



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Análisis de falla de 3 válvulas de admisión de un motor de combustión interna

Gilber Anderson Gama Ávila
Wilson Mora Guzmán
Jonathan Romero Pedraza

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

Análisis de falla de 3 válvulas de admisión de un motor de combustión interna

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

Ingeniero Mecánico

Director:

Magíster en Ingeniería Mecánica - Ing. Edwin Darío Cendales Ladino

Línea de Investigación:

Análisis de falla, fractografía e ingeniería de superficies.

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D. C. , Colombia

2018

Dedicatoria

A nuestras familias que siempre estuvieron presentes durante nuestra etapa de formación y a la Fundación Universitaria Los Libertadores por forjarnos como ingenieros mecánicos íntegros y éticos.

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

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

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Lista de Figuras

3-2. a). Corte válvula 1 y 2. b). Corte válvula 3.	16
3-1. a). Inspección válvula 1, b). Inspección válvula 2, c). Inspección válvula 3. . .	18
4-1. a). Microestructura generalizada de las válvulas 100X. b). 200X. c). 500X. d). 1000X.	20
5-1. a). Acero inoxidable A-286 (AISI/SAE 660, 150 HV) b). Microestructura ge- neralizada de las válvulas.	21

Resumen

El siguiente proyecto tiene como fin implementar un método de análisis de falla para determinar la causa que originó la deformación plástica en tres válvulas de admisión de un motor de combustión interna, la metodología que se usó permitió identificar visualmente los daños que sufrieron las válvulas, identificar las posibles causas de fallo, mediante la investigación teórica para contextualizar con algunos de los diferentes métodos que actualmente existen para analizar este tipo de fallas, mediante el uso de elementos de laboratorio y estudios metalográficos se logró concluir el tipo de material del cual están fabricadas las válvulas de admisión y se determinó, realizando comparaciones con otros motores de combustión si estas válvulas eran las adecuadas para usarse en esta configuración. Por último se concluyó la efectividad del uso de análisis de falla y el método de análisis causa raíz el cual llevo a definir la causa primordial y las inherentes a su normal funcionamiento, que sirvieron para llevarlas a su falla final, comparando estos resultados con otras investigaciones.

Palabras clave: Válvula, deformación, inspección metalográfica, análisis de falla.

Abstract

The following project aims to implement a failure analysis method to determine the cause that caused the plastic deformation in three intake valves of an internal combustion engine, the methodology that was used allowed to visually identify the damages suffered by the valves, identify the possible causes of failure, through theoretical research to contextualize with some of the different methods that currently exist to analyze this type of faults, through the use of laboratory elements and metallographic studies it was possible to conclude the type of material from which they are manufactured. intake valves and was determined, making comparisons with other combustion engines if these valves were suitable for use in this configuration. Finally, the effectiveness of the use of failure analysis and root cause analysis method was concluded, which led to defining the primary cause and the inherent causes of its normal operation, which served to bring them to their final failure, comparing these results with other investigations.

Keywords: Valve, deformation, metallographic inspection, failure analysis.

Contenido

Resumen	x
1. Objetivos	2
2. Introducción	3
2.1. Tipos de Aceros Inoxidables	3
2.2. Fatiga en Aceros Estructurales	5
2.3. Aceros Estructurales	5
2.4. Aceros Inoxidables Austeníticos Resistentes a Fracturas	6
2.5. Resistencia a la Fractura	7
2.6. Fracturas a Temperatura Ambiente o Elevadas	7
2.7. Resistencia a la Fractura en los Aceros Inoxidables Trabajados en Frío	9
2.8. Cambios Microestructurales Inducidos por el Envejecimiento	9
2.9. Resistencia a la Fractura en Bases Metálicas y Soldaduras	9
2.10. Rigidez en Fracturas Criogénicas en Bases Metálicas	11
2.11. Propiedades del Uso y Fracturas en los Aceros Inoxidables	12
2.12. Fragilidad	12
2.13. Aceros Inoxidables Ferríticos	12
2.14. Aceros Inoxidables Martensíticos	13
2.15. Acero Inoxidable Martensítico PH	13
2.16. Aceros Austeníticos y Semi-Austeníticos	13
2.17. Aceros Inoxidables Austeníticos	14
3. Procedimiento de análisis	15
3.1. Inspección Visual	15
3.2. Preparación de la muestra	15
4. Análisis Metalográfico	19
5. Análisis de Falla	21
6. Conclusiones	22
Bibliografía	23

1 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla y análisis de causa raíz a tres válvulas de admisión de un motor de combustión interna que presentan algún tipo de falla con el fin de determinar la causa probable de falla.

2.2. Objetivo Específicos

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

2 Introducción

2.1. Tipos de Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables ferríticos se llaman así porque su estructura cristalina cúbica centrada (bcc) es la misma que la del hierro a temperatura ambiente. Estas aleaciones son magnéticas y no pueden ser endurecidas por tratamiento térmico. Los aceros inoxidables ferríticos contienen entre 11 y 30% de Cr, con solo pequeñas cantidades de elementos que forman austenita, como carbono, nitrógeno y níquel. Su uso general depende del contenido de cromo para la resistencia a la corrosión. En general, los aceros inoxidables ferríticos no tienen una resistencia particularmente alta. Su resistencia a la fluencia oscila entre 275 y 350 MPa (40 a 50 ksi) y su baja dureza y susceptibilidad a la sensibilización limitan su fabricación y los tamaños de sección utilizable. Sus principales ventajas son su resistencia al agrietamiento por corrosión por cloruros, a la corrosión atmosférica y a la oxidación a un costo relativamente bajo.

Los aceros inoxidables ferríticos pueden ser una alternativa viable a los aceros austeníticos para algunas aplicaciones estructurales a altas temperaturas. En vista de su menor contenido de aleación y menor costo, los aceros ferríticos tienen una ventaja económica sobre los aceros austeníticos, si las condiciones de tensión lo permiten. Los aceros inoxidables ferríticos también pueden ser preferidos en aplicaciones con ciclos térmicos debido a que los aceros ferríticos tienen conductividades térmicas más altas y menores coeficientes de expansión térmica que los aceros austeníticos. Los aceros ferríticos pueden por lo tanto permitir reducciones en las tensiones térmicas y una mejor resistencia a la fatiga térmica.

