

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**ANÁLISIS DE FALLA Y RECUPERACIÓN POR SOLDADURA DE UN
CIGÜEÑAL DE MOTOR ESTACIONARIO**

**Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería de
Soldadura que presenta:**

Frans Steven Solórzano Castillo

ASESOR:

Mg. Daniel Merino Ponce

Lima, 2025


Informe de Similitud

Yo, Daniel Merino Ponce, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis titulada(o) ANÁLISIS DE FALLA Y RECUPERACIÓN POR SOLDADURA DE UN CIGÜEÑAL DE MOTOR ESTACIONARIO, del autor Frans Steven Solórzano Castillo, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 17%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 29/09/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de investigación, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 30 de septiembre de 2025.

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Merino Ponce, Daniel</u>	
DNI: 06784219	Firma
ORCID: 0000-0003-0394-9003	

RESUMEN

El presente trabajo de investigación aborda el estudio del análisis de falla de un cigüeñal de motor estacionario de 4 tiempos a gasolina, fabricado en acero al carbono y, posteriormente, el desarrollo de un procedimiento de recuperación mediante soldadura de la zona afectada. El cigüeñal presentó una fractura en el extremo del eje de trabajo luego de 400 horas de funcionamiento. Se aplicó el procedimiento recomendado por la ASM para el análisis de la superficie de fractura y determinar la causa raíz de la falla. Mediante análisis químico se concluyó que el acero con el cual se fabricó el cigüeñal fue del tipo AISI/SAE 1045. Se determinaron las propiedades mecánicas mediante ensayos de dureza y se obtuvo que el acero utilizado para la fabricación del componente poseía características similares a un acero AISI/SAE 1045 sometido a temple y revenido. El análisis fractográfico determinó que la fractura fue del tipo frágil y ocurrió debido a la presencia de condiciones de cargas cíclicas y un concentrador de esfuerzos geométrico. Posteriormente al análisis de falla, se procedió a la elaboración de un WPS preliminar para la calificación del procedimiento de recuperación por soldadura. Se determinó un proceso de soldadura GTAW mediante aporte ER90S-B3 siguiendo los lineamientos de las normas AWS D14.6 y AWS B2.1. El procedimiento preliminar fue evaluado mediante ensayos de inspección visual, análisis con partículas magnéticas, líquidos penetrantes, ensayo de doblado, examen macrográfico, ensayos de dureza y análisis químico. Se ejecutó el procedimiento de soldadura en el cigüeñal y se analizó el efecto del tratamiento térmico post soldadura (PWHT) en cuatro muestras, sometidas a un PWHT a temperaturas de 690 °C, 500 °C, 400 °C y 300 °C, durante 1 hora. Se encontró que, a una menor temperatura de PWHT, la dureza se incrementa en la zona afectada por el calor (ZAC) y, principalmente, en el metal de aporte (MA). Esto se comprobó mediante un análisis metalográfico, confirmando la presencia de microestructuras duras en la ZAC, MA y en el metal base (MB).

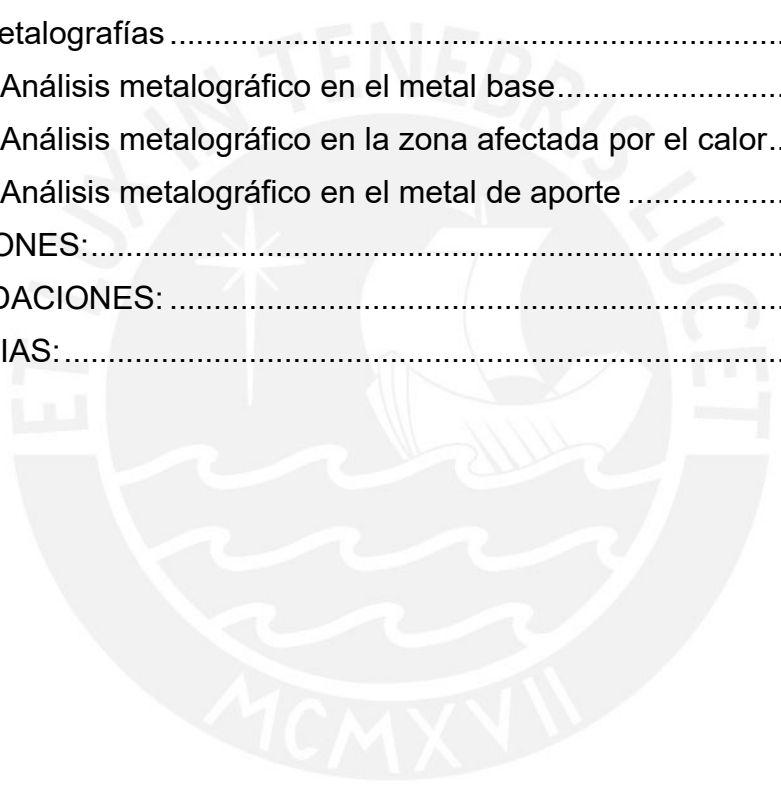
Palabras clave: Análisis de falla, fractura frágil, análisis químico, caracterización mecánica, recuperación por soldadura, WPS, PQR, tratamiento térmico post soldadura.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	i
TABLA DE CONTENIDOS	ii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1 Cigüeñal	4
1.1.1 Partes del cigüeñal	4
1.1.2 Condiciones de funcionamiento del cigüeñal	5
1.1.3 Materiales para la fabricación de cigüeñales	5
1.2 Mecánica de la fractura y análisis de falla	5
1.2.1 Etapas en el análisis de fallas	5
1.2.2 Causas que ocasionan fallas.....	6
1.3 Fallas comunes en cigüeñales	6
1.4 Estudios de reparación por soldadura en cigüeñales	8
1.5 Caracterización del material	9
1.5.1 Caracterización mediante análisis químico	9
1.5.2 Caracterización mecánica	9
1.5.3 Ensayo metalográfico	9
1.6 Especificación del procedimiento de soldadura	10
1.6.1 Metal base	10
1.6.2 Metal de aporte.....	10
1.6.3 Tipo de junta	10
1.6.4 Temperatura de precalentamiento	11
1.6.5 Tratamiento térmico post soldadura.....	11
1.6.6 Temperatura entre pasadas	11
1.7 Registro de calificación del procedimiento de soldadura	11
2. ANÁLISIS DE FALLA	12
2.1 Procedimiento experimental	12
2.1.1 Recopilación de datos e historial.....	12
2.1.1.1 Descripción del motor y condiciones de operación.....	12
2.1.1.2 Descripción del cigüeñal.....	13
2.1.1.3 Historial y descripción de la falla	14

2.1.2	Inspección visual y fractografía	15
2.1.3	Inspección por partículas magnéticas	16
2.1.4	Caracterización química y mecánica.....	17
2.1.4.1	Análisis químico.....	17
2.1.4.1.1	Cálculo del carbono equivalente	18
2.1.4.2	Ensayos de dureza.....	18
2.1.4.2.1	Ensayo de Dureza Vickers.....	18
2.1.4.2.2	Ensayo de Dureza Rockwell	19
2.1.5	Análisis metalográfico.....	19
2.2	Resultados y análisis de resultados	21
2.2.1	Inspección visual y fractografía	21
2.2.2	Inspección por partículas magnéticas	24
2.2.3	Caracterización química y mecánica.....	26
2.2.3.1	Análisis químico.....	26
2.2.3.2	Carbono equivalente.....	26
2.2.4	Ensayos de dureza.....	27
2.2.4.1	Ensayo de dureza Vickers.....	27
2.2.4.2	Ensayo de dureza Rockwell	29
2.2.5	Análisis metalográfico.....	31
2.2.5.1	Análisis de la muestra M1	31
2.2.5.2	Análisis de la muestra M2	34
3.	RECUPERACIÓN POR SOLDADURA	37
3.1	Procedimiento experimental	37
3.1.1	Elaboración del WPS preliminar.....	37
3.1.1.1	Material base	37
3.1.1.2	Proceso de soldadura.....	39
3.1.1.3	Consumibles de soldadura	39
3.1.1.4	Diseño de junta.....	41
3.1.1.5	Características eléctricas	42
3.1.1.6	Condiciones de soldadura.....	42
3.1.1.7	Posición	45
3.1.2	Calificación del procedimiento de soldadura.....	47
3.1.2.1	Pruebas de calificación del procedimiento.....	47
3.1.2.2	Resultados de las pruebas	53
3.1.3	Procedimiento de soldadura en cigüeñal	62

3.1.3.1 Preparación de la superficie	62
3.1.3.2 Precalentamiento.....	62
3.1.3.3 Control de parámetros de soldadura.....	63
3.1.3.4 Control de temperatura entre pasadas.....	64
3.1.4 Evaluación del procedimiento de recuperación	65
3.1.4.1 Inspección visual	65
3.1.4.2 Inspección mediante partículas magnéticas	65
3.1.4.3 Tratamientos térmicos post soldadura	66
3.1.4.4 Macrográficas.....	68
3.1.4.5 Ensayos de dureza.....	70
3.1.4.6 Metalografías	73
3.1.4.6.1 Análisis metalográfico en el metal base.....	73
3.1.4.6.2 Análisis metalográfico en la zona afectada por el calor.....	76
3.1.4.6.3 Análisis metalográfico en el metal de aporte	79
CONCLUSIONES:.....	82
RECOMENDACIONES:.....	83
REFERENCIAS:.....	84



INTRODUCCIÓN

En la industria en general, el uso de motores de combustión interna (MCI) como fuente de movimiento para diversos sistemas mecánicos está en crecimiento debido a la versatilidad de los mismos. La facilidad de operación en un amplio rango de potencia, el uso de combustibles de diferente naturaleza y la diversidad constructiva, justifican su elección como máquinas propulsoras (Payri & Desantes, 2015). Además, la correcta elección del tipo de motor según la aplicación, permite asegurar un buen desempeño de los equipos y obtener los productos deseados.

