

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO**



Título

**ANÁLISIS DE FALLA DE UN ÁRBOL DE LEVAS DE BOMBA DE INYECCIÓN
DE COMBUSTIBLE REPARADO POR SOLDADURA**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN
INGENÍERÍA DE SOLDADURA**

AUTOR

Ing. Daniel Merino Ponce

ASESOR

Dr. Ing. Paul Pedro Lean Sifuentes

Febrero, 2020

RESUMEN

El trabajo de investigación aquí descrito presenta la metodología aplicada y los resultados obtenidos en la realización del análisis de falla de un árbol de levas de bomba de inyección de combustible reparada por soldadura. El árbol de levas tuvo una reparación (recuperación) por soldadura un mes antes de que se produjera la fractura del componente, la empresa que realizó el trabajo de recuperación no proporcionó información sobre el procedimiento seguido para la recuperación. Se ejecutaron diversos ensayos cuya finalidad fue la de establecer la causa más probable de falla. En la inspección visual y el ensayo de fractografía, se determinó que la fractura del árbol de levas se produce por un mecanismo de fatiga mecánica de baja carga. La caracterización del material del árbol de levas determinó que se trata de un acero de bajo carbono y baja aleación al cromo que posee un tratamiento térmico de endurecimiento superficial. Del análisis macrográfico realizado se identificaron las zonas de reparación por soldadura que coincide con el inicio de fractura del árbol de levas. Del análisis metalográfico se encontró la existencia de dos ciclos de aporte de calor, así como también se identificó la presencia de una capa superficial producto de un tratamiento térmico de cementado. Mediante el ensayo de análisis químico por microscopía electrónica de barrido EDS se determinó que el material de aporte utilizado en el proceso de reparación por soldadura es compatible con un acero inoxidable 14,12% Cr y 7,47% Ni. Del ensayo de dureza se concluyó que existe un cambio significativo en propiedades mecánicas entre la zona recuperada por soldadura y el cuerpo del árbol de levas. De lo anterior se concluyó que la fractura del árbol de levas se inicia en la zona afectada por el calor, en una de las zonas reparadas por soldadura, y la propagación de la misma se ve favorecida por la presencia de zonas de elevada dureza (814 HV) y cargas cíclicas (fenómeno de fatiga mecánica) hasta producir la fractura del árbol de levas.

Palabras clave: Análisis de falla, árbol de levas, fatiga mecánica, reparación por soldadura, control de calidad.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	i
TABLA DE CONTENIDOS	ii
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Bomba de inyección en línea.....	3
1.2. Aplicaciones de las bombas de inyección en línea.....	3
1.3. Constitución de las bombas de inyección en línea	6
1.4. Eje o árbol de levas	8
1.4.1. Clasificación de los árboles de levas.....	8
1.4.2. Funcionamiento de los árboles de levas	10
1.5. Selección de materiales de un árbol de levas	14
1.6. Reparación por soldadura de un árbol de levas	18
1.7. Fatiga mecánica	19
1.7.1. Fatiga en ejes de transmisión	21
1.7.2. Tipos de fatiga que se presentan en ejes de transmisión	22
1.8. Principales factores que ocasionan fallas en ejes de transmisión	24
1.8.1. Problemas en el diseño.....	24
1.8.2. Problemas en la fabricación	24
1.8.3. Problemas en el material.....	24
1.9. Análisis de falla de un componente	25
1.10. Etapas del análisis de falla	26
1.11. Alcance de los ensayos realizados.....	27
1.11.1. Inspección visual.....	27
1.11.2. Partículas magnéticas.....	28
1.11.3. Análisis fractográfico	29
1.12. Caracterización de material	29
1.12.1. Análisis químico	29
1.12.2. Cálculo del carbono equivalente	29

1.12.3. Análisis metalográfico	30
1.12.4. Análisis macrográfico	30
1.12.5. Espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) ...	30
1.12.6. Ensayo de dureza	30
1.12.6.1. Dureza Vickers	31
2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA	32
2.1. Inspección visual y fractografía	32
2.2. Partículas magnéticas	32
2.3. Caracterización del material	34
2.3.1. Análisis químico	35
2.3.2. Cálculo del carbono equivalente	35
2.3.3. Análisis metalográfico	35
2.3.4. Análisis macrográfico	36
2.3.5. Espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS).....	36
2.3.6. Ensayo de dureza	37
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
3.1. Inspección visual y fractografía	38
3.2. Inspección por partículas magnéticas.....	41
3.3. Caracterización del material	41
3.3.1. Composición química	41
3.3.2. Carbono equivalente	42
3.3.3. Análisis macrográfico	45
3.3.4. Análisis metalográfico	45
3.3.5. Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS).....	53
3.3.6. Ensayo de dureza	55
CONCLUSIONES.....	59
RECOMENDACIONES	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de investigación se expone el análisis de falla de un árbol de levas de una bomba de inyección de combustible de un motor de 6 cilindros, según información recabada durante el proceso de investigación, el dueño declaró: “el motor estuvo trabajando aproximadamente 90,000 kilómetros a una altura de 3,000 metros sobre el nivel del mar y con una carga del 85%; durante la operación normal de trabajo, el motor perdió potencia y se apagó por falla en el suministro del combustible”. En mayo de 2017 se realizó la última reparación general del eje de levas, se rellenó la superficie desgastada mediante una recuperación por soldadura, de la cual no se cuenta con la información técnica y un mes después, se produjo la fractura del eje de levas. Los componentes fracturados fueron entregados en las condiciones que se muestran en la figura 1 y la figura 2.



Figura 1.- Vista de las condiciones de recepción del componente fracturado para su análisis.

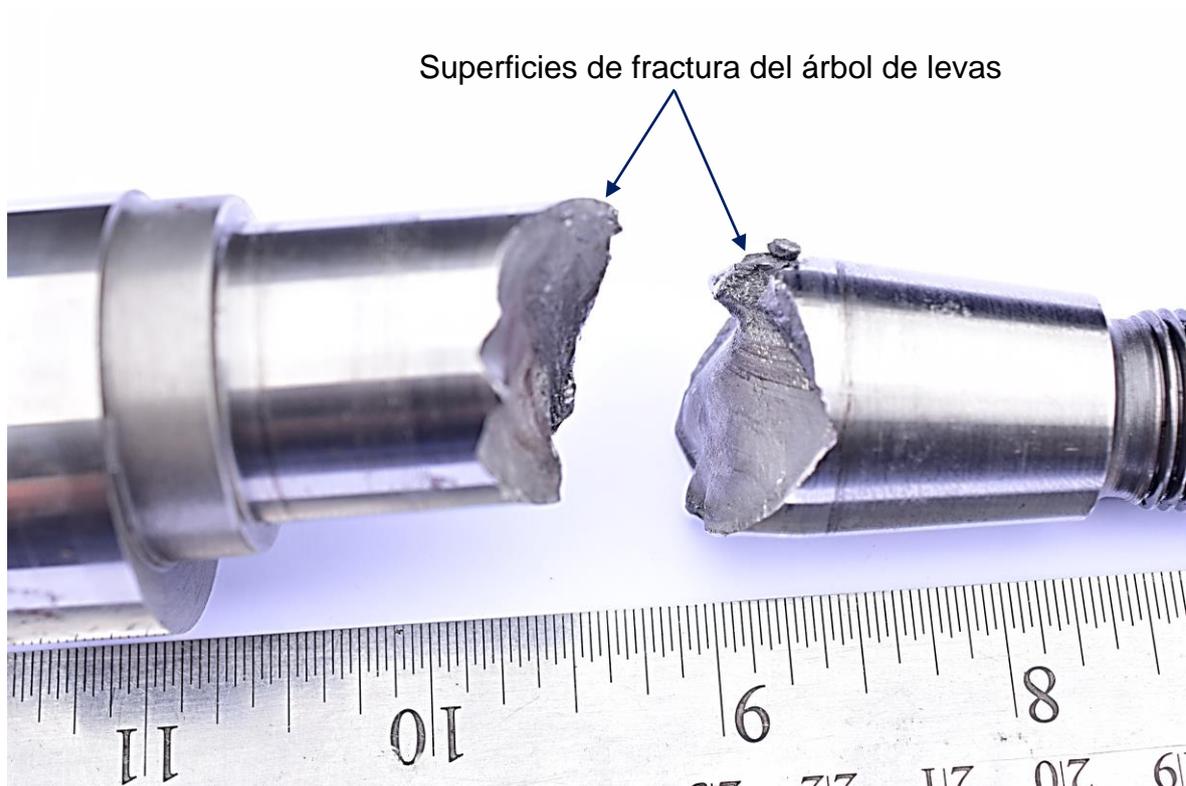


Figura 2.- Acercamiento de la zona de fractura del árbol de levas.

Objetivo general

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo general encontrar la causa más probable de la fractura del eje de levas de bomba de inyección de combustible de motor de 6 cilindros.

Objetivos específicos

1. Analizar la superficie de fractura para determinar el mecanismo o los mecanismos de falla que se presentan en el eje de levas.
2. Caracterizar el material con que fue fabricado el eje de levas.
3. Realizar ensayos no destructivos, ensayos destructivos y de constitución necesarios para determinar el origen de la falla.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Bomba de inyección en línea

Castillejo [1] presenta una definición muy didáctica.

Este tipo de bomba fue diseñada por Robert Bosch a principios del siglo XX; desde entonces la compañía Robert Bosch GmbH, fundada por él mismo, ha sido el principal fabricante de este tipo de bombas.

Ha sido la más utilizada y lo sigue siendo en vehículos pesados; en turismos lo fue hasta la década de los 60 cuando se vio sustituida por las bombas rotativas, más pequeñas y aptas para motores rápidos.

Este tipo de bombas son de constitución muy robusta y de una fiabilidad mecánica contrastada. Sus inconvenientes son su tamaño, peso y que están limitadas a un número de revoluciones, lo que las hacen aptas para vehículos pesados, pero no para turismos.

Los principales elementos que la componen son:

- Elementos de bombeo colocados en línea, uno por cada cilindro del motor.
- Un regulador de velocidad que puede ser centrífugo, neumático o hidráulico.
- Un variador de avance automático de inyección acoplado al sistema de arrastre de la bomba.
- Válvulas de descarga.
- Además, suele llevar acoplada la bomba de alimentación (2014: 35).

1.2. Aplicaciones de las bombas de inyección en línea

Las bombas de inyección en línea se utilizan en motores con potencias que van desde 10 hasta 200 kW/cilindro; esto es posible gracias a la extensa gama de modelos que existe de estas bombas.

Actualmente se utilizan sobre todo en motores diesel instalados en camiones, autobuses, tractores y otra maquinaria de uso agrícola y de construcción. Otros campos de aplicación son los motores navales y los estacionarios, desde grandes motores industriales hasta los más pequeños utilizados en grupos electrógenos.

Existen bombas de distintos tamaños que se adaptan a la potencia del motor que van a alimentar. Los tipos de bombas se reúnen en series cuyos rendimientos se solapan en los máximos y mínimos. Dentro de las bombas de inyección en línea PE existen dos construcciones distintas. Por un lado, tenemos las denominadas "M" y "A" y por el otro las "MW" y "P" (Castillejo 2014: 36).

En la figura 3 se muestran los componentes del juego de piezas de una bomba de inyección, serie PE(S) P y en la figura 4 se identifican las piezas de la mencionada bomba de inyección.

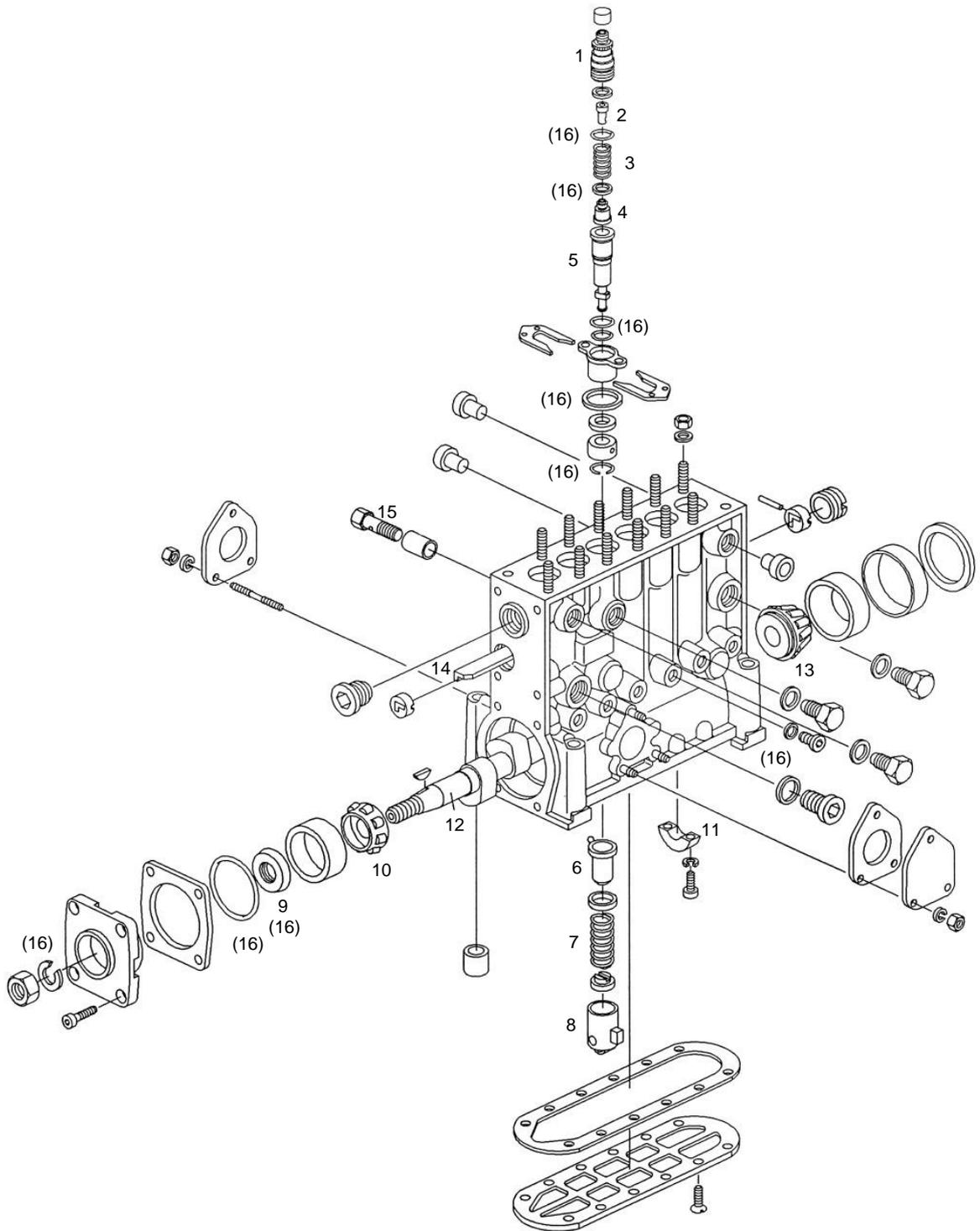


Figura 3.- Componentes del juego de piezas de una bomba de inyección, serie PE(S) P. [2].



Figura 4.- Identificación de las piezas de una bomba de inyección PE(S) P. [2].

1.3. Constitución de las bombas de inyección en línea

Castillejo [1] describe la constitución de las bombas como sigue.

En la figura 5 se puede ver la sección de una bomba de inyección en línea en la que aparecen todos los elementos que componen la unidad de bombeo.

Se puede ver que dispone de un cárter o cuerpo, de aleación de aluminio-silicio, que aloja en su parte inferior o cárter inferior (C), al árbol de levas (A), que tiene tantas levas como cilindros el motor. En el lateral del cárter inferior de bomba, se encuentra la bomba de alimentación (B), que recibe movimiento del mismo árbol de levas, por medio de una excéntrica labrada en él.

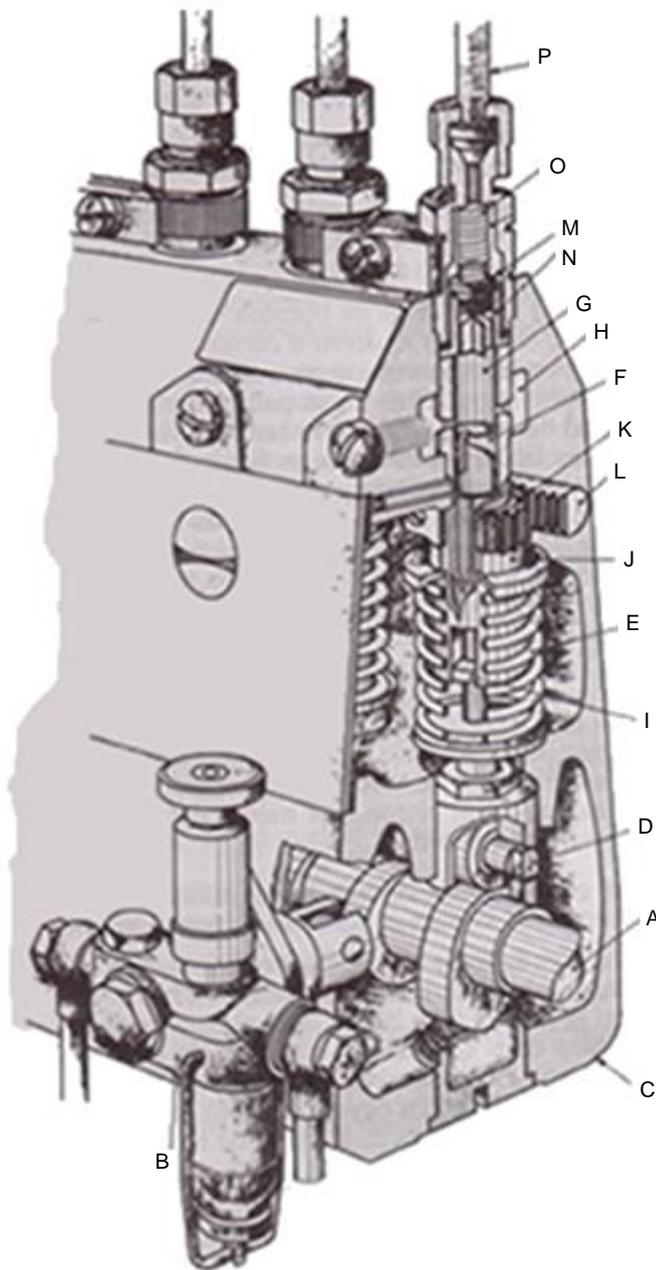
Cada una de las levas acciona un elemento llamado empujador o taqué (D). Este posee un rodillo que, debido a la acción del muelle (E), se encuentra en contacto con la leva. El empujador (D) a su vez da movimiento al émbolo (F), que se desliza en el interior del cilindro (G), que se comunica por medio de unos orificios laterales llamados lumbreras con la canalización (H), por donde le llega el combustible procedente de la bomba de alimentación.

Además del movimiento de subida y bajada del pistón, éste puede girar un cierto ángulo sobre su eje vertical, ya que la parte inferior tiene un saliente (I), que encaja con el manguito cilíndrico (J), que a su vez rodea la parte inferior del cilindro (G) y que, en su parte superior, lleva adosada la corona dentada (K), que engrana con la barra cremallera (L). El movimiento de esta barra cremallera hace girar a la corona dentada, quien comunica su giro al pistón, por medio del manguito cilíndrico (J) y el saliente (I) de la parte inferior del pistón.

La parte superior del cilindro, está cerrada por la válvula de retención (M), que ajusta sobre su asiento (N), por la acción del muelle (O).

Cuando el saliente de la leva acciona el empujador (D), este acciona el pistón (F), haciéndolo subir. Tras quedar tapadas las lumbreras que comunican el cilindro (G) con la canalización (H) el pistón comienza a comprimir el combustible encerrado en el cilindro hasta que se alcanza una determinada presión en el cilindro, que provoca la apertura de la válvula, venciendo la acción del muelle antagonista, en ese momento el combustible sale por el cilindro hacia el inyector correspondiente.