Además, varios grados de aceros ferríticos resistentes al calor con alto contenido de cromo son aleaciones importantes para aplicaciones estructurales a alta temperatura. Los aceros ferríticos resistentes al calor de cromo alto se desarrollaron por primera vez para su uso en aplicaciones de turbina de gas y vapor. A principios de la década de 1940, la necesidad de materiales mejorados de alta resistencia y resistentes a la corrosión para discos de turbinas de gas y álabes de turbinas de vapor, operando a temperaturas cercanas a los 540°C (1000°F), llevó a los metalúrgicos de Inglaterra a aumentar el trabajo de desarrollo en 12% Cr aceros resistentes al calor. Esta investigación produjo dos aceros (H-46 y FV 448) y otros aceros de aleación en la década de 1950 con una mejor resistencia a la fluencia creep. Durante el mismo período de tiempo, otras aleaciones con 12% de Cr, como AISI 422 (UNS S42200) y

Lapelloy, se introdujeron en los Estados Unidos; se han utilizado para palas de turbina de vapor y materiales de atornillado para cilindros de turbina. Aunque muchos de los aceros ferríticos resistentes al calor con alto contenido de cromo no se consideran estrictamente como aceros inoxidable, los contenidos de cromo son lo suficientemente altos como para exhibir una resistencia a la corrosión comparable a la de los aceros inoxidables típicos [2].

Los aceros inoxidables austeníticos constituyen la familia de inoxidables más grande en términos de número de aleaciones y uso. Como son aleaciones ferríticas, no pueden ser endurecidas por tratamiento térmico. Las aleaciones austeníticas son no magnéticas, y su estructura es cúbica (fcc). Poseen excelente ductilidad, formabilidad y dureza, incluso a temperaturas criogénicas. Además, pueden ser sustancialmente endurecidos por el trabajo en frío. Los aceros inoxidables austeníticos se pueden subdividir en dos categorías: aleaciones de cromo y níquel, como S30400 y S31600, y aleaciones de cromo-manganeso-nitrógeno, tales como S20100 y S24100. El último grupo generalmente contiene menos níquel y mantiene la estructura austenítica con altos niveles de nitrógeno. El manganeso (5 a 20 %) es necesario en estas aleaciones con bajo contenido de níquel para aumentar la solubilidad del nitrógeno en la austenita y prevenir la transformación de la martensita. La adición de nitrógeno también aumenta la resistencia de las aleaciones austeníticas.

Las aleaciones típicas de cromo-níquel tienen resistencias a la tracción de 200 a 275 MPa (30 a 40 ksi) en estado recocido, mientras que las aleaciones con alto contenido de nitrógeno tienen un límite elástico de hasta 500 MPa (70 ksi). El acero inoxidable austenítico más común es el Tipo 304, que se ha utilizado para aplicaciones críticas de alta temperatura, como tuberías de alta presión en estaciones generadoras de energía y para aplicaciones a temperaturas muy bajas, como tuberías de transferencia de helio líquido y recipientes de almacenamiento. La aleación se usa generalmente en la condición recocida (calentada a 1060 °C o 1950°F, para disolver carburos, y se enfría en agua o se enfría al aire a una velocidad lo suficientemente alta como para evitar la precipitación del carburo). El tipo 304 tiene alta ductilidad y dureza en esta condición en un amplio rango de temperaturas de servicio. Debido a su alta dureza y resistencia a la fluencia relativamente baja, no se pueden obtener condiciones de deformación plana en la carga monotónica hasta el punto de propagación de grietas inestables en muestras de tenacidad a la fractura precortadas de tamaño razonable [5].

La misma limitación se aplica a todos los aceros inoxidables austeníticos en estado recocido. Por lo tanto, los datos de mecánica de fractura disponibles para estas aleaciones generalmente están limitados a datos de velocidad de crecimiento de grietas de fatiga (da/dN). Sin embargo, las propiedades mecánicas de las fracturas monotónicas válidas de los aceros inoxidables austeníticos son un área de interés de ingeniería activa.

2.2. Fatiga en Aceros Estructurales

El término fatiga en la industria fue acuñado en Europa durante el inicio del siglo XIX, luego que se descubriera en los elementos de ferrocarriles y puentes, grietas debido a cargas cíclicas y repetidas a las cuales eran sometidos. Esto despertó el interés de muchos investigadores a su vez que el uso de acero en la industria iba cada día en aumento, aunque este tipo de fallas no solo ocurría en estructuras o elementos de acero si no que también podían verse con mucha frecuencia en tuberías de arcilla edificaciones hechas de hormigón y también construidas en madera; los ojos y los estudios se enfocaron en crear modelos que mitigaran este tipo de fallas en elementos construidos con acero dada su gran expansión en el uso industrial y en la construcción de infraestructura vial y por el riesgo que esto traería consigo [9].

Al pasar los años se mejoró la comprensión de los materiales de ingeniería así como su comportamiento frente a cargas estáticas y dinámicas, por ello a principios del siglo XX el conocimiento sobre los efectos en los aceros por este tipo de cargas permitió que el diseño se enfocara en cuatro características principales: 1. Enfoque en un modelo de prueba 2. Enfoque en la propagación de grietas en los elementos debido a fatiga 3. Enfoque en la vida útil de los componentes 4. Enfoque en el tiempo de vida ante la fatiga [3].

La fatiga es un término que aplicado en la rama de la ingeniería refiere, a la normas ASTM E 1150, las cual han sido renovadas por las normas ASTM E 1823-13 en las que se especifica sobre la definición del término fatiga como "El proceso de cambio estructural progresivo, localizado y permanente que ocurre en un material sometido a condiciones que producen esfuerzos y deformaciones fluctuantes en un punto o puntos, y que puede culminar en agrietamiento o fractura total después de un número suficiente de fluctuaciones" [10].

2.3. Aceros Estructurales

Durante las últimas décadas se ha incrementado el uso de aceros en la construcción de estructuras las cuales pueden abarcar muchos campos que incluyen la minería, construcción, infraestructura vial, industria petrolera, transporte marítimo entre otros. Todas estas aplicaciones usan en gran porcentaje aceros estructurales, los cuales trabajan sus diseños basados en especificaciones de ASTM para regirse por las propiedades de resistencias mecánicas y por su composición química. A pesar que en las especificaciones para recipientes a presión y estructurales incluidas en la ASTM existen alrededor de 1000 tipos diferentes de aceros, solo unos pocos son usados frecuentemente en el sector industrial.