Un factor adicional para el correcto funcionamiento de los motores, es el mantenimiento. Con un adecuado mantenimiento se logra evitar fallos prematuros en los equipos, reduciendo el tiempo muerto e incrementando la productividad (Duffuaa et al., 2000). Sin embargo; en ciertas ocasiones pueden surgir averías repentinas en los principales componentes del motor, tales como pistón, biela, bloque o cigüeñal. Sobre el cigüeñal, actúan esfuerzos de gran magnitud debido a su función de convertir el movimiento lineal del pistón, en un movimiento rotatorio y transmitir el par final aprovechable (Rovira & Muñoz, 2015). Esto hace que sea un elemento crítico en el motor y constituye una parte común de falla en los MCI estacionarios.

En el presente trabajo se plantea realizar el análisis de falla y el proceso de recuperación, mediante soldadura, de un cigüeñal de motor estacionario que presenta un fallo frecuente. El cigüeñal corresponde a un motor a gasolina de 4 tiempos (4T) que es utilizado en un equipo vibro-apisonador para la compactación de suelos (Figura 1).



Figura 1. Motor estacionario 4T Honda GX100 (HONDA, 2016).

La fractura se presenta en el extremo de trabajo (eje) del cigüeñal, en la zona de ensamblaje con un embrague. La falla presenta un desprendimiento superficial del eje que inicia desde la cara lateral del chavetero de medialuna, tal como se muestra en la Figura 2. El extremo del cigüeñal con su geometría original se puede observar en la Figura 3.

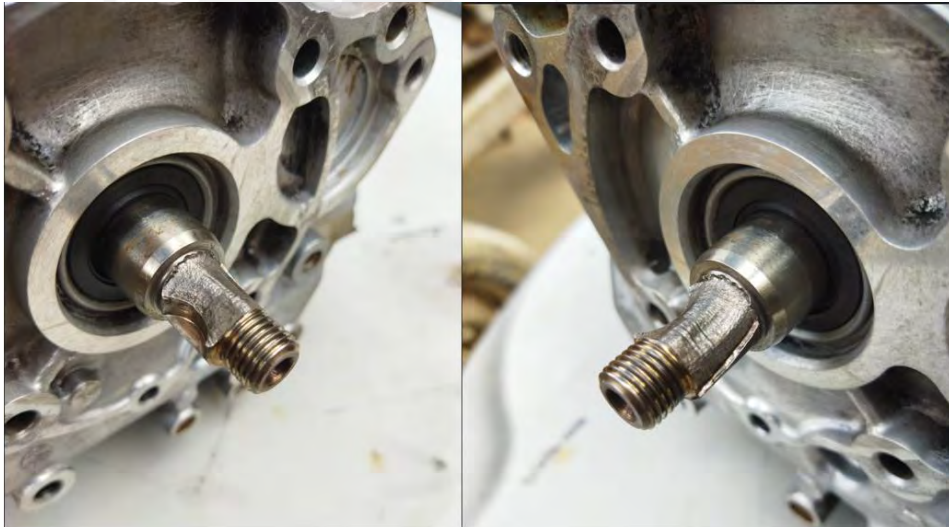


Figura 2. Falla presente en el extremo de trabajo (eje) del cigüeñal.

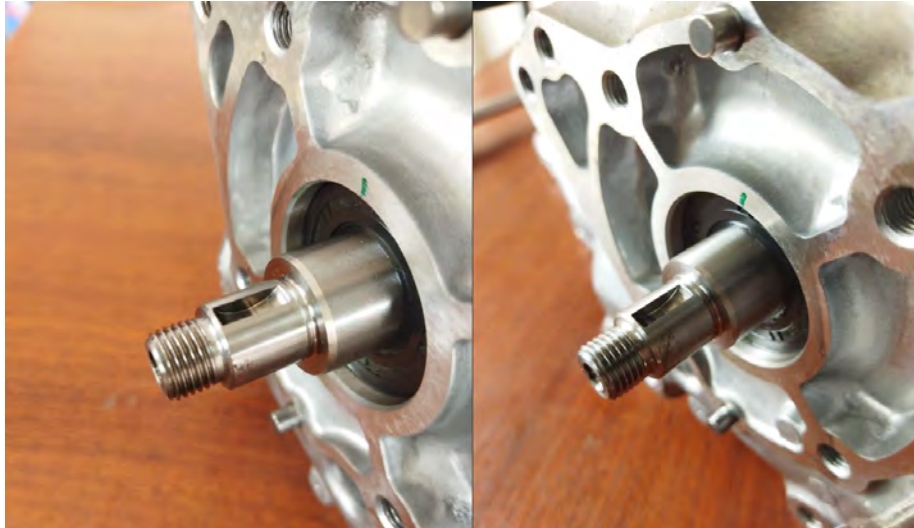


Figura 3. Cigüeñal sin falla.

OBJETIVOS

General:

Realizar el análisis de falla y desarrollar un proceso de soldadura para la recuperación de un cigüeñal de motor estacionario de 4T Honda GX-100.

Específicos:

- Analizar la superficie de fractura del cigüeñal y determinar la causa raíz de la falla del componente.
- Realizar la caracterización química y mecánica del material base del cigüeñal.
- Desarrollar un procedimiento de recuperación por soldadura adecuado para el caso presentado.
- Evaluar los cambios microestructurales y las propiedades mecánicas de la zona recuperada.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Cigüeñal

El cigüeñal es un elemento móvil de los motores de combustión interna, el cual permite convertir el movimiento rectilíneo, causado por los impulsos de las bielas, en un movimiento circular sobre su propio eje. Este movimiento se transmite hacia el extremo del cigüeñal con la ayuda de un volante de inercia para aprovechar el torque generado por la combustión (Rajput, 2005).

1.1.1 Partes del cigüeñal

Las partes principales de un cigüeñal de motor de CI se pueden observar en la Figura 4. Está formado por un eje compuesto de acodamientos o muñones según el número de cilindros del motor; a su vez, cada muñón se une al eje mediante dos manivelas construidas con contrapesos. Además de ello, existen apoyos situados a cada lado de los muñones que coinciden con la línea del eje y que permiten el giro del cigüeñal sobre la bancada. Dependiendo del tipo de motor y su diseño, el cigüeñal posee una parte para el acople de un engranaje para el árbol de levas. En los extremos del cigüeñal se encuentra una zona para el montaje del volante de inercia y el eje para la transmisión de potencia (Ceac, 2003).

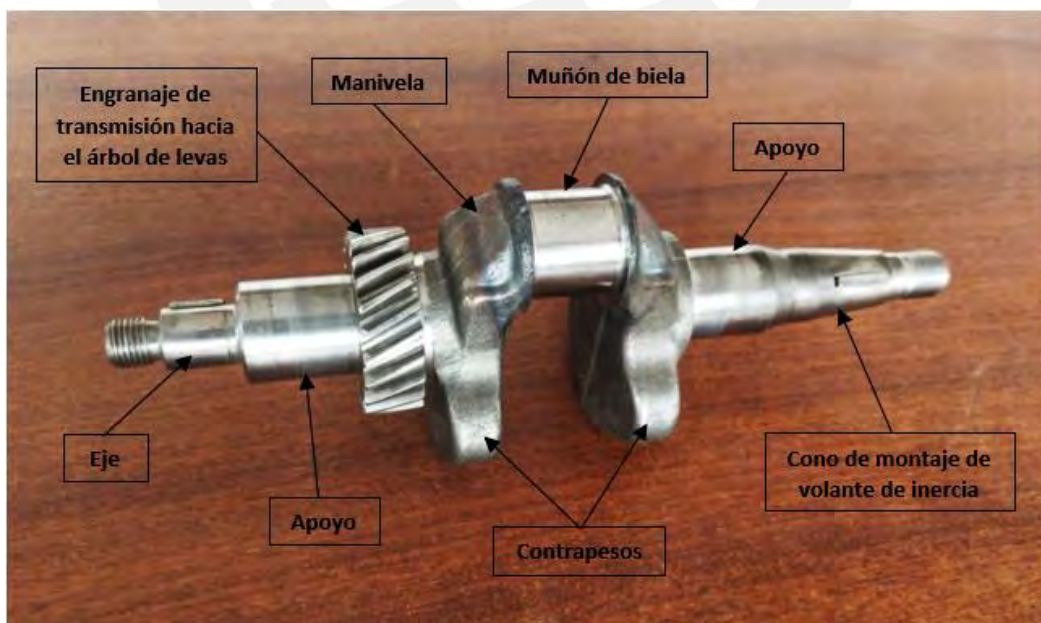


Figura 4. Partes principales de un cigüeñal de MCI estacionario monocilíndrico.

1.1.2 Condiciones de funcionamiento del cigüeñal

Las condiciones de funcionamiento en un cigüeñal se pueden establecer según los esfuerzos a los que se somete este elemento. Los principales esfuerzos presentes en las diferentes partes del cigüeñal, son:

- Compresión: Manivelas
- Tracción: Manivelas
- Flexión: Apoyos, muñones y eje
- Torsión: Apoyos y eje

Estos esfuerzos determinan las dimensiones del mismo y la adecuada selección del material.

