



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Implementación del método de análisis de falla en componentes mecánicos

Diana Carolina Jiménez Casallas
Fleidym Borraez Correa
Darío Cantor Barragan

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de ingeniería
Bogotá D. C. , Colombia
2017

Implementación del método de análisis de falla en componentes mecánicos

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 propiedades en materiales de ingeniería

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D. C. , Colombia

2017

Dedicatoria

A Dios y a nuestras familias que siempre vieron en nosotros grandes profesionales.

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

1-1. Distribución típica del tiempo de las fallas ("curva de la bañera") [2]	4
3-1. Propiedades de los materiales y los modos de falla que sufren.	10
4-1. Diagrama de aplicación vida útil de los componentes mecánicos [2].	17
4-2. Ejemplo simplificado de árbol de fallas [2].	18
4-3. Gráfico del evento simplificado y factor causal [2].	19
4-4. Diagrama de espina de pescado [2].	19
4-5. Profundidad de penetración por el método Rockwell [4].	22
5-1. Pieza A/B - Deformación plástica de una válvula de escape.	25
5-2. Pieza A2 - Ruptura por deformación plástica de una válvula de escape.	26
5-3. Pieza A2 - Ruptura por deformación plástica de una Válvula de culata.	27
5-4. Pieza A4 - Fractura sobre copa de cuadrante hexagonal de $\frac{1}{2}$ ".	28
5-5. Pieza A5 - Deformación térmica en un eje	29
6-1. Durómetro utilizado y resultado de su calibración utilizando el patrón.	31
6-2. Procedimiento utilizado para la medición de dureza en los vástagos de las válvulas.	32
6-3. Procedimiento utilizado para la medición de dureza en las superficies internas y externas del eje.	34
7-1. Equipos de laboratorio metalográfico.	35
7-2. Pieza A/B - Deformación del vástago de las válvulas de escape de un motor de combustión interna.	36
7-3. Pieza C - Corte seccional, microestructura y fractura interna de la cabeza de una válvula.	38
7-4. Pieza D - Corrosión y agrietamiento bajo esfuerzo del material de la copa hexagonal.	39
7-5. Pieza E - Eje de salida de potencia.	40

Resumen

Las bases fundamentales en las cuales direccionamos el método de ejecución del proyecto fueron identificar, analizar, evaluar y concluir, las fallas detectadas en 5 elementos mecánicos comunes que integran diversos sistemas. A través de las diferentes pruebas realizadas en el laboratorio, se dio como resultado un examen sistemático, que permitió detectar la dureza, y la micro-estructura del material. Con estos resultados se realizó una clasificación previa la cual nos ayudó a aclarar las principales causas y consecuencias de las fallas en los componentes, reconociendo su origen y dejando al descubierto los factores más importantes que intervinieron en la propagación de las mismas, con este análisis, el propósito es evitar que se presenten nuevamente este tipo de fallas a futuro, sugiriendo un análisis preventivo que involucre un buen control de calidad, mantenimiento y seguimiento constante sobre estos sistemas. Para concluir nuestra investigación cabe resaltar que los resultados obtenidos muestran que aunque tienen composiciones similares, presentan fallas distintas, lo cual requirió puntual atención en cada una de ellas, como lo evaluado en el proyecto.

Palabras claves: (**Falla, deformación, metalográfico**)

Abstract

The fundamental bases in which we directed the method of project execution were to identify, analyze, evaluate and conclude, that 5 common failures were detected in the mechanical elements that integrate different systems. Through a series of different tests carried out in the lab, yielding a systematic examination, which allowed to detect hardness, the material type and its macro structure. With these results a preclassification was made which helped us in clarifying the main causes and consequences with the failed components; and by recognizing that point of origination the purpose of this analysis is avoiding future failure occurrences by suggesting a preventive analysis involving good quality control, maintenance and constant follow-up to the systems. In conclusion our research, should emphasize at the end that different materials, although similar in composition, present differentiation in failures, which required timely attention to each of them, as per our evaluations in the project.

Keywords: (**Failure, deformation, metallography**)

Contenido

Resumen	x
1. Introducción	2
2. Objetivos	5
3. Factores conducentes a la falla	6
3.1. Deficiencias de Diseño	6
3.2. Defectos de fabricación y montaje	6
3.3. Montaje en Fábrica / Instalación en el Sitio	7
3.4. Mantenimiento inadecuado	8
3.5. Teoría de falla de los metales	9
3.6. Modos de falla	9
3.7. Falla a elevada temperatura	10
3.8. Corrosión uniforme	11
3.9. Corrosión por hendidura	12
3.10. Corrosión bajo esfuerzo	13
3.11. Corrosión-Fatiga	14
4. Fundamentos - Análisis de Causa Raíz (RCA)	15
4.1. Análisis de falla	15
4.1.1. Perfil del Analista de fallas	15
4.1.2. Objetivos del análisis de falla	16
4.2. Principales causas físicas de la raíz de falla	17
4.3. Análisis de causa raíz - RCA	19
4.4. Metodología del análisis de falla	20
4.4.1. Inspección visual	20
4.4.2. Ensayos de dureza	21
4.4.3. Ensayo metalográfico	21
5. Inspección Visual	23
5.1. Historial de las piezas	23
5.1.1. Válvulas de culata	23
5.1.2. Copa hexagonal	23

5.1.3. Eje de salida de potencia	23
5.2. Pieza A/B-Deformación térmica y plástica	24
5.3. Pieza C-Ruptura de vástago de válvula de culata	26
5.4. Pieza D-Fractura en copa de cuadrante Hexagonal	27
5.5. Pieza E-Cambio de coloración debido a calentamiento	29
6. Ensayos de dureza Rockwell	31
6.1. Pieza A/B- Vástagos de las válvulas	32
6.2. Pieza E- Eje de salida de potencia	33
7. Análisis metalográfico	35
7.1. Pieza A/B, Vástagos de válvulas	36
7.2. Pieza C, Válvula	37
7.3. Pieza D, Copa hexagonal	37
7.4. Pieza E, Eje de salida de potencia	37
8. Análisis de falla RCA	41
8.1. Pieza A/B- Vástagos de las válvulas	41
8.2. Pieza C- Válvula	42
8.3. Pieza C- Copa Hexagonal	42
8.4. Pieza E-Eje de salida de potencia	42
9. Conclusiones	44
Bibliografía	45

1 Introducción

En la actualidad existen varios factores que determinan la detección de fallas en distintos elementos mecánicos que normalmente están expuestos a comportamientos y esfuerzos críticos, estas se pueden presentar en distintos escenarios los cuales en su mayoría pueden llegar a producir daños severos que no solo involucran daños materiales y económicos sino que también pueden llegar a verse involucradas pérdidas más importantes, como vidas humanas si no se establecen controles ni prevenciones en sus respectivos mantenimientos [3].

Algunas fallas ocurren normalmente a niveles de esfuerzos considerablemente menores que la resistencia última e inclusive menores que la resistencia a la fluencia de los materiales. Las características primordiales de este tipo de falla en elementos mecánicos que han soportado cargas dinámicas durante largos periodos de tiempo, no garantizan que al aplicar las teorías de falla estática sobre estos elementos sujetos a cargas dinámicas eviten posibles diseños inseguros [2, 14].

El análisis de fallas se puede llegar a aplicar en diversos elementos que estén expuestos a la variación de cargas en cualquier sistema mecánico, los cuales con el tiempo generan la alteración de su forma, fluctuaciones y agrietamientos. El análisis es un proceso crítico y constante que requiere énfasis en todas las etapas para encontrar los factores que las originaron, con este fin, los ingenieros y científicos han estudiado y analizado estos fenómenos, en busca de optimizar la vida útil de los materiales en procura de evitar fallas prematuras que comprometan alguna zona de estos sistemas. Con este mismo objetivo se establecen algunas relaciones encontradas en las piezas estudiadas respecto a su comportamiento de acuerdo al tipo de material y el aspecto superficial de las fallas más críticas [1, 13, 15].

Definición de la falla mecánica

En el sentido general de la palabra, una falla se define como un suceso o condición indeseable que se evidencia como un cambio en la geometría del componente mecánico o la presencia de algún defecto superficial o interno en el material. Para el propósito del estudio relacionado con el análisis y prevención de fallas, es un término general utilizado para referir que un componente es incapaz de realizar adecuadamente su función prevista, por lo tanto, la definición de la falla se puede clasificar en varios niveles diferentes [21, 26].

La forma más simple de una falla en un sistema o componente es cuando el sistema opera pero no cumple su función prevista. Esto se considera una pérdida de función. Un motor a reacción que funciona pero sólo produce un empuje parcial (insuficiente para permitir que un avión despegue) es un ejemplo de pérdida de función [2]. El siguiente nivel de falla, involucra un sistema o componente que realiza su función pero no es confiable o no es seguro. En esta forma de falla, el sistema o componente ha sufrido una pérdida de vida útil. Por ejemplo, un cable para un elevador ha perdido su vida útil cuando ha sufrido fracturas por fatiga de algunos de los hilos individuales, debido a irregularidades en la envolvente sobre la polea. A pesar de que el cable continúa funcionando, la presencia de fracturas por fatiga de algunos de los cables resultan en una condición insegura y por lo tanto se considera una falla [4, 16, 18].

En el siguiente nivel, un sistema o componente es inoperable tal como una fractura del eje de una bomba que hace que el impulsor obtenga una pérdida de la capacidad de carga o el caso de un perno estructural en servicio debido a la fractura. La definición y la distinción entre un indicador (es decir, síntoma), una causa, el mecanismo de falla y una consecuencia, es considerado por algunos autores como, una clara comprensión de cada parte de la situación. El análisis de la trazabilidad de los componentes y como estos se asocian a una falla, aumentan en gran medida la capacidad de comprender las causas, las opciones atenuantes y acciones correctivas apropiadas [6, 22, 23].

Consideremos el ejemplo de una válvula de mariposa que falla en servicio de un sistema de agua de refrigeración en una planta de tratamiento. Los factores a considerar incluyen el reconocimiento de los indicadores, las causas, los mecanismos y las consecuencias, lo cual permite concentrar las acciones de la investigación y determinan los sucesos de falla en el elemento. Los indicadores permiten al analista de falla ejercer un control de estos como precursores y síntomas de fallas[7]. Las causas permiten establecer un enfoque de las acciones de mitigación en los componentes afectados. Finalmente, los mecanismos de falla describen cómo falló el material de acuerdo con el seguimiento que se le dio en el análisis previo [14, 25].

Si el análisis es correcto, el mecanismo será coherente con la(s) causa(s). Si el mecanismo no está bien entendido, entonces ninguna causa verdadera podrá ser identificada y la acción correctiva no será completamente satisfactoria. Con base en esta metodología se establece el concepto de gestión del ciclo de vida de un producto, que se refiere a la idea de administrar la vida útil de un sistema, estructura o componente. Hay un costo asociado con la prolongación de la vida útil de un elemento, por ejemplo, costos mayores de investigación, costos de diseño, costos de material y fabricación, así como mayores costos de mantenimiento [9].

Es importante entender cómo la distribución típica de una falla altera radicalmente un producto y cómo mediante de un análisis se identifica gradualmente la descomposición de su vida útil. La Figura 1-1, muestra esquemáticamente las diversas fases esperadas para la ge-

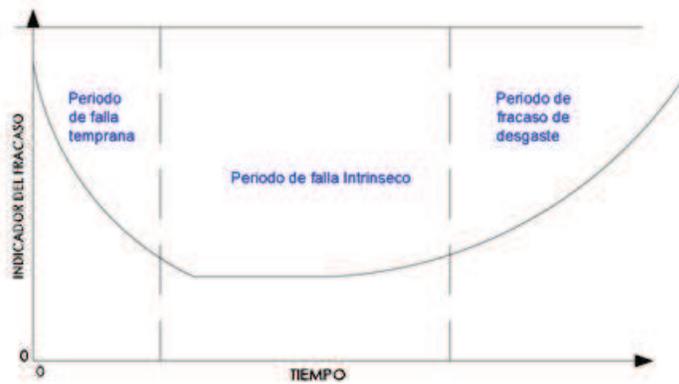


Figura 1-1: Distribución típica del tiempo de las fallas ("curva de la bañera") [2]

neración de una falla en un componente mecánico. En esta curva se observa como las fallas tempranas normalmente ocurren a una mayor velocidad debido a deficiencias en los procesos de selección del material, diseño y fabricación. De igual forma en periodos de tiempo considerables, los componentes mecánicos fallarán a una mayor velocidad debido al deterioro acumulado durante los innumerables ciclos de trabajo. En el intermedio de estos dos escenarios se encuentran algunas fallas que se presentan debido a la conjugación de ambos factores, deficiencias en fabricación y desgaste acumulado, pero como muestra la gráfica, estos se presentan a menor velocidad [2, 13].

A través del análisis de fallas y la implementación de medidas preventivas, se han logrado mejoras significativas en la calidad de los productos y los sistemas. Esto requiere no sólo un entendimiento en general del fracaso evidenciado en los análisis, sino también una apreciación de la garantía de calidad y las expectativas de los usuarios, de productos y sistemas.

2 Objetivos

2.1. Objetivo General

- Implementar el método de análisis de falla a cinco componentes mecánicos que han sido obtenidos de talleres automotrices y otras piezas metálicas que presentan algún tipo de falla con el fin de determinar la causa probable de falla.

2.2. Objetivos Específicos

- Obtener diferentes piezas mecánicas que hayan sufrido diferentes tipos de fallas.
- Recopilar información bibliográfica teórica acerca de estudios sobre análisis de falla relacionados con los componentes mecánicos obtenidos.
- Realizar pruebas de laboratorio tales como inspección visual, análisis de dureza y análisis metalográfico, 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 publlindex.