Los aceros estructurales son un tipo de aceros muy dúctiles los cuales contienen un porcentaje de carbono que puede estar hasta en un 0.25% con contenidos de azufre y fósforo. Este tipo de aceros se usa comúnmente en partes estructurales de edificaciones, automóviles

y puentes, esto debido a su alta ductilidad maleabilidad y por supuesto su excelente soldabilidad. Un ejemplo de este tipo de acero que es uno de los más usados en la industria es el acero ASTM A-36, que tiene una alta resistencia a la fluencia y una buena respuesta a la soldadura, aunque en la actualidad ha venido siendo reemplazado por aceros aleados de baja resistencia que poseen una mejor resistencia a la corrosión atmosférica, esto debido a la constante búsqueda por disminución en los costos de producción y de implementación [4].

Antes de inicio de la segunda guerra mundial la ciencia de los aceros era muy limitada, si se quería aumentar la resistencia se adicionaba una mayor cantidad de carbono hasta un 0.4 % y manganeso hasta en 1.5 %, con esto se lograba una resistencia a la fluencia entre 350-400 MPa. El aumento deliberado de carbono en estos aceros tenía como resultado una mayor cantidad de perlita en la microestructura con lo cual se lograba mayor resistencia a la tracción, sin embargo este aumento de carbono en su composición química traía como resultado una desmejora en su soldabilidad, así como la disminución de la ductilidad, lo que se ha convertido en un criterio principal en el diseño de estructuras. Los aceros al carbono con contenido de manganeso son usados para forja tubos sin costura y en calderas, estos aceros estructurales llegan a tener una alta resistencia y alcanzan límites elásticos más allá de los 275 MPa algunos de ellos se pueden encontrar en las siguientes formas: Hojas laminadas en frío, barras y diferentes perfiles estructurales forjados en caliente tratados térmicamente. Estos últimos que son tratados térmicamente alcanzan por lo general un límite elástico de 290-690 MPa.

2.4. Aceros Inoxidables Austeníticos Resistentes a Fracturas

Este tipo de aleaciones son muy usadas en estructuras resistentes al calor, como aquellas industrias de electricidad o química gracias a su estabilidad metalúrgica, resistencia a la corrosión y excelentes propiedades de fluencia y ductilidad en altas temperaturas. Los del tipo AISI 300, son muy utilizados en aplicaciones criogénicas por su ductilidad y resistencia a las fracturas, además de una baja expansión térmica y baja permeabilidad magnética. Estos materiales son expuestos a múltiples pruebas contra fallas para mejorar sus componentes, entre ellas la resistencia a las fracturas de los metales bien forjados y sus soldaduras. Existen valores medidos, basados en análisis previos para el uso en evaluaciones de mecánica de fractura. Para caracterizar las propiedades en los aceros inoxidables, se realizan pruebas de fractura mecánica de plástico- elástico, después de trabajos en frío e irradiación de neutrones. Para esto se usa la curva de resistencia integral J para evaluar el comportamiento de fractura en materiales dúctiles, pero hay otro tipo de pruebas estándar como las ASTM para determinar estas curvas en materiales de alta ductilidad y tenacidad [11].

2.5. Resistencia a la Fractura

Esta se determina mediante la aplicación de la técnica de curva J-R, haciendo muestras individuales y múltiples, las técnicas ASTM no se aplican por la dureza, ductilidad y capacidad de endurecimiento de las aleaciones. La curva J-R se construye trazando los valores de J-integral contra los valores de extensión de grieta y ajustando los datos J con una línea de regresión de ley lineal o de potencia. La resistencia a la fractura se determina en la intersección en la línea de regresión junto a la línea de embotamiento. Los valores arrojados pueden ser similares a los realizados con pruebas [3].

2.6. Fracturas a Temperatura Ambiente o Elevadas

Pruebas exhaustivas fueron realizadas en aceros tipo 304 y 316, y estas muestran que son extremadamente resistentes a las fracturas, Ambos tipos muestran una respuesta de fractura dúctil en una amplia variedad de condiciones, donde los hallazgos nos muestran una variabilidad significativa de las propiedades a diferentes temperaturas son inherentes a los aceros inoxidables austeníticos.

El aumento de la temperatura tiende a disminuir la tenacidad a las fracturas. La disminución en la tenacidad a la fractura refleja una disminución tanto de la resistencia a la fluencia de 430 a 300 MPa como del alargamiento total del 70 al 40 % a medida que la temperatura aumenta de 24 a 538 °C. Las pruebas arrojan también que hay pocas posibilidades de fractura en temperaturas bajas.

Mientras que el valor medio de J_c de 421 kJ/m² a 400 a 550 °C es aproximadamente 35 % más bajo que el valor de la temperatura ambiente, el valor promedio de dJ/da de 263 MPa es esencialmente el mismo que su homólogo de temperatura ambiente. Esto indica que la resistencia al desgarro no se degrada a temperaturas elevadas. Los valores J_c y dJ/da de 90 % / 95 % de límite inferior están a las temperaturas elevadas 96 kJ/m² y 79 MPa, respectivamente. La pendiente de la curva J-R del límite inferior, que corresponde a un módulo de rasgado de 120, indica que los tipos 304 y 316 conservan una excelente resistencia a la fractura a temperaturas de hasta 550 °C.

Los límites convencionales de diseño de esfuerzo y deformación, como los provistos en el código de calderas y recipientes a presión de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME), son suficientes para proteger contra la fractura porque impiden una deformación plástica excesiva. Para aplicaciones donde los márgenes contra la fractura dúctil deben ser cuantificados o donde los componentes están sujetos a grandes deformaciones plásticas, se pueden usar métodos elásticos (*J-integral*) para predecir las condiciones de fractura. Estos métodos incluyen los esquemas de estimación J desarrollados [6].

El método aplicado para el agrietamiento en los aceros inoxidable se hace con coalescencia, que no tiene que ver con pruebas de temperatura. Aun así los cambios de temperatura aplicados son asociados con diferencias en la matriz en la densidad y la morfología de las inclusiones para la nucleación de microhuecos, las inclusiones grandes fallan en las etapas iniciales del esfuerzo plástico, por lo que una alta densidad de inclusión reduce drásticamente la energía plástica requerida para la coalescencia de los micro huecos. Las inclusiones típicas incluyen carburos de tipo MC, aluminatos de calcio y sulfuros de manganeso. La resistencia de la matriz generalmente depende de la efectividad del recocido de la solución para eliminar la deformación plástica introducida durante el procesamiento termo mecánico. La retención de 1 a 2 % de trabajo en frío es suficiente para restringir la deformación plástica durante el proceso de fractura. Los hoyos primarios son superficiales y están confinados a las inmediaciones del plano de fisuración. Los grupos de inclusión alineados en la dirección de trabajo primario fallan temprano en el proceso de deformación plástica, creando un camino de grieta [2].