1.1.3 Materiales para la fabricación de cigüeñales

Los materiales para la fabricación de cigüeñales se pueden clasificar en función del tipo de trabajo (Ceac, 2003). Para trabajos severos el material seleccionado es acero forjado y acero aleado al Cr-Ni-Mo o al Cr-Ni-Mn. En casos de menores esfuerzos, se utiliza fundición aleada al Cr-Si. (Rajput, 2005) menciona el uso de fundiciones de hierro esferoidal o fundición de aleación de níquel. En el caso de motores de baja y media velocidad, se utilizan aceros al carbono de baja aleación con un respectivo tratamiento térmico para la obtención de estructuras martensíticas (Myagkov et al., 2014).

1.2 Mecánica de la fractura y análisis de falla

Jaramillo et al. (2008) definen a la mecánica de la fractura como la disciplina que permite realizar el análisis, diseño y evaluación de componentes mecánicos con el objetivo de garantizar su resistencia a los defectos y reducir posibles fallas inesperadas y catastróficas. El análisis de falla, por su parte, busca identificar los mecanismos de daño que ocasionan las fracturas y daños de los componentes.

1.2.1 Etapas en el análisis de fallas

El análisis de falla en componentes mecánicos puede seguir las siguientes etapas para un correcto análisis (Otegui, 2013):

- Recopilación de datos e historial

- Técnicas de inspección visual
- Análisis fractográfico
- Inspección mediante END
- Caracterización química y mecánica del material del elemento de falla
- Caracterización metalográfica

1.2.2 Causas que ocasionan fallas

Los motivos por los cuales pueden ocurrir fallas en los componentes se detallan en la Tabla 1 (Jaramillo et al., 2008):

Tabla 1. Causas según el tipo de falla en componentes mecánicos

Causas	
Fallas debido a procesamiento defectuoso	Inclusiones, impurezas, mala selección del material Segregaciones, porosidades, cavidades Defectos de maquinado, esmerilado Anormalidades debidas al tratamiento térmico Defectos por ensamble Defectos debidos a tratamientos superficiales
Fallas debidas a consideraciones de diseño defectuoso	Falla dúctil, frágil, por fatiga Falla por altas temperaturas Fracturas estáticas demoradas Concentradores de esfuerzos excesivos Error de análisis de esfuerzos
Fallas debidas al deterioro durante el servicio	Condiciones de carga excesivas o repentinas Desgaste, corrosión Mantenimiento inadecuado

1.3 Fallas comunes en cigüeñales

Los estudios sobre fallas en cigüeñales, se refieren, en su mayoría, a cigüeñales de motores de automóviles. Sin embargo; en estas investigaciones se puede obtener información importante para el análisis de falla en cigüeñales de motores estacionarios. Wang et al. (2005) concluyeron que montajes incorrectos en un cigüeñal, pueden causar grietas debido a esfuerzos cortantes sobre los muñones, causando fricción y

sobrecalentamiento, lo que conduce a una fragilidad del temple de la zona afectada.

Kareem, (2015) determinó, mediante un análisis estadístico basado en opiniones de expertos en mantenimiento de MCI de automóviles, que los factores más influyentes para el fallo de los cigüeñales se deben principalmente a bajas calidades superficiales del material, sobrecargas, defectos de lubricación y mal montaje de cojinetes.

De igual manera, Witek et al. (2017) analizaron la causa de una fractura sobre un muñón principal de cigüeñal (Figura 5) mediante el análisis de elementos finitos. Una mala elección del material junto a zonas de dureza variable en la superficie y condiciones de fatiga de alto ciclo pueden causar la falla catastrófica.



Figura 5. Zonas de origen de fisuras en cigüeñal (Witek et al., 2017).

Por otra parte, Fonte et al. (2015) estudiaron el caso de falla de dos motores estacionarios a diésel monocilíndricos utilizados en maquinaria agrícola que presentaron una fractura total del muñón de biela del cigüeñal. En ambos casos la falla se originó a raíz de concentradores de esfuerzos (cambios de sección y orificios de lubricación) y debido a esfuerzos de fatiga y condiciones de vibración (Figura 6).

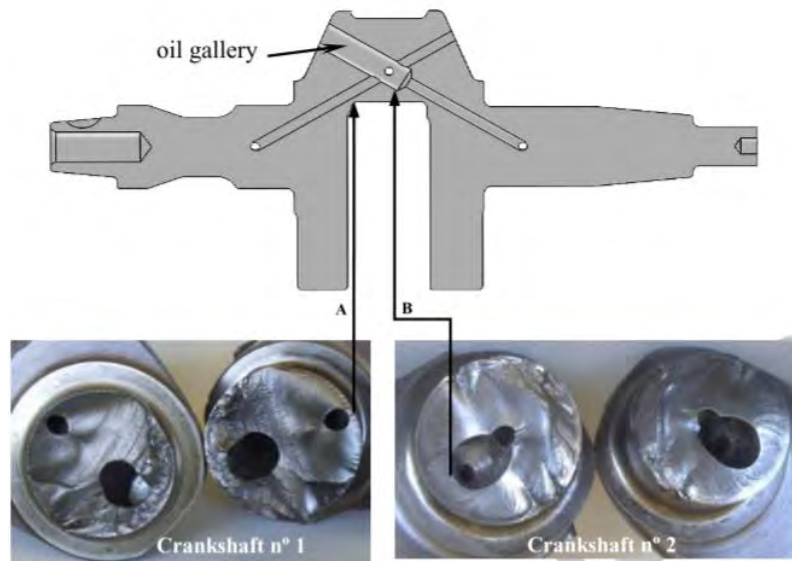


Figura 6. Concentradores de esfuerzos que originaron una falla (Fonte et al., 2015).

1.4 Estudios de reparación por soldadura en cigüeñales

Estudios anteriores, como alternativas para la reparación de cigüeñales fracturados o desgastados, sugieren métodos de soldadura y metalizado.

Sergeev et al. (2004) utilizaron la técnica de metalizado por arco eléctrico para reacondicionar un cigüeñal de motor a diésel de automóvil. Además, mediante la aplicación de alambre tubular PP-TP-1 como material para rociado y variando las velocidades del chorro de metalización, pudieron obtener superficies con buena adherencia y una alta resistencia al desgaste.

Por su parte, Zhang et al. (2014) realizaron un estudio sobre técnicas de recargue en un cigüeñal con alambre tubular. Encontraron un mejoramiento de la resistencia al desgaste con respecto al material original, al aplicar un aporte de alambre tubular JX-09-1 con protección gaseosa de CO₂. La presencia de polvos metálicos de Mo, Mn, Ti, V, así como de partículas ultrafinas de SiC, permitieron obtener una capa de soldadura con una alta fuerza de unión, una alta dureza y una alta tenacidad a la fractura.

Chivu et al. (2016) utilizaron procesos SMAW y GTAW para la recuperación de un cigüeñal con desgaste en los muñones de biela. En este estudio se realizaron depósitos de soldadura con electrodos E10-UM-60-CZ y varilla de aporte WSG-3GZ-5-T. Los resultados obtenidos muestran que las capas de material depositado, en ambos casos, son homogéneas y resistentes al

desgaste, principalmente debido a estructuras martensíticas (proceso SMAW) y estructuras compuestas de austenita y cementita residual, con presencia de carburos de cromo (GTAW).

Teniendo en cuenta las investigaciones mencionadas, es posible aplicar métodos de recuperación por soldadura en zonas afectadas de cigüeñales como alternativa de reacondicionamiento de estos elementos.

1.5 Caracterización del material

Con el objetivo de obtener información acerca de las propiedades del material de un componente en estudio, se realiza la caracterización del mismo. Este procedimiento puede incluir la obtención de propiedades químicas, mecánicas, térmicas, eléctricas, ópticas y/o magnéticas.

1.5.1 Caracterización mediante análisis químico

El análisis químico en metales permite conocer su composición química con el fin de verificar el cumplimiento en las especificaciones de composición. La norma ASTM E415 hace referencia al análisis químico de metales y especifica el método de ensayo para la determinación simultánea de 21 elementos de aleación, elementos residuales en aceros al carbono y de baja aleación.

1.5.2 Caracterización mecánica

Para la verificación de las propiedades mecánicas y físicas de un metal, es necesario realizar la caracterización mecánica del mismo. Mediante esta técnica de caracterización es posible verificar propiedades de resistencia mecánica, dureza, tenacidad, etc.

1.5.3 Ensayo metalográfico

Mediante un análisis o ensayo metalográfico se puede estudiar la microestructura de los metales. Para ello es importante definir la preparación de las muestras metalográficas, el tipo de ensayo a aplicar y los equipos necesarios para el ensayo.

Mediante la norma ASTM E3 se pueden realizar métodos de muestreo y preparación de metales con el objetivo de su composición, procesamiento en

frío y en caliente, mecanizado y examen de microestructuras afectadas por procesos como la soldadura.

1.6 Especificación del procedimiento de soldadura

Según AWS la especificación del procedimiento de soldadura (WPS) es un documento que proporciona las variables requeridas para aplicar un proceso de soldadura asegurando la repetibilidad por parte de soldadores y operadores adecuadamente capacitados (American Welding Society, 2020a).

En este contexto, el WPS especifica de manera completa las variables del proceso de soldadura, tales como:

- Tipo de proceso de soldadura
- Metal base
- Metal de aporte
- Tipo de junta
- Variables eléctricas
- Condiciones de precalentamiento y tratamiento térmico post soldadura
- Posiciones y gas de protección

1.6.1 Metal base

Es el material que será sometido al proceso de soldadura, corte, brazing o soldering; por lo tanto, sobre este material se ejecuta el proceso de soldadura especificado (American Welding Society, 2020a).

1.6.2 Metal de aporte

Indica el material que se agregará para la fabricación de una junta soldada. El material de aporte puede presentarse en forma de varillas o alambres continuos (American Welding Society, 2020a).