3 Factores conducentes a la falla

3.1. Deficiencias de Diseño

Se considera que un elemento tiene un falla de diseño cuando no se tienen en cuenta algunas condiciones técnicas o se encuentra un error en el cálculo de las condiciones a la cuales deberá operar dicho elemento. A diario las personas que realizan el trabajo de diseño de piezas, de maquinaria, tuberías entre otros, deben realizar cálculos y selección de materiales de acuerdo a las características técnicas a las cuales se va a operar dichos elementos, si falta algún cálculo necesario o no se consideran factores que intensifican los esfuerzos aplicados como sobre cargas, entallas, vibración, entre otros, pueden conducir a que ocurran errores de diseño [29]. Un ejemplo real de las deficiencias de diseño se pudo evidenciar en los inicios de la construcción de los primeros jets en 1950, cuando no se tuvo en cuenta que debido a la presurización y despresurización de la cabina se generaría en las equinas agudas de las ventanas una alta concentración de esfuerzos, los cuales generaron pequeñas grietas que posteriormente alcanzaron el tamaño crítico de la grieta y las fracturas produjeron la explosión de las naves en pleno vuelo. Este ejemplo muestra la importancia de revisar cada parte de cada diseño para evitar condiciones de operación conducentes a la falla del material [27].

Las causas fundamentales de las fallas que se derivan de deficiencias de diseño se refieren a características inaceptables de un producto o sistema que son el resultado del proceso de diseño. Este proceso abarca el desarrollo del concepto original, la configuración general, la definición y diseño detallado, incluyendo la selección y especificación de materiales dentro de sus procesos de fabricación. El diseño implica la identificación y definición de una necesidad del producto o sistema, seguida de la definición del rendimiento y los requisitos que debe cumplir, los cuales abarcan las condiciones de servicio previstas en la solicitud, las limitaciones en el diseño y los puntos críticos o los riesgos asociados al falla.

3.2. Defectos de fabricación y montaje

La fabricación se refiere a la producción de objetos a través de medios de tipo mecánicos o bien, implican la construcción ó elaboración de algún componente, usando documentación técnica y materias primas, que generalmente se realizan en una fábrica [19]. Cualquier tipo

de fabricación implica convertir una materia prima en un producto, esta se puede realizar a través de máquinas o manualmente. Hay muchos defectos causados por la fabricación; cuando se salen de los límites de control cabe la posibilidad que resulte un producto defectuoso.

Un ejemplo de los defectos en fabricación son las grietas microscópicas que se inducen durante el mecanizado. En elementos mecanizados que se someten a esfuerzos cíclicos repetitivos la presencia de alguna marca de mecanizado puede llevar a la fatiga prematura del material. De igual manera, algunos procesos de conformado generan defectos que pueden servir como núcleos de fallas catastróficas durante el servicio como en las fundiciones y soldaduras, en las cuales se pueden presentar porosidades (en el caso de la soldadura debido a la presencia de escoria) y grietas en las cuales se pueden concentran esfuerzos generando posibles rupturas del elemento o de la unión. Algunos ejemplos de los defectos más comunes de fabricación son [14]:

- Deficiencias en el mecanizado
- Daño debido a los defectos de las herramientas
- Fisuras de tensión residual por sobrecalentamiento
- Marcas de herramientas y arañazos de la formación
- Lágrimas superficiales debido a la mala preparación de la superficie antes de trabajar
- Fisuras de tensión residual debido a la formación de flujo
- Daños debidos al cizallamiento, perforación.
- Daño por sobrecalentamiento
- Fisuras por corrosión por esfuerzo debido al uso de lubricantes inadecuados
- Transformación de fase incompleta en un tratamiento térmico
- Materiales no templados correctamente
- Falta de fusión en la soldadura
- Inclusiones de escoria o Corrosión debido a una limpieza inadecuada antes de pintar

3.3. Montaje en Fábrica / Instalación en el Sitio

El montaje puede ser considerado como la fabricación en sitio. Puede que todos los productos se diseñen bien utilizando excelentes materiales, pero si se encuentran defectos durante el proceso de fabricación que no son corregidos los cuales pueden repercutir en errores durante

el montaje de un sistema en el sitio. En ocasiones se requiere que las tolerancias del ensamble presenten una precisión alta, ya que alguno de los elementos de unión puede presentar desalineamiento generando así un mayor esfuerzo que llevaría a la ruptura del material [29].

En algunas ocasiones, defectos que no fueron previstos en la etapa del diseño y no fueron visibles en la etapa de fabricación, generan defectos en el montaje, personalmente, un defecto encontrado en el montaje de una torre de enfriamiento con estructura metálica, fue la unión con tensores de las columnas exteriores, dichos tensores se debían fabricar derechos e izquierdos, para poder atornillarlos, en planos no se describió dicha opción. Durante la fabricación no se dieron cuenta porque no estaba anotado en los planos y en montaje se generaron errores. Esto conlleva a realizar más trabajo durante el montaje, más gastos y más materiales fueron desperdiciados. El ajuste no fue fácil, porque las piezas que debían coincidir con los agujeros hechos en las columnas, no se podían alinear perfectamente, aunque el defecto venía desde la etapa de diseño, se generaron muchos más arreglos en la parte de montaje. Esto invita a la reflexión de que todas las áreas deben estar en contacto constante para evitar que se generen este tipo de fallas.

3.4. Mantenimiento inadecuado

El mantenimiento se puede definir como un conjunto de acciones cuyo objetivo es mantener un artículo o restaurarlo para que este pueda realizar su función, en caso que haya sufrido algún daño que hizo que se requiriera una acción de mantenimiento. Un mantenimiento inadecuado puede generar fallas en pieza, herramientas o equipos, ya sea por malas conexiones eléctricas, piezas no ajustadas debidamente o por repuestos en mal estado o no encontrado en el mercado [8].

Para evitar daños permanentes en equipos y herramientas, se debe realizar periódicamente la inspección conducente al mantenimiento correctivo, el cual implica la realización de acciones correctivas para fallas que no son fáciles de detectar y que tienen consecuencias graves. Las acciones correctivas permiten generar cambios en diseño, procesos, procedimientos o materiales y de esta forma eliminar la deficiencia. El objetivo del desarrollo de una acción correctiva está en poder eliminar la causa de la falla. Algunos ejemplos de fallas son: Especificación de material incorrecta, instrucciones de mantenimiento inadecuadas, programación errónea del mantenimiento entre otros [25].

Se debe tener en cuenta para todo equipo, que por su uso normal se genera un desgaste normal del material y que puede ser corregido con un correcto mantenimiento preventivo, que de no ser realizado causaría un funcionamiento anormal del mismo, lo cual se considera como una falla. Siempre que una falla conlleve a una situación de funcionamiento inseguro, se debe poner en alerta al usuario para garantizar la inspección completa del sistema antes de

operarlo. Una herramienta más para evitar fallas, es el mantenimiento preventivo, el cual se efectúa en tiempos específicos ya agendados, que se relacionan con los tiempos de duración de servicio de los equipos y antes que ocurra una falla se realizan en sitio las "paradas técnicas". Es muy importante la generación de un programa de mantenimiento adecuado dado que la ausencia total de éste o su implementación inadecuada, afectan de la misma forma la seguridad del personal operativo [10, 24].

3.5. Teoría de falla de los metales

La falla de un elemento se refiere a la pérdida de su funcionalidad, es decir cuando una pieza en particular que integra un sistema o la maquinaria pierde su vida útil, dentro de esa determinación existen varias consecuencias tales como fractura ó distorsión permanente [1].

La fractura ó distorsión permanente se deben a que los esfuerzos soportados son mayores que la resistencia del material fabricado. La falla de los materiales puede producirse en los procesos de conformado, mecanizado, fundición, soldadura o tratamientos térmicos. Los errores de operación se refieren al establecimiento de condiciones de operaciones diferentes a aquellas especificadas en el diseño, por ejemplo sobrecarga, vibración o sobrecalentamiento. La inadecuada selección de materiales se relaciona con la adquisición de materiales distintos a los recomendados en el diseño de la pieza [29].

La Figura 3-1 ilustra la conjunción de diversos factores que afectan las diversas propiedades del material en el uso de una válvula de fundición de hierro para una aplicación que requiere una de acero. Las fallas ocurren cuando los defectos o errores mencionados provocan la aparición de fenómenos de degradación en los materiales. Entre estos se puede mencionar la fatiga, la termofluencia, la corrosión y la erosión. Para poder determinar la cantidad de esfuerzo que debe ser aplicado para que se produzca una falla, se implementan las teorías de falla, las cuales hacen referencia a la comparación del esfuerzo actuante contra el esfuerzo resultante aplicado a pruebas de tensión, compresión o prueba axial [13].

3.6. Modos de falla

Un modo de falla es una causa de falla o una posible manera en la que un sistema puede fallar. Cuando un sistema tiene muchas maneras posibles de fallar, tiene múltiples modos de falla o riesgos que compiten. Mientras más complejo es un sistema, más modos de falla tendrá. En realidad los sistemas y componentes mecánicos no siguen un modelo de causa-efecto, pues una sola causa puede tener múltiples efectos y una combinación de causas puede tener un solo efecto o múltiples efectos. Con el tiempo un modo de falla está entre una causa y un efecto, por lo que en algunas ocasiones es difícil identificar si una causa es una

MODO DE FALLAS	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES										
	RESISTENCIA A LA TRACCION	RESISTENCIA A LA FLUENCIA	RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO	LIMITE ELASTICO	PROPIEDADES DE FATIGA	DUCTILIDAD	ENERGIA DE IMPACTO	TEMPERATURA DE TRANSICION	MODULO DE ELASTICIDAD	POTENCIAL ELECTROQUIMICO	DUREZA
FATIGA POR CORROSION					■					■	
CORROSION GALVANICA										■	
RENDIMIENTO BRUTO			■	■							
PANDEO		■									
FRACURA POR FRAGILIDAD											
FATIGA CICLO BAJO					■		■	■			
FATIGA CICLO ALTO	■				■						
FATIGA POR CONTACTO		■									
CORROSION										■	
CORROSION BAJO TENSION	■									■	
FRAGILIZACION POR HIDROGENO	■										
DESGASTE											■
FATIGA TERMICA											

Figura 3-1: Propiedades de los materiales y los modos de falla que sufren.

causa, un modo de falla o un efecto. Cuando sucede un evento, es decir un daño o se presenta alguna falla, se puede definir si es exactamente una causa, un efecto o un modo de falla [29].

Existen múltiples tipos de fallas y estas se presentan tanto en el análisis del diseño como en el análisis del proceso, por ejemplo: "Fallas en el diseño/"Fallas en el proceso". Un efecto de la falla puede considerarse como el impacto en el cliente o en el proceso siguiente, cuando el modo de falla se materializa. De modo que en este caso la falla es la forma en que un producto o proceso puede afectar el cumplimiento de las especificaciones, afectando al cliente, al colaborador o al proceso siguiente [15].

3.7. Falla a elevada temperatura

Éste es posiblemente el tipo de falla más complicado debido a que varios modos de fractura pueden interactuar. Normalmente en condiciones estáticas a temperatura ambiente, la resistencia a la fluencia representa la resistencia mecánica del material. Sin embargo a medida que la temperatura del material aumenta, este valor es afectado debido a la constante dependiente del tiempo durante el proceso de deformación dependiente del tiempo bajo esfuerzo a alta temperatura denominado *creep*.

A elevadas temperaturas la vida de un componente metálico es predeciblemente limitada cuando esta sujeto tanto a cargas estáticas como a cargas dinámicas. En contraste la vida de un elemento metálico a baja temperatura en ausencia de un ambiente corrosivos limitado por su resistencia estática (si el esfuerzo no excede el esfuerzo de fluencia del material). Dentro de los tipos principales de fallas a altas temperaturas se encuentran *creep*, fatiga de alto y

bajo ciclaje, fatiga térmica por sobre carga y combinaciones de estas. La falla del material puede ser afectada por el nivel de esfuerzo, tiempo, temperatura y ambiente corrosivo, lo cual se refleja en cambio de la microestructura.

La resistencia a la fatiga del material decrece con el aumento de la temperatura. En algunos casos un componente mecánico puede operar a elevadas temperaturas bajo condiciones de esfuerzo estables en el tiempo o en condiciones de carga fluctuante. En este caso los esfuerzos combinados de *creep* y fatiga resultan en disminución de la vida en servicio a alta temperatura en comparación con la vida en servicio alcanzada con la aplicación del *creep*. Algunos factores como la oxidación, esfuerzos aplicados, frecuencia de la carga cíclica, deformaciones y patrones de fractura superficial deben ser considerados.

Durante la fatiga térmica se presenta agrietamiento como resultado de los ciclos de calentamiento y enfriamiento los cuales redundan en cargas por la deformación alternada de la expansión y contracción del material. Los ciclos térmicos podrían ser causados por la fricción seca entre superficies como en las bandas y pastillas de los frenos de los automóviles, así como en la prensa y el disco de un embrague. En algunos componentes metálicos como los exostos alcanzan temperaturas superiores a los 900°C, lo cual genera esfuerzos residuales en el material cuando este se enfría y no se permite la deformación del material mediante juntas metálicas [29].