En el calor de alta tenacidad con una J_c de 751 kJ/m^2 , los hoyuelos primarios profundos y los micro huecos grandes alejados del plano de fisura demuestran que el proceso de fractura implica una gran plasticidad. En el proceso termo mecánico de los aceros inoxidable se puede presentar microestructuras anisotrópicas, éstas tienen a fallar y generar huecos al comienzo del proceso de deformación plástica, propagando las grietas. Con algunas temperaturas, las líneas de ferrita se alinean en la fase dúctil, pero no afectan en la tenacidad, esto significa que son muy resistentes a las fracturas [1].

La tenacidad de la placa 304 en la orientación T-L, mientras que las otras no, La pequeña diferencia en J_c para las orientaciones L-T y T-L en algunas placas se debe a que las placas a menudo tienen laminación cruzada para minimizar la alineación de inclusión en cualquier dirección particular. Sin embargo, las inclusiones en placas laminadas cruzadas se extienden de forma normal. La baja tenacidad en esta orientación generalmente no es una preocupación, porque la mayoría de los componentes no están sometidos a tensiones significativas.

En la placa 316 se hicieron pruebas de fractura a $370 \text{ }^\circ\text{C}$ en 6 orientaciones diferentes, los aceros inoxidable J-max están muy por encima de los J_c , esto significa que son más resistentes al desgarro. En pruebas se ve que la orientación de las grietas puede afectar un 40 % la tenacidad del material. Las cargas de orientación S-T y S-L, son paralelos y tienen caminos de fractura de baja energía, lo que demuestra una menor resistencia a las grietas [3].

2.7. Resistencia a la Fractura en los Aceros Inoxidables Trabajados en Frío

El trabajo en frío se realiza para mejorar la fuerza de los aceros inoxidables, pero esto implica una reducción de la ductilidad y la resistencia a las fracturas, como ejemplo se presenta el acero de tipo 316 tiene un límite elástico de 200 a 300 MPa, pero en trabajo en frío aumenta casi a 600 MPa, la resistencia aumenta sacrificando la ductilidad y está a su vez es responsable de la disminución de la dureza.

2.8. Cambios Microestructurales Inducidos por el Envejecimiento

Los aceros inoxidables austeníticos se usan comúnmente en altas temperaturas donde los cambios microestructurales inducidos por el envejecimiento degradan la resistencia a la fractura. El envejecimiento a alta temperatura de los materiales base da como resultado la formación de carburos intermetálicos. Sus precipitaciones son ricas en cromo. La fase ferrítica en soldaduras dúplex austenítico-ferríticas son inestables a temperaturas elevadas. El envejecimiento a largo plazo por encima de 500 °C hace que la ferrita se transforme en carburos de austenita.

De igual forma, el envejecimiento no tiene ningún efecto sobre la resistencia a la fractura, sólo implica una pequeña degradación. Cuando se reduce la tenacidad se inicia un mecanismo de rompimiento intergranular localizado en regiones aisladas. El predominio del mecanismo de ruptura de hoyuelos tanto en condiciones no envejecidas como envejecidas explica el efecto relativamente pequeño del envejecimiento térmico. De igual manera se observa un envejecimiento bajo esfuerzo, lo que genera una pérdida en la dureza esta se asocia con la precipitación de carburo intergranular e intragranular y el desarrollo de una subestructura de dislocación inducida por estrés [7].

2.9. Resistencia a la Fractura en Bases Metálicas y Soldaduras

Es de resaltar que la mayor pérdida de dureza o rigidez ocurre dentro de las primeras 1000 h de envejecimiento a 550 °C. Estos perfiles se obtienen puliendo áreas seleccionadas de la superficie de fractura para que su topografía y microestructura subyacente se puedan caracterizar simultáneamente. Se observa que los micro huecos en bases no envejecida son nucleados por inclusiones y partículas de ferrita, mientras que los micro huecos en bases envejecida son

nucleados por inclusiones, fase y carburos.

Las diferentes respuestas de envejecimiento exhibidas se atribuyen a la eficacia relativa de los sitios de nucleación de los micro huecos. Mientras que los carburos y la fase proporcionan sitios de nucleación adicionales en las soldaduras de SMAW, su efectividad en la nucleación de los micros huecos es menor que la asociada con las inclusiones ya presentes en la condición de soldadura. Esto explica los modestos efectos de envejecimiento de las soldaduras SMAW. En soldaduras de alta tenacidad, las inclusiones pequeñas y la ferrita no resisten fallas. En este caso, los carburos inducidos por el envejecimiento y la fase tienen un efecto pronunciado sobre la tenacidad porque son sitios de nucleación más efectivos. Cabe destacar que aunque el envejecimiento de las soldaduras reduce la resistencia a la fractura hasta en un 60 %, los valores de J_c después del envejecimiento son sustancialmente mayores que el valor J_c , para la soldadura SMAW sin envejecer. Esta comparación muestra claramente que los carburos inducidos por el envejecimiento y la fase son sitios de nucleación de micro huecos menos efectivos que las inclusiones en las soldaduras de SMAW. El envejecimiento en la pieza 308 y 16-8-2 soldado a 475 a 482 °C pierde la dureza de envejecimiento casi igual que cuando se suelda a 550 a 566 °C. Durante la exposición a largo plazo a temperaturas inferiores a 500°C, la descomposición espinodal de la ferrita, junto con la fase y la precipitación de carburo son responsables de los efectos del envejecimiento. La microscopía iónica de campo de la sonda atómica de la ferrita envejecida confirma la descomposición espinodal en regiones ricas en hierro y regiones ricas en cromo [12].

El papel dominante del mecanismo de fragilidad se demostró utilizando experimentos de reversión del tratamiento térmico en los que la soldadura envejecida se trató térmicamente a 550 °C durante 1 h, este tratamiento da como resultado una recuperación sustancial, pero no total, de la tenacidad de la muesca, lo que demuestra que la reacción espinodal es responsable de la mayor parte de la fragilización, mientras que los precipitados de la segunda fase desempeñan un papel menor.