Cuando ha pasado el saliente de la leva, el impulsor (D) baja por la acción del muelle, haciendo bajar a su vez el émbolo (F), que vuelve a ocupar la posición representada en la figura 5, permitiendo de nuevo el llenado del cilindro a través de sus aberturas laterales. Mientras tanto, la válvula (M) ha bajado y cerrado el paso de combustible al inyector (2014: 40-41).



- A.- Árbol de levas.
- B.- Bomba de alimentación.
- C.- Cáster inferior de la bomba.
- D.- Empujador o taqué.
- E.- Muelle.
- F.- Émbolo.
- G.- Cilindro (cámara de presión).
- H.- Canalización (llegada de combustible).
- I.- Saliente.
- J.- Manguito cilíndrico.
- K.- Corona dentada.
- L.- Cremallera.
- M.- Válvula de retención.
- N.- Asiento de válvula.
- O.- Muelle.
- P.- Canalización hacia el inyector.

Figura 5.- Sección una bomba en línea. Se aprecian las partes que componen el sistema de bombeo. [3].

1.4. Eje o árbol de levas

Rodríguez [4] presenta una definición del eje de levas bastante adecuada.

El eje o árbol de levas es una de las partes principales de los motores que usan pistones. Este componente se usa para hacer trabajar las válvulas. Se compone de una varilla cilíndrica que recorre la longitud de la bancada de los cilindros con número de lóbulos oblongos o levas, que sobresalen de esta varilla y por lo general suele ser una por cada válvula. Las levas fuerzan a que las válvulas se abran debido a la presión en la misma (o por algún otro mecanismo intermedio) a medida que éstas giran.

Dependiendo de la ubicación del árbol de levas, éstas trabajan con las válvulas, ya sea directamente o a través de un enlace de varillas de empuje y balancines. La operación directa implica un mecanismo más sencillo y da un resultado con menos problemas, pero requiere que el árbol de levas se sitúe en la parte superior de los cilindros. En el pasado, cuando los motores no eran tan fiables como hoy en día, esta solución era demasiado compleja, pero en los motores de gasolina modernos colocar este sistema en la parte superior es algo común (2015).

1.4.1. Clasificación de los árboles de levas.

Algunos motores utilizan dos árboles de levas, uno para las válvulas de admisión y otro para las de escape, conocido como leva doble o dual (DOHC) y, por tanto, un motor en V puede tener hasta 4 árboles de levas. Los árboles de levas se pueden clasificar de dos formas:

- Árbol de levas individual (SOHC).
 - Doble árbol de levas (DOHC - Double OverHead Camshaft) (Rodríguez 2015).
- Árbol de levas individual (SOHC - Single OverHead Camshaft), Restrepo [5] presenta la siguiente descripción:

Es un árbol de levas sencillo está ubicado encima de las válvulas y el movimiento es transmitido directamente a las mismas. Tal como se observa en la figura 6.

Opera de la siguiente manera:

1. El cigüeñal transmite el movimiento al árbol de levas mediante una correa de distribución (sea una banda de caucho o una cadena metálica) u otro sistema (engranajes, etc).
2. El árbol de levas transmite el movimiento a las válvulas (cada cilindro emplea 1 válvula de admisión y 1 válvula de escape) (2019)

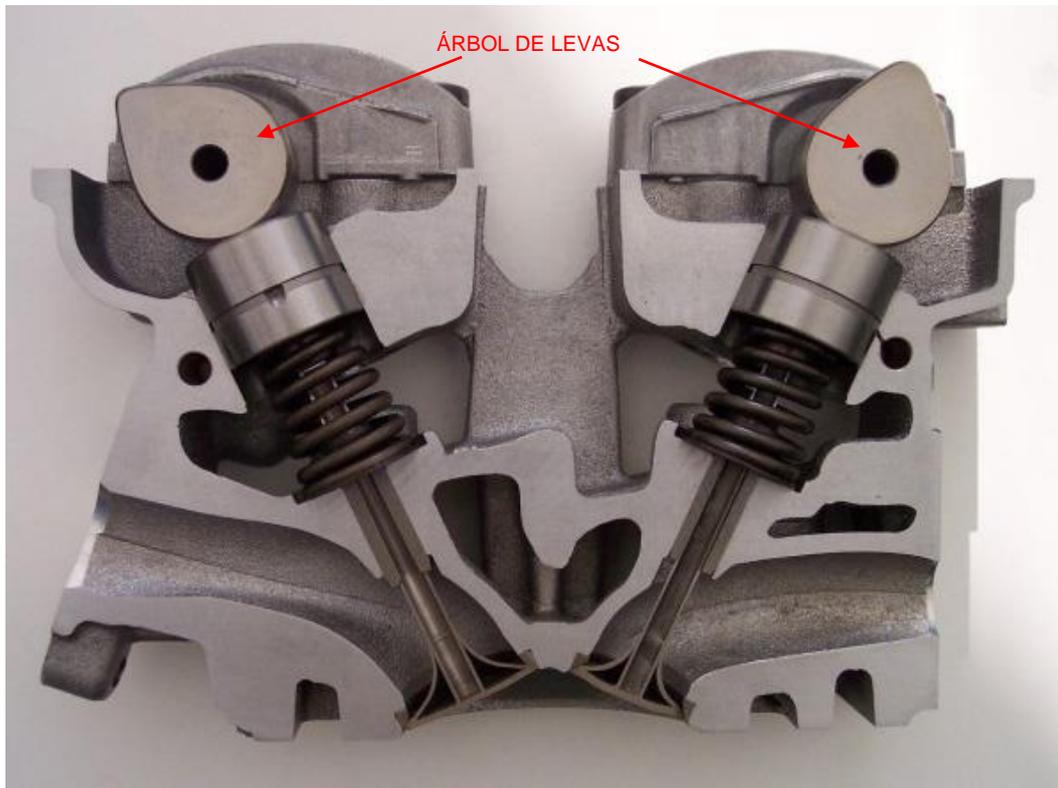


Figura 6.- Árbol de levas individual (SOHC). [5].

- Doble árbol de levas (DOHC - Double OverHead Camshaft), Restrepo [5] indica lo siguiente:

Un árbol de levas doble está ubicado encima de las válvulas y el movimiento es transmitido directamente a las mismas. En la figura 7 y la figura 8 se aprecia la configuración de un doble árbol de levas.

Opera de la siguiente manera:

1. El cigüeñal transmite el movimiento al árbol de levas mediante una correa de distribución (sea una banda de caucho o una cadena metálica) u otro sistema (engranajes, etc).
2. El árbol de levas transmite el movimiento a las válvulas (cada cilindro emplea 2 válvulas de admisión y 2 válvulas de escape) (2019)

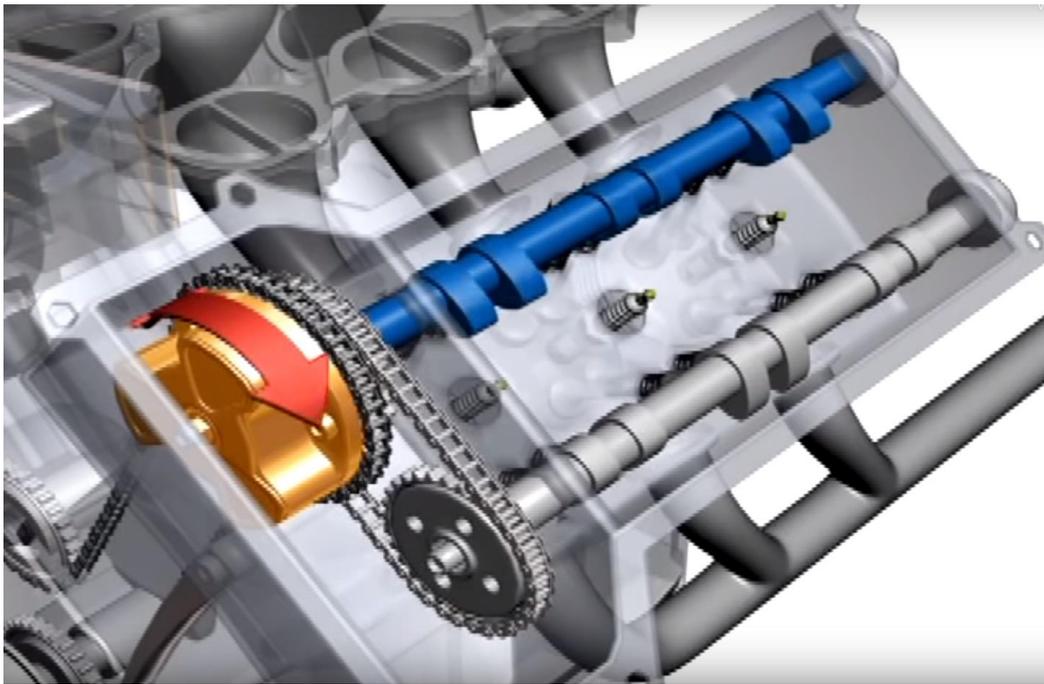


Figura 7.- Doble árbol de levas (DOHC). [5].

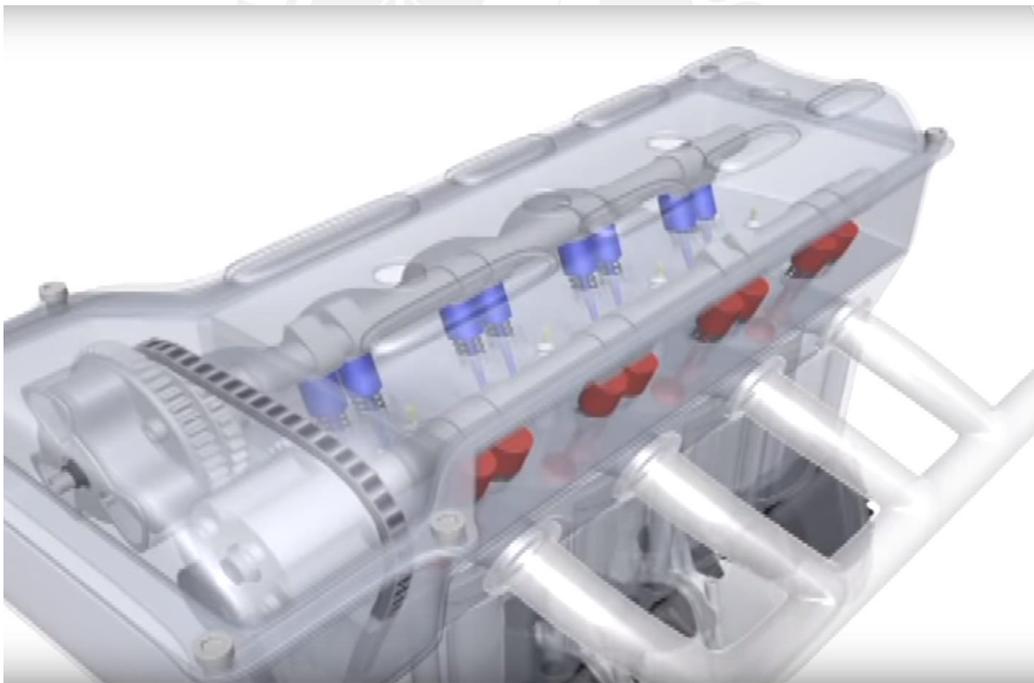


Figura 8.- Doble árbol de levas (DOHC). [5].

1.4.2. Funcionamiento de los árboles de levas.

“La relación entre rotación del árbol de levas y la rotación del cigüeñal es primordial. Si las culatas y los pistones son el corazón de un motor, entonces el árbol de levas

y las válvulas son el cerebro de la operación. El tiempo de apertura, cierre, elevación y la duración de cada ciclo de válvula es fundamental para conseguir la potencia y el par motor” (Rodríguez 2015).

Dado que las válvulas controlan el flujo de admisión de la mezcla de aire con el combustible y los gases del escape, estos elementos han de abrirse y cerrarse en el momento apropiado durante la carrera del pistón. Por esta razón, el árbol de levas está conectado al cigüeñal ya sea directamente a través de un mecanismo de engranajes, o indirectamente a través de una correa de distribución.

En algunos diseños, el árbol de levas también impulsa el distribuidor y, en los primeros sistemas de inyección de combustible, las levas harían trabajar a los inyectores de combustible.

Las válvulas admiten la mezcla de aire con combustible dentro de las cámaras de combustión del motor, cuando el pistón llega a la parte inferior de su recorrido la válvula de admisión se cierra, tal como se aprecia en la figura 9, empieza el ciclo de compresión de la mezcla de aire y combustible dentro de la cámara del cilindro (ver figura 10), cuando el pistón alcanza su punto más alto con ayuda de una bujía, se genera una chispa y se produce la explosión, tal como se observa en la figura 11, esta explosión da energía al pistón para que baje y cuando comienza de nuevo a subir se abre la válvula de escape (ver figura 12) que permite que los gases ya quemados puedan ser expulsados hacia los escapes, todas estas etapas son controladas por los lóbulos con forma de huevo en el árbol de levas. La forma de los lóbulos y su posicionamiento en el eje determinan el tiempo de una leva (Rodríguez 2015).

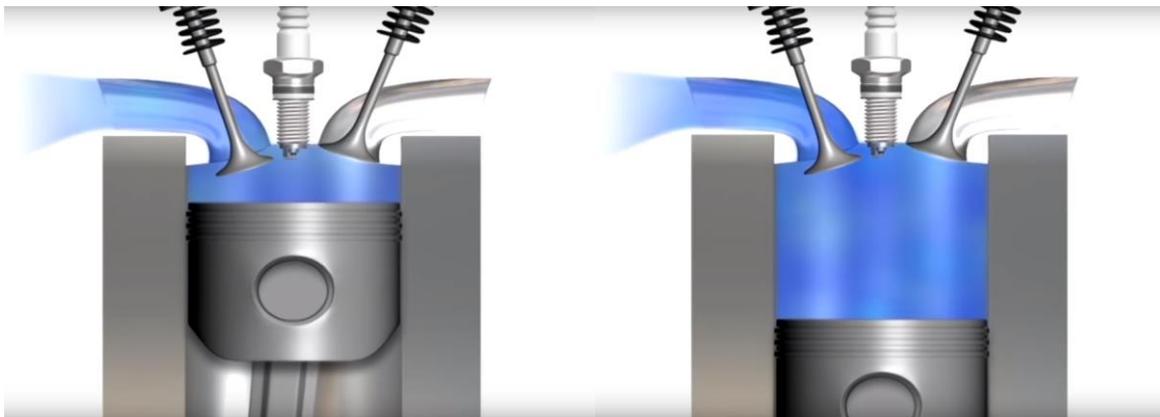


Figura 9.- Admisión. [5].

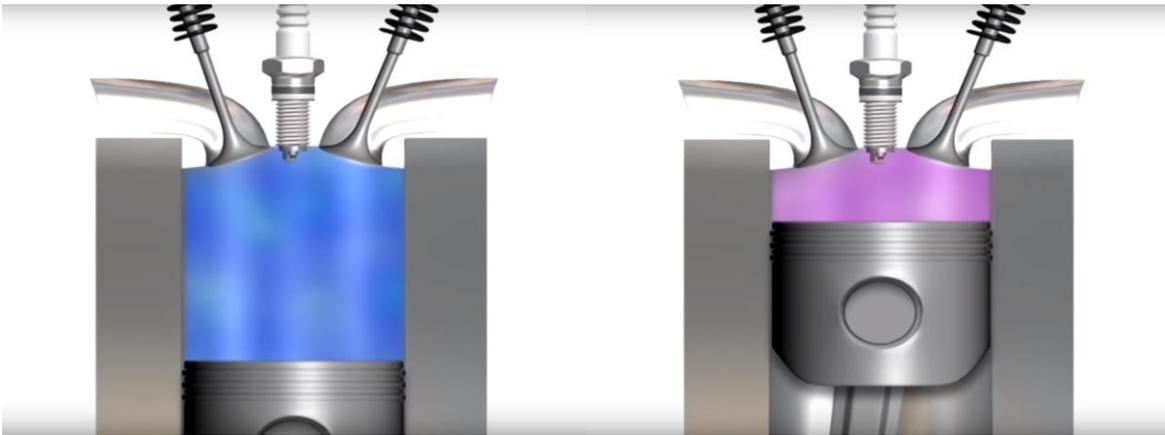


Figura 10.- Compresión. [5].

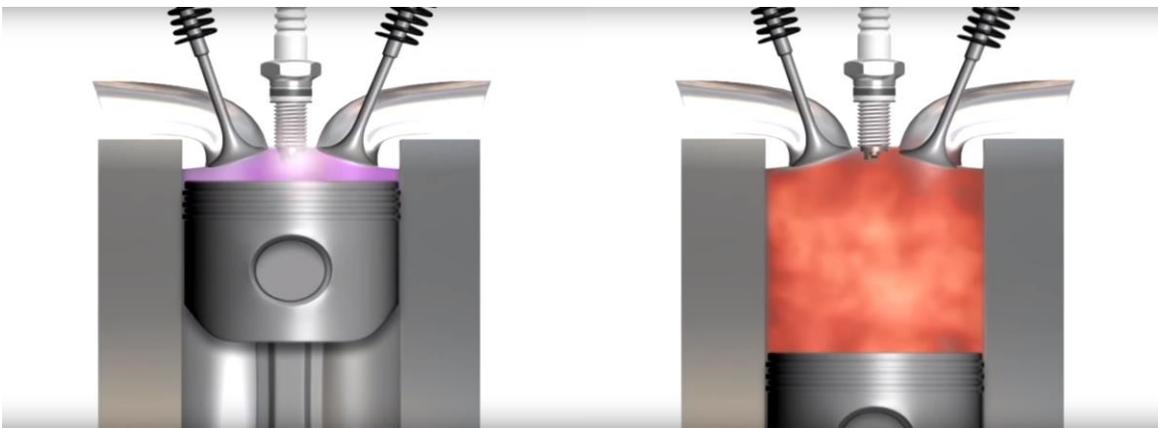


Figura 11.- Explosión. [5].

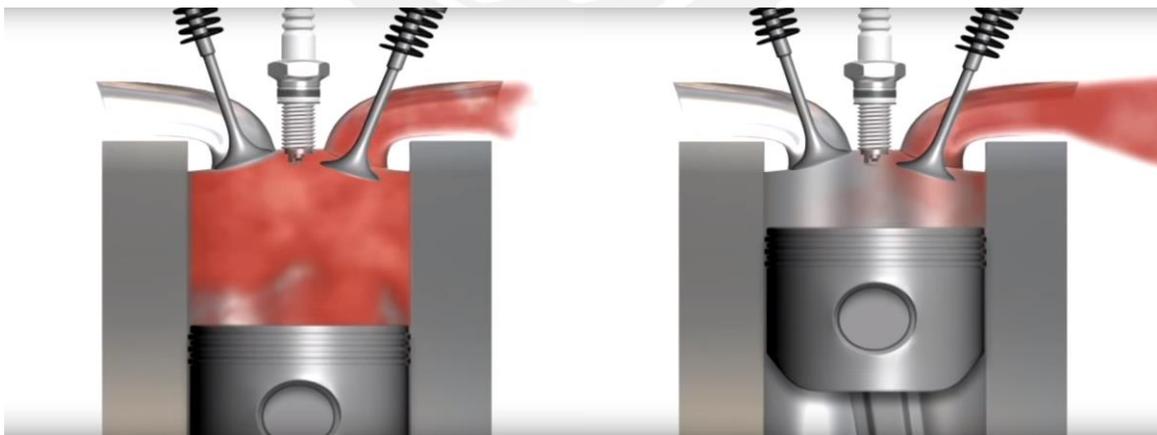


Figura 12.- Escape. [5].

En la mayoría de los casos, la sincronización de las levas es fija, lo que significa un compromiso que proporciona un rendimiento óptimo sólo a la velocidad a la que el motor es probable que realice la mayor parte de su trabajo. Cuando el motor gira más lento o más rápido que este punto ideal, el ciclo de combustión no quema la mezcla de forma adecuada, lo que lleva a comprometer el rendimiento del motor y

originar residuos. Por esta razón hay una relación directa entre la forma de los lóbulos de leva y la forma en que el motor funciona a diferentes rangos de velocidad.

