente en un corto plazo, un estudio detallado como lo es el análisis de falla muestra la zona y causa de dicha falla. En una revisión macroscópica y microscópica se pueden observar detalles en el material que el diseñador en su momento no contempló, así como, los defectos generados durante el proceso de manufactura e instalación.

De acuerdo a la metodología realizada en cada caso es posible tener un panorama amplio y general del elemento, particularmente los pasos del análisis de falla básicos como:

1. Datos generales
2. Análisis químico
3. Perfil de dureza
4. Fractografía
5. Observación microscópica y macroscópica
6. Análisis de tenacidad a la fractura
7. Análisis por elemento finito
8. Conclusiones

Pero en esta investigación se mostró que para cada caso en específico, se van obteniendo nuevos pasos y/o seguimientos de acuerdo a cada elemento.

Sin embargo al obtener varios resultados se llega a una rápida y acertada conclusión:

En el caso I del Motor de combustión interna, la falla fue por un elevado régimen de revoluciones muy superior al de máxima potencia, aunque si bien la porosidad encontrada en las bielas, y el granallado aplicado, al combinarse generaron microfisuras contrarias a la idea del diseñador al definir este proceso de granallado a las bielas.

Si no se hubiera realizado un análisis de falla en dicho motor las primeras conclusiones en cuanto a su falla prematura sería totalmente errónea.

En los casos II y III de los Muelles Z y del las Barras estabilizadoras respectivamente, sin duda alguna el modo de falla fue por fatiga, debido a que durante el diseño no se contemplaron aspectos como la calidad metalúrgica y la forma de sujeción. La vida total por fatiga está fuertemente influida por la calidad del acabado de la superficie, los posibles esfuerzos residuales dentro del elemento, la presencia de imperfecciones de fabricación como inclusiones y defectos, la presencia de concentradores de esfuerzo, la naturaleza química del medio ambiente y su ensamble.

Recomendación para el diseño mecánico.

La base del diseño de un componente tomando como herramienta la mecánica del medio continuo, es que dicho componente tenga la capacidad de soportar y transmitir cargas menores a su resistencia (esfuerzo máximo permisible). Para eso es necesario conocer:

- La distribución de esfuerzos en la sección transversal del componente, en función de las cargas, geometría y dimensiones del mismo.
- El valor de la resistencia última y el límite de cedencia del material.
- La forma y dimensiones de la sección transversal del componente y sobre la cual están definidos los esfuerzos.

Relacionados estos 3 factores por $\sigma = \frac{P}{A}$,

Donde el criterio general del diseño es: *si $\sigma > \text{Esfuerzo Máximo Permisible}$, el elemento es propenso a la falla.*

Recomendación para evitar fallas por fatiga.

Al desarrollar la relación entre las cargas y la resistencia, se obtienen dimensiones óptimas de los componentes, evitando concentradores de esfuerzo, con el requisito de que el elemento no falle al estar en servicio, logrando un diseño seguro y libre de desperfectos.

Cuando la fuerza aplicada es cíclica sobre una estructura, el material no resiste el esfuerzo último de una prueba estática. La resistencia última depende del número de veces que es aplicada la fuerza cuando el material trabaja a un nivel particular de esfuerzo, indicando el número de ciclos requeridos para obtener una fractura a un esfuerzo particular bajo la aplicación de una carga fluctuante, llamada prueba de fatiga.

Observación:

Las empresas en general no le dan importancia al análisis de falla, ya que no lo ven como una etapa fundamental en el avance del diseño. Pero al diseñar un elemento mecánico se deben contar con los resultados de un buen análisis de falla, ya que proporcionan información útil y precisa indicando al ingeniero el factor de seguridad a emplear y la confiabilidad para una duración de servicio determinada, para tener una idea clara de las condiciones de servicio que puede ofrecer un elemento que contiene una fisura y la seguridad que pueden tener sus usuarios.

Concluyendo con este trabajo se demuestra que el análisis de falla es actualmente una herramienta indispensable en el ejercicio profesional de cualquier ingeniero mecánico, sobre todo en el diseño y mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Anglada, M., Alcalá, J., LLanes, L., Mateo, A., Salán, M.
Fractura de Materiales.
Ediciones UPC
2002
2. Borja, V., López, M., Ramírez, A.
Bases de un Método Sistemático para Diagnosticar Maquinas.
Memorias del VIII Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Monterrey, N.L. Septiembre
México, 2002
3. Cerrud, S., Jacobo, V., Ortíz, A., Schouwenaars, R.
Análisis de Falla.
Facultad de Ingeniería, UNAM
México, 2002
4. Cerrud, S., Jacobo, V., Ortíz, A., Schouwenaars, R.
Determinación de las Causas que Producen Defectos Superficiales en Ruedas de Aluminio Coladas por Baja Presión.
Memorias del X Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica.
Septiembre
México, 2004
5. Del Río, J.
Deformación plástica de los materiales.
Editorial Gustavo Gili, S.A.
Barcelona, 1980
6. Dieter, G.
Engineering Design.
Mc. Graw Hill Internacional Editions, 2da. Edición
1991
7. Fernández, R., Campos, R.
Determinación de las Causas de Ruptura del Cigüeñal de una Prensa.
Memorias del XII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Acapulco, Gro. Septiembre
México, 2006
8. Galaviz, J., Rodríguez, R., González, B.
Análisis de Grieta en Gancho de Grúa Viajera Mediante M.E.F.
Memorias del IX Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Veracruz, Ver. Septiembre
México, 2003