1.6.3 Tipo de junta

El tipo de junta clasifica una unión basándose en la orientación relativa de las piezas de trabajo que se unen (American Welding Society, 2020a).

1.6.4 Temperatura de precalentamiento

Se define como la temperatura del material base en el volumen que rodea el punto de soldadura, inmediatamente antes de comenzar a realizar el proceso de soldadura (American Welding Society, 2020a).

1.6.5 Tratamiento térmico post soldadura

Es la temperatura a la cual se debe mantener a un conjunto luego de la ejecución de la soldadura durante un tiempo específico (American Welding Society, 2020a).

1.6.6 Temperatura entre pasadas

Cuando se aplica una soldadura de múltiples pasadas, es la temperatura del área de soldadura inmediatamente antes de aplicar pasadas posteriores (American Welding Society, 2020a).

1.7 Registro de calificación del procedimiento de soldadura

El registro de calificación del procedimiento de soldadura (PQR) corresponde a un documento que registra las variables de soldadura utilizadas para producir una pieza soldada de prueba aceptable y, a su vez, registra los resultados de las pruebas realizadas en la soldadura con el fin de calificar un WPS (American Welding Society, 2020a).

2. ANÁLISIS DE FALLA

2.1 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental utilizado para el análisis de falla se estructuró según lo recomendado por ASM Metal Handbook, Failure Analysis and Prevention (ASM Handbook Committee, 2002) y consistió en los siguientes pasos:

- Recopilación de información preliminar
- Inspección visual y fractografía
- Inspección por partículas magnéticas
- Caracterización del material
- Análisis metalográfico

2.1.1 Recopilación de datos e historial

2.1.1.1 Descripción del motor y condiciones de operación

El cigüeñal fracturado corresponde a un motor con las siguientes características:

- Tipo de motor: Monocilíndrico a gasolina, 4T OHV, eje horizontal.
- Marca del motor: HONDA
- Modelo: GX-100
- Potencia: 2.8 HP

Este motor se utiliza en un equipo vibroapisonador para la compactación de suelos mediante la aplicación de impactos a través de una zapata (Figura 7).



Figura 7. Motor acoplado a apisonador.

El equipo está sujeto a impacto y a vibraciones; sin embargo, la zona afectada del cigüeñal trabaja en condiciones de cargas cíclicas (torque variable en el tiempo).

2.1.1.2 Descripción del cigüeñal

El cigüeñal del motor está constituido por un muñón de biela, dos apoyos, dos contrapesos, un extremo para el acople del volante de inercia y un extremo de trabajo.

El elemento está fabricado en acero al carbono; no obstante, no se pudo obtener información acerca del tipo de acero del mismo. Las dimensiones (en milímetros) del cigüeñal se muestran en la Figura 8.

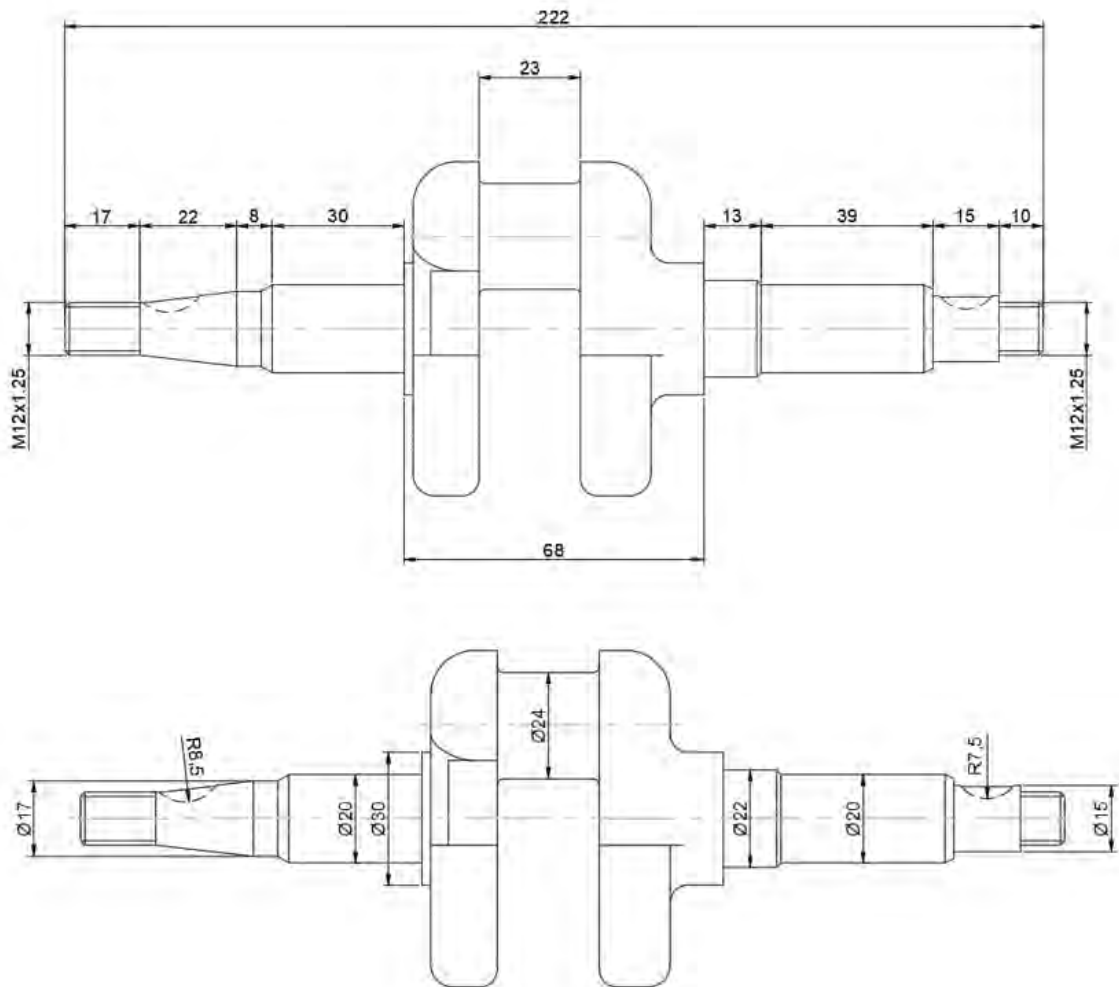


Figura 8. Dimensiones del cigüeñal.

2.1.1.3 Historial y descripción de la falla

La falla ocurrió durante una rutina de compactación de un vibroapisonador Masalta EMR68H. La fractura en el cigüeñal (Figura 9) causó el daño del embrague, imposibilitando la transmisión del movimiento vibratorio a la zapata.



Figura 9. Cigüeñal fracturado extraído del motor.

El componente no tiene reparación previa alguna y la fractura se presentó luego 400 horas de funcionamiento aproximadamente.

2.1.2 Inspección visual y fractografía

La inspección visual se aplicó con el objetivo de detectar discontinuidades superficiales como fisuras, deformaciones y ubicar el sitio del origen de la falla. De igual manera, el análisis fractográfico fue aplicado con el fin de interpretar la superficie del cigüeñal y conocer las causas que originaron la fractura.

Se realizó una adecuada limpieza sobre el extremo del eje, en la zona de la fractura, mediante cepillado y aplicación de removedor MR 85, marca MR Chemie (Figura 10).



Figura 10. Limpieza de la superficie de fractura.

Se tomaron medidas de la profundidad de la fractura con respecto a la superficie original. Se examinó la superficie de fractura en condiciones de iluminación por encima de los 1000 luxes.

2.1.3 Inspección por partículas magnéticas

El método de inspección por partículas magnéticas fue ejecutado con el fin de detectar discontinuidades superficiales y/o subsuperficiales en la zona de la fractura del cigüeñal.

Se realizó la inspección de la superficie de fractura mediante partículas magnéticas fluorescentes, en medio húmedo, según lo establecido por la norma ASTM E709-21: Guía Estándar para Ensayos de Partículas Magnéticas (ASTM International, 2021b).

Se aplicó una suspensión de partículas magnéticas base aceite mediante aerosol Magnaglo 14 AM, marca Magnaflux. A su vez, para la magnetización del cigüeñal, se utilizó un yugo electromagnético tipo Y-7 Magnaflux de corriente alterna. Para una adecuada identificación de las discontinuidades se utilizó una lámpara de luz ultravioleta Magnaflux UV5000 en un ambiente oscuro, con un nivel de iluminación menor a 20 luxes.

2.1.4 Caracterización química y mecánica

Para la caracterización química y mecánica del componente se extrajo una sección del eje cigüeñal, realizando dos cortes transversales paralelos y cercanos a la zona de la fractura (Figura 11).

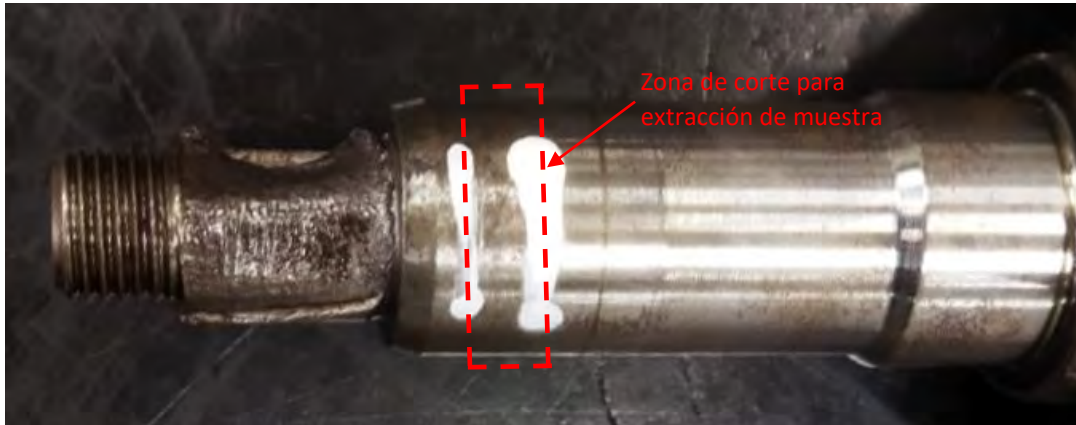


Figura 11. Zona de extracción de muestra para caracterización.