La exposición de la superficie del metal al calentamiento en una atmósfera oxidante, es conocido como escalado (*scaling*). Dado que se presenta corrosión en la superficie metálica, una vez el material se enfría, las hojuelas del óxido metálico se contraen en menor medida que la base metálica lo cual causa el descascarado de la superficie corroída. Algunos metales como los aceros inoxidable ferríticos presentan una buena resistencia a la oxidación a altas temperaturas comparable con la resistencia que presentan los aceros inoxidable austeníticos. La oxidación en los aceros inoxidable es una función de factores como la atmósfera, temperatura, tiempo de exposición y el tipo de esfuerzo aplicado (estático-dinámico). Los exostos normalmente han sido fabricados con acero inoxidable ferrítico clase 409, en el que la expansión y contracción del metal base y del óxido metálico son similares [2].

3.8. Corrosión uniforme

La corrosión es un proceso natural que se rige por leyes termodinámicas lo cual implica que el metal de forma espontánea intenta mantener el estado óxido que le representa el menor estado energético. El metal sufre un proceso de corrosión con el fin de alcanzar el estado de menor energía. Debido a que la corrosión implica el contacto físico del metal con el ambiente corrosivo, es necesario establecer tanto la naturaleza del comportamiento del metal inmerso en un ambiente corrosivo, así como la agresividad del proceso corrosivo que genera un am-

biente específico sobre un material en particular [29].

Dentro de los diferentes mecanismos de corrosión, este es el más común dado que existe sin la presencia obvia de un par galvánico. Este mecanismo es en realidad el resultado de la formación de una celda galvánica microscópica en la superficie del metal. Ocurre debido a las diferencias químicas locales en el metal, generando que hayan ánodos y cátodos microscópicos disponibles para generar la corrosión. Este mecanismo de corrosión puede prevenirse mediante el uso de pinturas y recubrimientos superficiales que prevengan el contacto de la superficie con el ambiente. Además pueden utilizarse recubrimientos óxidos como en el caso del anodizado del aluminio. Sin embargo, estos recubrimientos no son efectivos si hay rayaduras y hendiduras en la superficie o si existe picadura (*pitting*) en el metal debido a la presencia de haluros o cloruros [1].

La superficie metálica también puede recubrirse con un metal más activo (menos catódico) en un proceso conocido como plateado (*plating*), el cual es efectivo durante largo periodos de tiempo. No obstante, la aplicación de un metal más catódico es perjudicial dado que si el electrólito alcanza en alguna circunstancia el metal base, se presentaría la situación de una celda galvánica con un ánodo grande en contacto con un cátodo pequeño lo cual acelera el proceso corrosivo [2].

Otra forma de prevención de este mecanismo de corrosión es mediante la técnica de revestido (*cladding*), la cual es utilizada en la elaboración de monedas o en aleaciones de aluminio estructural, en la que dos metales recubiertos se colocan en contacto; uno de los metales presenta una mayor resistencia a la corrosión y el otro metal presenta una mayor resistencia mecánica. Finalmente el metal puede dejarse oxidar libremente, como en el caso de los rieles del ferrocarril. En estos, las superficies laterales y la superficie inferior son humedecidas con una solución de aceites para prevenir su corrosión, mientras que la parte superior que esta en contacto con las ruedas de los vagones soporta grandes esfuerzos mecánicos y permanece sin recubrimiento.

3.9. Corrosión por hendidura

Este mecanismo de corrosión se presenta debido a la presencia de una concentración diferencial de oxígeno en la celda galvánica. Una hendidura o junta se presenta entre dos superficies o el metal bajo la humedad con contaminantes, los cuales presentan mayor probabilidad de corroerse que el metal expuesto fuera de la junta. La región de contacto, donde hay poco oxígeno es anódica y se corroerá, mientras que la región expuesta a una mayor concentración de oxígeno es catódica y esta protegida. Dentro de los modos de control de este mecanismo de corrosión se encuentran la eliminación de juntas remachadas y pernadas, sin embargo la

soldadura que se aplique en esta zona puede dañar los recubrimientos aplicados. Además es posible drenar la humedad y limpiar periódicamente las zonas en las que se presentan hendiduras o juntas. Asimismo es recomendable la utilización de sellos no absorbentes como sellos de caucho o de plástico.

3.10. Corrosión bajo esfuerzo

Esta forma de fractura metálica presenta una fragilización del metal debido a la corrosión y la presencia de esfuerzos mecánicos que fomentan el agrietamiento. El agrietamiento que se presenta puede ser intergranular o transgranular dado que la grieta crece gradualmente cuando alcanza un tamaño crítico. La presencia de concentradores de esfuerzo puede causar la falla frágil repentina del material. El primer caso documentado de este tipo de falla se presentó en la India en los años 1800 durante la colonización británica. La armada británica acostumbraba almacenar las municiones de los fusiles fabricadas con latón Cu-Zn (70-30 %, latón de cartuchería), cerca de las caballerizas. Se encontró que los cartuchos se agrietaban durante su almacenamiento debido a la presencia de amoníaco (aminas y nitrato de mercurio) en el ambiente producto de la descomposición del estiércol bovino.

Dentro de las principales características del SCC se encuentra que algunos metales y aleaciones son afectados por solo ciertos ambientes. Adicionalmente se ha establecido que los metales puros son menos susceptibles que las aleaciones tales como las aleaciones binarias (Cu-Zn), (Cu-Au), (Mg-Al). De otra parte, la protección catódica ha sido efectiva en la prevención de inicio de la SCC, sin embargo si la propagación de la SCC ha progresado, mediante este mecanismo puede ser disminuida su razón de avance, pero realmente su avance continuará hasta que se consolide la falla del material. Ciertos factores como el tamaño de grano, estructura cristalina y número de fases influyen drásticamente la susceptibilidad del material al agrietamiento bajo la presencia de corrosión y esfuerzo.

Los aceros inoxidable pueden ser susceptibles a SCC durante los procesos de soldadura, dado que el cromo presente en el material tiende a formar carburos complejos de cromo en las fronteras del grano. Para contrarrestar esta situación, se aconseja utilizar aceros inoxidable con bajo contenido de carbono con el fin de limitar la formación de los carburos. Asimismo puede adicionarse titanio, el cual presenta mayor facilidad para la formación de carburos, al igual que el columbio y el tantalio (aceros tipo 321-347 formados de 304SS).

La aplicación de granallado (shot penning), permite la formación de esfuerzos residuales superficiales en el material, los cuales contribuyen a minimizar los esfuerzos de tensión durante el servicio necesaria para iniciar el agrietamiento en presencia de ambientes corrosivos.

Normalmente la superficie de fractura de una falla por fatiga presenta una textura suave en la región de origen y gradualmente se hace más rugosa hacia la región de ruptura final. No obstante, este cambio no es visto en una fractura SCC o en las fallas por agrietamiento por hidrógeno que presentan características similares. Resulta necesario realizar una investigación acerca del origen de la grieta, patrones de agrietamiento, evidencia de poca o nula corrosión en la superficie, características microscópicas (aleación, tratamiento térmico, esfuerzos aplicados, patrones geométricos, tiempo de aplicación de las cargas en servicio, condiciones ambientales y temperatura).

3.11. Corrosión-Fatiga

Esta falla se presenta cuando existe una sollicitación mecánica repetida sobre el material en presencia de ambientes corrosivos que se caracteriza por una menor vida en servicio. Mientras mayor sea la exposición de la abertura de la grieta a las condiciones corrosivas, mayor será el efecto del ambiente en acortar la vida en servicio. La iniciación de la grieta ocurre desde las picaduras presentes en la superficie corroída. En otros casos la grieta se inicia en la superficie y después la presencia del agente corrosivo que ingresa a la grieta debido al efecto capilar como la humedad, acelera el crecimiento de la grieta. A partir del examen de este tipo de fallas se observa que el origen está normalmente más corroído que las superficies adyacentes, con lo cual podría establecerse el tiempo que ha transcurrido desde la iniciación de la grieta.

Dentro de los mecanismos de prevención de este tipo de grietas se encuentra la aplicación de pinturas y recubrimientos con la adición de inhibidores químicos. La aplicación de procesos mecánicos como el granallado (shot-penning) que induce esfuerzos residuales de compresión sobre las superficies, también la aplicación de procesos como el rolado de laminas y ejes induce esfuerzos superficiales de compresión específicamente en los lugares donde los esfuerzos dinámicos podrían inducir la falla.

La fatiga es una de las principales causas de las fallas en maquinarias, considerando que los elementos mecánicos normalmente están sometidos a la acción de fuerzas externas e internas denominadas, cargas estáticas y dinámicas, las cuales generan esfuerzos alternantes, repetidos y fluctuantes sobre el material del cual está compuesto el elemento de la máquina.

4 Fundamentos - Análisis de Causa Raíz (RCA)

4.1. Análisis de falla

El análisis de una falla es un proceso metodológico que busca determinar las raíces físicas de las fallas mecánicas. El proceso puede llegar a ser complejo, e incluye diferentes disciplinas técnicas mediante la observación, inspección y técnicas de laboratorio. En un correcto análisis de falla es vital examinar y analizar la evidencia para encontrar de la mejor manera las causas que hicieron que se produzca la falla. Como en una empresa, es necesario tener la colaboración con expertos de otras disciplinas para poder integrar y realizar un análisis de la evidencia con explicación de resultados e información de antecedentes sobre todos los factores que han colaborado en la terminación del producto o servicio y de esta forma encontrar en qué punto el producto o material o servicio ha fallado [2].

4.1.1. Perfil del Analista de fallas

Para poder definir un perfil de un analista de fallas, se debe tener en cuenta que debe poseer un buen conocimiento en muchos conceptos, de forma que el analista llega a usar muchas de las herramientas que tiene para demostrar de donde procede la falla, y poder detenerla a tiempo o demostrar donde estuvo el error cuando ya ocurrió la falla [1].

El analista honesto faculta a los implicados para emitir una declaración de los factores involucrados en permitir las condiciones que promovieron la probabilidad de la falla. Esto sigue siendo una tarea útil, tal vez más útil que algo que ponga "culpa" sobre un individuo o grupo en particular. Entender todos los factores que llevan a una falla puede llevar a comprender las herramientas requeridas para mejorar la duración de productos, equipos o estructuras. La comprensión va más allá del conocimiento de los hechos. Este proceso integra todos los hechos y ayuda al individuo a analizarlos y comprenderlos para convertirlos en conocimiento y luego en productos y/o procesos de mejora.

Una falla pequeña puede analizarla una sola persona con formación básica en la evaluación visual de los objetos de ingeniería. Pero para llegar más a fondo de las fallas de productos y procesos se requiere más experiencia. Igualmente, las personas que realizan análisis de fallas

deben conocer los aspectos legales ya que el análisis de cualquiera que sea su tipo, presenta implicaciones en este campo y es tomado como evidencia científica en disputas legales, dado que el analista de falla debe ser capaz de darse cuenta en que está fallando y como puede llegar a solucionarlo si es posible darle solución [13, 1].

La comunicación es vital para un analista de fallas, dado que le permite comprender todas las funciones, procesos, materiales, usos de los productos a fabricar para realizar todos los análisis, pruebas y técnicas de acuerdo a las características de cada elemento, por ello requerirá la colaboración de todo el personal que esta incluido en la realización de un proyecto [26].

4.1.2. Objetivos del análisis de falla

El análisis de fallas tiene como objetivo determinar las causas que provocan ciertos daños (en especial las averías repetitivas y las que son más costosas) para realizar medidas preventivas que permitan que las fallas no se presenten de nuevo. Es importante destacar la doble función en el análisis de fallas: Determinar las causas de una falla y establecer medidas que eviten las fallas, luego de determinar las causas [29].

Los buenos resultados en los mantenimientos suceden, por estudiar los incidentes que ocurren en la planta y dar prontas soluciones para que estas no ocurran. Por ejemplo cuando se rompe una elemento mecánico y se realiza el cambio por un elemento similar, más no igual, se actúa sobre el síntoma y no sobre la causa que produjo la falla. No obstante, si una pieza se rompe es necesario cambiarla: pero si el objetivo es retrasar o evitar la falla es necesario estudiar la causa y actuar sobre ella [7].

El objetivo o propósito de un proyecto de análisis de falla se describe como la prevención de una falla recurrente. Un ejemplo de estos tipos de proyectos es cuando se presenta un evento por lesiones, en este caso es importante asignar la responsabilidad de un evento no deseado. Hay otros casos en los que no hay recurrencia es decir que no se presentara daños repetitivos si el elemento que falla es único. Cuando ocurre un caso en el que se presenta una falla muy pequeña y de muy poco valor sin fallas subsecuentes, se dificulta realizar un proyecto orientado a la prevención porque puede ser más económico vivir con un pequeño nivel de falla que dedicar recursos a la prevención [14].

Al principio de cada investigación, los que tienen interés deben determinar exactamente cuál es su objetivo ó objetivos. Si las partes tienen un deseo genuino de evitar recurrencias, aunque no tengan obligación legal de hacerlo, todavía tienen que decidir hasta dónde quieren ir hacia este objetivo. Las consideraciones económicas y temporales generalmente determinan el alcance de la investigación.

4.2. Principales causas físicas de la raíz de falla

Las causas raíz físicas de la falla en diversos componentes mecánicos se identifican en cuatro categorías fundamentales: Deficiencias de diseño, Defectos en los materiales, Defectos de fabricación/instalación y Anomalías en la vida útil. Una representación gráfica efectiva del impacto de los defectos en la vida útil de un componente o sistema se proporciona en el diagrama de la Figura 4-1 en el cual se representa la influencia de la geometría de un elemento mecánico respecto al tiempo de vida útil esperado antes de que suceda la falla [17].