9. González, J.
Mecánica de fractura, bases y aplicaciones.
Editorial Limusa
1998.
10. Gunter, L.
Systematic Analysis of Technical Failures.
Informations Gesell Schaft
U.S.A., 1986
11. Gutiérrez, C.
Aplicación del análisis de falla en prótesis Humanas.
Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM
México, 2007
12. Hasebe, H.
Detección Analítica de Fallas.
Kepner Tregoe, 1992
13. Jaca, R., Godoy, L.
Colapso de un Tanque Metálico en Construcción Bajo la Acción del Viento.
Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.
14. Jacobo, V.
Importancia del análisis de falla en la ingeniería.
Concurso de oposición, Exposición escrita
México, 2000
15. Jacobo, V., Cerrud, S., Ortiz, A., Ramírez, M., Márquez, U.
Metodología para el Desarrollo de Sistemas Expertos en Análisis de Falla.
Memorias del IX Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Veracruz, Ver. Septiembre
México, 2003
16. Jacobo, V., Cerrud, S., Ortiz, A., Ramírez, M., Márquez, U.
Sistema Experto Híbrido para Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos.
Memorias del X Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Septiembre
México, 2004
17. Juvinall, R.
Fundamentos de diseño para Ingeniería Mecánica.
LIMUSA, 1ª Edición
México, 1993
18. Metals Handbook
Failure Analysis and Prevention.
American Society for Metals, Metals Park, 9th Ed., vol. 11
Ohio, 1986

19. Ortiz, A., Jacobo, V., Cerrud, S., Hernández, A.
Análisis de Falla de Elementos Metálicos Mecánicos Mediante Razonamiento Basado en Casos.
Memorias del IX Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Veracruz, Ver. Septiembre
México, 2003
20. Ortiz, A., Jacobo, V., Romero, J., Schouwenaars, R.
Determinación de las Causas de Falla de Muelles Tipo Z.
Memorias del XII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Acapulco, Gro. Septiembre
México, 2006
21. Posadas, H., Caudillo, M., Soria, A., Martínez, F., Jiménez, L., Morales, R.
Pruebas de Fatiga para Caracterizar Pernos de Pistón.
Memorias del VIII Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Monterrey, N.L. Septiembre
México, 2002
22. Shigley, J., Mitchell, L.
Diseño en Ingeniería Mecánica.
Mc. Graw Hill, 4ª Ed.
México, 1985
23. Trujillo, M., Muñoz, J., López, M., Zepeda, A., Barba, A., Yebra, T., Jiménez, O.
Teorías de Decisión como Herramientas para el Diseño Mecánico.
Memorias del IX Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Veracruz, Ver. Septiembre
México, 2003
24. Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM).
Análisis de Falla de Barra Estabilizadora de Suspensión de Volvo.
Ciudad Universitaria, Facultad de Ingeniería. Reporte de circulación interna.
México, 2004
25. Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM).
Análisis de Falla de Muelle Z de suspensión trasera.
Ciudad Universitaria, Facultad de Ingeniería. Reporte de circulación interna
México, 2005
26. Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM).
Aplicación de la Metodología de Análisis de Falla para la Definición de Mejoras en el Diseño de un Motor de Combustión Interna de uso Automotriz.
Ciudad Universitaria, Facultad de Ingeniería. Reporte de circulación interna.
México, D.F. 2006.

27. Velásquez, F., Santillán, S., Coello, C.
Diseño Evolutivo Óptimo en Mecánica.
Memorias del IX Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica
Veracruz, Ver. Septiembre
México, 2003.

INTERNET:

28. http://es.wikipedia.org/wiki/Barra_estabilizadora
29. Cravino, C., Cardús, G., Svoboda, H., De Rosa, H., Evaluación de la Falla de una Biela de Automor. <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10229>
30. www.uprm.edu/.../webresearchers/luisgodoy/courses
31. www.solomantenimiento.com
32. www.revistamarina.cl/revistas/2000//ortuzar.pdf
33. www.roadranger.com.mx/PDFfiles/MSEjMotrices.pdf
34. <http://mecanica.uniandes.edu>