Aunque la exposición térmica a largo plazo degrada la dureza de las soldaduras, los altos valores de J_c post-envejecimiento indican que se retiene suficiente tenacidad para evitar la fractura no articulada. El desgarramiento dúctil de los materiales envejecidos ocurre solo después de una deformación plástica sustancial, por lo que el control de la fractura de los aceros inoxidables envejecidos generalmente no es un problema crítico de ingeniería [5].

Diferentes datos muestran que el envejecimiento térmico causa hasta el 90 % de degradación en la energía Charpy en metales y soldaduras. Para soldaduras dúplex, el envejecimiento no sólo degrada la energía de la plataforma superior, sino que también aumenta la temperatura de transición dúctil-quebradiza. En contraste con la gran degradación en la energía de Charpy, algunos estudios de mecánica de fractura muestran que el envejecimiento térmico

produce solo una reducción modesta en J_c y resistencia al desgarro.

Los exámenes fractográficos revelan que la gran degradación de la energía Charpy V-notch después del envejecimiento, se debe a las diferencias en la energía requerida para iniciar una grieta a partir de una muesca roma. La característica clave de la superficie de fractura en muestras de Charpy V-notch no envejecidas es una serie de marcas de detención de rasgaduras, donde las grietas se inician, pero son detenidas rápidamente por la matriz resistente a la fractura. La tremenda cantidad de energía requerida para la reiniciación de crack da cuenta de la alta energía de impacto Charpy de muesca roma en estado no envejecido. Después del envejecimiento, hay poca o ninguna evidencia de marcas de detención. Estos hallazgos demuestran que la gran reducción en la energía Charpy de muesca roma se debe a cambios micro estructurales inducidos por el envejecimiento que disminuyen marcadamente la energía requerida para iniciar una fisura aguda [1].

En muchos casos, los datos Charpy de punta roma son un indicador excesivamente pesimista de los efectos del envejecimiento térmico para componentes de acero inoxidable que contienen grietas o defectos similares a grietas. En contraste con este comportamiento, se encontró una buena correlación entre la energía Charpy V-notch y la resistencia a la fractura para una soldadura envejecida tipo 308. Para esta soldadura, los cambios microestructurales inducidos por el envejecimiento parecían tener el mismo efecto sobre la energía de propagación de grietas y la energía requerida para iniciar una grieta desde una muesca roma.

2.10. Rigidez en Fracturas Criogénicas en Bases Metálicas

Los aceros inoxidables austeníticos se usan ampliamente a temperaturas criogénicas, se pueden separar en dos categorías: 1) aleaciones metaestables (por ejemplo, tipos 304 y 316 y sus soldaduras) que experimentan una transformación parcial inducida por deformación y 2) aleaciones completamente estables (por ejemplo, tipos 310, 330, y la serie de aleaciones nitronicas que resisten transformaciones de fase a temperaturas criogénicas tan bajas como $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Los aceros inoxidables reforzados con nitrógeno, incluidos los tipos AISI 304N, 304LN, 316N, 316LN y aleaciones Nitronic, son atractivos porque el nitrógeno estabiliza la austenita con respecto a la transformación de martensita y es un reforzador efectivo, particularmente a $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

2.11. Propiedades del Uso y Fracturas en los Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables están presentes en diversas aplicaciones estructurales. Estas aplicaciones estructurales se encuentran en su mayoría en industrias de ingeniería química y energética representando un amplio rango en el mercado de aceros inoxidables. En estas aplicaciones se encuentran varios sectores importantes como en la parte nuclear donde se encuentran recipientes de reactor, intercambiadores de calor, tubulares de la industria petrolera, hornos y calderas utilizadas en plantas de energía eléctrica. Estos aceros de todo tipo contienen cromo en cantidades de 10 a 30 %, la resistencia de estos aceros es principalmente por el cromo, aunque están otras aleaciones como el silicio, níquel, molibdeno, cobre y aluminio y ayudan al ataque de la corrosión. Las composiciones de los aceros inoxidables se dividen en microestructurales en los siguientes grupos: tipos austeníticos, tipo ferríticos, tipos dúplex, tipos martensíticos y endurecimiento por precipitación [6].

2.12. Fragilidad

Los aceros inoxidables presentan fragilidad durante el tratamiento térmico o el servicio a temperatura elevada. Dentro de las formas de fragilización térmicamente inducidas en los aceros inoxidables incluimos la sensibilización, (fragilidad a 475°C (885°F)). Estos aceros inoxidables son susceptibles en diversas formas de asistencia ambiental crecimiento de grietas por fragilización de hidrógeno, esto se analiza por separado de tipo de aleación. Estos aceros se vuelven susceptibles a la corrosión intergranular cuando se forman carburos de cromo en los límites de grano durante la exposición de altas temperaturas.

El agotamiento de cromo en los límites de grano se denomina sensibilización por que las aleaciones se vuelven más sensibles al ataque localizado en ambientes corrosivos. Los aceros inoxidables austeníticos se vuelven susceptibles a la corrosión intergranular cuando encontramos temperaturas en el rango de 480 a 415°C (900 - 1500°F). Se han presentado varios enfoques para disminuir o prevenir la sensibilización de los aceros inoxidables austeníticos [3].

2.13. Aceros Inoxidables Ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos tienen una ductilidad comparativamente baja y tenacidad. Los datos de tenacidad disponibles para estos aceros se limitan principalmente a la energía de dureza del impacto. Los aceros inoxidables ferríticos son sensibles a la muesca similares a los aceros bajos en carbono y baja aleación. La tenacidad y las temperaturas de transición

son influenciados por contenido de carbono, niveles de cromo y dureza. Cuando contenido de cromo ha superado el 0.018 % en peso hay un aumento en la temperatura de transición.

Los aceros inoxidables ferríticos como los tipo 405 y 430 tiene una alta resistencia al SCC (Stress Corrosion Cracking) en soluciones al cloruro y granos ferríticos UNS S 44400 y S44800 pueden ser completamente resistentes al cloruro SCC a niveles de intensidad de estrés de 60 MPa-m (55 ksi-in) en soluciones de NaCl al 22 % y a 105°C (220 °F). La resistencia al cloruro SCC de estos aceros puede reducirse por la presencia de varios elementos de aleación: sensibilización, trabajo en frío, fragilidad a alta temperatura [11].