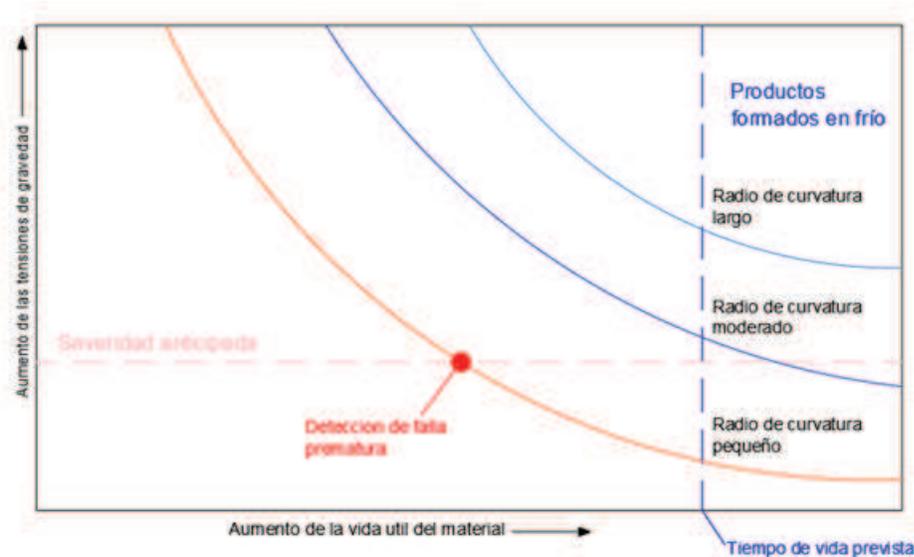


Figura 4-1: Diagrama de aplicación vida útil de los componentes mecánicos [2].

El diagrama se construye trazando la vida útil de los componentes con las características específicas en el diseño/configuración, en relación con la severidad de una condición de servicio específica que es prevista para la aplicación. Las características típicas incluyen resistencia, resistencia a la corrosión, estado del tratamiento térmico, el tamaño de las muescas iniciales, el acabado de la superficie, el radio de curvatura, el contenido de vacíos durante el colado y solidificación de una pieza fundida, el grado de sensibilización y así sucesivamente. Los ejemplos de las condiciones de servicio incluyen la magnitud de la tensión (dinámica ó estática), la temperatura de exposición, la agresividad del ambiente, exposición a la radiación, tensión eléctrica, etc [15].

Por otra parte, un análisis de árbol de fallas es un análisis deductivo, que identifica un evento superior, es decir evalúa el caso de una falla, y luego pasa a evaluar todas las maneras creíbles en las que este evento podría haber ocurrido, identificando las interrelaciones de eventos o

condiciones básicas que conducen a la falla. El árbol se organiza identificando todas las cadenas de eventos que conducen al evento superior y conectándolas con una "puerta" que representa la relación lógica. La Figura 4-2 muestra un árbol de fallas simplificado, con un ejemplo referente a un perno [2].



Figura 4-2: Ejemplo simplificado de árbol de fallas [2].

Los elementos básicos del evento y la gráfica de factores causales (Figura 4-3), son la evidencia de los eventos primarios, eventos secundarios y condiciones. Los acontecimientos constituyen la columna vertebral del gráfico, mientras que las condiciones, son circunstancias pertinentes a la situación. El objetivo del análisis es identificar las principales fallas de equipos, fallas de proceso o errores humanos que permitieron que ocurriera el evento de pérdida a falta de controles establecidos. Una vez establecida la secuencia se identifican los factores causales. Estos se identifican como los factores que si se eliminaran o si se hubieran controlado desde el inicio de los procesos, hubieran evitado la ocurrencia o disminuido la gravedad del evento de pérdida [12].

De igual forma un análisis de causa y efecto es una forma de relacionar las causas con una falla en un intento de encontrar la causa raíz. Las causas pueden ser problemas de diseño, rendimiento humano, mala fabricación, etc. Un simple análisis de causa y efecto puede tomar la forma de un diagrama de espina de pescado (Figura 4-4) que puede construirse a través del análisis de las posibles influencias que generaron factores externos sobre la falla del elemento mecánico en cada aspecto relevante durante el diseño, fabricación, operación y mantenimiento del mismo [29].

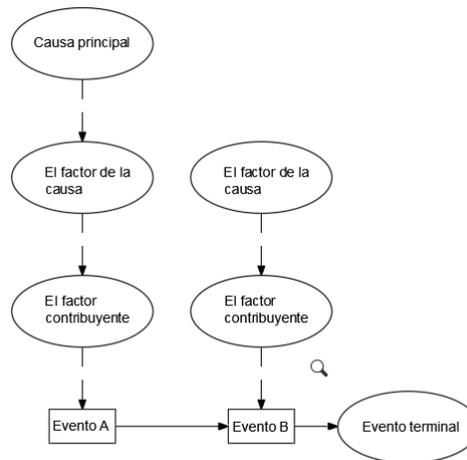


Figura 4-3: Gráfico del evento simplificado y factor causal [2].

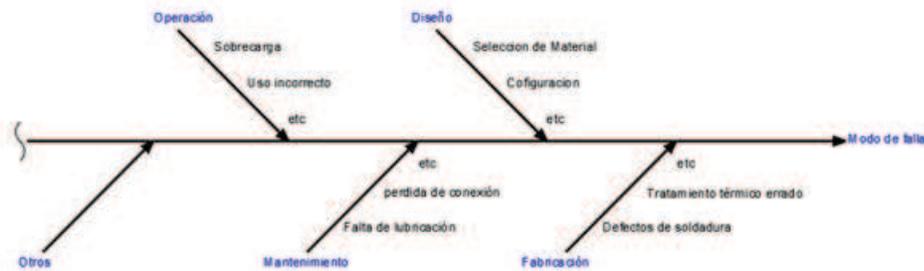


Figura 4-4: Diagrama de espina de pescado [2].

Para lograr unificar los conceptos y constituir un diagrama que integre claramente el análisis de las causas de falla, podemos realizar el siguiente procedimiento: 1. Describir claramente el fallo en el lado derecho del diagrama. 2. Identificar las principales categorías de causas como ramas que convergen en la falla. 3. Hacer una lluvia de ideas y enumerando todas las causas en cada rama. 4. Analizar los datos hasta que se identifiquen las causas raíz. De esta manera será mucho más fácil buscar los puntos estratégicos que se deben prevenir antes de que se presente la falla en elementos mecánicos [11].

4.3. Análisis de causa raíz - RCA

Este método permite resolver problemas presentados durante la falla del material identificando las causas y acontecimientos. Esta práctica plantea que los problemas se resuelven mejor eliminando la causa principal del problema y no los inconvenientes que se presentan

en el momento. A través de esta metodología se detecta y solucionan los problemas, es decir que actúa cuando el evento ya ha ocurrido. Usando de la manera correcta este método se puede prever el suceso de algún evento antes que ocurra. Este sistema está acompañado de tres aspectos: Problema, causa, cómo prevenirlo. Existe una clasificación según su origen: - RCA basado en la seguridad- RCA basado en la producción - RCA basado en el proceso - RCA basado en la falla - RCA basado en los sistemas.

Dentro de esta clasificación hay algunos principios que abarcan este método: 1. Realizar la ejecución de medidas de mejoramiento en las causas raíz. 2. El RCA debe realizarse de forma sistemática, con conclusiones y causas respaldadas por pruebas documentadas. 3. Generalmente hay más de una causa potencial de un determinado problema. 4. El análisis debe establecer todas las relaciones entre la causa(s) y el problema. 5. Análisis de causa raíz reacciona a los problemas resolviéndolos antes de que se intensifiquen, creando una reducción de la variabilidad además de una actitud para evitar riesgo [28]. Para este caso el análisis de causa raíz, permite verificar porque las muestras fallaron y encontrar la causa principal, dejando como conclusión la acción correctiva que se puede realizar para que dichas piezas o muestras no vayan a fallar en el futuro y que si en algún momento llega a ocurrir una falla se puedan determinar realmente las causas. Este método permite realizar un completo análisis de principio a fin para verificar e investigar todos los acontecimientos sucedidos en dichas piezas, desde el comienzo de su falla hasta la ruptura total de la pieza [20].

4.4. Metodología del análisis de falla

4.4.1. Inspección visual

La inspección visual es una actividad realizada en los sectores industriales y se le reconoce como ensayo no destructivo. La razón por la cual se le reconoce como no destructivo, es porque no produce ningún daño a los materiales. Si se revisa cada proceso industrial se verifica que no existe ningún proceso en el cual la inspección visual no se encuentre presente. Este tipo de inspección es simple y su costo operativo no es alto, sin embargo, requiere de una buena técnica y estudios realizados sobre inspección que se deben aplicar correctamente de acuerdo a los parámetros técnicos especificados.

El examen visual o prueba (VT) es un método de inspección simple, no destructivo, accesible y de bajo costo que permite detectar discontinuidades superficiales en los componentes a estudiar [2]. Para ello se emplea el ojo humano que sin ayuda posee una profundidad admirable de enfoque y la capacidad de examinar grandes áreas rápidamente, detectando cambios superficiales visibles en el espectro de longitud de onda asequible para este órgano del cuerpo humano. Se recomienda que el ojo este a menos de 6 pulgadas (150 mm) de la superficie a examinar y en un ángulo no inferior a 30° respecto a la superficie a examinar [23].

El chequeo visual puede llegar a revelar concentraciones de tensiones, imperfecciones, presencia de recubrimientos superficiales, regiones endurecidas, soldaduras, residuos adheridos, evidencia de corrosión, cambios de color en la superficie, abrasión y marcas de fricción, porosidad, grietas, inclusiones entre otras, también se pueden dar indicios en la calidad de mano de obra en la fabricación del componente así como cualquier abuso que este podrá haber experimentado durante su servicio [12].

4.4.2. Ensayos de dureza

La dureza es una condición de la superficie del material, se entiende por la resistencia superficial a la deformación de un elemento. A partir de los ensayos de dureza se puede obtener información de las características mecánicas del mismo material que al mismo tiempo se relacionan con las propiedades elásticas y plásticas [29].

Los ensayos de dureza se realizan para realizar una comparación del material a analizar con otros. Este consiste en producir una deformación a la pieza a través de un indentador y realizar las respectivas mediciones. Los procesos de preparación de la muestra son relativamente sencillos, rápidos y ocasionalmente no destructivos [3].

Resistencia a la indentación permanente bajo cargas estáticas o dinámicas (dureza por penetración): aquí se usan varios métodos en los cuales se diferencia la forma de los penetradores, tanto en la carga aplicada y la forma como se expresa el valor de la dureza [4].

Dureza Rockwell

Mediante este ensayo mecánico se determina la dureza del material a través de la profundidad de la penetración obtenida durante el ensayo, bajo la aplicación de una carga estática dada. Este ensayo no necesita el uso de alguna fórmula, el resultado se obtiene de la lectura del indicador de la máquina con la cual se realiza el ensayo. Cuando se aplica la carga al material, el material fluye plásticamente realizando una penetración, luego de retirar la carga el material se recupera elásticamente y el resultado aparece en la máquina en la cual se realiza el ensayo como se observa en la figura 4-5.

4.4.3. Ensayo metalográfico

Si se habla de metalografía, se define como la ciencia que estudia las características estructurales o la constitución de metales y aleaciones y relacionar las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los mismos. Este análisis puede dar a conocer los diferentes tipos de

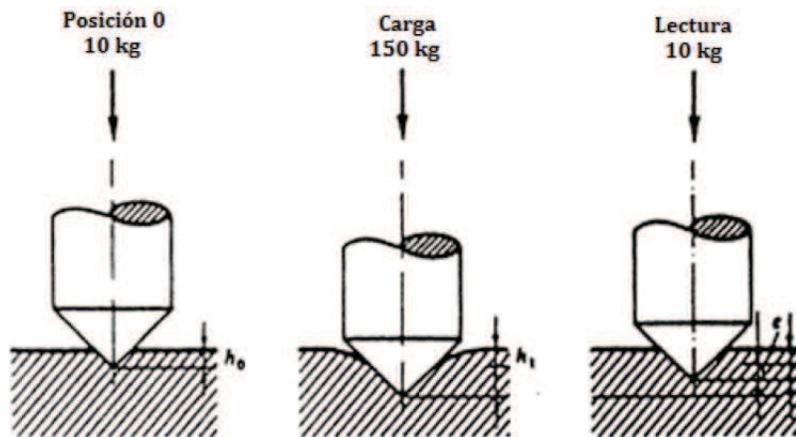


Figura 4-5: Profundidad de penetración por el método Rockwell [4].

tratamientos térmicos que le han realizado al material de la pieza que está bajo análisis. Este estudio tiene por finalidad determinar las características tales como: tamaño de grano, distribución de las fases que comprenden la aleación, inclusiones, sulfuros, silicatos, aluminatos y óxidos presentes en la microestructura del material que pueden llegar a afectar la resistencia mecánica del material [5].

También este tipo de pruebas se puede aplicar si estas han sufrido algún tipo de deformación o han fallado por algún motivo durante su funcionamiento. A partir de este se puede obtener un diagnóstico. De igual forma se pueden realizar antes que el material vaya a cumplir la función destinada, para así evitar inconvenientes que se puedan presentar durante las pruebas. Para el ensayo se hace una extracción, luego una preparación y un ataque químico, para realizar la observación microscópica. Si la preparación no se hizo de manera correcta, puede influir en el resultado y es posible que en el caso de tratamiento térmico quitar alguna capa si está ha sufrido calentamiento excesivo [1, 5].