Se extrajo la muestra utilizando una cortadora SX-100M de marca Leco, mediante disco abrasivo y chorro de refrigeración para evitar afectaciones térmicas. Las medidas de la muestra fueron de 6 mm de espesor y 20 mm de diámetro.

2.1.4.1 Análisis químico

El análisis químico se realiza con el objetivo de contrastar la composición química del material con las normas del fabricante del componente (Otegui, 2013); sin embargo, para el presente estudio se realizó la caracterización química para identificar el tipo de acero utilizado en la fabricación del cigüeñal.

Se realizó un análisis mediante espectrometría de emisión óptica sobre una superficie de la muestra extraída. El procedimiento se ejecutó bajo lo indicado por la norma ASTM E415-21: Método de prueba estándar para el análisis de acero al carbono y de baja aleación mediante espectrometría de emisión atómica por chispa (ASTM International, 2021a).

Sobre la superficie seleccionada para el análisis, se realizó un pulido mediante papel lija de manera progresiva hasta utilizar una lija número 240.

Luego, se analizó la muestra en un espectrómetro de emisión óptica Magellan Q8, marca Bruker.

2.1.4.1.1 Cálculo del carbono equivalente

Se realizó el cálculo del carbono equivalente para poder relacionar la composición química del cigüeñal y la posibilidad de formación de fases duras en la zona afectada por el calor (ZAC) al someter el componente a un proceso de soldadura.

Para ello, se empleó la ecuación sugerida por AWS D1.1 Código de soldadura estructural-acero (American Welding Society, 2020b):

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

Donde:

CE: Carbono equivalente

2.1.4.2 Ensayos de dureza

Se realizaron ensayos de dureza para conocer si el elemento ha sido sometido a un tratamiento térmico superficial (Dureza Vickers) y para obtener información acerca de la resistencia mecánica del acero del cigüeñal (Dureza Rockwell), dado que, por el tamaño del cigüeñal, no se pudo extraer una probeta para el ensayo de tracción.

2.1.4.2.1 Ensayo de Dureza Vickers

El ensayo de dureza Vickers se realizó según lo especificado por la norma ASTM E92-17: Métodos de prueba estándar para la dureza Vickers y la dureza Knoop de materiales metálicos (ASTM International, 2017a).

Se preparó la superficie mediante pulido mecánico y ataque químico (Nital al 5%). Se utilizó un durómetro Vickers ZHV de la marca Zwick/Roell, con una carga de 1 kg y se realizó un barrido de dureza desde el borde externo de la muestra, hacia el centro de la misma.

2.1.4.2.2 Ensayo de Dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell B fue ejecutado bajo la norma ASTM E18-22: Métodos de prueba estándar para la dureza Rockwell de materiales metálicos (ASTM International, 2022a).

Para el ensayo de dureza Rockwell se preparó la cara opuesta a la utilizada para el ensayo de dureza Vickers. Esta superficie fue sometida a un pulido mecánico y se realizaron indentaciones mediante un medidor de dureza marca Leco, modelo LCR-500.

Se realizó la conversión de dureza Rockwell B a dureza Brinell (HB) mediante la norma ASTM E140-12b (2019) e1: Tablas de conversión estándar de dureza para metales relacionadas entre dureza Brinell, dureza Vickers, dureza Rockwell, dureza superficial, dureza Knoop y dureza escleroscópica (ASTM International, 2019).

El valor de dureza Brinell se utilizó para estimar la resistencia última a la tracción mediante (Otegui, 2013):

$$S_{ut} = 3.10 HB$$

Donde:

S_{ut} : Resistencia última a la tracción [MPa]

HB : Dureza Brinell

2.1.5 Análisis metalográfico

El análisis metalográfico fue realizado con el objetivo de determinar los componentes microestructurales en la zona de la fractura.

Se realizaron tres cortes transversales y un corte longitudinal para obtener dos superficies para el análisis metalográfico (Figura 12).



Figura 12. Superficies para análisis metalográfico.

El procedimiento para el análisis metalográfico de las dos superficies se realizó según lo especificado por ASM Metal Handbook, Metallography and Microstructures (ASM Handbook Committee, 2004).

Luego de la extracción mediante corte mecánico de las dos muestras se realizó lo siguiente:

- Encapsulamiento de las muestras (Figura 13) mediante prensa de montaje metalúrgico marca Buehler, modelo Simplimet 2.
- Pulido manual progresivo de las superficies mediante lijas de carburo de silicio de granulometría 240, 320, 400, 600 y 1000.
- Pulido final semiautomático mediante pulidora Struers LaboPol-25, con paño de diamante de 6 y 1 micras.
- Ataque químico de las muestras pulidas con Nital al 5%.
- Toma de imágenes de las superficies atacadas mediante microscopio óptico metalográfico marca Leica, modelo DMI 5000.

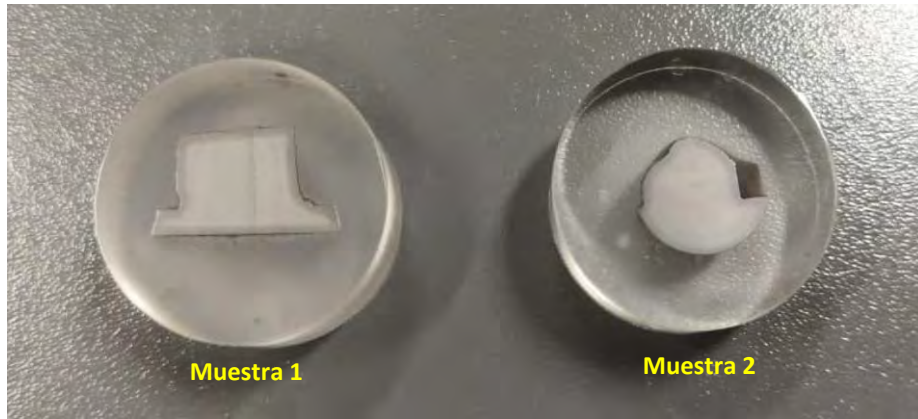


Figura 13. Muestras metalográficas encapsuladas.

Para llevar a cabo el análisis metalográfico se tomó en cuenta los lineamientos de las siguientes normas:

- ASTM E3-11 (2017): Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas (ASTM International, 2017b).
- ASTM E7-22 (2022): Terminología estándar relacionada con la metalografía (ASTM International, 2022b)
- ASTM E407-23 (2023): Práctica estándar para microataque de metales y aleaciones (ASTM International, 2023c).

2.2 Resultados y análisis de resultados

2.2.1 Inspección visual y fractografía

De la inspección visual se tienen los siguientes resultados:

- La inspección del elemento se realizó sobre el extremo del eje, en la zona cilíndrica donde se ubica el canal de chavetero de medialuna. Se observó un desprendimiento de la superficie del eje con origen en el chavetero. La profundidad máxima de la fractura es de 3 mm y se reduce hasta aproximadamente 1 mm (Figura 14).

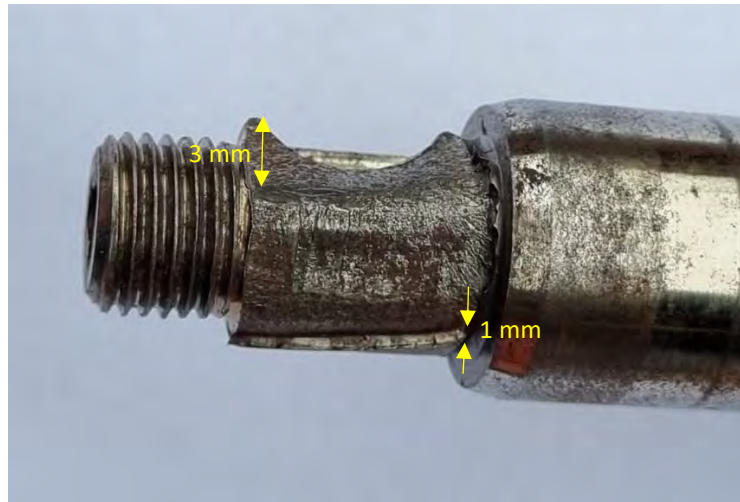


Figura 14. Profundidad de fractura alrededor del eje.

- La fractura se propagó en el sentido longitudinal del eje hasta los cambios de sección propios de la geometría del cigüeñal (Figura 15).



Figura 15. Límites de la zona de fractura.

- Se pudo apreciar un ligero estado de corrosión sobre la superficie de fractura.

Mediante el análisis fractográfico se pudo determinar lo siguiente:

- Se puede evidenciar que la fractura se originó en el canal chavetero, en la parte más profunda del mismo y junto a una cara lateral de la cavidad.

El final de la fractura se extendió hasta la parte diametral opuesta del eje (Figura 16).

- Se tienen marcas radiales que se propagan desde el origen de la fractura hasta los bordes del cambio de sección del eje del cigüeñal (Figura 17). Esto evidencia la presencia de una fractura frágil por clivaje. La zona con marcas radiales corresponde al 80% de la superficie total de fractura.
- Existe una zona adicional con marcas de playa (Figura 18), que indican un tipo de falla debido a fatiga torsional. Las marcas de playa abarcan aproximadamente el 20% de la superficie analizada.