Cuando el pistón comienza su carrera de admisión y la válvula de admisión se abre, la mezcla de aire y combustible se acelera en el cilindro. En el momento en el que el pistón alcance su punto más bajo, la mezcla se mueve a una velocidad muy alta. Al cerrar la válvula de admisión, la mezcla habría llegado a su fin y no entraría más en el cilindro. Si, por el contrario, se dejase la válvula de admisión abierta un poco más, al añadirse aire y combustible, el impulso forzaría la compresión mayor de la mezcla en el cilindro incluso cuando el pistón ha empezado a comprimir.

En teoría, cuanto más rápido va un motor, más rápido va el flujo de la mezcla, por lo que lo ideal sería que la válvula de admisión se quede abierta lo máximo posible. A su vez, también se quiere que la válvula se abra lo más 'ancha' posible a grandes velocidades puesto que mejoraría el volumen de la mezcla. Algo que también afectaría al rendimiento de las levas es la elevación, la duración, la superposición y la sincronización.

La elevación se refiere a la elevación máxima de la válvula. Esto viene inducido por el punto más alto del lóbulo de la leva. Las válvulas de admisión y escape han de estar abiertas para que entre aire y combustible y salga el gas de escape de los cilindros, tal como se muestra en la figura 13. En general, la apertura más rápida de las válvulas aumentará la potencia del motor. El aumento de la elevación de la válvula, sin aumentar la duración, puede producir más energía, sí, pero en cambio la naturaleza de la curva de potencia no variará en exceso. Sin embargo, un aumento en la elevación de la válvula casi siempre está acompañado de un aumento en la duración. Esto es porque los flancos de los lóbulos están directamente relacionados con el tipo de ascensores, tales como llanos o rodillos (Rodríguez 2015).

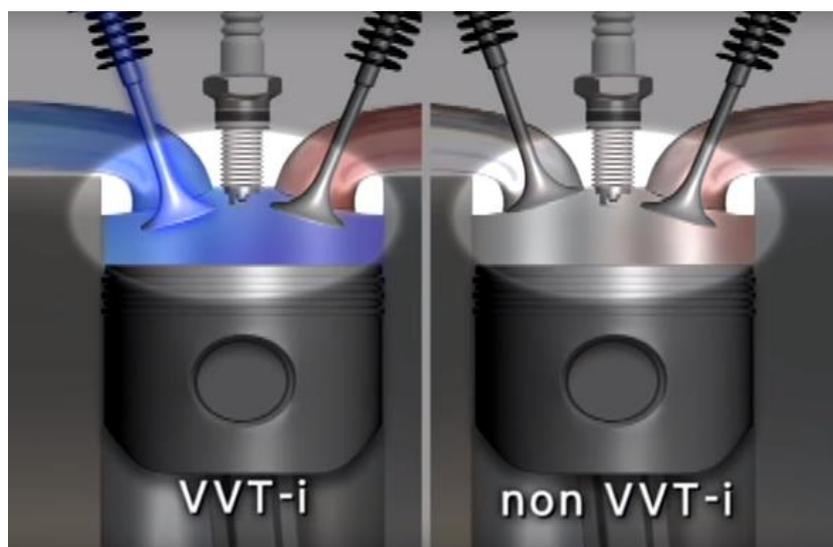


Figura 13.- Válvula de admisión y escape abiertas al mismo tiempo. [5].

1.5. Selección de materiales de un árbol de levas

“Dependiendo de la aplicación, el diseñador puede elegir entre materiales como plásticos; bronce; hierro fundido gris; hierro nodular y maleable; aceros de baja media y alta aleación y aceros inoxidable. Además, hay diferentes formas de modificar o procesar los materiales para mejorar sus propiedades o reducir el costo de fabricación” (Zaretsky 1997) [6].

Cuando las condiciones de operación son moderadas, como cargas medias y temperatura ambiente, se puede usar un acero de baja aleación sin el costo adicional de tratamiento térmico y procesamiento adicional. Los aceros AISI 9310, AISI 8620 son buenos materiales para estas aplicaciones y pueden operar a esfuerzos máximos de 600 MPa. Estos aceros de baja aleación deben ser cementados o nitrurados para así obtener una superficie muy dura y resistente al desgaste. Las levas que son cementadas generalmente requerirán un rectificado después de la operación de endurecimiento debido a la distorsión durante el proceso de tratamiento térmico. Los materiales nitrurados ofrecen la ventaja de mucha menos distorsión durante la nitruración y, por lo tanto, se puede usar en condiciones de nitruración sin acabado adicional. Las piezas nitruradas tienen buena resistencia a la corrosión y propiedades de fatiga mejoradas.

Los aceros de media aleación se pueden tratar térmicamente para proporcionar una buena capacidad de resistencia máxima que oscila entre 1100 – 1200 MPa.

Los aceros de alta aleación son mucho más resistentes y deben usarse en aplicaciones muy severas, donde la capacidad de resistencia máxima esté alrededor de 1400 MPa.

La tabla 1 enumera los valores de K para 100 millones de ciclos de carga en rodadura pura y en rodadura con un nueve por ciento de deslizamiento. Una de las superficies de ensayo corresponde a un rodillo de acero endurecido con una dureza superficial entre 60 – 62 HRC y la otra superficie corresponde a los materiales seleccionados. Los valores de K se han determinado en función del número de ciclos de cargas necesarios para que la superficie falle.

En la siguiente ecuación relaciona el factor K con el tiempo de vida:

$$\log_{10}K = \frac{B - \log_{10}N}{A}$$

Donde:

K: Factor de carga esfuerzo para cilindros en contacto.

A y B: Son constantes propias del material (ver tabla 1).

N: Número de ciclos de carga que se requiere para un valor de K establecido.

Como se observa en la tabla 1 se pueden utilizar los aceros AISI 4140, 4150, 4320 (generalmente cementados), 4340 y 4615 para fabricar ejes de levas. El AISI 4140 se selecciona particularmente ya que puede ser endurecido por tratamiento térmico o por nitruración. El proceso de nitruración produce una capa superficial delgada y muy dura (Rockwell C 70) de unas 250 micras de espesor. Esta carcasa delgada muy dura asegura una excelente resistencia al desgaste. Debajo de esa superficie a una profundidad de 500 a 875 micras se obtiene una dureza Rockwell C entre 52 y 54. El acero AISI 4140 proporciona una buena maquinabilidad y excelentes propiedades de endurecimiento superficial. [6].

Los aceros de baja y media aleación tienen una temperatura de funcionamiento limitada por encima de la cual comienzan a perder su dureza y resistencia, generalmente alrededor de 150 °C. Encima de esta temperatura, el material puede sufrir un revenido que producirá fallas o picaduras en la superficie. La dureza mínima superficial generalmente aceptada a la temperatura de funcionamiento más alta es Rockwell C 58. [6].

En casos de mucha exigencia, se eligen el carburo de tungsteno y AISI 52100 como material de la leva o como inserto de la leva en puntos altos de desgaste indeseable. [6].

Tabla 1.- Resistencia a la fatiga superficial de diversos materiales. [6].

Material	Pure Rolling				Rolling & 9% sliding			
	K_t	σ_{max}^*	A	B	K_t	σ_{max}^*	A	B
1020 steel, carburized, 0.045 in min. depth, 50-60Rc	12,700	256,000	7.39	38.33	10,400	99,000	13.20	61.06
1020 steel, 130-150 BHN	—	—	—	—	1,720	94,000	4.78	23.45
1117 steel, 130-150 BHN	1,500	89,000	4.21	21.41	1,150	77,000	3.63	19.12
X1340 steel, induction-hardened, 0.045 in min. depth, 45-58Rc	10,000	227,000	6.56	34.24	8,200	206,000	8.51	41.31
Blue tempered spring-steel stampings, 40-50Rc	2,470	113,000	4.00	21.57	—	—	—	—
4140/4150 steel, 350-370 BHN (std 180)	—	—	—	—	11,300	242,000	17.76	80.00
4150 steel, heat-treated, 270-300 BHN, phosphate-coated	12,000	249,000	11.40	54.52	8,660	211,000	15.47	68.92
4150 steel, heat-treated, 270-300 BHN, flash chromium-plated	6,060	177,000	11.18	50.29	—	—	—	—
4150 steel, heat-treated, 270-300 BHN, phosphate-coated	9,000	216,000	8.80	42.81	6,260	180,000	11.56	51.92
4150 ceramic cast steel, heat-treated, 270-300 BHN	—	—	—	—	2,850	121,000	17.86	69.72
4340 steel, induction-hardened 0.045 in. min. depth, 50-58Rc	13,000	259,000	14.15	66.22	9,000	216,000	14.02	63.44
4340 steel, heat-treated, 270-300 BHN	—	—	—	—	5,500	169,000	18.05	75.55
6150 steel, 300-320 BHN	1,170	78,000	3.10	17.51	—	—	—	—
6150 steel, 270-300 BHN	—	—	—	—	1,820	97,000	8.30	35.06
18% Ni maraging tool, air-hardened, 48-50 Rc	—	—	—	—	4,300	146,000	3.90	22.18
Gray-iron, class 20,	—	—	—	—	—	—	—	—
160-190 BHN, phosphate-coated	940	53,000	3.90	19.60	—	—	—	—
Gray-iron, class 20, 140-160 BHN	790	49,000	3.83	19.09	740	47,000	4.09	19.72
Gray-iron, class 30, 200-220 BHN	1,120	63,000	4.24	20.92	—	—	—	—
Gray-iron, class 30,	—	—	—	—	—	—	—	—

Continuación tabla 1.- Resistencia a la fatiga superficial de diversos materiales. [6].

Material	Pure Rolling				Rolling & 9% sliding			
	K_1	σ_{max}^*	A	B	K_1	σ_{max}^*	A	B
heat-treated (austempered), 255-300 BHN, phosphate-coated	2,920	102,000	5.52	27.11	2,510	94,000	6.01	28.44
Gray-iron, class 30, oil-quenched, 270-41.5BHN	1,850	81,000	5.45	25.79	—	—	—	—
Gray-iron, class 35, 225-255BHN	2,000	86,000	11.62	46.35	1,900	84,000	8.39	35.51
Gray-iron, class 45, 220-240 BHN	—	—	—	—	1,070	65,000	3.77	19.41
Nodular-iron, Grade 80-60-03, 270-241 BHN	2,100	96,000	10.09	41.53	1,960	93,000	5.56	26.31
Nodular-iron, Grade 100-70-03, heat-treated, 240-260 BHN	—	—	—	—	3,570	122,000	13.04	54.33
High-strength yellow brass, drawn, 157-162 BHN	1,280	67,000	3.69	19.45	—	—	—	—
Nickel bronze, 80-90 BHN	1,390	73,000	6.01	26.89	—	—	—	—
SAE 65 phosphor-bronze sand casting, 65-75 BHN	730	52,000	2.84	16.13	350	36,000	2.39	14.08
SAE 660 continuous-cast bronze, 75-80 BHN	—	—	—	—	320	33,000	1.94	12.87
Aluminum bronze	2,500	98,000	5.87	27.97	—	—	—	—
Zinc die casting, 70 BHN	250	28,000	3.07	15.35	220	26,000	3.11	15.29
Random-fiber cotton-base phenolic	1,000	—	6.03	26.11	900	—	5.95	25.60
Graphitized laminated phenolic	900	—	6.58	27.43	—	—	—	—
Nema Grade L laminated phenolic	880	—	9.39	35.64	830	—	5.53	24.13
Linen-base laminated phenolic	830	—	8.54	32.90	670	—	6.46	26.25
Acetal resin	620	—	—	—	580	—	—	—
Polyurethane rubber	240	—	—	—	—	—	—	—
Polycarbonate resin	60	—	—	—	—	—	—	—
High-molecular-weight polyethylene	—	—	—	—	370	—	8.03	28.61

BHN—Brinell hardness number.

Re—Rockwell hardness number.

* for 100,000,000 cycles.

1.6. Reparación por soldadura de un árbol de levas

Los ejes de levas que presenta zonas desgastadas se pueden reparar utilizando alguno de los siguientes procesos de soldadura:

- Soldadura láser (LBW).
- Soldadura por arco de transferencia por plasma (PTA).
- Soldadura de haz de electrones (EBW)
- Soldadura con gas inerte metálico (GMAW)
- Soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW).

Todos estos procesos de soldadura pueden llevarse a cabo bajo la protección de una atmósfera o en vacío para prevenir la excesiva oxidación.

Los gases de protección comúnmente utilizados son argón, dióxido de carbono o helio.

Antes de realizar la reparación por soldadura, se debe preparar la superficie donde se depositará la soldadura, considerar si es necesario realizar un pre calentamiento, el cual se realiza a una temperatura adecuada durante un período de tiempo específico, para determinar la temperatura de pre calentamiento se puede utilizar las recomendaciones dadas en los diversos códigos de fabricación por soldadura, como tenemos el código AWS D1.1 [7].

Con el proceso de pre calentamiento se puede lograr una mejor penetración de la soldadura de reparación y reducir la velocidad de enfriamiento, reduciendo la formación de zonas duras.

En la soldadura de reparación se realizan la cantidad de pases necesarios para poder llenar la región a reparar. Una vez que el proceso de reparación ha sido concluido se puede proceder, de manera opcional, con el proceso de tratamiento térmico post soldadura que ayuda a la eliminación de tensiones residuales y reduce sustancialmente el riesgo de que la sección del eje de levas reparado se agriete después del proceso de soldadura.

Finalmente se maquina la superficie reparada hasta llevarlo a las dimensiones finales o dependiendo del tratamiento de endurecimiento superficial (cementación o nitruración) a dimensiones intermedias, para luego realizar el rectificado correspondiente. [8].

Lo recomendable es hacer un adecuado control de calidad de la reparación a través de la realización de técnicas no destructivas y evaluar sus propiedades mecánicas a través del ensayo de dureza superficial.

1.7. Fatiga mecánica.

Fatiga es el proceso de cambio localizado progresivo que ocurre en un material sujeto a cargas o esfuerzos cíclicos en algún punto o puntos y que pueden culminar en fisuras o fractura completa [9].

Se debe tener en consideración el fenómeno de fatiga mecánica en la etapa de diseño y en la designación del material a utilizar en la fabricación de un componente. La presencia de cargas cíclicas que actúen bajo amplitud constante o amplitud variable es crítica para que se produzca el fenómeno de fatiga mecánica. Cuando se analiza una falla y se atribuye a la fatiga, lo único que se sabe en ese punto es que las cargas (las tensiones / esfuerzos) fluctuaban. No se sabe necesariamente nada sobre la nucleación del daño que forma el origen de las grietas por fatiga. [10].

La fatiga se puede definir como la medida de la disminución de la resistencia a tensiones repetitivas. En otras palabras, cuando un componente es sometido a cargas cíclicas, este podría fallar a un esfuerzo considerablemente menor que el esfuerzo de fluencia.

Para que pueda ocurrir una falla por fatiga deben de existir tres condiciones:

- a. Que el esfuerzo al que está sometido el eje sea lo suficientemente elevado para que se pueda iniciar una fisura.
- b. La variación del esfuerzo debe ser lo suficientemente grande para que permita la propagación de la fisura.
- c. El número de repeticiones (ciclos) debe ser lo suficientemente alto para que la fisura se propague.

Además de las condiciones antes mencionadas, otra de las condiciones es la presencia de discontinuidades, que puede ser macroscópica como una entalla en el componente mecánico o microscópica como la presencia de una inclusión en el material utilizado en la fabricación del componente (Díaz 2017: 6).

Según Díaz, se puede establecer cuatro etapas en la falla por fatiga de un componente, tal como se muestra en la figura 14 (2017: 6):

- a. Micro-deformación plástica. Microdeformaciones provocan movimiento de los planos de deslizamiento a través de dislocaciones.
- b. Etapa I - Iniciación de microfisuras: Se originan en bandas de deslizamiento, límites de grano, en partículas de segunda fase, en inclusiones o interfaces matriz/fase secundaria.
- c. Etapa II – Propagación de microfisuras: Las microfisuras crecen a través de determinados planos cristalográficos y es muy dependiente de la microestructura. Alcanzando un tamaño, esta microfisura crece bajo la acción de los esfuerzos aplicados moviéndose en la dirección normal a los esfuerzos de tracción máximos.
- d. Falla final: Crecimiento inestable de fisura, hasta la falla final (Díaz 2017: 6).

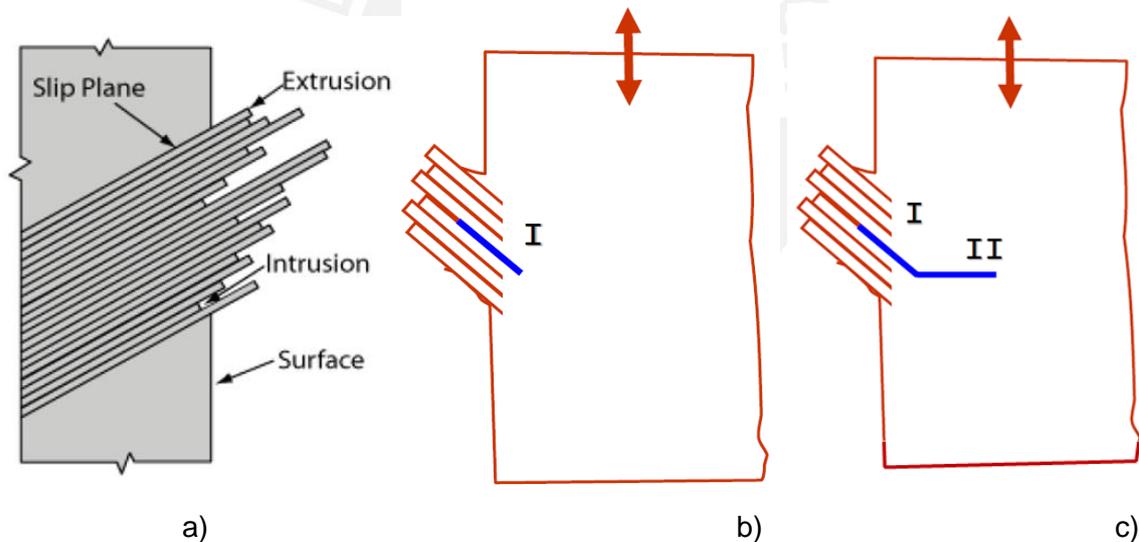


Figura 14.- Mecanismos de fallas por fatiga. a) Microdeformación plástica. b) Etapa 1: Iniciación de microfisuras. c) Etapa II: Propagación de microfisuras. [10].

La figura 15 presenta una fractografía realizada a un eje de reductor SEW, las evidencias, permiten identificar que el mecanismo de fractura es compatible con fatiga mecánica de bajas cargas por acción de esfuerzos de flexión con medianos concentradores de tensiones.