5 Inspección Visual

5.1. Historial de las piezas

5.1.1. Válvulas de culata

Las válvulas de Culata fueron suministradas por el taller automotriz servicio J. Jiménez, directamente por el departamento de mantenimiento, estas fueron obtenidas de la reparación de vehículos de alta gama. Su funcionalidad dentro del sistema automotriz se relaciona con motores de inyección directa turbo cargados, con un promedio de trabajo de 5 a 6 horas diarias, posteriormente el vehículo presentó deterioro a la correa de repartición lo cual conllevó al desajuste de los tiempos de cierre y apertura de las válvulas de escape, ocasionando la falla catastrófica del motor.

5.1.2. Copa hexagonal

La copa hexagonal fue entregada por el taller de servicios Gishi-Motors que está ubicado diagonal a la universidad, la funcionalidad de esta pieza estaba destinada para realizar mantenimientos correctivos, preventivos y reparativos, según la información de los técnicos a cargo del área, y según la investigación preliminar que se realizó, se reportó una caída de la pieza por uno de los funcionarios, generando un impacto directo con el piso, lo cual posibilitó el inicio de la propagación de la fractura en el cuerpo del eje, el estudio determinó el punto de partida, y los análisis reflejaron los puntos críticos afectados en la pieza.

5.1.3. Eje de salida de potencia

El eje fue retirado de una motocicleta dentro del marco realizado de su mantenimiento preventivo, según la inspección preliminar ejecutada, la falta de lubricación, dio paso a una decoloración de la pieza, lo cual imposibilitó seguir ejecutando sus funciones correctamente, se observa que la afectación va directamente relacionada a la caja de cambios, lo cual determinó el retiro de la pieza, para realizar el respectivo análisis causa raíz evaluando más a fondo las causales de su falla.

5.2. Pieza A/B-Deformación térmica y plástica

La deformación térmica de un material, se presenta cuando este es sometido a un cambio de temperatura y sus características iniciales tienden a experimentar cambios, los cuales se reflejan en su deformación axial, la cual es denominada deformación térmica. Comúnmente los programas de software permiten realizar análisis térmicos los cuales nos permiten determinar la transferencia de calor y los perfiles de temperatura. Si el proceso es controlado regularmente no se presentara la deformación, pero por lo general se puede presentar un esfuerzo al que se le conoce como esfuerzo térmico. Por lo general la discusión se limita sólo a aquellas áreas en las que se afectan la integridad estructural del elemento, pero a medida que los componentes de ingeniería se someten a cambios de temperatura externos o internos, se pueden alterar varios factores.

En primer lugar la temperatura en todo el componente cambia. El perfil de temperatura dependerá de variables tales como la geometría del componente, las propiedades térmicas del material y cómo se genera la transferencia de calor hacia el componente. En segundo lugar, a medida que la temperatura del componente cambia, se expandirá o se contraerá dependiendo del perfil de temperatura y del comportamiento de expansión térmica del material. Finalmente, las propiedades mecánicas del material, tales como el módulo elástico o la tenacidad a la fractura, pueden cambiar con la temperatura.

Por otra parte, la deformación plástica ocurre en un material cuando se aplica un esfuerzo localizado en alguna zona del material más allá de su límite elástico y el material presenta una deformación permanente cuando deja de actuar la carga. Si la deformación se presenta a temperaturas normales, se dice que es una deformación en frío, en consecuencia, se presentan características en el material que conllevan a la separación de sus partículas, generando la fractura y ruptura en los puntos donde se propició la deformación inicial. Las Figuras 5-1 y 5-2 ilustran este tipo de deformaciones en las válvulas de culata, las cuales presentaron deformación plástica debido a que de acuerdo con los técnicos que facilitaron las piezas, la correa dentada que transmite la potencia y controla los movimientos de apertura y cierre de las válvulas de escape falló, lo cual genero impactos sucesivos de los pistones contra las válvulas generando la falla catastrófica del motor.

En la Figura 5-1:Pieza A-1 corresponde a la deformación plástica de una válvula de culata, donde se evidencia su estado final después de haber sido sometida críticamente a un grado de deformación plástica del material donde bajo la aplicación de tensiones externas, se genero la flexión de los vástagos causando la falla. Normalmente, el cierre de las válvulas se debe a la acción de un resorte, cuya tensión debe ser suficientemente alta para cerrar la válvula rápidamente, aún en los altos regímenes y al mismo tiempo lo más baja posible para no dificultar en exceso la apertura de la válvula. Dado que se comprobó que tanto el

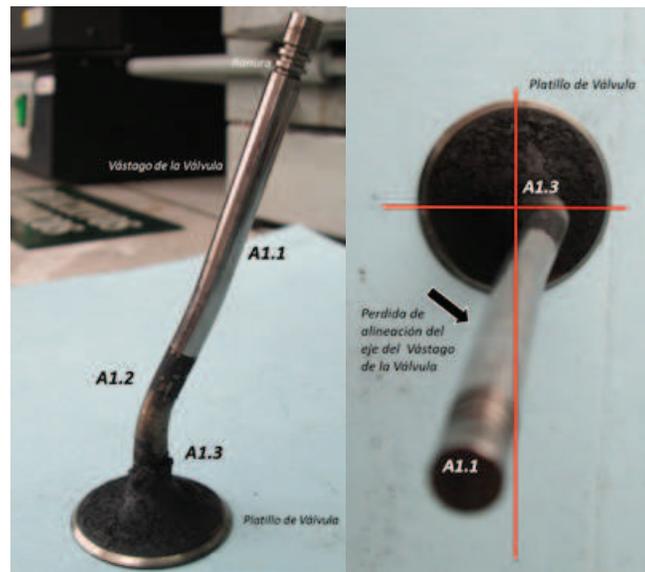


Figura 5-1: Pieza A/B - Deformación plástica de una válvula de escape.

cuerpo como la cabeza de la válvula son magnéticas, se establece que la válvula es de material mono-metálico, es decir puede estar constituido por un acero aleado con cromo y vanadio.

A1.1: La falta de tolerancia y lubricación entre el vástago de la válvula y la guía evidencia un rango por debajo del mínimo recomendado lo cual genera flexión y deformación extrema.

A1.2: El vástago se deforma dado que esta sometido a un brusco aumento de la carga como ocurre durante el funcionamiento del motor, bajo la acción de la fuerza de compresión puede experimentar una rotura de la pieza.

A1.3: Debido a la deformación plástica severa, provoca la deflexión entre el platillo y el vástago de la válvula, se genera una reacción lo cual identifica el punto donde se dispersa la deformación entre el vástago y el platillo de la válvula alterando la alineación de la pieza.

Es lógico pensar que en el transcurso del tiempo, los desgastes de las piezas móviles de un motor y las holguras aparecidas a consecuencia de ello, modifiquen substancialmente el funcionamiento del mismo, inclusive generando daños tan extremos como la ruptura por esfuerzo de las mismas, en este caso puntual se evidencia la Figura 5-2: Pieza A2, donde se diagnostica la rotura total del vástago debido a la carga mecánica de impacto soportada por la pieza.

A2.1: Observamos el punto donde ocurre la rotura principal de la válvula, evidenciando que debido al esfuerzo excesivo al que fue sometida, se genero un corte transversal agresivo que

permite observar la fractura interna del material de la guía de la válvula.

A2.2: La separación del platillo y el vástago de la válvula fue el resultado de una carga no controlada, dentro del proceso mecánico de funcionamiento de la pieza. Dado que si con anterioridad no se tuvo un control regulado dentro del mantenimiento de la misma y probablemente se fueron presentando grietas internas, poco a poco la tensión de tracción que se propaga en el centro de la pieza generara mayor probabilidad de que esta falle, en consecuencia se fractura por un punto donde se lograra concentrar la mayor tensión.



Figura 5-2: Pieza A2 - Ruptura por deformación plástica de una válvula de escape.

5.3. Pieza C-Ruptura de vástago de válvula de culata

El análisis de fallo es un proceso que se realiza para determinar las causas o factores que han conducido a una pérdida indeseada de funcionalidad de una pieza o componente mecánico. Se busca demostrar el hecho de cual fue la causa que ocasiono la ruptura del vástago de la válvula de culata ya que distintas teorías podrían definir cuales fueron las causas principales del fracaso de una manera bastante binaria: ¿era la parte defectuosa o fue abusada? Obviamente, hay muchos tipos de defectos, incluyendo los que vienen de un diseño deficiente, material inadecuado, o errores en la fabricación.

Las razones de esto están relacionadas con el hecho de que muchos de los "defectos" los que se quiere llegar en conclusión, son visibles en un microscopio de algún tipo. Aunque los microscopios pueden estar ampliamente disponibles, los conocimientos necesarios para interpretar las imágenes están menos disponibles. El otro tipo importante de defectos, los relacionados con cuestiones de diseño, también puede requerir la evaluación de un especialista en materiales. Las causas más frecuentes que se evidencian en las rupturas de las válvulas de escape se asocian con cargas anormales, golpes, exposición a velocidades excesivas y fatiga del material.

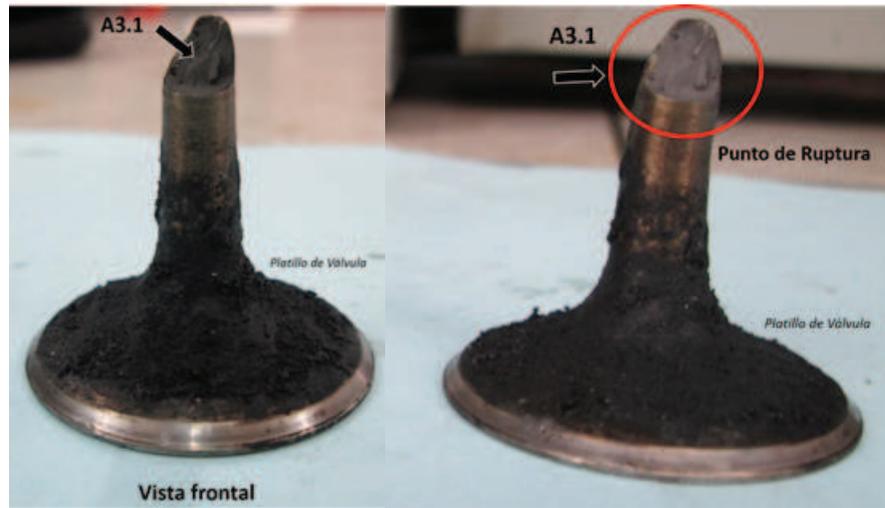


Figura 5-3: Pieza A2 - Ruptura por deformación plástica de una Válvula de culata.

A3.1: En el punto señalado la evidencia registra que la válvula de escape fallo debido a la exposición de temperaturas irregulares en los gases de escape, lo que genero la fatiga al metal, generando una corrosión en el vástago que propicio gradualmente el rompimiento del mismo. Debido a que se aplico un esfuerzo de tracción, la deformación comienza a ejercer flexión en el eje central del vástago, lo cual hace, que este pierda gran parte de su fuerza y el eje parcialmente agrietado termine su vida como un fallo de torsión seguido de la ruptura en caliente, en este caso el vástago se desprende de su posición inicial y genera un impacto drástico el cual logra desprender la pieza dividiéndola en dos partes, es obvio darse cuenta el punto donde fallo el eje de válvula y los puntos críticos que dejan la evidencia de la separación del vástago y el platillo de la válvula, cabe anotar que se evidencia una falta de mantenimiento a la válvula lo cual, aumenta las posibilidades a que este más propensa a presentar una falla.

5.4. Pieza D-Fractura en copa de cuadrante Hexagonal

Se usan varios términos para describir las imperfecciones superficiales e internas de un elemento mecánico. Una fractura es el resultado final de un proceso de deformación plástica excesiva al cual es sometido un material. Dependiendo del material y factores ajenos a este como la temperatura, la carga y el tiempo durante el cual es sometido el elemento, este puede llegar a una fractura, que se puede clasificar principalmente como súbita (también llamada frágil) ó una fractura dúctil, además, cada tipo de fractura presenta diferentes características en su aspecto, así como también en su microestructura. Se debe reconocer claramente que los materiales manufacturados siempre tienen algunas imperfecciones o discontinuidades que

pueden ser aceptables, si no interfieren con la utilidad o el servicio de una pieza.



Figura 5-4: Pieza A4 - Fractura sobre copa de cuadrante hexagonal de $\frac{1}{2}$ ".

A4.1: Observamos como se genera un punto de partida, donde se propaga la fractura de la pieza, afectando la integridad de la misma, se considera que la sección cilíndrica bajo carga axial, por ejemplo, las imperfecciones a lo largo de la línea central o en la superficie (Figura 5-4) son los lugares más probables de iniciación de la grieta. En ausencia de elevadores de tensión en la superficie, el inicio de la fisuración a partir de imperfecciones de fabricación es muy probable a lo largo de la línea central de una barra no entallada bajo carga de tracción. En este caso, si el agrietamiento se inicia en otro lugar, tiene que hacerlo porque el estrés local (residual y / o aplicado) fue mayor que a lo largo de la línea central, aunque puede haber excepciones. Algunas excepciones incluyen la distribución aleatoria de las grietas de temple excesivo en aceros en lugares donde la martensita se formó después del apagado o el agrietamiento de la cementita retenida en los límites de grano de acero de bajo carbono después del trabajo en frío. En la imagen inferior derecha, se observa la posición frontal de la pieza donde se genera la fractura, debemos tener en cuenta que todos los materiales y estructuras tienen defectos, pero estos solo son importantes si evitan que el componente no cumpla con el propósito al que fue diseñado, no obstante existen varios factores que pudieron intervenir en la aparición de la fractura, ocasionando las imperfecciones en la pieza mecánica.