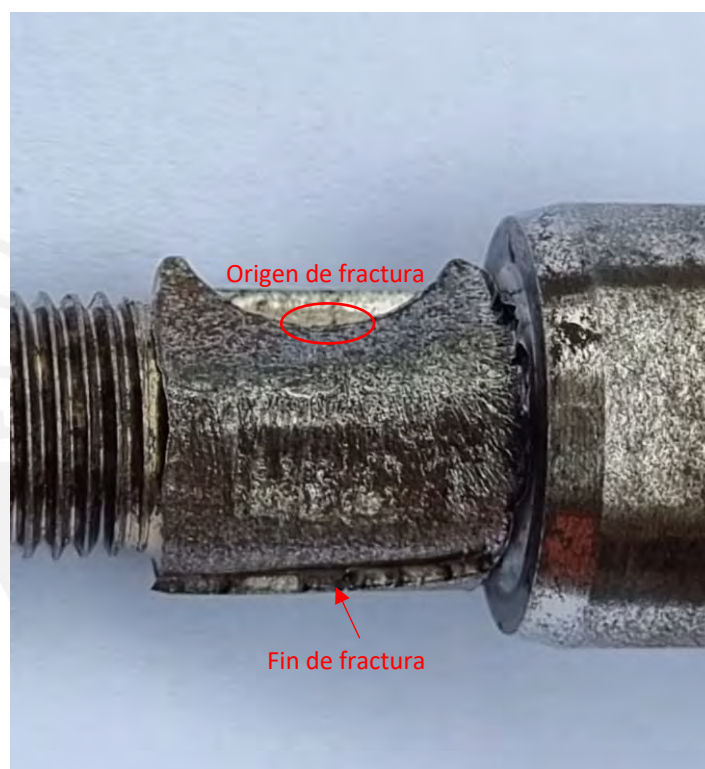


Figura 16. Ubicación del origen y fin de la fractura



Figura 17. Marcas radiales que indican el sentido de propagación de la fractura.



Figura 18. Marcas de playa en la superficie de fractura.

2.2.2 Inspección por partículas magnéticas

En la Figura 19 se muestra el resultado de la aplicación de partículas magnéticas. No se evidenciaron fisuras adicionales sobre la superficie de

fractura. Solamente se pueden observar las marcas radiales de la propagación de la fisura, así como las marcas de playa.



Figura 19. Resultado de aplicación de partículas magnéticas sobre la superficie de fractura.

Adicionalmente, en la Figura 20, se puede observar una indicación que evidencia una zona de deformación plástica ubicada en el borde del final de la fractura.

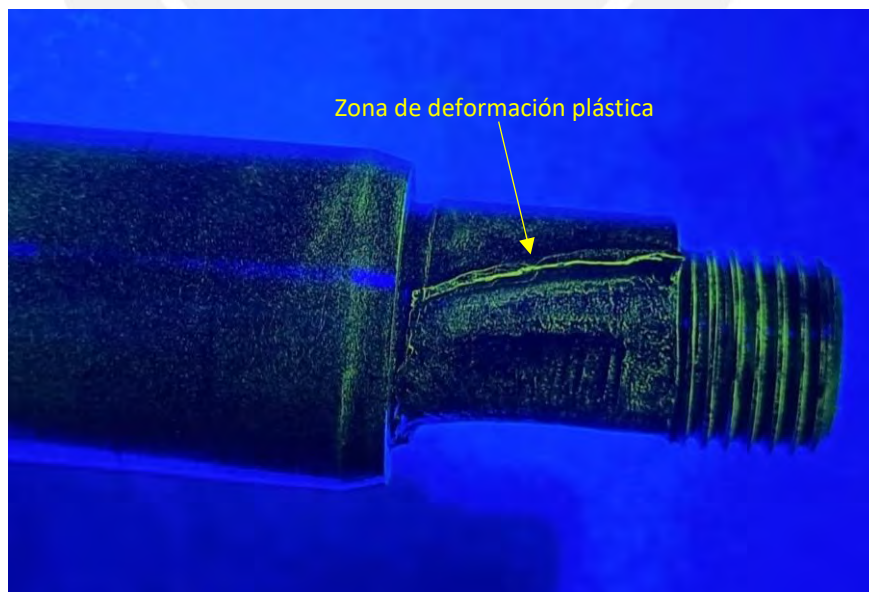


Figura 20. Zona de deformación plástica identificada con partículas magnéticas

La zona de deformación plástica se atribuye como una consecuencia de la fractura, al continuar acoplado embrague centrífugo aún después del fallo del componente.

2.2.3 Caracterización química y mecánica

2.2.3.1 Análisis químico

En la Tabla 2 se muestran los porcentajes de cada elemento obtenidos mediante el análisis químico. Estos valores han sido comparados con la composición química del acero AISI/SAE 1045.

Tabla 2. Comparación entre los resultados del análisis químico y la composición del acero AISI/SAE 1045.

Elemento	Porcentaje (%) obtenido en Análisis Químico	Composición (%) acero AISI/SAE 1045
C	0.4760	0.43-0.50
Mn	0.6790	0.60-0.90
P	0.0088	≤0.035
S	0.0204	≤0.035
Si	0.1683	0.10-0.35
Cr	0.1130	-
Ni	0.0160	-
Mo	0.0050	-
Cu	0.0050	-
V	0.0020	-

Según la comparación mostrada en la Tabla 2, se establece que el acero del cigüeñal es compatible con el acero AISI/SAE 1045, que corresponde a un acero de medio contenido de carbono.

2.2.3.2 Carbono equivalente

A partir de los resultados del análisis químico, se obtuvo el valor del carbono equivalente:

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

$$CE = 0.476 + \frac{(0,679 + 0,1683)}{6} + \frac{(0,113 + 0,005 + 0,002)}{5} + \frac{(0,016 + 0,005)}{15}$$

$$CE = 0,64$$

Se utilizó el diagrama de Graville (Figura 21) para evaluar la soldabilidad del cigüeñal en función del porcentaje de carbono y del valor del carbono equivalente.

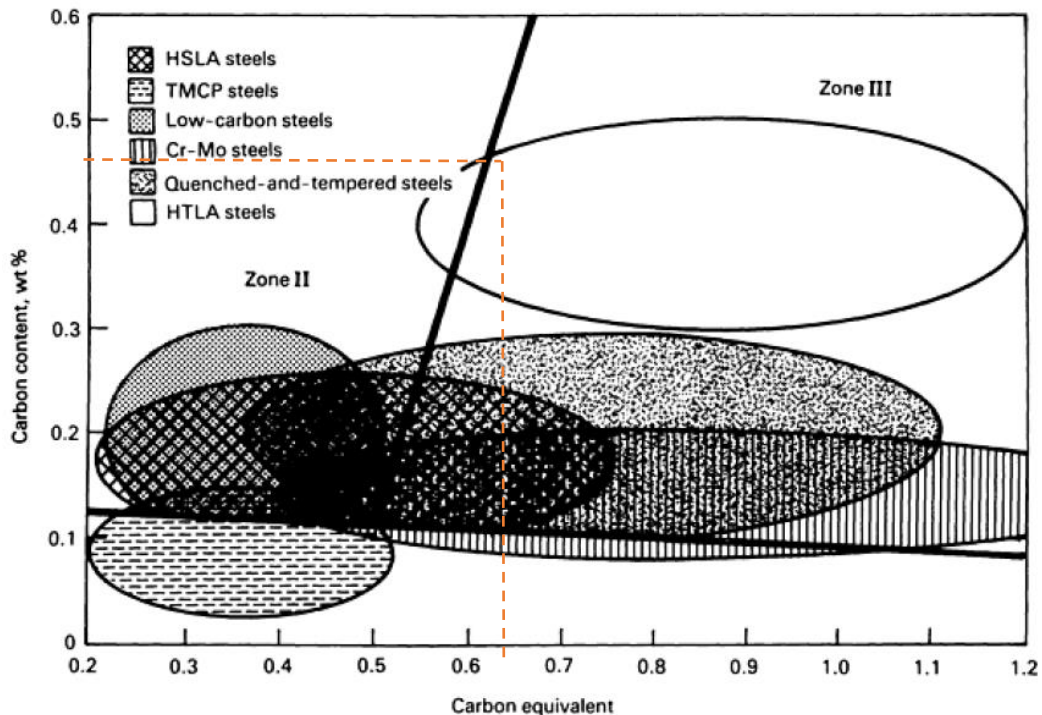


Figura 21. Diagrama de Graville (ASM Handbook Committee, 1993).

Dado que el acero evaluado se sitúa sobre la Zona III del diagrama, es probable que se produzcan microestructuras susceptibles a fisuras durante la soldadura. Esto indica la necesidad aplicar un proceso de soldadura de bajo hidrógeno, precalentamiento y tratamiento térmico post soldadura (ASM Handbook Committee, 1993).

2.2.4 Ensayos de dureza

2.2.4.1 Ensayo de dureza Vickers

Se realizaron 6 indentaciones sobre la superficie de la muestra (Figura 22). En la Figura 23 se muestra un esquema referencial con la ubicación de las indentaciones. Se indica además la separación (μm) entre cada medición de dureza.



Figura 22. Sección de cigüeñal preparada para ensayo de dureza Vickers.