2.14. Aceros Inoxidables Martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos que se destacan son el 403 y 410 que presentan las composiciones básicas. Estas aleaciones son utilizadas en varias aplicaciones estructurales críticas a la fractura, un ejemplo sería el acero inoxidable martensítico tipo 403 utilizado para las palas de rotor de turbina de vapor y rotores que operan a temperaturas hasta de 480 °C (900 °F). Para este tipo de aplicación los componentes se templean a 590 °C (1100 °F) o más, luego de lo cual la fragilidad en el servicio de temperaturas son insignificantes. La resistencia a la fatiga y la fractura de estos aceros es similar a la de los aceros martensíticos de baja aleación son comparables en fuerza y dureza [11].

2.15. Acero Inoxidable Martensítico PH

Los aceros inoxidables martensíticos generalmente se adquieren en la condición de recocido de solución con una microestructura de martensita de bajo carbono. Después de una fabricación los componentes son endurecidos en un rango de temperaturas de 480-590 °C (900-1100 °F) y enfriado al ambiente. El envejecimiento desarrolla la precipitación endurecida en estos aceros. En el envejecimiento los precipitados de compuestos de cobre submicroscópicos se forman en la matriz martensítica y causan aumento en fuerza y dureza. La composición de 15-5 PH no se produce ferrita delta en esta aleación y por lo tanto tiene una buena ductilidad transversal corta y central en productos forjados. Un pequeño porcentaje de ferrita delta puede ser observado en microestructuras de acero inoxidable 17-4PH.

2.16. Aceros Austeníticos y Semi-Austeníticos

Los aceros semi-austeníticos PH, solo se han publicado unos datos de resistencia a la fractura limitados en semi-austeníticos con precipitación para el endurecimiento de aceros inoxidables. Aparentemente estos aceros tienen relativamente baja resistencia al crecimiento de grietas en soluciones acuosas de cloruro de sodio. El acero inoxidable A-286 de endurecimiento por

precipitación austenítico es el principal representante en esta categoría, contiene titanio y pequeñas cantidades de vanadio y aluminio, que se precipitan como compuestos intermetálicos en el envejecimiento [8].

2.17. Aceros Inoxidables Austeníticos

Estos aceros se han estudiado ampliamente dada su amplia difusión. Se usa en piezas estructurales de alta temperatura con esfuerzos cíclicos en una amplia gama de frecuencias y relaciones de carga. La vida útil de los aceros inoxidables austeníticos evalúa el efecto envejecimiento por temperatura de servicio, dando resultado grietas por fatiga que se tomaron en condiciones envejecidas y no envejecidas (5000 horas a 593 °C/1100 °F) después de las 5000 horas de envejecimiento a esta temperatura la precipitación de carburos es esencialmente completa. Estos resultados nos indican que a 593°C (1100°C) no hay unos efectos nocivos del envejecimiento en las tasas de crecimiento de grietas de las muestras que son continuamente cicladas. Cuando se incluye un tiempo de retención de 0.1 o 1.0 minuto en cada ciclo de carga tiende haber un ligero aumento en la tasa de crecimiento de la fisura por fatiga a un nivel dado [8].

3 Procedimiento de análisis

3.1. Inspección Visual

Las válvulas usadas para este proyecto, tres valvulas de admision obtenidas de un vehículo mazda 323 modelo 1995, las cuales sufrieron deformación durante su funcionamiento. Para la realización de los estudios metalográficos se usó el laboratorio 401 sede Caldas de metales y tratamientos térmicos de la Fundación Universitaria Los Libertadores, bajo la tutoría del director de proyecto con el fin de garantizar el uso correcto de los equipos que estarían involucrados durante esta práctica y así minimizar cualquier riesgo que pueda estar presente ya que existen equipos de corte y lijado así como químicos corrosivos que pueden generar lesiones graves en los estudiantes.

Como se puede observar en las siguientes imágenes las válvulas sufrieron una fuerte deformación, la hipótesis planteada desde el inicio del proyecto está dirigida a una falla relacionada con una falla mecánica y no térmica, aparentemente por el impacto contra el eje de levas o contra los pistones. En las fotografía se aprecia la deformación del vástago de la válvula el cual se desvió de su eje de forma dramática. Esta deformación parece ser casi idéntica en cada una de las tres válvulas si se comparan por sus vástagos.

3.2. Preparación de la muestra

Luego de tener inspeccionadas las válvulas e identificadas se procedió a realizar un corte en el inicio de la cabeza de la válvula usando la tronzadora. para este procedimiento se contó con la supervisión del docente dado el riesgo latente que existe de sufrir un accidente, también fue necesario usar la careta para pulir con el fin de evitar que partículas que pueden salir despedidas desde la pieza de corte, pudieran ocasionar lesiones en el rostro o en los ojos.

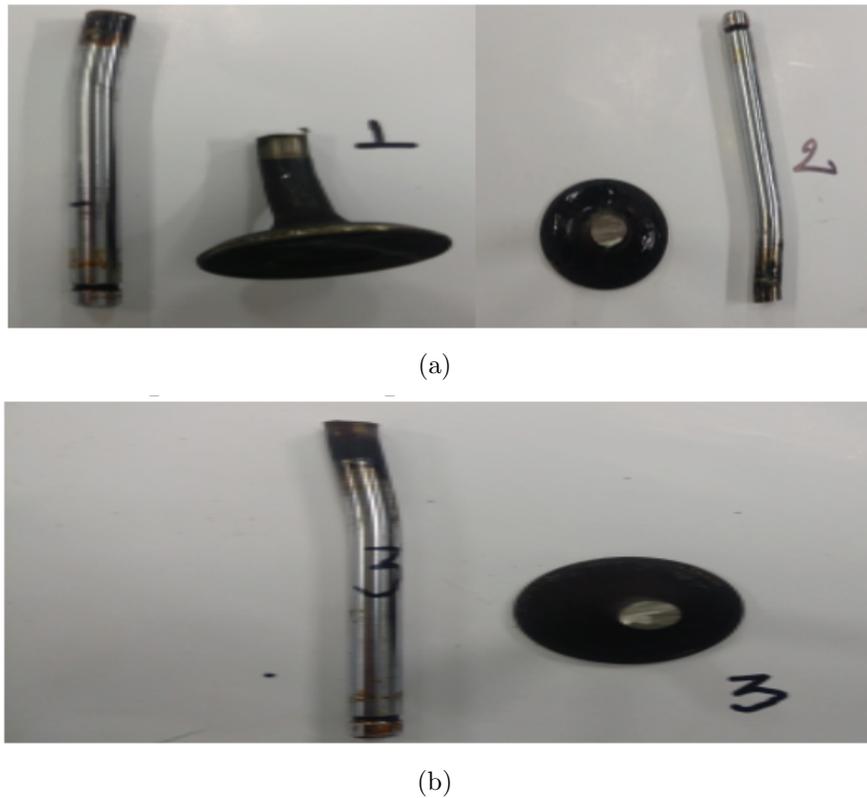


Figura 3-2: a). Corte válvula 1 y 2. b). Corte válvula 3.