A4.2: La propagación de la fractura en la pieza, genera imperfecciones que pueden llegar a afectar adversamente el rendimiento de una parte creando una muesca de gravedad des-

conocida, y si no son detectadas a tiempo, podrían alterar el funcionamiento general del equipo al que están integradas. En una sección cilíndrica bajo carga axial, por ejemplo, las imperfecciones a lo largo de la línea central o en la superficie son los lugares más probables de iniciación de la grieta. En ausencia de elevadores de tensión en la superficie, el inicio de la fisuración a partir de imperfecciones de fabricación es más probable a lo largo de la línea central de una barra no entallada bajo carga de tracción. En este caso, si el agrietamiento se inicia en otro lugar, tiene que hacerlo porque el estrés local (residual y / o aplicado) fue mayor que a lo largo de la línea central, aunque puede haber excepciones.

5.5. Pieza E-Cambio de coloración debido a calentamiento

Este tipo de deformaciones se evidencian en la Figura 5-5, (Deformación térmica de un eje de salida de potencia), el cual fue sometido a altos cambios de temperatura, generando un sobrecalentamiento en la pieza mecánica, esto generó una deformación térmica dentro del sistema que integra el eje, alterando sus propiedades mecánicas y generando fallas evidenciadas en la pérdida de potencia del mismo, adicional la falta de lubricación aumenta el riesgo de sobrecalentamiento lo cual da paso a la disminución de dureza del material reflejando un cambio estructural y alterando la función a la que fue destinada la pieza.



Figura 5-5: Pieza A5 - Deformación térmica en un eje .

A5.1-A5.2: Observamos el efecto gradual que propaga el calentamiento sobre el cuerpo del eje, el cambio de la coloración determina la alteración estructural con mayor propagación en la parte derecha del cilindro central del eje, la falta de mantenimiento y lubricación a la pieza acelera el proceso de desgaste, sumado a los esfuerzos a los que la pieza es sometida. En los análisis realizados se establece que la disminución de dureza corresponde solo a una de las

partes integrales del componente y como el resultado es parcial, la vida útil del mismo se hubiese podido propagar un poco más, pero el proceso de sustitución de la pieza al mecanismo fue inmediato.

6 Ensayos de dureza Rockwell

La ejecución y evaluación de los ensayos de dureza Rockwell en los componentes mecánicos para el análisis de falla, tiene como objetivo determinar si los fallos han causado cambios en las durezas superficiales en distintas zonas internas y externas de cada elemento, así interpreta la posible propagación del fallo y como estos cambios han afectado la resistencia del material a los esfuerzos sometidos bajo operación, por ende la provocación del fallo total o parcial del elemento.

Los ensayos han sido elaborados con el durómetro marca *Brooks Inspection Equipment* con una carga principal 150 kg, el cual posee el número de activo fijo 16500 (23580) del laboratorio de ensayo de materiales de la Fundación Universitaria Los Libertadores, Figura 6-1-(a). Dicho instrumento antes de ser usado en cada prueba, se sometió a inspección previa para verificar su calibración usando el patrón base de 61,8 HRC como lo muestra la Figura 6-1-(b) con este procedimiento previo se corroboran los resultados al medir su respectiva dureza como se aprecia en la Figura(c), en base a estos parámetros, se determina que los resultados obtenidos durante el procedimiento son correctos y verificables en cualquier momento que así se requiera. La normatividad internacional recomendada para el procedimiento de las pruebas de dureza en la cual se apoyo este estudio fue ASTM E18-15 [4].



(a) Durómetro

(b) Patrón de dureza 61.8 HRC

(c) Indicador de dureza

Figura 6-1: Durómetro utilizado y resultado de su calibración utilizando el patrón.

6.1. Pieza A/B- Vástagos de las válvulas

Para la realización de las ensayos de dureza sobre las piezas bajo análisis, se requirió preparar las piezas con anterioridad lo cual consistió en realizar un esmerilado por secciones opuestas ya que el cuerpo de estos vástagos es de forma cilíndrica. Una vez se alcanzó la condición de planitud en ambas secciones esmeriladas, se realizaron las mediciones de dureza en varios puntos, algunos de los cuales se indican en la Figura 6-2-c.

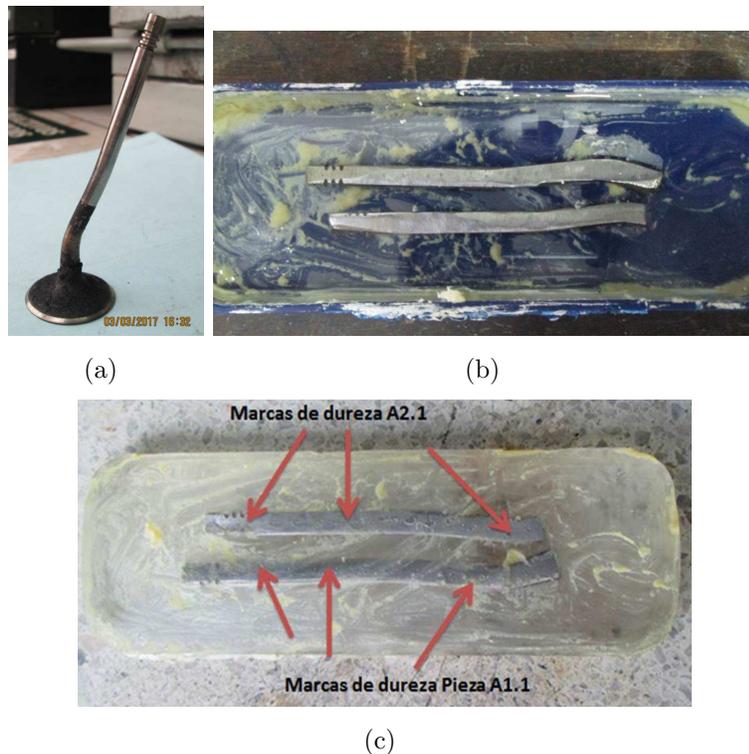


Figura 6-2: Procedimiento utilizado para la medición de dureza en los vástagos de las válvulas.

Los resultados obtenidos se registran en la Tabla 6-1, en la cual se observa una disminución significativa en los valores de la dureza en zonas más cercanas a la cabeza de la válvula. Esto es consecuente con el hecho que la cabeza de la válvula esta en contacto mayor tiempo con los gases calientes y por lo tanto el aumento de la temperatura en esta sección producto de la transferencia de calor en estas zonas tiene un efecto de reblandecimiento sobre el material.

Tabla 6-1: Mediciones de dureza hechos sobre los vástagos de las válvulas.

Distancia desde las cuñas	Dureza medida en los vástagos de las válvulas	
	Vástago Largo	Vástago Corto
0.5	56	57
1	55	35
1.5	55	37
2.0	39	34
2.5	41	34
3.0	42	37
3.5	41	34
4.0	38	37
4.5	35	34
5.0	34	41

¹ Unidades en HRC.

6.2. Pieza E- Eje de salida de potencia

Para poder evaluar como afectó la temperatura a la que fue sometida esta pieza en su dureza evidenciada en la figura (g), se debió seccionar el eje en dos partes; una evidentemente afectada por la temperatura y la otra parte como comparativo de dureza. Después de realizar dichos cortes, se le hizo el debido acabado superficial utilizando el limado manual para obtener superficies apropiadas para las mediciones de dureza.

Se tomaron durezas en la sección interna del eje que fue sometido a alta temperatura y los valores de estas mediciones se registran en la Tabla 6-2, en la cual además se muestran valores de medición de dureza en la superficie del eje. Con base en los valores mostrados en la tabla se evidencia la caída sustancial en los valores de la dureza al interior de la sección respecto a los valores de dureza obtenidos en la sección que no presentó calentamiento. La Figura 6-3, ilustra las secciones que fueron cortadas del eje para la realización tanto de las mediciones de dureza así como del análisis de la microestructura.

Tabla 6-2: Mediciones de dureza.

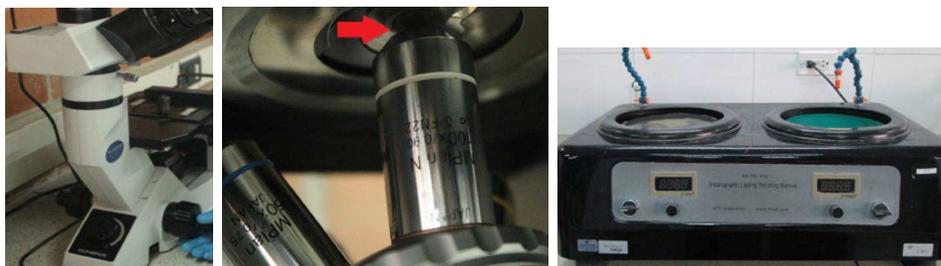
Zona	Valor medido sobre algunas superficies del eje
Centro del eje	23
Periferia del eje	28
Superficie del eje en zona afectada	50
Superficie del eje en zona no afectada	61



Figura 6-3: Procedimiento utilizado para la medición de dureza en las superficies internas y externas del eje.

7 Análisis metalográfico

La elaboración del análisis microscópico o metalográfico en los componentes mecánicos para el análisis de falla, tiene como fin observar cambios de composición y microestructura en distintas zonas internas de cada elemento, con ello se interpreta los cambios y como estos han afectado la resistencia del material, por ende la provocación del fallo total o parcial del elemento. La elaboración de este análisis se apoyado en normatividad internacional ASTM E 3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens [3] y ASTM E 340-00 Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys [5]. Los ensayos han sido efectuados con ayuda de distintos instrumentos y materiales los cuales fueron usados y suministrados por el laboratorio de ensayo de materiales de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Los instrumentos y materiales usados fueron: Microscopio metalográfico invertido OLYMPUS GX 41 Figura 7-1-(a) con número de activo 16498-16 7-1, lentes de microscopio 7-1-(b) y máquina de pulido metalográfico 7-1-(c) con número de activo 25143 7-1, alúmina u oxido de aluminio, lijas con tamaño de grano 240, 280, 400, 600 y 1000, paños de pulido y ácido nítrico al 5%. En el registro de los análisis en las piezas, se implementa unas marcas enumeradas sobre la superficie no pulida a espejo de las probetas, esto se realiza para tener una noción de los puntos estudiados, se hacen las marca en la zona no pulida ya que los lentes del microscopio se encuentran en la parte inferior de este figura, por ello se pone la probeta de forma que la superficie pulida repose sobre la base el mismo.



(a) Microscopio Óptico (b) Lente del microscopio, 1000X. (c) Máquina de pulido con discos y paño

Figura 7-1: Equipos de laboratorio metalográfico.

7.1. Pieza A/B, Vástagos de válvulas

Metalografía Probeta A1.1 y A2.1. Los vástagos de las válvulas tuvieron que ser esmerilados por secciones opuestas con el fin de crear dos superficies planas que permitan la medición de la dureza en el material al interior del vástago con lo cual se pueda comparar con la dureza esperada mediante la microestructura que presenta a lo largo de los vástagos. Además, debido a que el cuerpo de los vástagos es de forma cilíndrica se tuvieron que encapsular para poder realizar la manipulación y pulido de las piezas. La Figura 7-2-(b) y 7-2-(c) y (d) ilustran la forma en la que se encapsulo la probeta y la microestructura obtenida en la región cercana a las ranuras de las cuñas de la válvula vista a diferentes aumentos y la microestructura obtenida en el vástago en la región cercana a la cabeza de las válvulas.

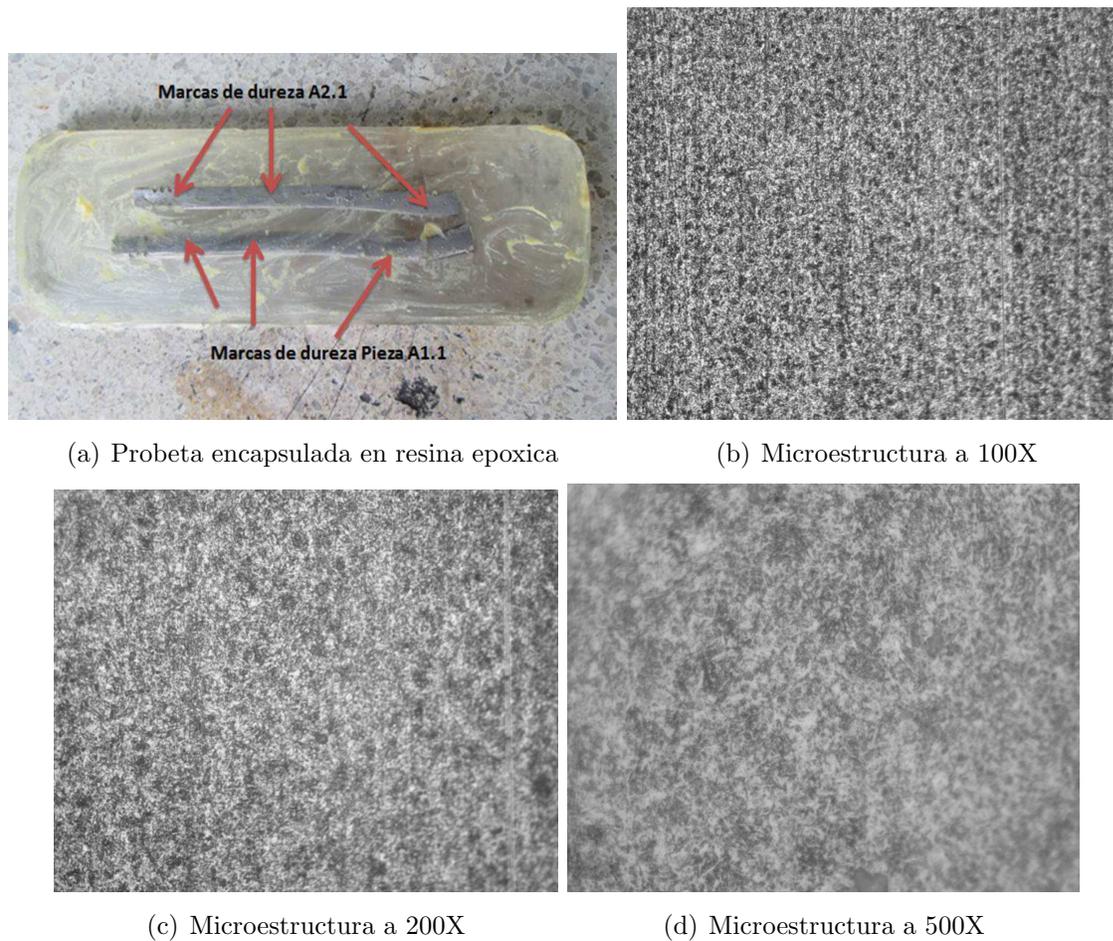


Figura 7-2: Pieza A/B - Deformación del vástago de las válvulas de escape de un motor de combustión interna.