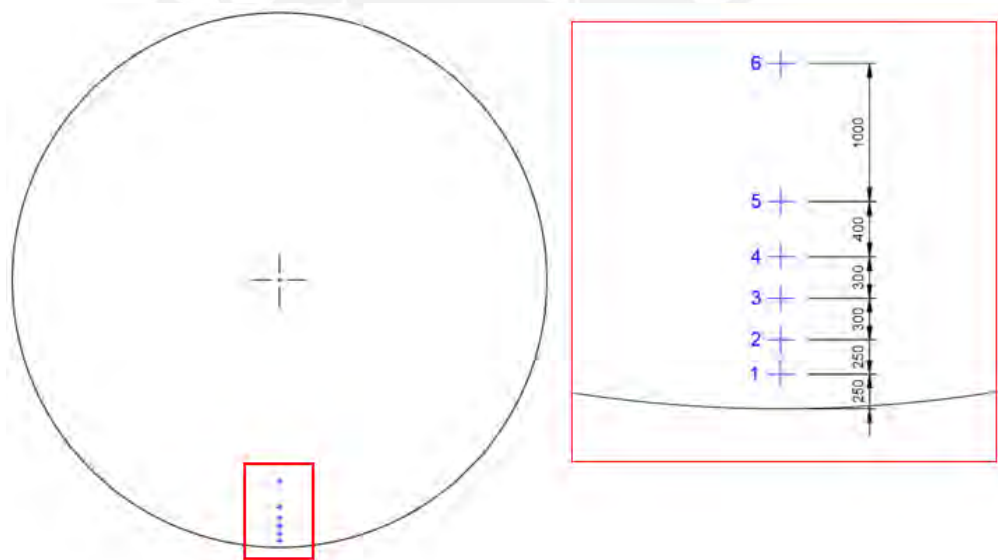


Figura 23. Esquema referencial de ubicación y separación entre indentaciones para ensayo de dureza Vickers.

En la Tabla 3 se muestran los valores de dureza obtenidos. Se encontró que la dureza en el borde de la sección es mayor a la dureza obtenida en la zona interna.

Tabla 3. Resultados de ensayo de microdureza Vickers

Muestra	Mediciones Dureza Vickers (HV1)					
	1	2	3	4	5	6
1	237	210	214	216	214	221

2.2.4.2 Ensayo de dureza Rockwell

En el ensayo de dureza Rockwell B se realizaron 5 indentaciones sobre la superficie de la muestra (Figura 24).

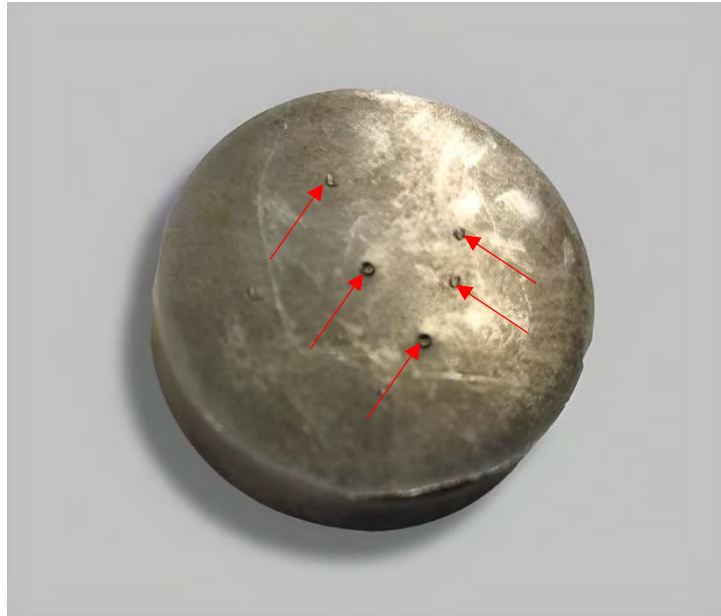


Figura 24. Ubicación de indentaciones para ensayo de dureza Rockwell.

En la Tabla 4 se muestran los resultados del ensayo de dureza Rockwell B. El valor promedio de dureza obtenido fue de 97.8 HRB.

Tabla 4. Resultados de ensayo de dureza Rockwell B.

Muestra	Mediciones dureza Rockwell B (HRB)					Promedio
	1	2	3	4	5	
1	98	99	97	97	98	97.8

La conversión a dureza Brinell HB se realizó mediante la Tabla 5 y el valor de dureza es:

$$HB = 228$$

En consecuencia, el valor aproximado de la resistencia a la tracción es:

$$S_{ut} = 3.10 * 228$$

$$S_{ut} = 707 \text{ MPa}$$

Tabla 5. Números aproximados de conversión de dureza para aceros no austeníticos (rango de dureza Rockwell B) (ASTM International, 2019).

Rockwell B Hardness Number, 100-kgf (HRB)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hard- ness Number, 3000-kgf, (HBS)	Knoop Hard- ness Number, 500-gf, and Over (HK)	Rockwell A Hardness Number, 60-kgf, (HRA)	Rockwell F Hardness Number, 60-kgf, (HRF)	Rockwell Superficial Hardness Number			Rockwell B Hardness Number, 100-kgf, (HRB)
						15T Scale, 15-kgf, (HR15T)	30T Scale, 30-kgf, (HR30T)	45T Scale, 45-kgf, (HR45T)	
100	240	240	251	61.5	...	93.1	83.1	72.9	100
99	234	234	246	60.9	...	92.8	82.5	71.9	99
98	228	228	241	60.2	...	92.5	81.8	70.9	98
97	222	222	236	59.5	...	92.1	81.1	69.9	97
96	216	216	231	58.9	...	91.8	80.4	68.9	96
95	210	210	226	58.3	...	91.5	79.8	67.9	95
94	205	205	221	57.6	...	91.2	79.1	66.9	94
93	200	200	216	57.0	...	90.8	78.4	65.9	93
92	195	195	211	56.4	...	90.5	77.8	64.8	92
91	190	190	206	55.8	...	90.2	77.1	63.8	91
90	185	185	201	55.2	...	89.9	76.4	62.8	90
89	180	180	196	54.6	...	89.5	75.8	61.8	89
88	176	176	192	54.0	...	89.2	75.1	60.8	88
87	172	172	188	53.4	...	88.9	74.4	59.8	87
86	169	169	184	52.8	...	88.6	73.8	58.8	86
85	165	165	180	52.3	...	88.2	73.1	57.8	85
84	162	162	176	51.7	...	87.9	72.4	56.8	84
83	159	159	173	51.1	...	87.6	71.8	55.8	83
82	156	156	170	50.6	...	87.3	71.1	54.8	82
81	153	153	167	50.0	...	86.9	70.4	53.8	81
80	150	150	164	49.5	...	86.6	69.7	52.8	80
79	147	147	161	48.9	...	86.3	69.1	51.8	79
78	144	144	158	48.4	...	86.0	68.4	50.8	78
77	141	141	155	47.9	...	85.6	67.7	49.8	77
76	139	139	152	47.3	...	85.3	67.1	48.8	76
75	137	137	150	46.8	99.6	85.0	66.4	47.8	75
74	135	135	147	46.3	99.1	84.7	65.7	46.8	74
73	132	132	145	45.8	98.5	84.3	65.1	45.8	73
72	130	130	143	45.3	98.0	84.0	64.4	44.8	72
71	127	127	141	44.8	97.4	83.7	63.7	43.8	71
70	125	125	139	44.3	96.8	83.4	63.1	42.8	70
69	123	123	137	43.8	96.2	83.0	62.4	41.8	69
68	121	121	135	43.3	95.6	82.7	61.7	40.8	68
67	119	119	133	42.8	95.1	82.4	61.0	39.8	67
66	117	117	131	42.3	94.5	82.1	60.4	38.7	66
65	116	116	129	41.8	93.9	81.8	59.7	37.7	65
64	114	114	127	41.4	93.4	81.4	59.0	36.7	64
63	112	112	125	40.9	92.8	81.1	58.4	35.7	63
62	110	110	124	40.4	92.2	80.8	57.7	34.7	62
61	108	108	122	40.0	91.7	80.5	57.0	33.7	61
60	107	107	120	39.5	91.1	80.1	56.4	32.7	60

El libro de referencia de metales “*Smithells Metals Reference Book*” (Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004) indica los siguientes valores de resistencia última a la tracción del acero AISI/SAE 1045, según su estado de suministro:

Normalizado: 620 MPa

Templado y Revenido: 770 MPa

Utilizando la dureza superficial $HV=HB=237$ y la ecuación para la estimación de la resistencia, se tiene:

$$S_{ut} = 3.10 * 237$$

$$S_{ut} = 735 \text{ MPa}$$

Esto indica que el acero del cigüeñal posee características de resistencia mecánica similares a las de un acero AISI/SAE 1045 en condiciones de temple y revenido.

2.2.5 Análisis metalográfico

En el análisis metalográfico se analizaron las superficies de las dos muestras indicadas en la Figura 13. La muestra 1, obtenida mediante un corte longitudinal se identificó como M1. La muestra 2, obtenida mediante un corte transversal se identificó como M2.

2.2.5.1 Análisis de la muestra M1

La Figura 25 indica el borde de la superficie de la muestra M1 a 100 aumentos. No se observaron defectos en la microestructura y se pudo observar la presencia de perlita y ferrita. De igual manera, la Figura 26 muestra la misma zona de análisis a 500 aumentos. Se pudo apreciar un mayor porcentaje de perlita con granos de ferrita dispersos.