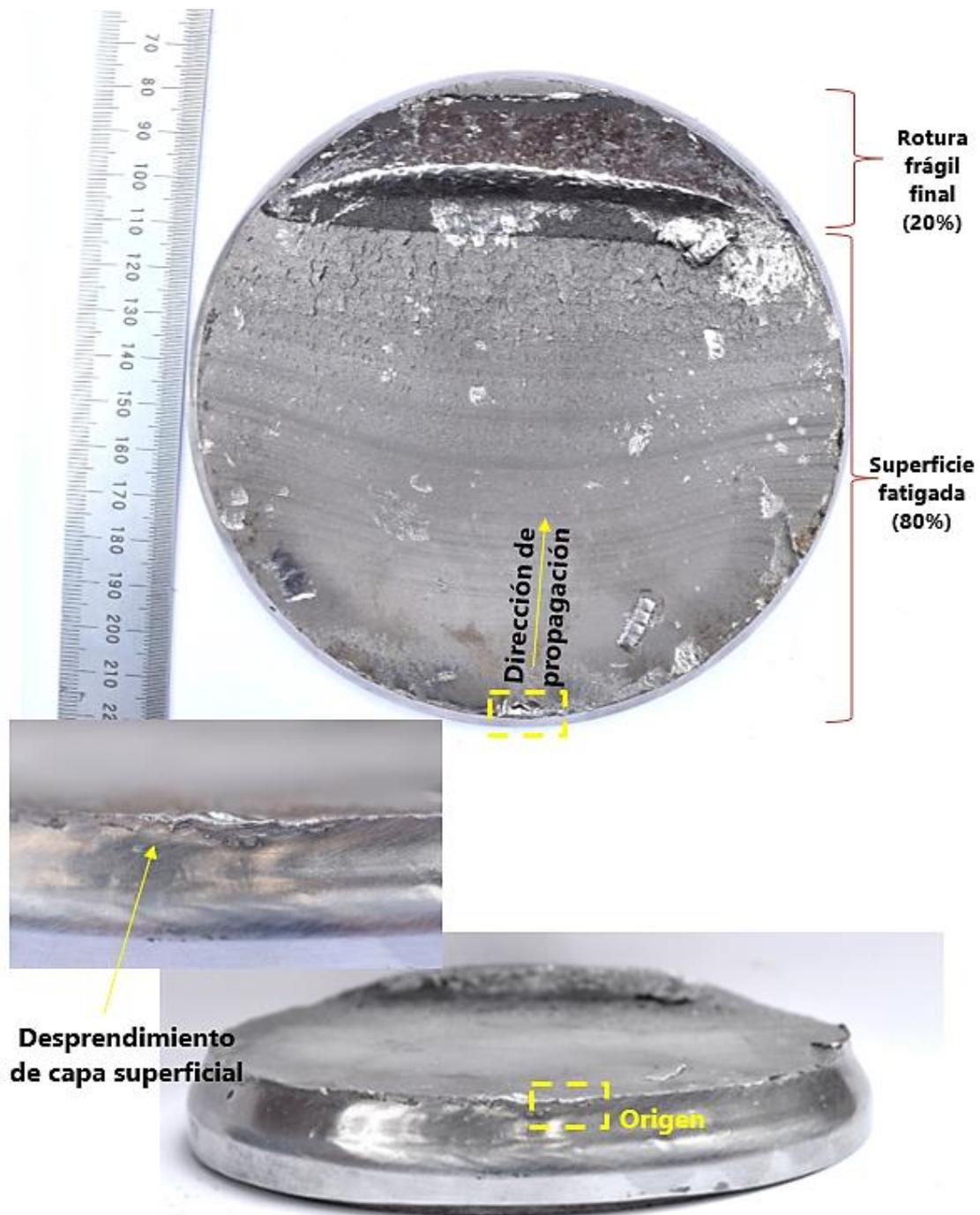


Figura 15.- Fractografía de un componente fallado. Identificación del origen y propagación de la falla.

1.7.1. Fatiga en ejes de transmisión

Los ejes y árboles de transmisión son componentes mecánicos que giran sobre su propio eje, algunos de ellos transmiten grandes potencias por periodos de trabajo bastante largos. En la figura 16 se puede observar como un punto infinitesimal "A" sobre la superficie de un eje que está sometido a cargas de flexión puede pasar de estar sometido a compresión en un tiempo "t1" a estar sometido a tracción en un

tiempo "t2". De esta manera se demuestra que la misma naturaleza de trabajo al que están sometidos los ejes cumplen con los requisitos b y c para que se produzca una falla por fatiga.

Por lo tanto, basta que los esfuerzos a los que están sometidos los ejes sean lo suficientemente alto para que se inicie una fisura para que el eje termine de fallar por fatiga (Díaz 2017: 7)

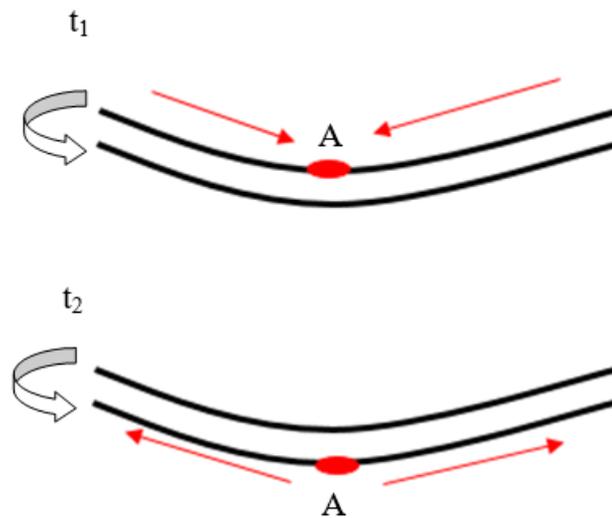


Figura 16.- Variación de esfuerzos de un punto en el tiempo (Díaz 2017: 7).

1.7.2. Tipos de fatiga que se presentan en ejes de transmisión.

Según el manual de "Fractografía" de la Sociedad Americana de Materiales publicado en 1992 [9], se puede clasificar el tipo de fatiga según los esfuerzos a los que están sometidos los componentes. En la figura 17 se puede observar un esquema del comportamiento de las cargas que pueden ocasionar fallas por fatiga, siendo los principales:

- Fatiga en componentes sometidos a flexión rotativa.
- Fatiga en componentes sometidos a torsión rotativa.

Los árboles al ser componentes mecánicos que están en rotación pueden fallar por fatiga por flexión rotativa o por torsión (Díaz 2017: 7-8)

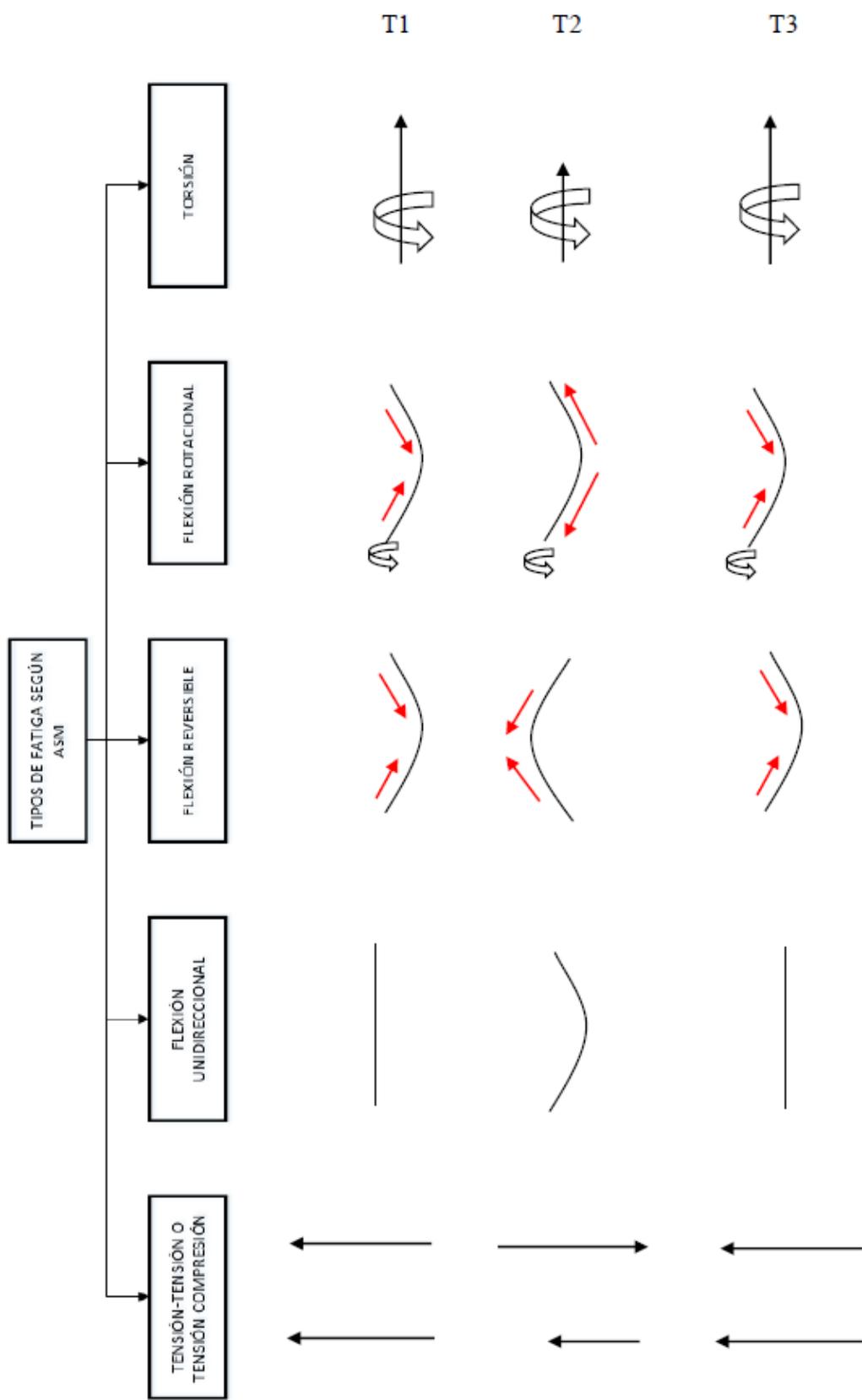


Figura 17.- Esquema de comportamiento de esfuerzos en fallas por fatiga (Díaz 2017: 8).

1.8. Principales factores que ocasionan fallas en ejes de transmisión

“Las causas más comunes de falla en ejes de transmisión de potencia son las siguientes:

- Problemas en el diseño
- Problemas en la fabricación
- Problemas en el material” (Díaz 2017: 9).

1.8.1. Problemas en el diseño

Los problemas de diseño más comunes que están presentes en los ejes de transmisión son los siguientes:

- Subestimación de esfuerzos en servicio. Este tipo de problema puede desencadenar en un mecanismo de falla dúctil o en caso de fatiga una falla catastrófica.
- Geometría indeseable: Este tipo de problema es muy frecuente en los ejes, ya que este tipo de componentes llevan canales chaveteros y cambios de sección, y ambos suelen ser grandes concentradores de tensiones si no se tiene especial cuidado al designar el radio de redondeo para aliviar tensiones.
- Selección inadecuada de materiales.
- Selección inapropiada del tratamiento térmico (Díaz 2017: 9).

1.8.2. Problemas en la fabricación

Los problemas en la fabricación de los ejes más comunes son los siguientes:

- Pobre acabado superficial: Huellas de mecanizado sobre la superficie que pueden ser concentradores de esfuerzos y originar la fisura.
- Recalentamiento por maquinado: Aumenta la dureza del eje en la zona recalentada tornándolo frágil.
- Mala ejecución del tratamiento térmico: Pueden ocasionar fisuras en el temple, sobrecalentamientos, un sobre revenido afectando directamente a las propiedades para las que fue diseñado el eje.
- Inadecuado tratamiento superficial (Díaz 2017: 9-10)

1.8.3. Problemas en el material

Los problemas más frecuentes que pueden presentar los materiales en la fabricación de los ejes de transmisión, son los siguientes:

- Pobre calidad del material.

- La composición química del material no cumple con las especificaciones de los códigos o normas.
- Fases indeseables e inclusiones no metálicas, éstas pueden ser redondeadas o alargadas; agrupadas, alargadas o puntuales. Este punto es muy importante, ya que las inclusiones actúan como concentradores de tensiones reduciendo notablemente la resistencia a la fatiga de los materiales (Díaz 2017: 10).

1.9. Análisis de falla de un componente.

El análisis de falla de un componente es un proceso crítico para determinar las causas físicas por la que falla. El proceso es complejo, involucra la participación de muchas disciplinas técnicas diferentes y utiliza una variedad de técnicas de observación, inspección y ensayos de laboratorio. Uno de los factores clave para realizar correctamente un análisis de fallas es mantener una mente abierta al examinar y analizar la evidencia para fomentar una perspectiva clara e imparcial de la falla. En ciertas circunstancias se requiere la colaboración con expertos en otras disciplinas para integrar el análisis de la evidencia con una comprensión cuantitativa de los factores de esfuerzos y la información de fondo sobre el diseño, la fabricación y el historial de servicio del producto o sistema fallido (ASM International 2002: 14). [12].

“La causa raíz de una falla es la causa primaria sobre la cual se debería actuar principalmente a fin de evitar fallas similares en el futuro. No existe normalmente una sola causa raíz para una falla, sin embargo, es posible analizar su efecto y por tanto valorar su grado de incidencia para prevenir en el futuro” (ASM International 2002: 16).

La ASM International [12] explica que la causa raíz de la falla de un componente puede ser:

- a. Causa raíz física: Cuyo origen es físico, son aquellas razones físicas que provocó la falla.
- b. Causa raíz humana: Cuyo origen es humano, comprende todos los errores humanos (si los hubiera) que provocaron la falla física.
- c. Causa raíz latente: Cuyo origen está en el sistema, abarca las deficiencias en los sistemas de gestión que permiten que los errores humanos continúen sin detectarse.

Existen diversas metodologías o procedimientos para detectar la causa de una falla:

- Análisis de falla (FA): Tiene por finalidad encontrar las razones físicas (mecanismo de daño) que provocó la falla. Este análisis se realiza en un laboratorio.
- Investigación de la causa raíz (RCI): Tiene por finalidad detectar los errores humanos (si los hubiera) que provocaron la falla física. Incluye una investigación en campo y es más profundo que el análisis de falla, ya que no solo se enfoca a la falla física, sino que también pretende encontrar las fallas humanas.
- Análisis de la causa raíz de la falla (RCA): Tiene por finalidad encontrar las deficiencias en los sistemas de gestión que permiten que los errores humanos continúen sin detectarse. Implica conducir un verdadero análisis que identifique las causas raíz físicas, humanas y latentes asociadas a como ocurrió un acontecimiento indeseable. La falla incluye ahora otros acontecimientos no mecánicos, como los incidentes de seguridad, defectos de calidad, quejas del cliente, problemas vinculados a procesos administrativos, entre otros.

Una falla se puede definir como una condición inesperada e indeseable que inhabilita el funcionamiento correcto de un componente, máquina o proceso. Dependiendo de la severidad con la que se presente, puede ser interpretada de distintas formas. El objetivo del presente estudio es determinar la causa física más probable de falla de un eje de levas recuperado por soldadura (Hurtado 2019: 7-8) [13].

1.10. Etapas del análisis de falla

Las etapas relevantes para un análisis de falla son:

- a. Recopilación de información:
 - Recopilación del historial de información y selección de muestras
 - Examen preliminar de las muestras falladas
 - Ensayos no destructivos
- b. Evaluación de los daños y las condiciones que repercutieron en la fractura:
 - Selección, identificación, preservación y limpieza de las muestras
 - Examen y análisis macroscópico
 - Examen microscópico y análisis de las superficies fracturadas
 - Determinación del mecanismo de fractura

- c. Condición del material:
 - Examen y análisis metalográfico
 - Ensayos mecánicos
 - Análisis químico
 - Discusión con expertos
 - Síntesis de información, formulación de conclusiones y elaboración del reporte.

Los procedimientos y ensayos por realizar en el análisis de falla usualmente son seleccionados por el analista en base a su experiencia y a consultas realizadas a expertos (Hurtado 2019: 8-9).

1.11. Alcance de los ensayos realizados.

1.11.1. Inspección visual:

El ensayo de inspección visual es un método de ensayo no destructivo cuyo alcance es detectar discontinuidades superficiales que son lo suficientemente grandes para ser detectadas por el ojo humano, con ayuda de algunos instrumentos de medición e iluminación.

La inspección visual es el método no destructivo por excelencia, aplicándose en muchas etapas del proceso de construcción de un componente, así tenemos:

- Detección de discontinuidades producidas durante un proceso fabricación de una componente.
- La inspección visual debe realizarse siempre, antes, durante y después de la fabricación de un componente, sirve como primer ensayo de control de calidad, para después utilizar otros ensayos no destructivos que complementen lo determinado mediante la inspección visual inicial.
- Si se realizar el ensayo de inspección visual correctamente reduce la necesidad de otros ensayos no destructivos (END).

La correcta realización de un ensayo de inspección visual depende de muchos factores que el inspector debe dominar, como son, tener el conocimiento necesario para hacer una observación visual prolija, saber interpretar los resultados productos de la realización del ensayo, para lo cual se deben tener conocimientos sólidos de

la constitución de los materiales, procesos de fabricación industrial y los diversos tipos de discontinuidades se pueden presentar en el componente según el proceso de fabricación y forma de trabajar del componente a inspeccionar (tipo de cargas aplicadas, el ambiente de las instalaciones).

1.11.2. Partículas magnéticas:

El ensayo de partículas magnéticas es un ensayo no destructivo que se emplea para detectar discontinuidades superficiales y sub superficiales en materiales ferromagnéticos, mediante la magnetización de la muestra y haciendo uso de corriente eléctrica, para lo cual se emplean partículas magnéticas finamente divididas que tienden a congregarse en las regiones del campo de fuga generados por las discontinuidades. En la figura 18 se puede observar la presencia de fisuras encontradas, mediante la técnica de partículas magnéticas fluorescentes, en la superficie de una culata de un motor CAT 3512B con N° parte 154-1612.

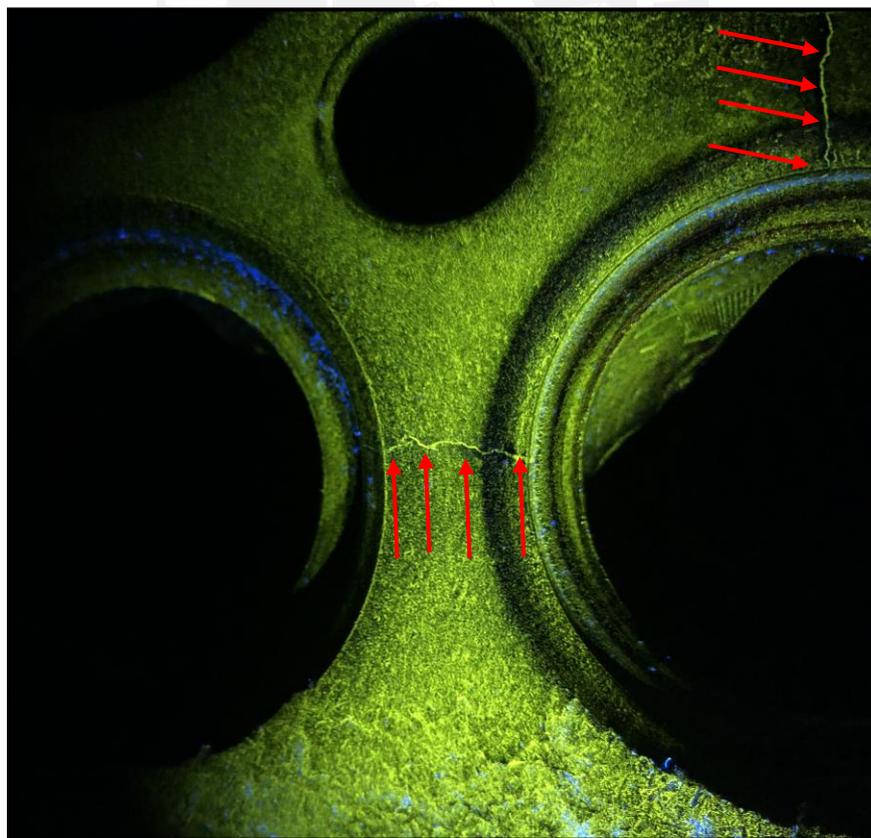


Figura 18.- Fisuras encontradas en la superficie de una culata de un motor CAT 3512B, mediante partículas magnéticas fluorescentes.

1.11.3. Análisis fractográfico:

La fractografía es la ciencia que tiene como objetivo principal analizar las características de una superficie de fractura e intentar relacionar la morfología con las causas y/o mecanismos de falla.