7.2. Pieza C, Válvula

Debido a que la falla se presentó en una zona de difícil manipulación, para las pruebas se decidió hacer un corte transversal a la válvula como se ilustra en la Figura 7-3-(a). La cabeza de la válvula fue cortada mediante un disco de corte y posteriormente se limó con el fin de obtener una región plana que permita desarrollar el proceso de pulido. en la misma figura en la parte (b), se ilustran las líneas de esfuerzo que se generaron durante la fabricación de la válvula, además de la presencia de carburos de cromo y/o vanadio en la microestructura de la válvula. La figura (c) ilustra una grieta interna encontrada en la válvula durante la inspección en el microscopio.

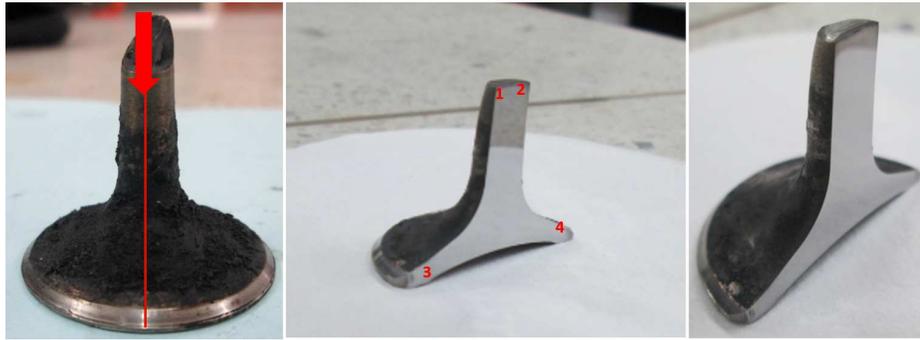
7.3. Pieza D, Copa hexagonal

Para esta pieza se realizó un corte a una distancia de 0.5 cm desde el inicio de la grieta y se realizó pulido a espejo de la sección transversal para poder realizar inspección en el microscopio. La Figura 7-4 ilustra la dirección del corte en la copa y una ampliación del inicio de grieta, detallando el deterioro localizado de la capa de cromo que protegía el material base y que origino el agrietamiento. En la misma figura se observa la microestructura del material base de la copa, en el cual se identifica la martensita revenida indicando que este acero es posiblemente un AISI-SAE 4140 ó un acero de mayor contenido de carbono.

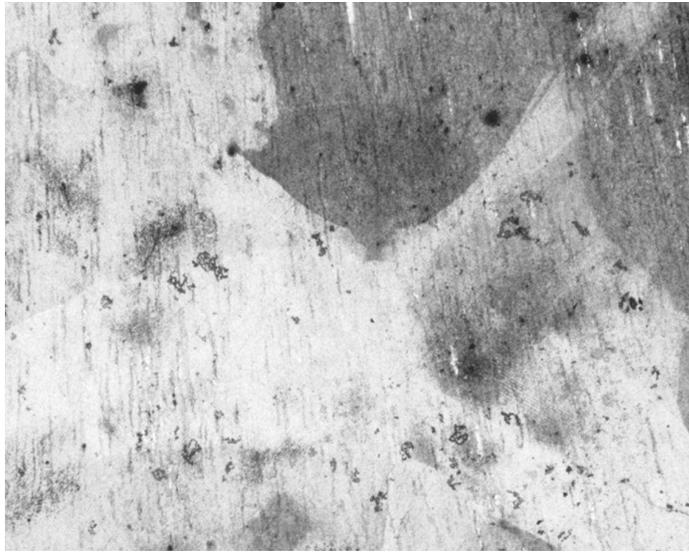
7.4. Pieza E, Eje de salida de potencia

A esta pieza se le efectuaron cortes seccionales tanto en la zona en la que se evidencia el calentamiento así como en las zonas en las que no presentan coloración con el fin de realizar ensayo de dureza en cada una de las tramos cortados y adicionalmente preparar las zonas que se pulieron y se analizaron en el microscopio. La Figura 7-5 ilustra el estado de las secciones cortadas y el aspecto de las probetas una vez que fueron pulidas a espejo y atacadas con Nital (5%). Las otras imágenes muestran la microestructura perlítica del acero evidenciando la presencia de inclusiones no metálicas al interior de una matriz ferrítica, siendo este acero posiblemente un ANSI-SAE 4140, enfriado lentamente para generar la microestructura de perlita fina.

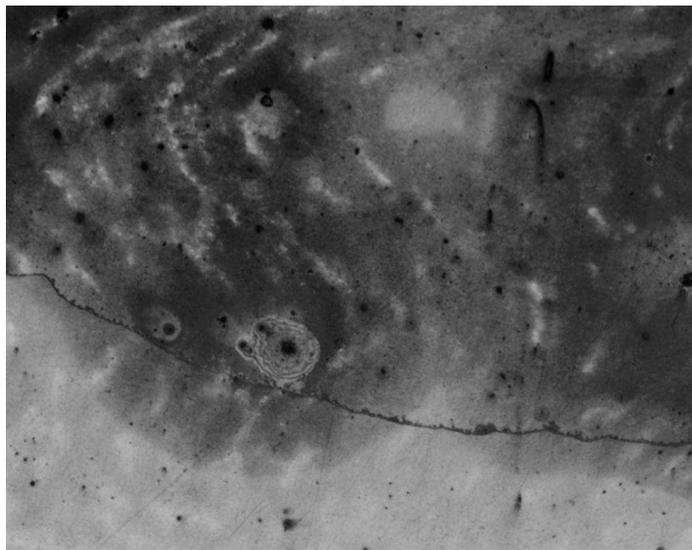
En la parte (d) de la misma figura se observa la microestructura a 200X de la superficie en la sección transversal del eje en la zona afectada por el calor. En esta imagen se alcanza a observar la transición entre la microestructura del núcleo del eje y la periferia que presenta un endurecimiento superficial. Esta zona endurecida es la que genera una alta resistencia mecánica a los esfuerzos cortantes en el eje y alcanza un valor de 50 HRC, como se mostró en la Tabla 6-2, el cual es menor que el registrado en la superficie de la sección que no sufrió afectación térmica.



(a)



(b)



(c)

Figura 7-3: Pieza C - Corte seccional, microestructura y fractura interna de la cabeza de una válvula.

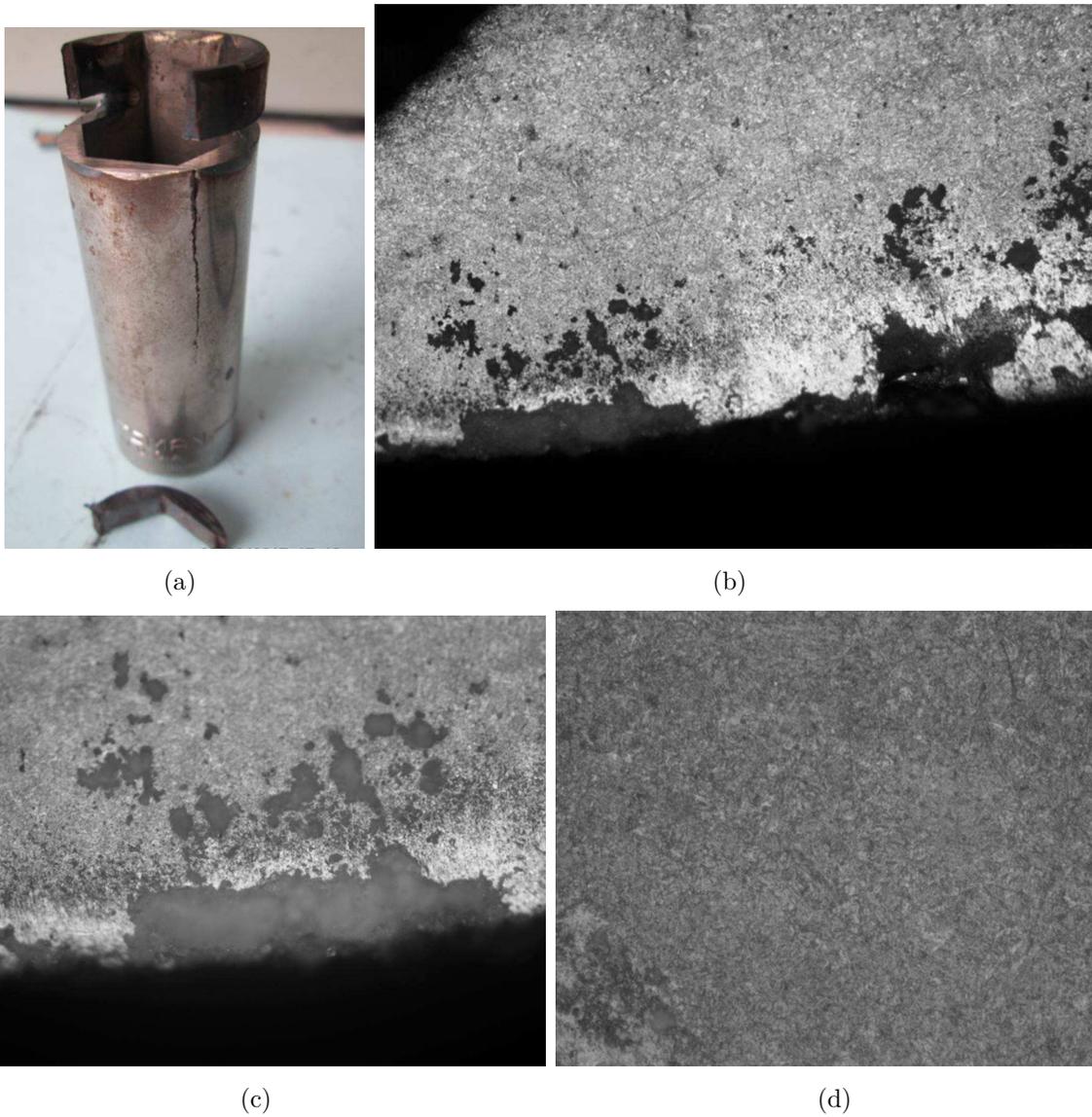


Figura 7-4: Pieza D - Corrosión y agrietamiento bajo esfuerzo del material de la copa hexagonal.

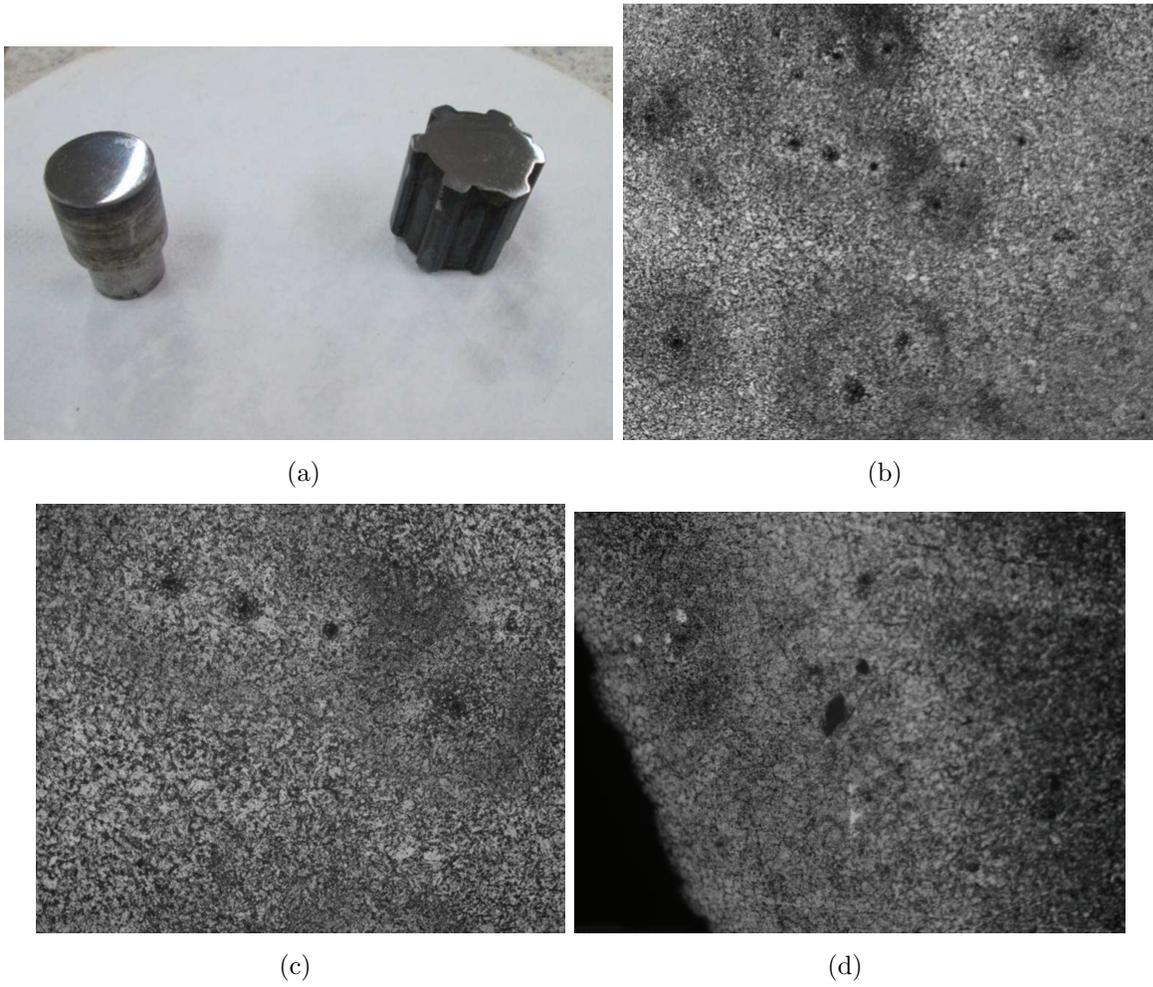


Figura 7-5: Pieza E - Eje de salida de potencia.