Después de terminar con el proceso de corte en el disco rotativo para corte, se inicia el lijado de las cabezas de las válvulas las cuales serán el objeto final del estudio metalográfico, para determinar experimentalmente su composición y determinar la causa de su falla.

En nuestro caso iniciamos con lija número 60 en la máquina de banda sin fin para borrar completamente la rebaba dejada por el corte. Después de haber quitado la rebaba se uso la lija número 100. La adecuación de la pieza que será analizada tiene como fin generar una superficie completamente brillante a lo que se le conoce como "brillo espejo" éste terminado superficial se logra lijando la cara de la pieza a analizar, con lijas de diferente tamaño de grano.

Luego de evidenciar que ya no existen rayas causadas por el corte inicial, continuamos con lija número 400 en la mesa para lijar ya que la pieza necesita lubricación con agua para mejorar el efecto del lijado. De aquí en adelante el proceso de lijado incluirá las referencias de lija 600 y 1000, teniendo cuidado de rotar la pieza 90° pasados algunos minutos después de iniciar con su lijado, esto se hace con el fin de eliminar las rayas en su totalidad Cuando se haya terminado el lijado con la lija número 1000 se procede a pulir la pieza en la máquina de pulido que usa un paño para llegar a nuestra meta final que es el brillo espejo.

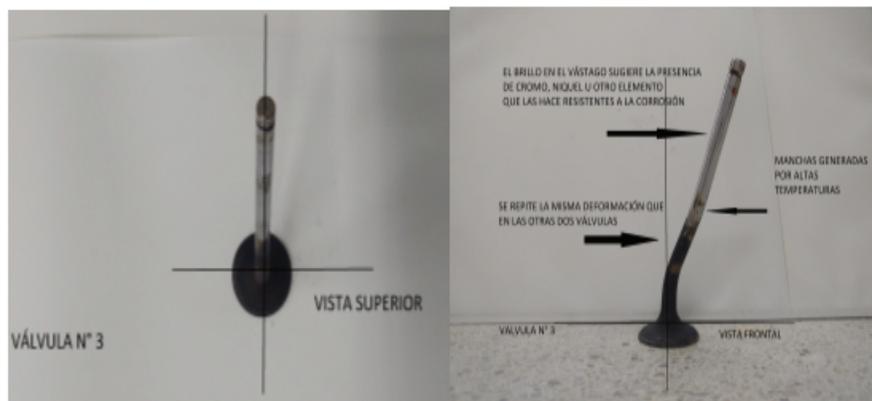
Para obtener unos excelentes resultados en el proceso de pulido en la máquina de pulido se debe lubricar constantemente el paño y adicional a esto se recomienda el uso de óxido de aluminio o alúmina, que es mezclado con agua y usado como abrasivo. Cuando se haya logrado el pulido brillo espejo en cada una de las válvulas, se guardaron en sus respectivos recipientes que las identifican. El último paso antes del estudio metalográfico, se debe "atacar" la superficie de la pieza previamente brillada, con Nital, el cual es una mezcla de alcohol etílico y ácido en una composición del 90% de alcohol etílico y 10% de ácido nítrico. Con este ataque químico se consigue revelar la microestructura de la pieza a examinar.



(a)



(b)



(c)

Figura 3-1: a). Inspección válvula 1, b). Inspección válvula 2, c). Inspección válvula 3.

4 Análisis Metalográfico

Luego de terminar la preparación de las válvulas y haber hecho el ataque químico con Nital (10 %), se puede apreciar como lo muestran las imágenes que acero del cual están fabricadas las válvulas parece ser acero austenítico al cromo vanadio o al cromo níquel, lo cual explica porque las válvulas son no magnéticas y porque no sufrieron oxidación. En la imagen ampliada a 100x podemos observar una microestructura austenítica con carburos de cromo en los límites del grano y la ausencia de ferrita. En la imagen ampliada a 100x y a 200x, podemos observar una microestructura austenítica con carburos de cromo en los límites del grano(1) y (2). En estas dos últimas imágenes se aprecian los carburos de cromo/vanadio (1) en una matriz austenítica (2) típica de los aceros inoxidable. La estructura se mantiene uniforme en las tres válvulas analizadas.

Debido a las cortas dimensiones de los vástagos y los platillos de las válvulas no se pudieron realizar las mediciones de dureza dado que implica realizar cortes en estos elementos. No obstante los equipos de corte con los que cuenta la institución no permiten realizar estos seccionamientos.