La fractografía puede dividirse en 2: Macro-Fractografía y Micro-Fractografía. El análisis del primero se realiza a ojo desnudo o con ayuda de un estereoscopio, el cual permite observar una superficie con 40 aumentos; mientras que, el análisis del segundo se realiza a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM).

El análisis fractográfico se debe realizar a aquellos componentes que hayan fallado por algún mecanismo de fractura, es decir, falla dúctil, falla frágil, o falla por fatiga (Díaz 2017: 14).

1.12. Caracterización de material.

“Los primeros ensayos que se deben realizar al componente son los ensayos de caracterización de material. El objetivo principal es conocer la composición química, microestructura y las propiedades mecánicas del componente fabricado con el objetivo de establecer si es el material adecuado y que la falla final no es atribuible al material. Para esto se realizan los siguientes ensayos” (Díaz 2017: 18):

1.12.1. Análisis químico:

“El análisis químico es una técnica de caracterización de un material que se emplea para determinar su composición química a nivel elemental. El objetivo de este ensayo es determinar en porcentaje en peso de la composición química de la muestra” (Díaz 2017: 18).

1.12.2. Cálculo del carbono equivalente:

“El carbono equivalente es el índice que permite correlacionar la composición química de un acero con su tendencia a presentar estructuras frágiles cuando éste es sometido a un proceso de soldadura, lo que se considera una manera de determinar su soldabilidad” (Hurtado 2019: 12).

El objetivo de este cálculo es hallar el valor del carbono equivalente del material con que fue fabricado el eje de levas, para luego poder determinar la temperatura de pre calentamiento y entre pases recomendadas para hacer una buena reparación por soldadura.

1.12.3. Análisis metalográfico:

El objetivo principal de este ensayo es determinar la microestructura de la muestra analizada y además si hay presencia de inclusiones no metálicas en la muestra y de haberlo cuál es la distribución de estas. Por ello se debe realizar el ensayo en 2 etapas: antes del ataque químico con el objetivo de buscar inclusiones no metálicas; y después de realizar el ataque químico, con la finalidad de observar cuál es la microestructura del material (Díaz 2017: 19).

1.12.4. Análisis macrográfico:

“El análisis macrográfico es un método que permite observar discontinuidades en los materiales a ojo desnudo o con la ayuda de lentes de aumentos hasta una magnificación de 40 aumentos” (Hurtado 2019: 21).

1.12.5. Espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS)

El uso más importante de EDS es la determinación cuantitativa de la concentración o cantidad de elementos en una variedad de materiales. La información cualitativa disponible de un espectro de rayos X es la energía o la longitud de onda a la que aparecen las líneas de emisión de rayos X en el espectro. La información cuantitativa es la intensidad de la radiación X emitida. Esta intensidad normalmente se expresa como el número de conteos por segundo, I (cps), desde el detector o el número total de conteos, N, obtenidos en un período de tiempo fijo, como 100 s (ASM International 1998: 208) [14], determinándose así la composición química del material ensayado.

1.12.6. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza consiste en presionar un indentador de geometría y propiedades mecánicas conocidas en el material de prueba. La dureza del material se cuantifica usando una de las tantas escalas que directa o indirectamente indican la presión de contacto involucrada en la deformación de la superficie de prueba. Dado que el indentador se presiona en el material durante la prueba, la dureza también se ve como la capacidad de un material para resistir cargas de compresión (ASM International 2000:416) [15].

1.12.6.1. Dureza Vickers

Según ASM Internacional, el ensayo de dureza Vickers consiste en presionar un indentador con forma piramidal de base cuadrada en un material por un tiempo establecido, luego se elimina la fuerza de indentación, se miden las diagonales de la indentación resultante y se calcula el número de dureza dividiendo la fuerza entre el área de la superficie de la indentación. Las fuerzas de ensayo pueden ser de 1 a 120 kilogramos fuerza (2000: 459-460) [15].



2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA

Para realizar el presente trabajo de investigación se ejecutaron diversos análisis y ensayos siguiendo los lineamientos dados por la ASM Metal Handbook, Failure Analysis and Prevention [12]; además, se tomaron como referencia la metodología de análisis de estudios previos [16] – [20]. Los ensayos se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

La metodología aplicada en este trabajo se presenta en la figura 19, se aprecia que el estudio empieza con la llegada del eje de levas fracturado y concluye con la redacción del presente documento, donde encontramos los resultados de todos los ensayos realizados al eje de levas, las conclusiones propias del estudio y finalmente las recomendaciones para que un hecho indeseable no vuelva a ocurrir.

2.1. Inspección visual y fractografía.

La limpieza de las superficies inspeccionadas del eje de levas fracturado se realizó siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E165 [21], para lo cual se utilizó un removedor SKC-S de la marca MAGNAFLUX.

La inspección visual se desarrolló de acuerdo con establecido en el código ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. V, Artículo 9 – Visual Examination [22], se verificó que el nivel de iluminación esté por encima de 1000 luxes, mediante un medidor de luz visible digital de la marca MAGNAFLUX.

2.2. Partículas magnéticas

El ensayo de partículas magnéticas se desarrolló de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM E709 Guía Estándar para Ensayos de Partículas Magnéticas [23]. La inspección se realizó utilizando partículas magnéticas fluorescentes en suspensión base aceite aplicada en toda la superficie exterior del eje de levas y en la zona de fractura. La magnetización se realizó utilizando un yugo magnético con corriente alterna, marca Magnaflux modelo Y7 y una lámpara de luz ultravioleta marca Magnaflux modelo UV5000.

Antes de realizar el ensayo se verificó la fuerza del campo magnético del yugo utilizado, para ello se emplea un bloque cuyo peso es de 10 libras trazable al NBS (*National Bureau of Standards*) de Estados Unidos.

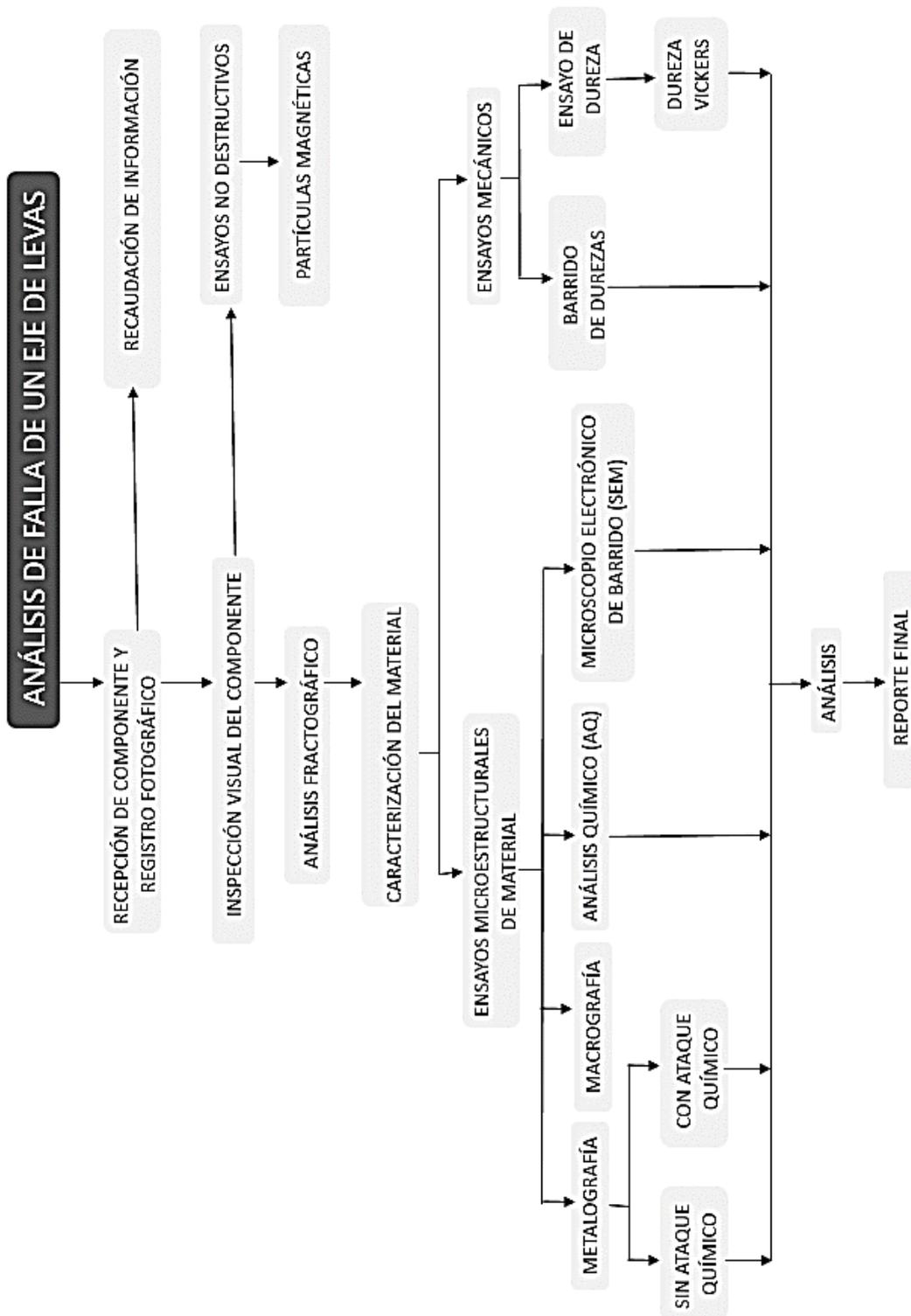


Figura 19.- Metodología del análisis de falla de un eje de levas materia de este estudio.

2.3. Caracterización del material

Para la correcta realización de la caracterización del material se cortó una sección delgada de uno de los extremos del árbol de levas, donde se encuentra la superficie de fractura, para luego realizar cortes que permitan observar las zonas previamente identificadas como inicios de la fractura del eje de levas. Esto se puede apreciar en la figura 20. La muestra se extrajo mediante corte mecánico, utilizando refrigerante, para controlar el efecto del calor generado durante el corte y que este calor no afecte las propiedades mecánicas, ni la microestructura del material del árbol de levas.

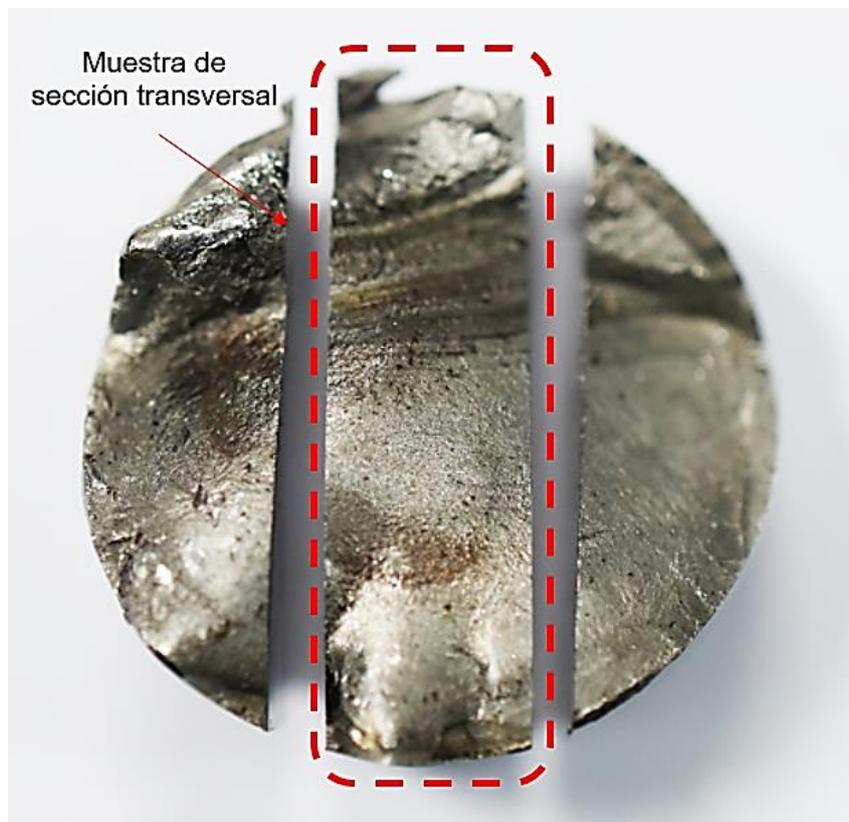


Figura 20.- Identificación de las zonas corte para análisis macrográfico, metalográfico y barridos de dureza.

El objetivo principal de estos ensayos es conocer la composición química, microestructura y las propiedades mecánicas del componente fabricado con el objetivo de establecer si es el material adecuado y que la falla final no es atribuible al material. Para esto se realizan los siguientes ensayos:

2.3.1. Análisis químico

El análisis químico se desarrolló de acuerdo con ASTM E415, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry [24].

El equipo empleado para el análisis químico fue un espectrómetro de emisión óptica por chispa de la marca Bruker modelo Q8 MAGELLAN.

Las consideraciones a tener en cuenta para preparar la muestra de ensayo fueron las siguientes:

- La muestra extraída debe tener un espesor entre 10 a 38 milímetros.
- La muestra debe tener dos caras paralelas.
- La superficie de la muestra a analizar debe ser pulida con papel lija número 120 como mínimo.

2.3.2. Cálculo del carbono equivalente

El carbono equivalente (CE_{Pcm}) se calculó de acuerdo a la fórmula recomendada por el AWS D1.1, Código de Soldadura Estructural – Acero [7]. La fórmula establecida se muestra a continuación:

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

2.3.3. Análisis metalográfico

El análisis metalográfico se realizó siguiendo los lineamientos de las siguientes normas:

- ASTM E3, Preparación de Especímenes Metalográficos. [25].
- ASTM E7, Terminología de Metalografía. [26].
- ASTM E45, Determinación de Contenido de Inclusiones en el Acero. [27].
- ASTM E112, Determinación del Tamaño de Grano Promedio. [28].
- ASTM E407, Microataque de Metales y Aleaciones. [29].

El análisis de la microestructura se realizó de acuerdo con el ASM Metal Handbook, Volume 9 [30].

El equipo empleado para realizar el análisis metalográfico fue un microscopio óptico de la marca Leica modelo DMI 5000, que permite alcanzar los 1000 aumentos, tiene incorporada una cámara digital y un software de procesamiento de imágenes.

Los pasos seguidos para la realización de este ensayo son los siguientes:

- Extracción de la muestra del componente, mediante corte mecánico.
- Preparación de una briqueta, para esto se utilizó una máquina para moldear en polvo.
- Posteriormente, la briqueta pasa por un proceso de pulido. Primero, este se realiza a través de lijas de carburo de silicio de granulometría 240, 320, 400 y 600 y después con la ayuda de unos platos giratorios magnéticos de diamante de 1 y de 0,3 micras.
- Finalmente, se utiliza un microscopio óptico marca Leica, para poder tomar imágenes de la superficie de la muestra sin y con ataque químico. El ataque metalográfico se realizó empleando nital disuelto al 5%.

2.3.4. Análisis macrográfico

El análisis macrográfico se realizó siguiendo los lineamientos de las siguientes normas:

- ASTM E3, Preparación de Especímenes Metalográficos. [25].
- ASTM E7, Terminología de Metalografía. [26].
- ASTM E340, Macroataque de Metales y Aleaciones. [31].

2.3.5. Espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS)

El microscopio electrónico Quanta 650 utiliza un detector en estado sólido de silicio y litio Si(Li) cuya función es recibir los rayos X para enviarlos a un amplificador y convertidor de señales y finalmente esta energía se envía a un analizador, para

funcionar bien se cuenta con sistemas informáticos dedicados. Se han desarrollado muchos paquetes de software para el análisis de datos, y los proveedores continúan desarrollando nuevos detectores, productos electrónicos y otro hardware, que presentan la información como espectros de intensidad contra energía de emisión (keV), los cuales permitirán determinar la composición química del material. La figura 21 muestra el equipo utilizado para realizar los ensayos.



Figura 21.- Microscopio Electrónico – Quanta 650 – FEI, con detector (EDS) EDAX Team.

2.3.6. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza Vickers se realizó siguiendo los lineamientos de ASTM E92, Métodos de Ensayo Estándar para Dureza Vickers y Dureza Knoop de Materiales Metálicos. [32].

Se realizó mediciones de dureza en una sección del material del árbol de levas, empleando el método de dureza Vickers (HV), con una carga de 3 kilogramos, utilizando el durómetro Vickers de la marca ZWICK/ROELL modelo ZHV.

Adicionalmente, se realizó barridos de dureza en diferentes zonas y direcciones, con la finalidad de estudiar el comportamiento mecánico del componente en la zona donde se existen reparaciones superficiales.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Inspección visual y fractografía

Mediante esta técnica de inspección visual y fractografía se encontró lo siguiente:

- a) El eje de levas está partido en dos tramos, siendo la ubicación de la falla en uno de los extremos del eje de levas, tal como se puede apreciar en la imagen de la figura 22.

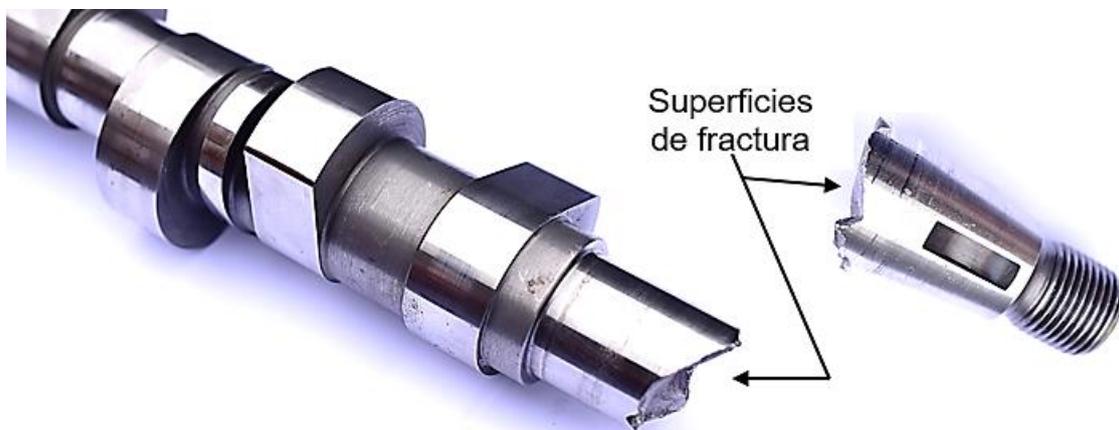


Figura 22.- Identificación de las superficies de fracturas.

- b) Analizando detenidamente las zonas cercanas a la falla (figura 23 y figura 24), se puede observar la presencia de huellas propias de un mecanizado, esto evidencia que la zona cercana a la falla ha tenido algún tipo de trabajo o reparación. Se descarta que estas marcas se generaran por desgaste abrasivo dado que en esa zona el eje de levas no tiene contacto con otro elemento de máquina.
- c) Al analizar la superficie de fractura se puede identificar que el mecanismo de falla asociado a la rotura del componente es fatiga mecánica de bajos esfuerzos [10], con una propagación del área fatigada de alrededor del 95% de la sección del árbol (ver figura 25, contorno de línea punteada roja).



Figura 23.- Huellas de mecanizado en la zona cercana a la falla.



Figura 24.- Huellas de mecanizado en la zona cercana a la falla.