8 Análisis de falla RCA

Se presenta a continuación los análisis de falla y RCA de los cuatro componentes mecánicos estudiados, basado en lo encontrado durante la realización de la inspección visual, análisis de dureza y análisis metalográfico, de igual forma se da un concepto técnico de lo que pudo haber ocurrido durante el fallo emitiendo una probable causa raíz. A causa de que solo se conoce como tal las piezas y no se dispone del sistema total al cual pertenecieron, se emite un concepto basado en la evidencia tangible que se obtuvo de la pieza.

8.1. Pieza A/B- Vástagos de las válvulas

Al inicio del proceso de análisis de falla se asumió que debido a que las válvulas presentaban hollín en gran parte de la superficie, estaban expuestas un mayor tiempo al contacto con los gases de escape del motor; de esta forma erróneamente se interpretó que esta falla estaba acompañada por los efectos de la deformación térmica y se esperaba que en el análisis de la microestructura se observaran cambios significativos de esta característica en las diversas secciones del vástago de la válvula. No obstante como se ilustra en la Figura 7-2, en el análisis metalográfico, todas las secciones de la válvula presentan el mismo tipo de microestructura, lo cual elimina directamente la influencia (en la falla del material) del calentamiento que sufrió el material durante el desarrollo de los procesos de combustión y expulsión de los gases de escape en el motor. De igual forma se tomaron mediciones de dureza a lo largo de los vástagos de las válvulas y se obtuvieron valores similares de dureza debido a que la microestructura es muy similar en las diversas secciones (variando debido solamente a la deformación plástica). Por lo tanto, la falla se debió *únicamente* a los procesos de deformación mecánica que sufrieron las válvulas cuando como consecuencia del rompimiento de la correa de repartición, se desajustaron los tiempos de ascenso y descenso de los pistones dado como resultado el impacto durante algunas fracciones de segundo de los pistones contra las válvulas generando la deformación plástica en estas.

Esta es una falla catastrófica del motor que puede evitarse al hacer la revisión y/o cambio periódico de la correa de repartición como medida preventiva. Esta acción de mantenimiento debe desarrollarla personal calificado para que el ajuste de los tiempos de apertura y cierre de las válvulas se realice sincrónicamente.

8.2. Pieza C- Válvula

El análisis de falla es el mismo que se anotó anteriormente para los vástagos de las válvulas dado que ésta válvula fracturada se obtuvo del mismo motor averiado. Sin embargo, es importante recalcar que como se señaló en la Figura 7-3-(c), la cabeza de la válvula presento agrietamiento interno quizás debido a la serie de impactos que sufrió esta sección de las válvulas durante las colisiones con el pistón. También se resalta que el material de la válvula presenta una dureza considerable debido a la presencia de carburos de cromo y vanadio los cuales se observaron en la Figura 7-3-(b) y le dan a este tipo de piezas no solo resistencia a la corrosión a elevadas temperaturas sino una resistencia mecánica considerable evidenciada en la dureza del material.

8.3. Pieza C- Copa Hexagonal

Al realizar la inspección metalográfica se constató que la falla se generó por deterioro del material de recubrimiento de la herramienta, posiblemente cromo (Figura 7-4-(b)). Dado que es posible que la copa haya sufrido cargas de impacto o micro-deformación plástica en la superficie externa (donde los esfuerzos cortantes son mayores), se generó el desprendimiento localizado de la capa de cromo que protege el material base de la corrosión. Al estar expuesto el material base, el acero de bajo carbono del cual fue fabricada esta herramienta sufrió corrosión en estas zonas lo cual hizo que esta fragilización nucleara la falla en dirección longitudinal. Esto es evidenciado en la Figura 5-4 en la que se observa que en las partes donde aun se encuentra presente la capa protectora no se nucleó la grieta, como si se presentó en otra locación en la cual se evidencia la caída de una parte del recubrimiento, evidente durante la inspección visual. Dado lo anterior se concluye que la falla de la pieza se debe a la condición agrietamiento bajo esfuerzo (SCC, por sus siglas en inglés). Se recomienda que estas herramientas sean fabricadas de un acero ANSI-SAE 4140 ó 4340, los cuales presentan resistencia a la corrosión y al desgaste además de alta resistencia mecánica.

8.4. Pieza E-Eje de salida de potencia

En la inspección visual se constato que la pieza se había sometido a temperaturas elevadas para el material que consideramos posiblemente sea AISI-SAE 4140, en condición microestructural de martensita revenida (Figura 7-5). Como se anotó previamente, los valores de dureza del material en las zonas interiores de la sección transversal en el área afectada, presentaron cambios significativos respecto a las durezas medidas en zonas internas de la sección transversal de áreas no afectadas significativamente por el calentamiento. Mediciones de dureza fueron tomadas en la superficie en varias zonas no afectadas por el calentamiento, los resultados estuvieron cercanos a 60 HRC, indicando que este es un valor de dureza cercano

al que tenía el eje al término del proceso de fabricación; sin embargo, el valor de la dureza superficial en la zona afectada directamente por el calentamiento resulto menor en aproximadamente 10 HRC. Esto indica que el calentamiento si afecto significativamente la resistencia mecánica del material del eje en la superficie pero no agoto totalmente la tolerancia al daño del material; lo que significa que el eje podría haber seguido funcionando posiblemente sin comprometer la capacidad de carga máxima establecida durante el diseño de este elemento.

Dado que el calentamiento de este material se debió probablemente por deficiente lubricación, se recomienda evitar esta condición de funcionamiento dado que deterioró considerablemente el eje, disminuyendo la dureza superficial y afectó quizás la geometría del mismo.

9 Conclusiones

- El análisis de falla permite al ingeniero indagar, evaluar y comprender las condiciones de trabajo a las cuales fueron sometidos diversos componentes mecánicos, este cuenta con un proceso exhaustivo que permitió identificar los daños acumulativos y fallidos, evaluando los antecedentes y las situaciones particulares a las que son expuestos los componentes mecánicos, y que condiciones asociadas como el trabajo y ambiente no les permitieron cumplir los requerimientos previamente esperados, no solo evidenciando las principales causas si no generando una lección aprendida con el fin de identificar previamente la falla para evitar que esta se presente nuevamente a futuro. Casos particulares de estudio llevados a laboratorio (como los evidenciados en este proyecto y muchos otros previamente documentados en libros y revistas especializadas), logran conclusiones y recomendaciones para que sistemas similares reduzcan la posibilidad de fallos a futuro.
- El análisis de falla es un examen sistemático y metódico, que proporciona herramientas para la obtención de conocimientos en el uso de pruebas y equipos de laboratorio, que se rigen bajo normatividad internacional, permitiendo identificar los cambios en las propiedades que pueden ocurrir en un material, según el sistema para el cual fue diseñado. El informe generado a raíz de las distintas indagaciones sobre las fallas que se presentaron en los componentes mecánicos, nos permitió cuestionarnos sobre el ¿Por qué? Y el ¿Cómo? de las circunstancias que generaron las fallas mecánicas, lo que nos permitió dar una trazabilidad investigativa soportada en todas y cada una de las pruebas de laboratorio registradas en el presente trabajo.
- Lograr buenas prácticas de diseño, selección y sobre todo incentivar a las personas que nos brindaron las piezas a tener mayores controles en los mantenimientos e inspecciones de los sistemas.
- Los resultados obtenidos en esta investigación se lograron con el uso de los equipos dispuestos por la Fundación Universitaria Los Libertadores, pero, como se menciona en el Capítulo 3 existen muchos tipos de exámenes que le permiten al analista conocer con mayor profundidad resultados más acertados, por ello un análisis visual, de durezas y microestructura puede en algunos casos no ser suficiente, pero incorporar el uso de un microscopio electrónico de barrido (SEM) o un espectrómetro de masas sería una herramienta fundamental para la mejora de los análisis de falla.

Bibliografía

- [1] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, George F.: *ASM handbook*. Vol. 9: *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004
- [2] ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE, W.T. ; SHIPLEY, R.J.: *ASM handbook*. Vol. 11: *Failure Analysis and Prevention*. ASM International, 2002
- [3] ASTM, E: ASTM E3-01 - Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2001)
- [4] ASTM, E: ASTM E18-15 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2003)
- [5] ASTM, E: ASTM E340-00 - Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. En: *Annual Book of ASTM Standards* (2013)
- [6] AVALLONE, Ugene. ; BAUMEISTER III, Heodore. ; SADEGH, Lim: *Standard Handbook or Mechanical Engineers*. 11th Edition. McGraw-Hill, 1987
- [7] BHATTACHARYA, Joymalya: Root Cause Analysis A Practice to Understanding and Control the Failure Management in Manufacturing Industry. En: *International Journal of Pharmaceutical Science Invention*. (2014), p. 12–20
- [8] BHUSHAN, Bharat: *Modern tribology handbook, two volume set*. CRC press, 2000
- [9] BLOCH, Heinz P. ; GEITNER, Fred K.: *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: Practical Machinery Management for Process Plants*. Vol. 2. Butterworth-Heinemann, 2012
- [10] BOOSER, E R.: *CRC Handbook of Lubrication and Tribology: Theory and Practice of Tribology*. CRC PRESS, 1993
- [11] CAMPBELL, Flake C.: *Fatigue and fracture: understanding the basics*. ASM International, 2012
- [12] CANALE, Lauralice de Campos F. ; TOTTEN, George E. ; MESQUITA, Rafael A.: *Failure analysis of heat treated steel components*. ASM international, 2008

-
- [13] COMMITTEE, ASM International. H.: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 1987
- [14] COMMITTEE, ASTM: *ASTM dictionary of engineering science & technology*. Tenth Edition. ASTM International, 2005
- [15] DAS, Amiya K.: *Metallurgy of failure analysis*. Vol. 132. McGraw-Hill New York, NY, 1997
- [16] GROUP, Mechanical Failures P. ; SHIVES, T.R. ; WILLARD, W.A. ; FOR MATERIALS RESEARCH (U.S.), Institute ; FOR MATERIALS RESEARCH. METALLURGY DIVISION, Institute: *Mechanical failure, definition of the problem: proceedings of the 20th meeting of the Mechanical Failures Prevention Group, held at the National Bureau of Standards, Washington, D.C., May 8-10, 1974*. U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards : for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off, 1976 (NBS special publication)
- [17] HELLIER, Charles: *Handbook of nondestructive evaluation*. McGraw-Hill, 2001
- [18] KHATTAK, MA ; ZAREEN, N ; MUKHTAR, Anique ; KAZI, S ; JALIL, Amena ; AHMED, Zaheer ; JAN, Miraj M.: Root cause analysis (RCA) of fractured ASTM A53 carbon steel pipe at oil & gas company. En: *Case Studies in Engineering Failure Analysis* 7 (2016), p. 1–8
- [19] KUTZ, Myer: *Handbook of materials selection*. John Wiley & Sons, 2002
- [20] MCEVILY, Arthur J.: *Metal failures: mechanisms, analysis, prevention*. John Wiley & Sons, 2002
- [21] MOBLEY, R K.: *Root cause failure analysis*. Butterworth-Heinemann, 1999
- [22] NISHIDA, Shin-ichi: *Failure analysis in engineering applications*. Butterworth-Heinemann, 1992
- [23] NOON, Randall K.: *Forensic engineering investigation*. CRC Press., 2000
- [24] PIEKOSZEWSKI, W ; SZCZEREK, M ; TUSZYNSKI, W: The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester. En: *Wear* 249 (2001), Nr. 3, p. 188–193
- [25] PURBOLAKSONO, J ; AHMAD, J ; BENG, LC ; RASHID, AZ ; KHINANI, A ; ALI, AA: Failure analysis on a primary superheater tube of a power plant. En: *Engineering Failure Analysis* 17 (2010), Nr. 1, p. 158–167
- [26] RAMACHANDRAN, V: *Failure analysis of engineering structures: methodology and case histories*. ASM International, 2005

- [27] VANDER VOORT, George F.: *Metallography, principles and practice*. ASM International, 1984
- [28] WILSON, Paul F.: *Root cause analysis: A tool for total quality management*. ASQ Quality Press, 1993
- [29] WULPI, Donald J.: *Understanding how components fail*. ASM international, 2013