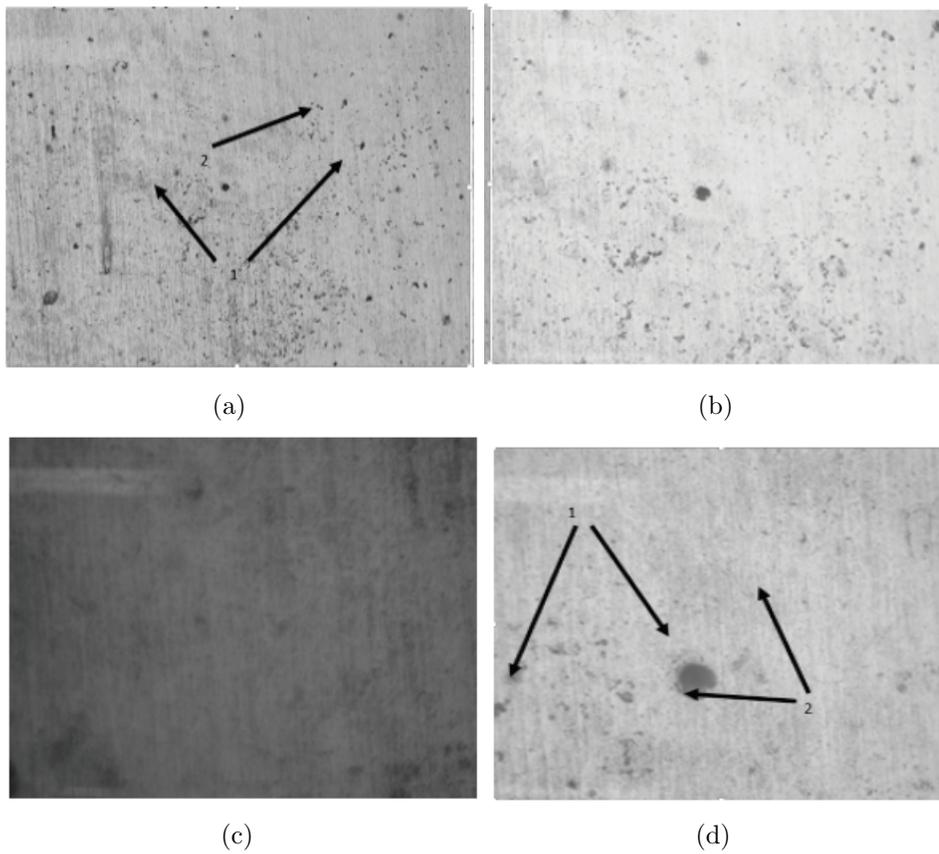


Figura 4-1: a). Microestructura generalizada de las válvulas 100X. b). 200X. c). 500X. d). 1000X.

5 Análisis de Falla

Al comparar las imágenes obtenidas del análisis metalográfico y compararlas con imágenes obtenidas como referencia se observa alta similitud con un acero inoxidable A-286 (AISI 660, 150 HV). La aparente no similitud entre las estructuras se debe a un uso no adecuado del agente químico usado para este estudio metalográfico, ya que en lugar de usarse NITAL debió usarse ácido pícrico lo cual aumentó el tiempo de espera para que el ataque fuera efectivo y con una obtención de resultados básicos. No obstante se logró determinar que la deformación en la válvula no fue efecto del aumento de temperatura durante la combustión ya que la microestructura permanece constante a lo largo de los puntos examinados en las tres válvulas y sin evidencia de deformación por fatiga térmica.

Con esto podemos deducir con gran seguridad que las válvulas no sufrieron deformación térmica sino deformación plástica únicamente. La deformación en las válvulas fue producto de un choque repentino contra el eje de levas por una pérdida en los tiempos de apertura y cierre, esto posiblemente por una ruptura de la correa de repartición durante el funcionamiento del motor, adicional a esto es fácil deducir que las válvulas estudiadas no fueron usadas para lo que fueron fabricadas, generalmente las válvulas con aleaciones de níquel-cromo son usadas como válvulas de escape ya que son estas las que están sometidas a mayores temperaturas que las válvulas de admisión así como el sometimiento a los gases producidos luego de la combustión los cuales son altamente corrosivos.

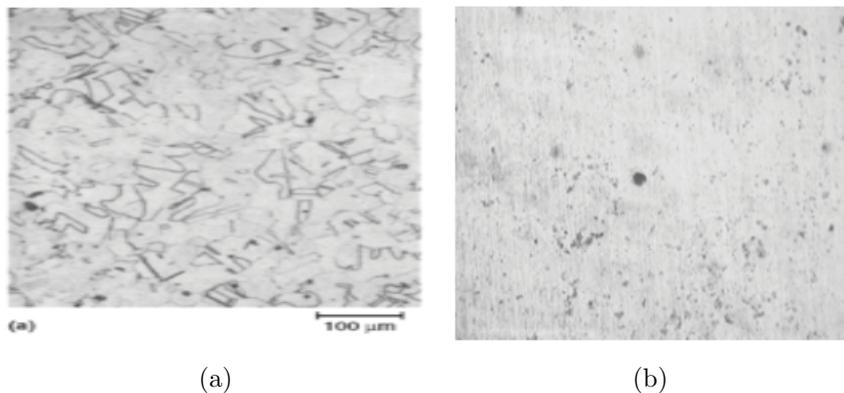


Figura 5-1: a). Acero inoxidable A-286 (AISI/SAE 660, 150 HV) b). Microestructura generalizada de las válvulas.

6 Conclusiones

- El análisis de fallas se presenta como una herramienta clave para poder determinar problemas que se presentan a diario en el desarrollo de la actividad ingenieril, optimizando el tiempo y recursos de la organización para cual se colabore, sin importar si las nuevas tecnologías en diseño predican desde la concepción misma de la idea cuanto sera la vida útil de un elemento, herramienta o máquina, siempre existirán factores que no pueden obviarse y los cuales repercutirán de la forma menos esperada. De ahí que el análisis de fallas siga siendo tan importante hoy en día como cuando surgió en el siglo XIX.
- Mediante el uso adecuado de las herramientas se puede llegar a desarrollar de la mejor forma un estudio de falla siguiendo los parámetros propuestos por las diferentes técnicas de investigación, pudiendo dar solución a casi cualquier problema que se presente en cualquier campo de la industria.

Bibliografía

- [1] ANDERSON, T.L.: *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Fourth Edition*. CRC Press, 2017. – ISBN 9781498728140
- [2] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, George F.: *ASM handbook*. Vol. 9: *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004
- [3] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, W.T. ; SHIPLEY, R.J.: *ASM handbook*. Vol. 11: *Failure Analysis and Prevention*. ASM International, 2002
- [4] CAMPBELL, F.C.: *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*. ASM International, 2012 (Ingeniería e ingeniería civil). – ISBN 9781615039760
- [5] DE CAMPOS FRANCESCHINI CANALE, L. ; TOTTEN, G.E. ; MESQUITA, R.A.: *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*. ASM International, 2008 (EngineeringPro collection). – ISBN 9781615030989
- [6] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987
- [7] DAS, Amiya K.: *Metallurgy of failure analysis*. Vol. 132. McGraw-Hill New York, NY, 1997
- [8] DAVIS, J.R. ; COMMITTEE, A.S.M.I.H.: *Stainless Steels*. ASM International, 1994 (ASM specialty handbook). – ISBN 9780871705037
- [9] FORREST, P.G.: *Fatigue of Metals*. Elsevier Science, 2013. – ISBN 9781483160733
- [10] INTERNATIONAL, ASTM: *Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*. ASTM International-West Conshohocken, PA, 2013
- [11] PROGRAM, ASM H. ; COMMITTEE, ASM International. H. ; STEINER, R.: *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM International, 1990 (ASM Handbooks Series). – ISBN 9780871703774
- [12] STEPHENS, Ralph I. ; FATEMI, Ali ; STEPHENS, Robert R. ; FUCHS, Henry O.: *Metal fatigue in engineering*. John Wiley & Sons, 2000