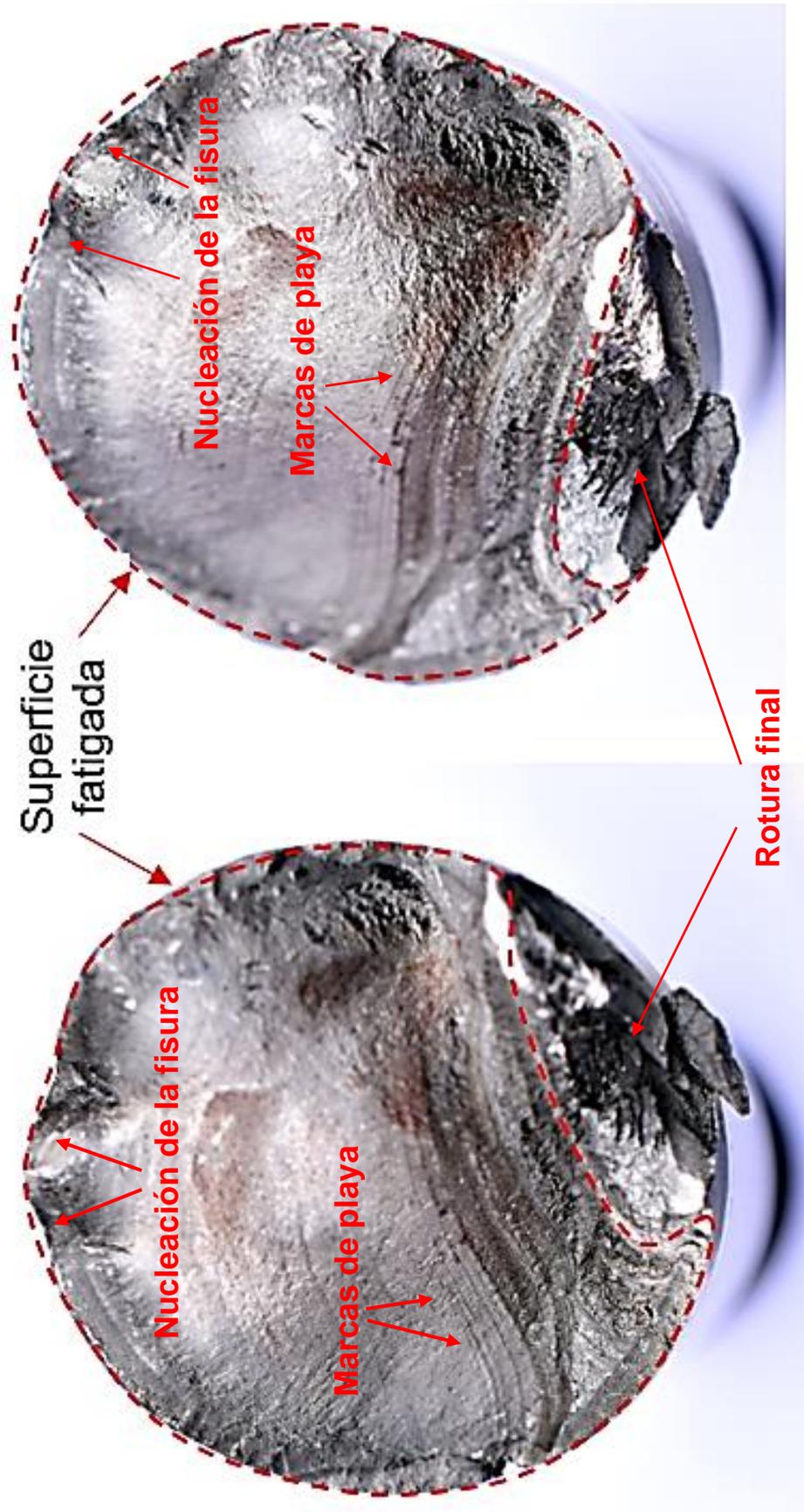


Figura 25.- Superficie de fractura de la falla.

3.2. Inspección por partículas magnéticas

Tal como se puede apreciar en la figura 26, los resultados del ensayo no evidencian indicaciones en el árbol compatibles con fisuras que puedan estar relacionados con el inicio de la falla.

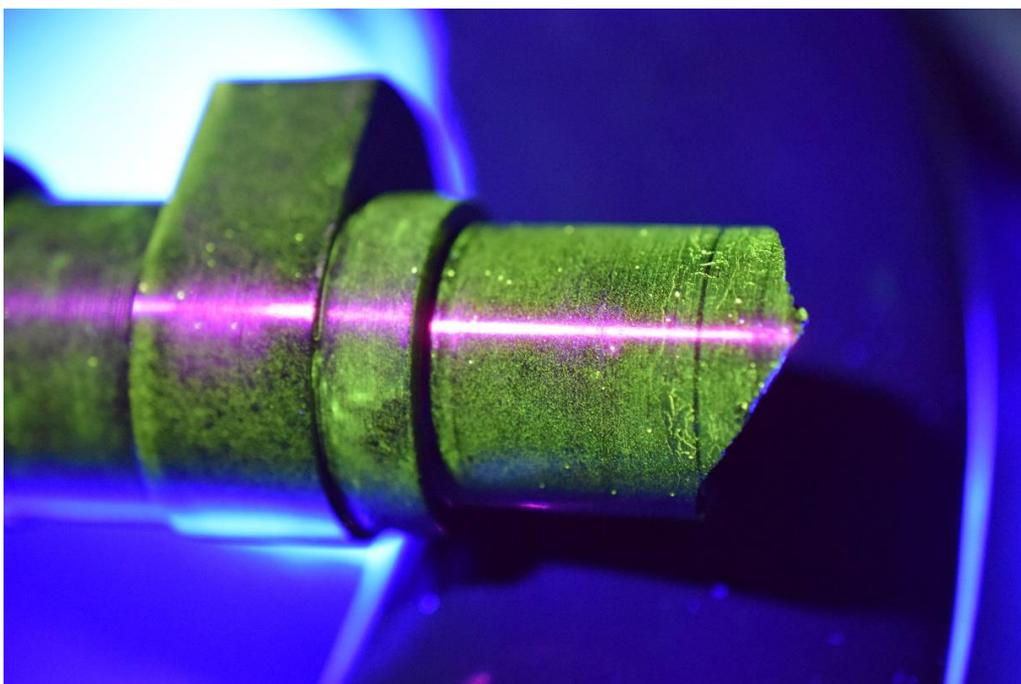


Figura 26.- Inspección por partículas magnéticas fluorescentes de la sección del árbol de levas fracturado.

3.3. Caracterización del material

3.3.1. Composición química

El resultado del análisis químico del material con que se fabricó el árbol de levas se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados del análisis químico del material base con que ha sido fabricado el árbol de levas.

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Muestra del eje de levas	0,23	0,63	0,20	0,036	0,029	0,09	0,53	0,02	0,27
EN 10084-2008	0,17 – 0,23	0,65 – 0,95	0,40 máx	0,025 máx	0,035 máx	0,40 – 0,70	0,35 – 0,70	0,15 – 0,25	---

Los resultados del análisis químico permiten establecer que la composición química del material es compatible con un acero con la denominación de bajo carbono y baja aleación al cromo y se asemeja a un acero EN 10084-2008 con bajo contenido de níquel y molibdeno.

3.3.2. Carbono equivalente

Con los valores encontrados en el análisis químico se determina el valor del carbono equivalente siguiendo los lineamientos de la norma AWS D1.1 [7].

$$CE = 0,23 + \frac{0,63 + 0,20}{6} + \frac{0,53 + 0,02}{5} + \frac{0,09 + 0,27}{15}$$

$$CE = 0,50\%$$

Con el valor del carbono equivalente y el porcentaje de carbono del material del eje de levas, se determinó la zona a la cual pertenece el acero, esta determinación se muestra en la figura 27.

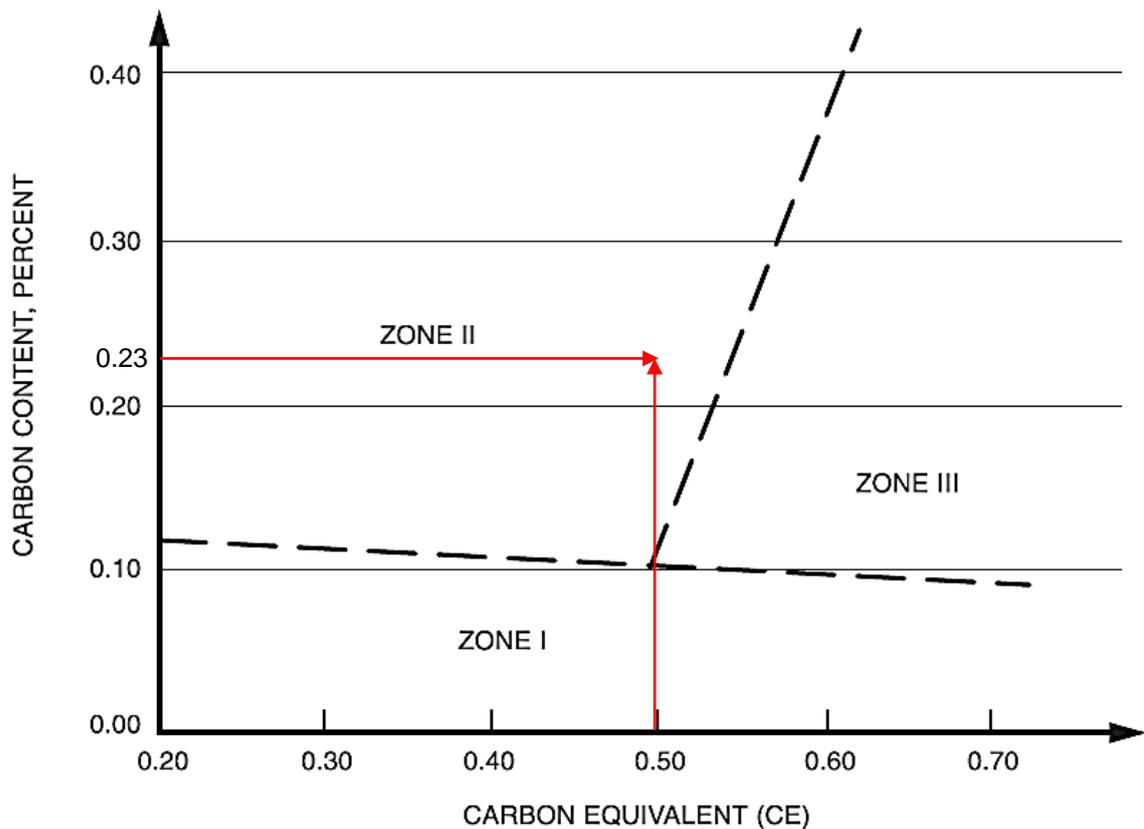


Figura 27.- Zona de clasificación. [7].

La zona II recomienda que para aceros de medio carbono, se requiere un control mínimo de la dureza y un precalentamiento para controlar la presencia de hidrógeno. Se procedió a determinar el valor del parámetro de composición y el índice de susceptibilidad en función al nivel de contenido de hidrógeno según el apartado H6.2 del anexo H del código AWS D1.1 [7].

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$$IS = 12 * P_{cm} + \log_{10}(H)$$

Donde:

P_{cm} : Parámetro de composición.

IS: Índice de susceptibilidad.

H: Nivel de hidrógeno ($\frac{5ml}{100g}$).

Así se obtiene los siguiente:

$$P_{cm} = 0,311$$

$$IS = 4,43$$

Con el valor de índice de susceptibilidad se le asigna un grupo, el cual corresponde a la letra D. Los grupos del índice de susceptibilidad se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Grupo de índice de susceptibilidad. [7].

Ítem	A	B	C	D	E	F	G
Índice	3,0	3,1 – 3,5	3,6 – 4,0	4,1 – 4,5	4,6 – 5,0	5,1 – 5,5	5,6 – 7,0

Por último, con el grupo del índice de susceptibilidad y el grado de restricción alto se determinó la temperatura mínima de precalentamiento de 140°C, según lo que se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Temperatura mínima de precalentamiento e interpase (°C). [7].

Table H.2 (Continued)								
Minimum Preheat and Interpass Temperatures for Three Levels of Restraint (see H6.2.4)								
		Minimum Preheat and Interpass Temperature (°C) ^b						
Restraint Level	Thickness ^a mm	Susceptibility Index Grouping						
		A	B	C	D	E	F	G
Low	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	140	150
	10–20 incl.	< 20	< 20	20	60	100	140	150
	> 20–38 incl.	< 20	< 20	20	80	110	140	150
	> 38–75 incl.	20	20	40	95	120	140	150
	> 75	20	20	40	95	120	140	150
Medium	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	70	140	160
	10–20 incl.	< 20	< 20	20	80	115	145	160
	> 20–38 incl.	20	20	75	110	140	150	160
	> 38–75 incl.	20	80	110	130	150	150	160
	> 75	95	120	140	150	160	160	160
High	< 10	< 20	< 20	20	40	110	150	160
	10–20 incl.	< 20	20	65	105	140	160	160
	> 20–38 incl.	20	85	115	140	150	160	160
	> 38–75 incl.	115	130	150	150	160	160	160
	> 75	115	130	150	150	160	160	160

^a Thickness is that of the thicker part welded.

^b "<" indicates that preheat and interpass temperatures lower than the temperature shown may be suitable to avoid hydrogen cracking. Preheat and interpass temperatures that are both lower than the listed temperature and lower than Table 3.3 shall be qualified by test.

Para corroborar estos cálculos se utiliza el método de Seferian para determina la temperatura de precalentamiento, para cual se utiliza las siguientes fórmulas:

$$C_q = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

$$C_e = 0,005 * e * C_q$$

$$C_t = C_q + C_e$$

Donde:

C_t : Porcentaje de carbono equivalente total.

C_q : Porcentaje de carbono equivalente que depende de la composición química.

C_e : Porcentaje de carbono equivalente que depende de la sección del árbol.

e : diámetro del árbol de levas en mm.

Así se obtiene los siguiente:

$$C_q = 0,23 + \frac{0,63 + ,053}{9} + \frac{0,09}{18} + \frac{7 * 0,02}{90} = 0,37\%$$

$$C_e = 0,005 * 20 * 0,37 = 0,037\%$$

$$C_t = 0,37 + 0,037 = 0,402\%$$

Para calcular la temperatura de precalentamiento utilizamos la siguiente fórmula:

$$T_p = 350 * \sqrt{(C_t - 0,25)}$$

Donde:

T_p : Temperatura de precalentamiento en °C.

Remplazando los valores se obtiene:

$$T_p = 350 * \sqrt{(0,402 - 0,25)} = 136,5 \text{ °C}$$

El valor de la temperatura de precalentamiento hallado mediante el método Seferian y el método establecido en el código AWS D1.1 es similar (140°C), por tanto, se determina que es necesario realizar un precalentamiento cuando se va a recuperar el árbol de levas por soldadura, para así evitar la formación de estructuras frágiles.

3.3.3. Análisis macrográfico

La figura 28 corresponde al ensayo macrográfico, se puede distinguir claramente la presencia de cordones de soldadura ubicados en el origen de la falla. La presencia de soldadura es producto de la reparación que ha sufrido el eje de levas; adicionalmente se puede apreciar zonas afectadas térmicamente producto de un aparente calentamiento localizado en dicha zona, a las cuales identificaremos como "Zona A" y "Zona B".

3.3.4. Análisis metalográfico

Luego de identificadas las zonas de interés mediante el ensayo macrográfico, se procedió a realizar el ensayo metalográfico, en las figuras 29 y 30 se presenta la metalografía del metal base sin ataque químico a 100 aumentos, se puede observar inclusiones no metálicas del tipo sulfuro presentes en el material, sin embargo, éstas son comunes en este tipo de aceros.

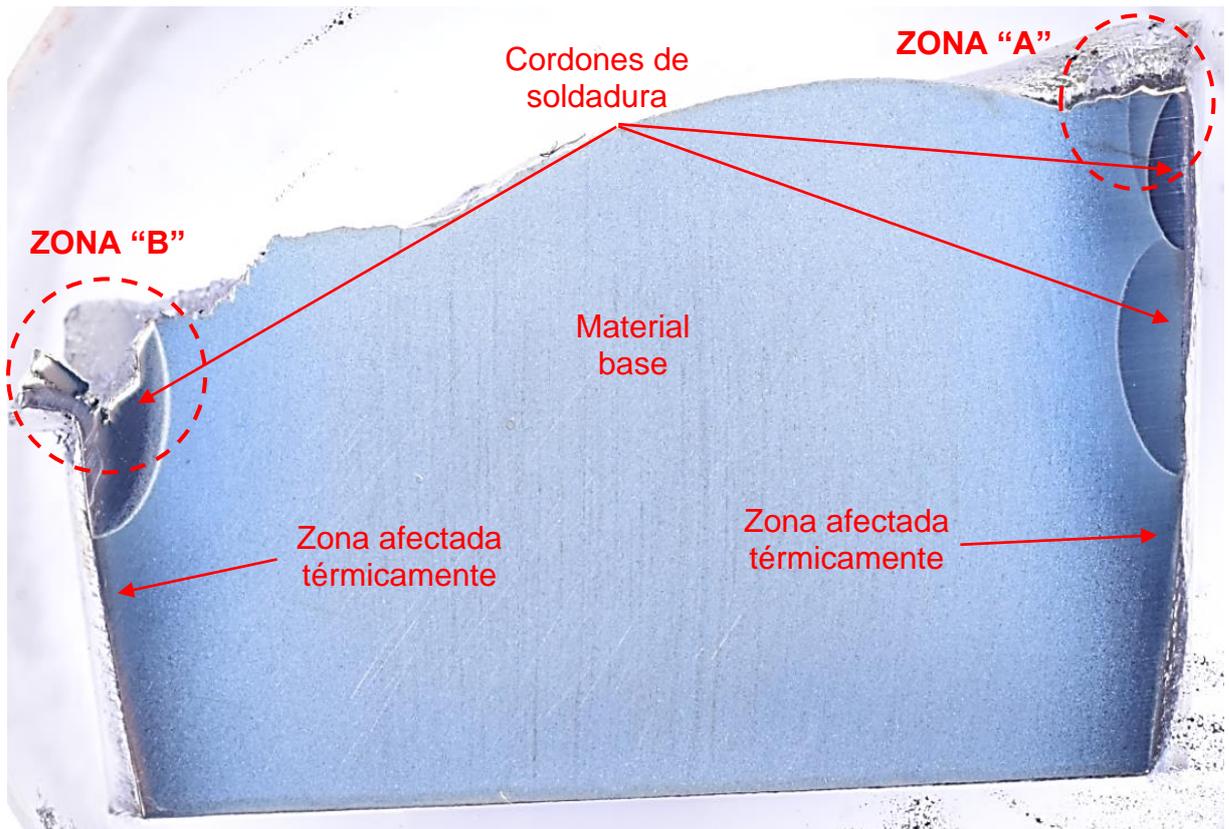


Figura 28.- Identificación de las zonas con signos de reparación por soldadura.



Figura 29.- Metalografía del metal base sin ataque químico en la superficie de fractura del árbol de levas. 50X.



Figura 30.- Metalografía del metal base sin ataque químico en el centro del árbol de levas. 100X.

La figura 31 corresponde a una vista realizada a 50X, sin ataque químico, de la "Zona A" (ver figura 28), se observan tres zonas pequeñas en la superficie que es compatible con una segunda reparación por soldadura, la primera recuperación tiene una zona mucho más amplia y profunda, por último, una grieta que va por la parte interna del árbol de levas y que se propaga a través del material del árbol y la zona de la primera recuperación. En la figura 32 se verifica que la grieta encontrada es interna y tiene una longitud de 1870 micras. La figura 33 muestra una ampliación de las reparaciones superficiales realizadas por soldadura, se observa que se realizaron tres cordones pequeños y próximos entre sí, y se presenta los límites de la primera recuperación. La figura 34 y 35 corresponden a una vista sin ataque químico de la "Zona B", se puede apreciar material depositado por los procesos de soldadura y fisuras que se propagan al interior del material del árbol, originadas por una deficiente segunda reparación, presencia de cavidad. Debido a que las grietas internas no originaron la falla del árbol de levas, no fue motivo del presente estudio, pero si es una señal de alarma pues de no haber fallado el árbol de levas, su fractura era inminente.

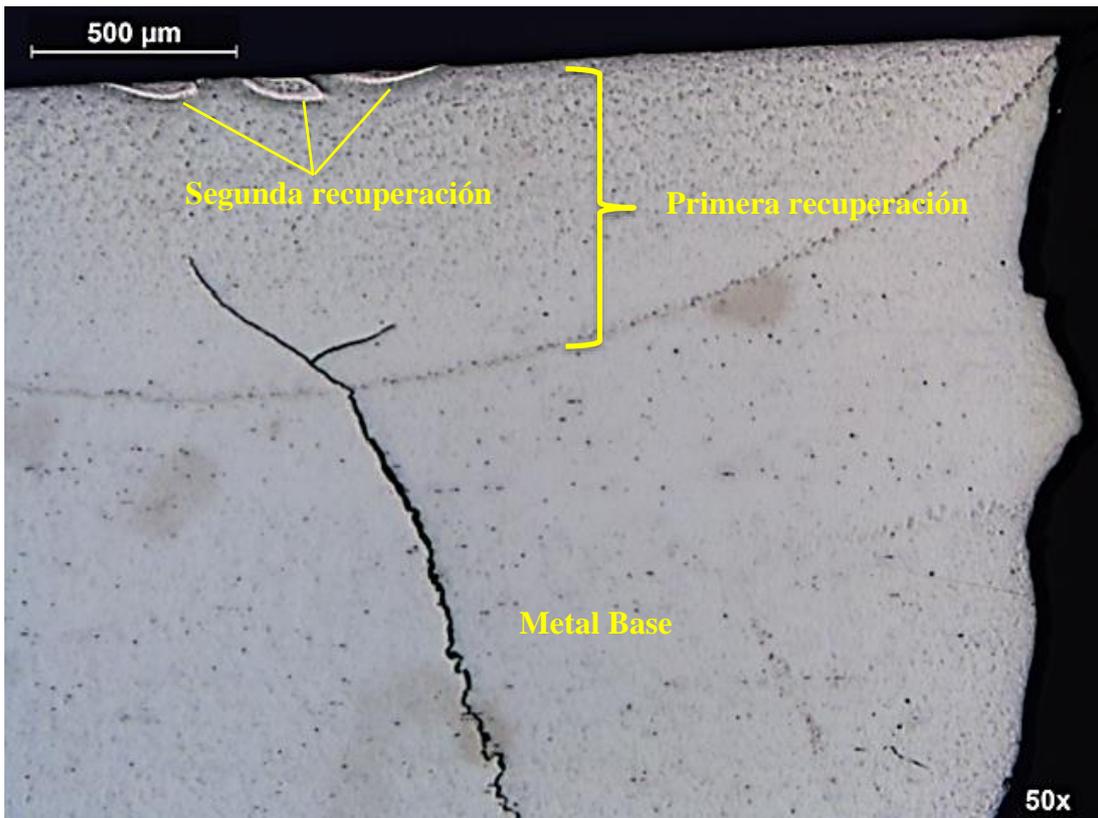


Figura 31.- Metalografía sin ataque en la "Zona A". 50X.



Figura 32.- Metalografía sin ataque en la "Zona A". La fisura presente en interna. 50X.



Figura 33.- Metalografía sin ataque en la “Zona A”. En la superficie existen tres reparaciones por soldadura. 100X



Figura 34.- Metalografía sin ataque en la “Zona B”. 50X.

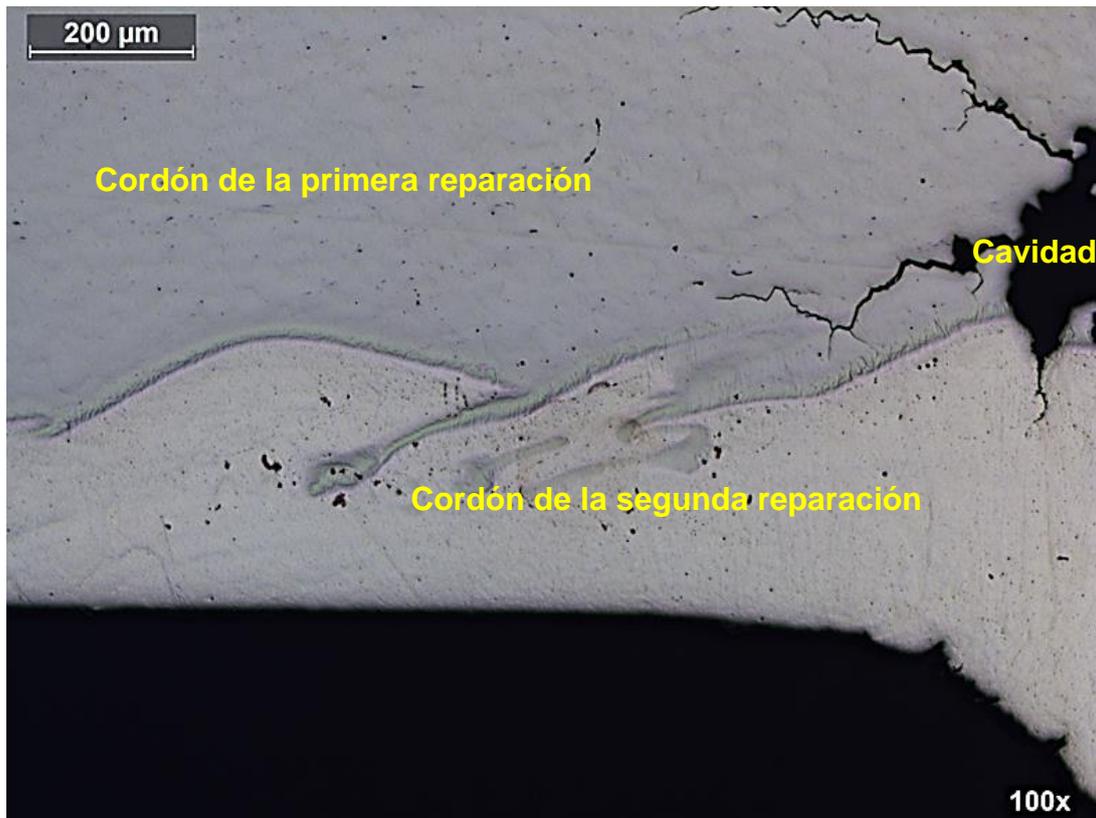


Figura 35.- Metalografía sin ataque en la "Zona B". 100X.

Las imágenes de la figura 36 y figura 37, muestran que la microestructura del metal del árbol de levas está conformada por perlita y ferrita [30].

La figura 38 corresponde a la "Zona A" con ataque químico, donde se realizaron las reparaciones, se aprecia tres puntos de soldadura pertenecientes a la segunda y última reparación que originó la fractura del árbol de levas (superficiales), una zona correspondiente a la primera reparación, que se realizó en otro proceso de recuperación del árbol de levas, (zona clara) y el material inicial del eje de levas (zona oscura).

La figura 38, corresponde a la superficie del eje de levas lejos de la zona de fractura, se observa variación microestructural desde la superficie (martensita) hacia el centro del árbol, típico de tratamiento de endurecimiento superficial (cementación).



Figura 36.- Metalografía del material base del eje de levas, constituida por perlita y ferrita. Muestra con ataque: Nital al 5%. 100X.



Figura 37.- Metalografía del material base del eje de levas, constituida por perlita y ferrita. Muestra con ataque: Nital al 5%. 500 X.

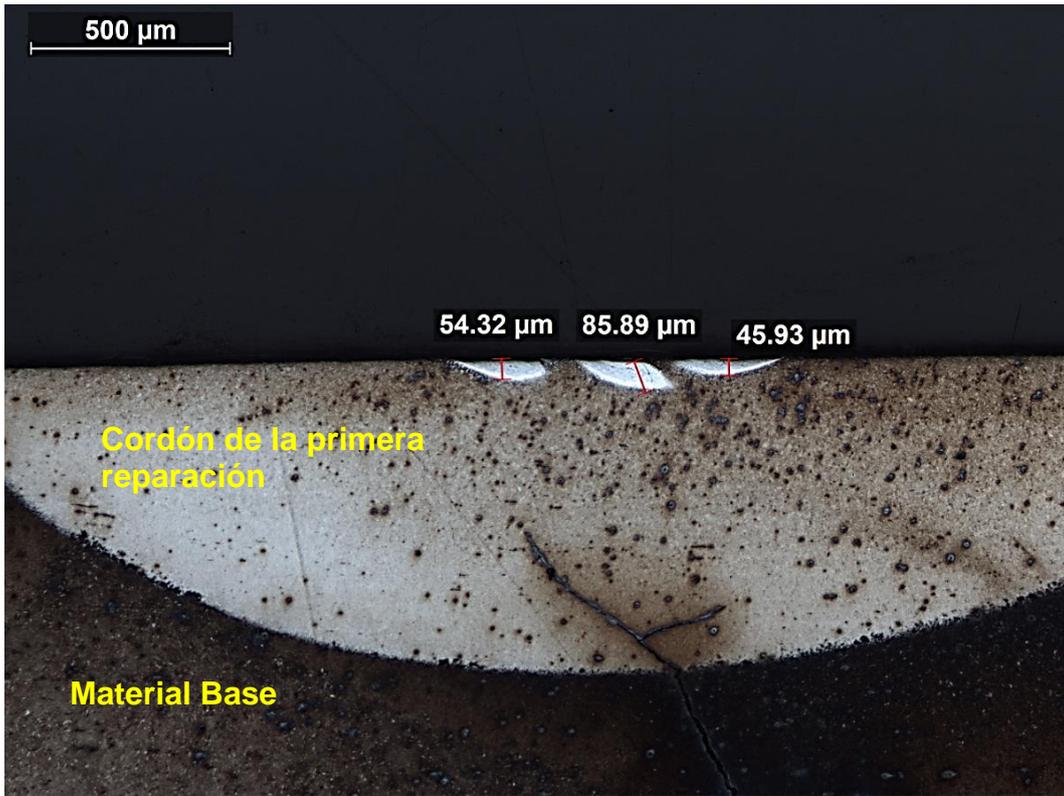


Figura 38.- Metalografía con ataque químico de "Zona A", se observa que las reparaciones fueron superficiales. 50X.

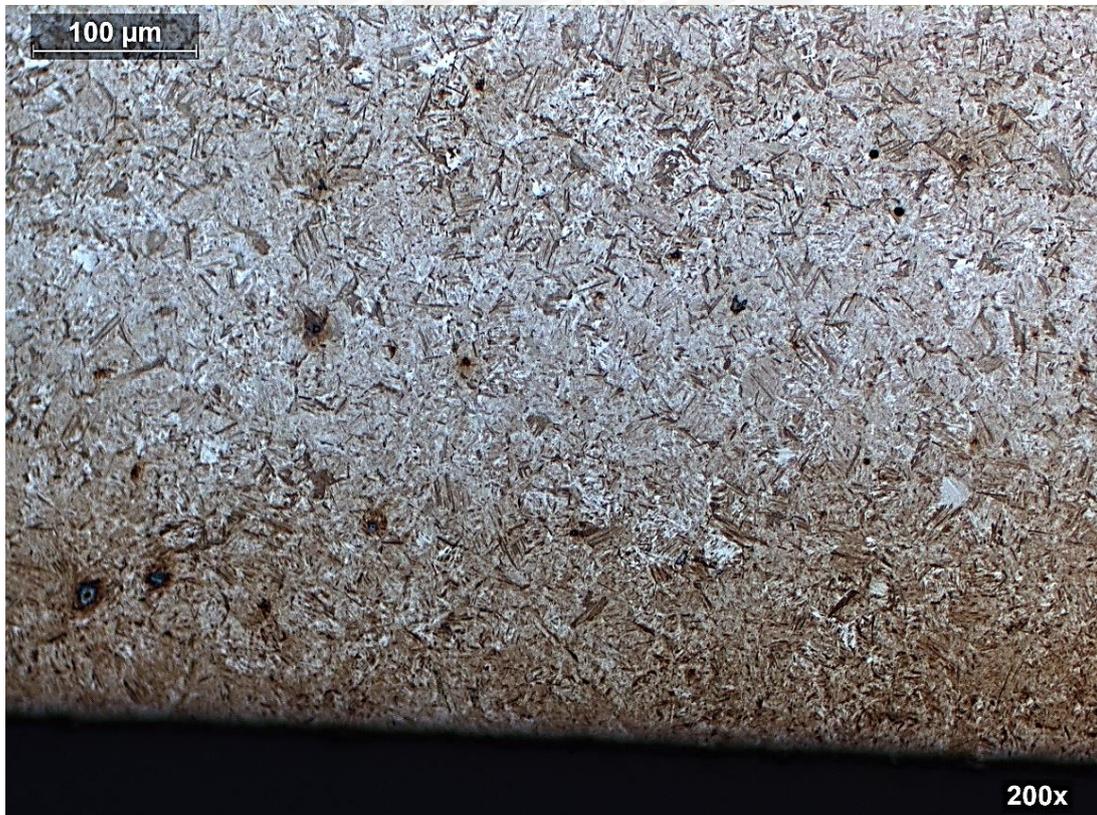


Figura 39.- Metalografía con ataque químico (Nital al 5%) de la superficie del eje de levas. 200X.

3.3.5. Espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS)

La figura 40 corresponde a una muestra extraída de la “Zona A” (ver figura 28), se analizó la composición química del material depositado en la segunda reparación (rectángulo rojo), y de la zona correspondiente a la primera recuperación (los spots 1, 2 y 3).

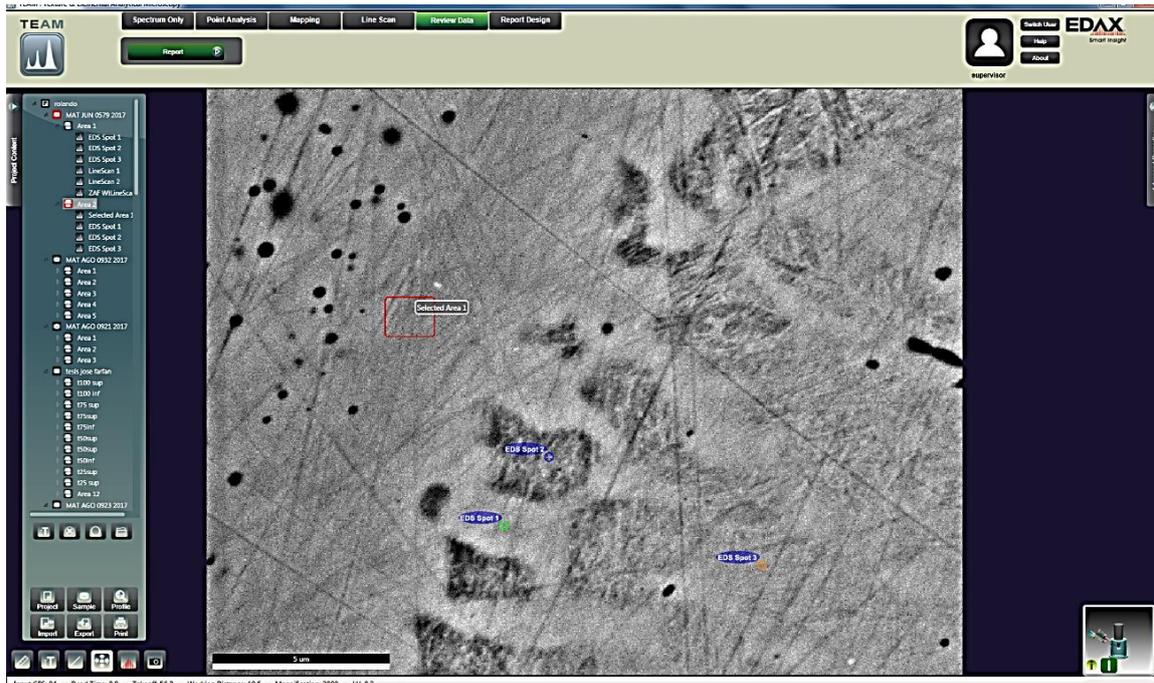


Figura 40.- Zona analizada mediante microscopía electrónica de barrido – “Zona A”. Identificación de los puntos analizados mediante EDS.

La figura 41 corresponde a una muestra extraída de la “Zona B” (ver figura 28), se analizó la composición química del material depositado de la segunda reparación (spot 1).

La figura 42 corresponde al estudio mediante EDS de la composición química del material depositado en la segunda reparación (zona A), la relación 14,23% Cr y 8,47% Ni indica que se trata de un acero inoxidable.

La figura 43 corresponde al estudio mediante EDS de la composición química del material depositado en la segunda reparación (zona B), la relación 14,12% Cr y 7,47% Ni indica que se trata de un acero inoxidable.

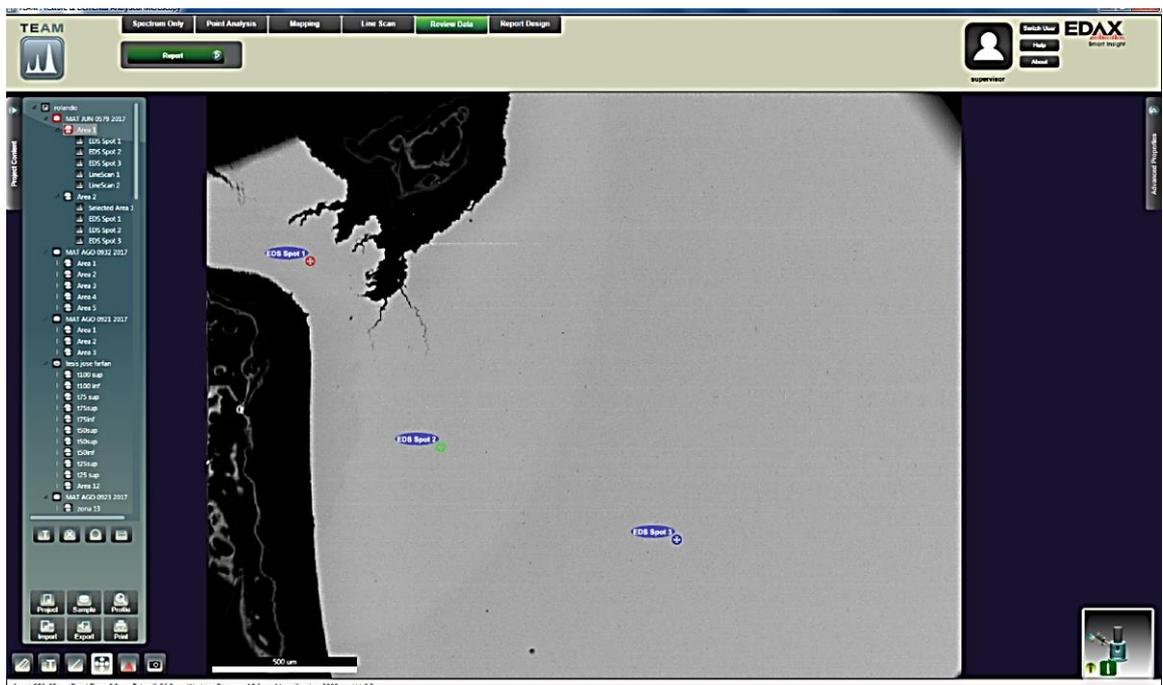


Figura 41.- Zona analizada mediante microscopía electrónica de barrido – “Zona B”. Identificación de los puntos analizados mediante EDS.

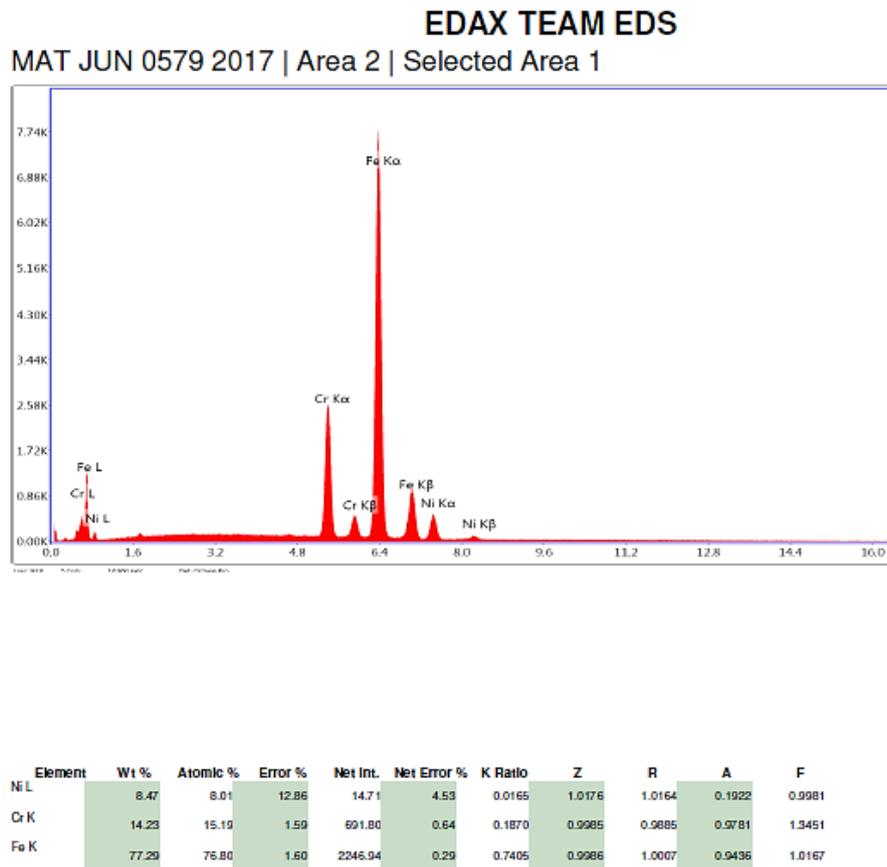
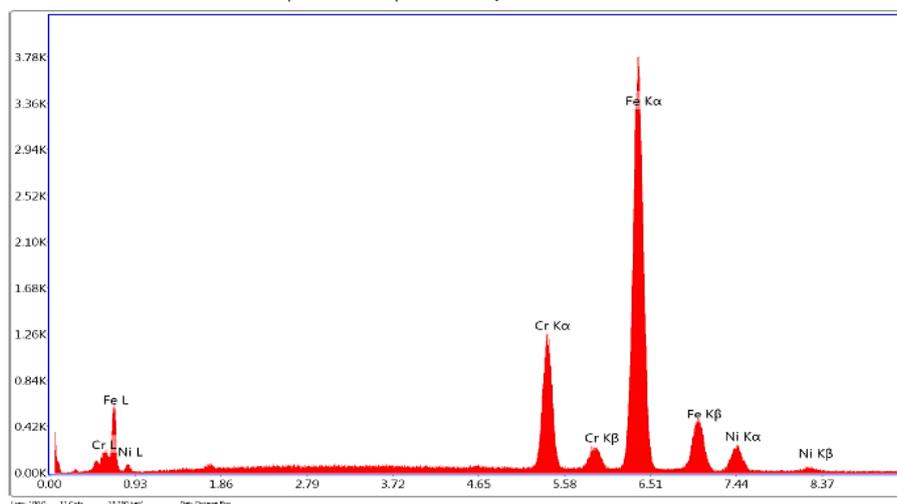


Figura 42: Resultados del análisis de EDS del material depositado en la segunda reparación “Zona A”.

EDAX TEAM EDS

MAT JUN 0579 2017 | Area 1 | EDS Spot 1



Element	Wt %	Atomic %	Error %	Net Int.	Net Error %	K Ratio	Z	R	A	F
Cr K	14.12	15.07	1.99	307.63	0.98	0.1863	0.9987	0.9886	0.9784	1.3500
Fe K	78.40	77.87	1.72	1016.03	0.42	0.7502	0.9988	1.0009	0.9441	1.0146
Ni K	7.47	7.06	6.64	66.86	3.45	0.0595	1.0154	1.0122	0.7841	1.0000

Figura 43.- Resultados del análisis de EDS del material depositado en la segunda reparación. “Zona B”.

El estudio mediante EDS de la composición química de puntos del material de aporte de la primera reparación, determinó valores promedio de 2,87% de Cr y 1,06% de Niquel.

3.3.6. Ensayo de dureza

En la figura 44 se muestra las líneas tomadas como referencia para realizar el barrido de durezas. En la tabla 6 se presentan los resultados de los barridos de dureza de las zonas que fueron reparadas por soldadura y en la tabla 5 se presentan los resultados de los barridos que corresponden a zonas alejadas de los cordones de reparación.

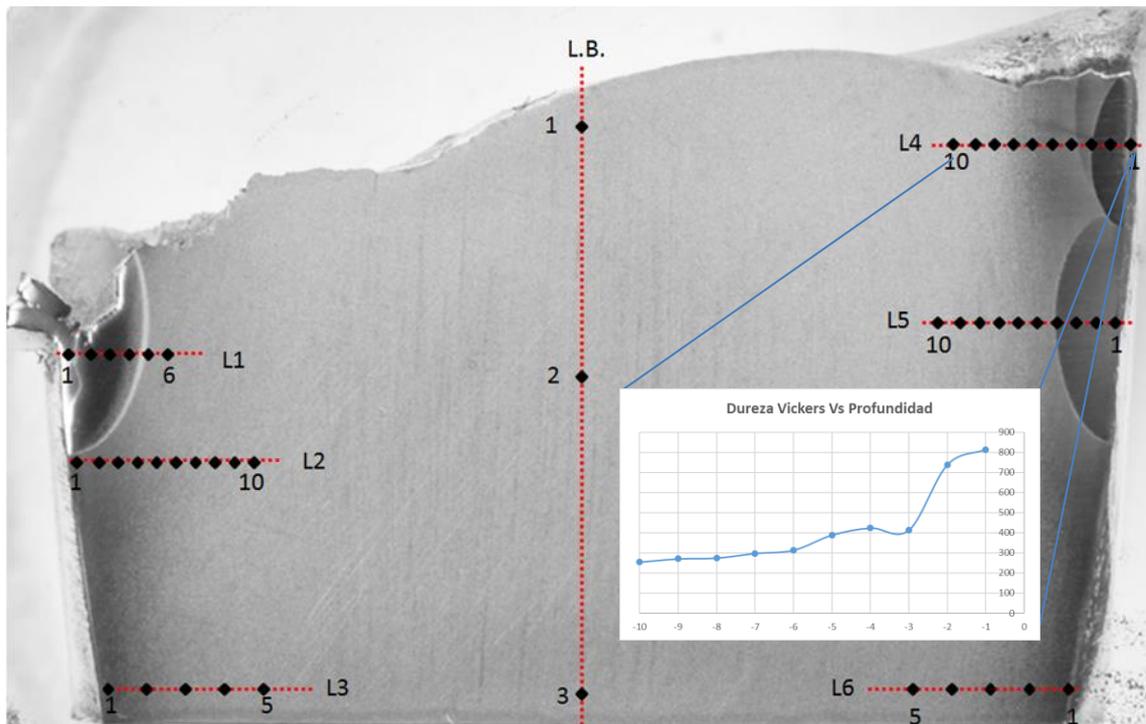


Figura 44.- Esquema de barridos de dureza realizados en la zona cercana y alejada de la fractura.

Tabla 5. Resultados del ensayo de dureza según la figura 44.

Número de indentaciones	Distancia de la superficie (mm)	Dureza Vickers HV 3kg			
		L1	L2	L4	L5
1	0.25	457	427	814	484
2	0.75	738	407	738	539
3	1.25	633	308	414	580
4	1.75	278	340	424	326
5	2.25	277	323	389	306
6	2.75	275	302	314	300
7	3.25	---	284	298	290
8	3.75	---	282	275	282
9	4.25	---	282	271	271
10	4.75	---	278	255	271

Tabla 6.- Resultados del ensayo de dureza según la figura 44.

Número de indentaciones	Dureza Vickers HV 3 kg		
	L.B.	L3	L6
1	259	424	472
2	271	314	347
3	270	298	308
4	---	274	265
5	---	271	270

Los valores de dureza encontrados de 814 HV, 738 HV, 633 HV, 580 HV (resaltados en la tabla 5) son muy elevados, corresponden a la dureza del cordón de soldadura y la zona afectada por el calor de la segunda y última reparación, estos valores indican que no se controló de manera adecuada la velocidad de enfriamiento durante la reparación, por lo tanto, no se realizó un precalentamiento que según el método de Seferian y el código AWS D1.1 recomiendan realizar.

Los valores de dureza de 424HV y 472HV (resaltados en la tabla 6) son elevados y permite establecer que el árbol de levas tiene un tratamiento térmico de endurecimiento superficial (cementado)

Para determinar el espesor de la capa endurecida por tratamiento térmico superficial, se realizó un barrido de durezas Vickers, en una zona alejada a la superficie de fractura, los resultados se muestran en la figura 45 y la tabla 7. La profundidad de la capa endurecida es aproximadamente 0.57 mm.

La dureza del material del eje de levas es aproximadamente de 270 HV, valor que es compatible con la microestructura y los resultados de análisis químico mostrados en los puntos anteriores.

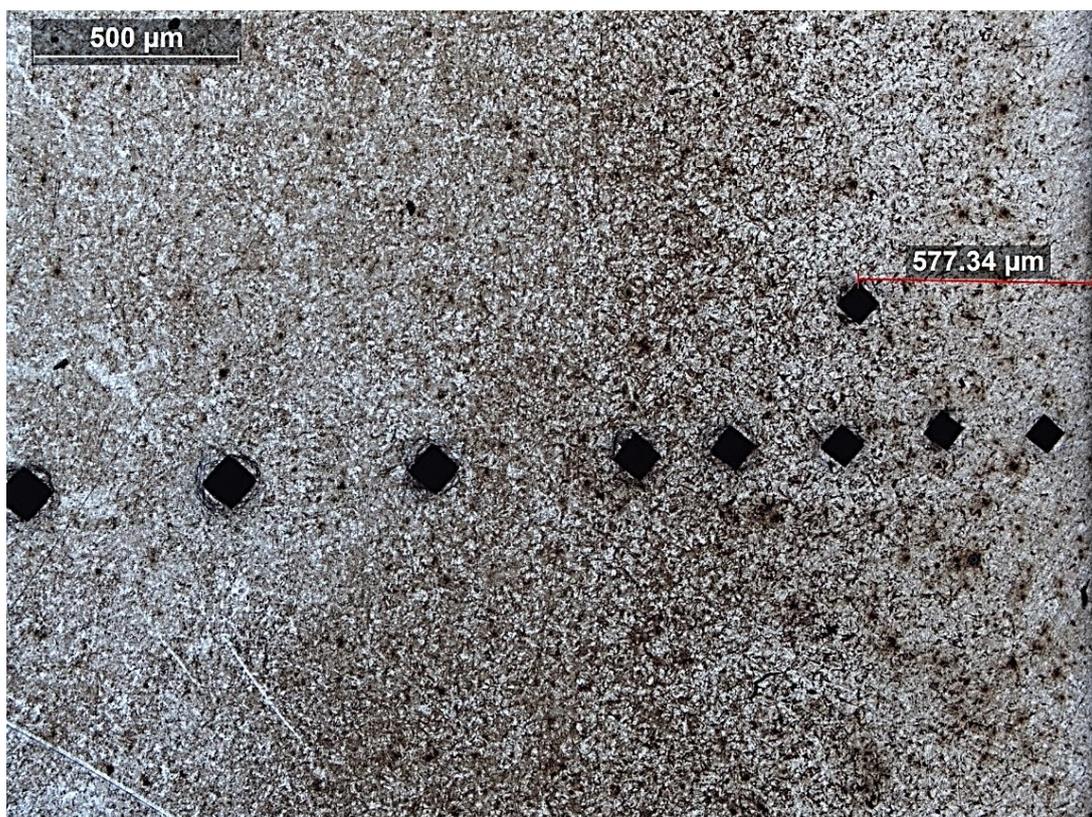


Foto 45.- Determinación de la profundidad de capa endurecida superficialmente.

Tabla 7. Resultados del ensayo de dureza según la figura 45.

Distancia de la superficie mm (aproximadamente)	Dureza Vickers HV 3 kg
0,10	597
0,35	549
0,57	506
0,60	484
0,85	442
1,10	398
1,60	350
2,10	308
2,60	294
3,10	290

El barrido de dureza realizado a las zonas cercanas a la falla, cordones de soldadura y zonas afectadas térmicamente, presentan valores de dureza extremadamente altos (punto 1 de L4: 814 HV) que favorecen la nucleación de fisuras y la propagación de las mismas.

CONCLUSIONES

De los resultados de los ensayos ejecutados se puede concluir:

La composición química del material del eje de levas es compatible con un acero de bajo carbono y baja aleación al cromo, su microestructura está compuesta por perlita y ferrita, con una dureza en el centro del eje de 270 HV y que presenta un tratamiento térmico de endurecimiento superficial (cementación), cuya profundidad de capa endurecida es de aproximadamente 0,57 milímetros y que genera una dureza superficial de 597 HV, este acero se asemeja a un acero EN 10084-2008 con bajo contenido de níquel y molibdeno, por las características encontradas se puede afirmar que la falla no se puede atribuir al material del árbol de levas.

El árbol de levas presenta evidencia de recuperación mediante el proceso de soldadura, las recuperaciones se realizaron en dos oportunidades, la última fue realizada con material de aporte de acero inoxidable de forma muy puntual y muy superficial, esto generó zonas frágiles con valores de dureza extremadamente altos (814 HV), lo que hace pensar que no se empleó un precalentamiento para así disminuir la velocidad de enfriamiento y evitar la aparición de estructuras duras.

El mecanismo de propagación de la falla se debió a fatiga mecánica de baja carga, la nucleación de las fisuras se produce en las zonas con elevada dureza (zona del cordón de soldadura de la segunda recuperación y la zona afectada térmicamente), estas zonas duras se generaron durante la reparación por soldadura de la superficie del eje de levas, e influyen negativamente en la resistencia a la fatiga mecánica del eje. Los valores elevados de dureza indican que no se controlaron los parámetros de velocidad de enfriamiento, ni se realizó pre calentamiento y ni tratamientos térmicos post soldadura.

RECOMENDACIONES

La recuperación de ejes de levas por el proceso de soldadura está estudiado y documentado, aparentemente no se siguieron los lineamientos indicados y adecuados.

- Realizar la reparación del eje de levas utilizando un procedimiento de recuperación calificado, que contemple un precalentamiento para así evitar la formación de estructuras duras.
- La recuperación del eje de levas debe ser realizada por un soldador homologado y con la homologación vigente.
- Realizar un tratamiento térmico post soldadura para homogenizar las propiedades de la zona recuperada y del resto del árbol de levas, en especial con las propiedades en la superficie.
- Realizar el ensayo de partículas magnéticas fluorescente removibles con solvente de la zona reparada para verificar que no se fisuró el árbol de levas durante la reparación, además realizar un barrido de durezas, para verificar la no presencia de zonas con durezas elevadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASTILLEJO CALLE, Alejandro.
2014 *Sistema de Inyección en Motores Diesel*. Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- [2] BOSCH, Roberto Bosch Limitada. División Autopartes "Catálogo de piezas de reparación para sistemas de inyección Diesel", Campiñas - Brasil, 1999.
- [3] AFICIONADOS A LA MECÁNICA
Bombas de Inyección en Línea. Consulta: 11 de agosto de 2019.
<http://www.aficionadosalamecanica.net>
- [4] RODRÍGUEZ, Alberto
Análisis Técnico - Árbol de Levas. Consulta: 25 de agosto de 2019.
<https://albrodpulf1.wordpress.com>
- [5] RESTREPO, Julio
Arboles de Levas y Valvulas – OHV vs SOHC vs DOHC. Consulta: 09 de agosto de 2019.
<https://julioestrepo.wordpress.com>
- [6] McGraw Hill, Harold A. Rothbart, "CAM DESIGN HANDBOOK", New York, 2004.
- [7] D1 Committee on Structural Welding, AWS D1.1/D1.1M:2015, *Structural Welding Code - Steel*. 2015.
- [8] Unites States, Patent Application Publication, Luick et al. "PROCESS FOR LOBE AND JOURNAL PREPARATION AND WELD REPAIR", Caterpillar Inc, Peoria, IL (US), 2016.
- [9] ASTM International, "ASTM E1823 - 13, Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing," *ASTM Int.*, pp. 1-25, 2013.
- [10] A.I.H. Committee, "Metals Handbook Volume 12 - Fractography", *ASM Int.*, vol. 12, p. 857, 1982.
- [11] DÍAZ CÁCERES, Jorge.
2017 *Determinación mediante la realización de análisis de falla de las causas más comunes de falla en ejes de equipos industriales*. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica.

- Lima: Pontificia Univesidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [12] A. I. H. Committe, "Metals Handbook Volume 11 - Failure Analysis and Prevention," *ASM Int.*, vol. 11, p. 2909, 2002.
- [13] HURTADO ESPEJO, Raúl.
2019 *Análisis de Falla de una Tubería de Descarga en "Y" de acero soldada.* Trabajo de Investigación para optar el Grado Académico de Magíster en Ingeniería de Soldadura. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Post Grado.
- [14] A. I. H. Committe, "Metals Handbook Volume 10 - Materials Characterization," *ASM Int.*, vol. 10, p. 1310, 1998.
- [15] A. I. H. Committe, "Metals Handbook Volume 08 - Mechanical Testing and Evaluation," *ASM Int.*, vol. 08, p. 2235, 2000.
- [16] Zhi-wei Yu. Xiao-lei Xu,
"Failure Analysis on Fractured Diesel Engine Camshafts," *J. Fail. Anal. and Preven.*, vol. 9, no. 1, pp. 39-42, 2009.
- [17] Parida, N., Tarafder, S., Das, S.K., Kumar, P., Das, G., Ranganath, V.R., Bhattacharya, D.K.
"Failure analysis of coal pulverizer mill shaft," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 10, no. 6, pp. 733-744, 2003.
- [18] H. Bayrakceken, I. Uzun, S. Tasgetiren,
"Fracture analysis of a camshaft made from nodular cast iron," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 13, no. 8, pp. 1240-1245, 2006.
- [19] V N Bhosale¹ , S P Gaikwad²,
"Failure Analysis of Grey Cast Iron Camshaft By Mode of Fracture," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 9, no. 4, pp. 36-42, 2013.
- [20] Zhi-wei Yu. Xiao-lei Xu,
"Analysis of a Cracked Diesel Engine Camshaft," *J. Fail. Anal. and Preven.*, vol. 12, no. 4, pp. 438-442, 2012.
- [21] ASTM International, "ASTM E165/E165M - 18, Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry," *ASTM Int.*, pp. 1-19, 2018.

- [22] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, "Section V - Nondestructive Examination," *Am. Soc. Mech. Eng.*, vol. V, p 991, 2019.
- [23] ASTM International, "ASTM E709 - 15, Standard Guide for Magnetic Particle Testing," *ASTM Int.*, pp. 1-48, 2015.
- [24] ASTM International, "ASTM E415 - 17, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry," *ASTM Int.*, pp. 1-11, 2017.
- [25] ASTM International, "ASTM E3 - 11(2017), Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens," *ASTM Int.*, vol. 03, no. July, pp. 1-17, 2017.
- [26] ASTM International, "ASTM E7 - 17, Standard Terminology Relating to Metallography," *ASTM Int.*, no. July, pp. 1-3, 2017.
- [27] ASTM International, "ASTM E45 - 18a, Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel," *ASTM Copyright.*, pp. 1-19, 2018.
- [28] ASTM International, "ASTM E112 - 13, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size," *ASTM Int.*, pp. 1-28, 2013.
- [29] ASTM International, "ASTM E407 - 07(2015e1), Standard Practice for Microetching Metals and Alloys," *ASTM Int.*, pp. 1-22, 2015.
- [30] A. I. H. Committe, "Metals Handbook Volume 9 - Metallography and Microstructures 2004," *ASM Int.*, vol 9, p. 2733, 2004.
- [31] ASTM International, "ASTM E340 - 15, Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys," *ASTM Int.*, pp. 1-11, 2015.
- [32] ASTM International, "ASTM E92 - 17, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials," *ASTM Int.*, pp. 1-27, 2017.