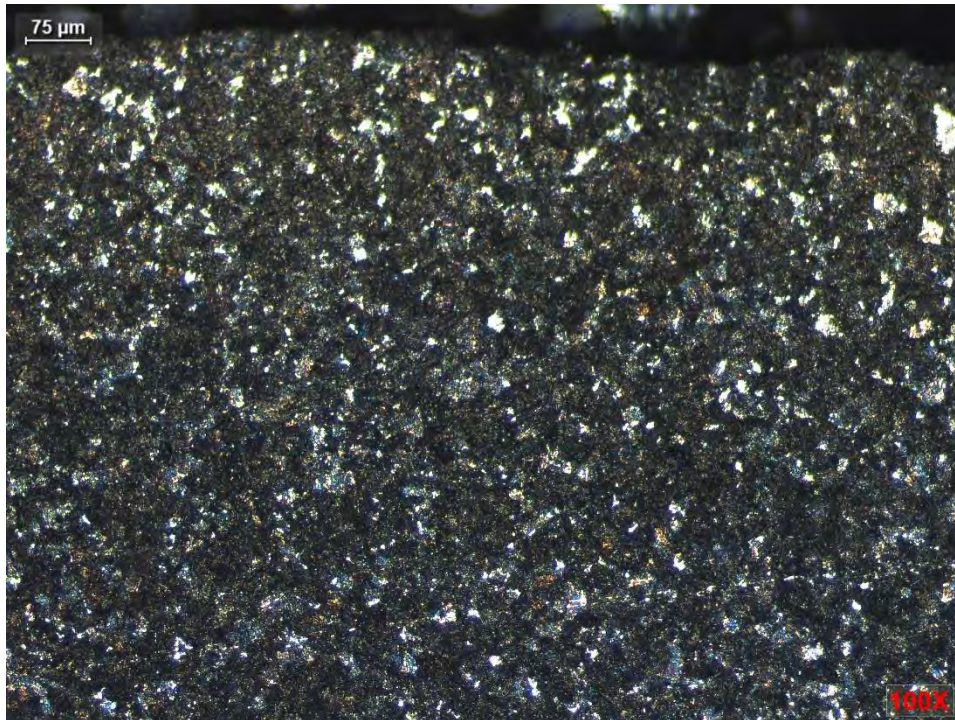


Figura 25. Metalografía en el borde de la superficie de M1. Muestra con ataque: Nital 5%. 100X.

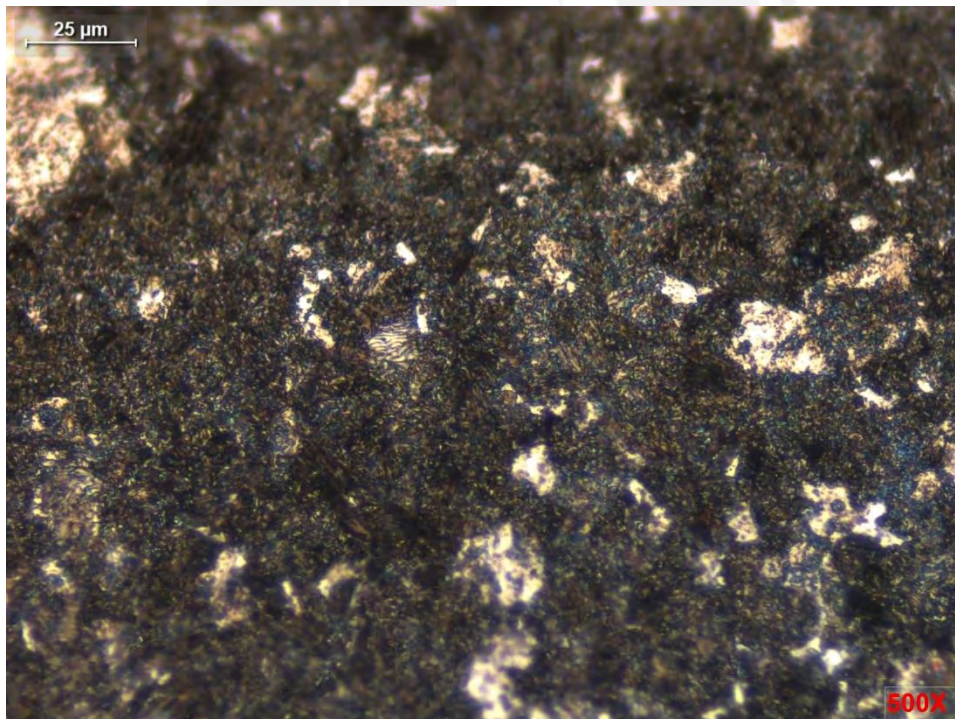


Figura 26. Metalografía en el borde de la superficie de M1. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X.

La Figura 27 indica el núcleo de la superficie de la muestra M1 a 100 aumentos. La presencia de ferrita aumentó de manera gradual en la microestructura. Esto se pudo apreciar de mejor manera en la Figura 26 (500

aumentos), donde se observaron zonas de ferrita con un mayor tamaño rodeando los granos de perlita.

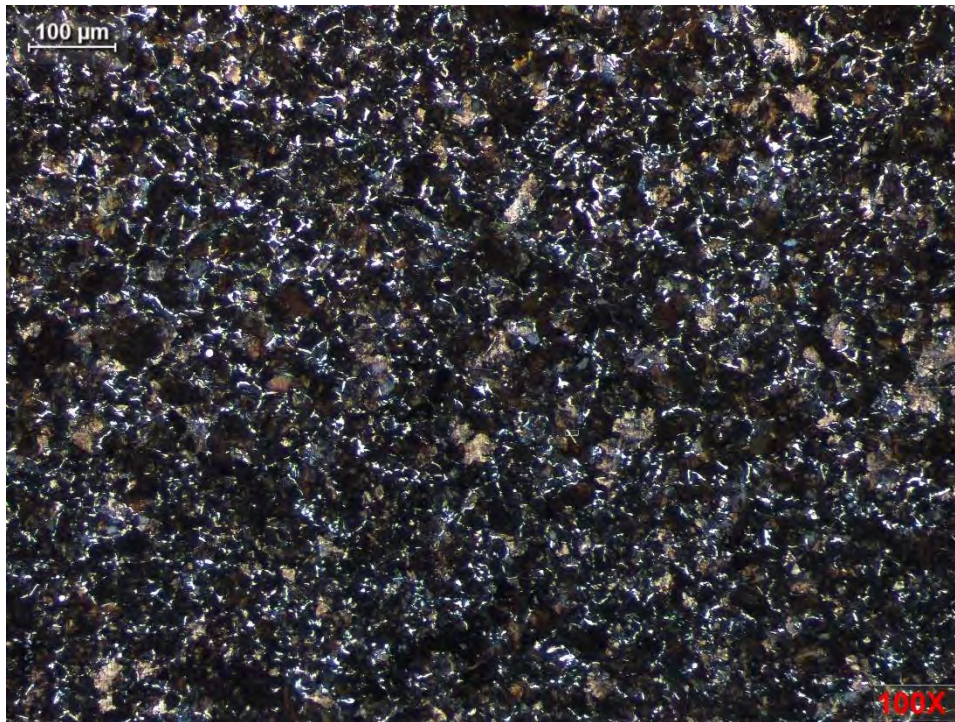


Figura 27. Metalografía en el núcleo de la superficie de M1. Muestra con ataque: Nital 5%. 100X.

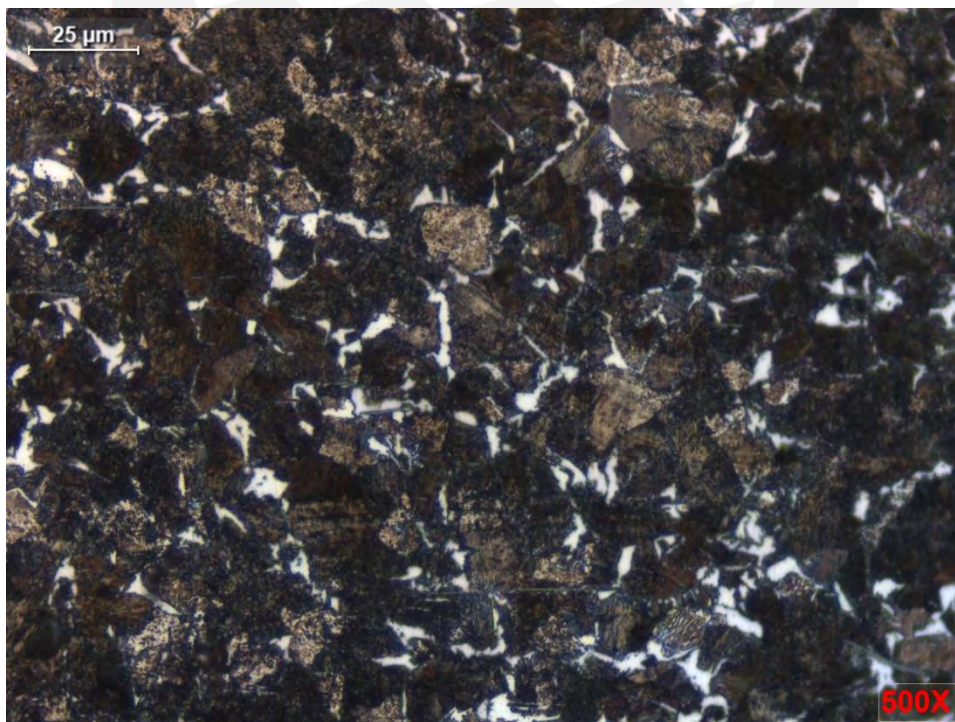


Figura 28. Metalografía en el núcleo de la superficie de M1. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X.

2.2.5.2 Análisis de la muestra M2

La Figura 29 indica el borde de la superficie de la muestra M2 a 100 aumentos. Al igual que la muestra M1, no se observaron defectos en la microestructura cercana a la superficie. La Figura 30 muestra la misma zona de análisis a 500 aumentos. Se pudo observar la matriz ferrítica que contiene granos de perlita.

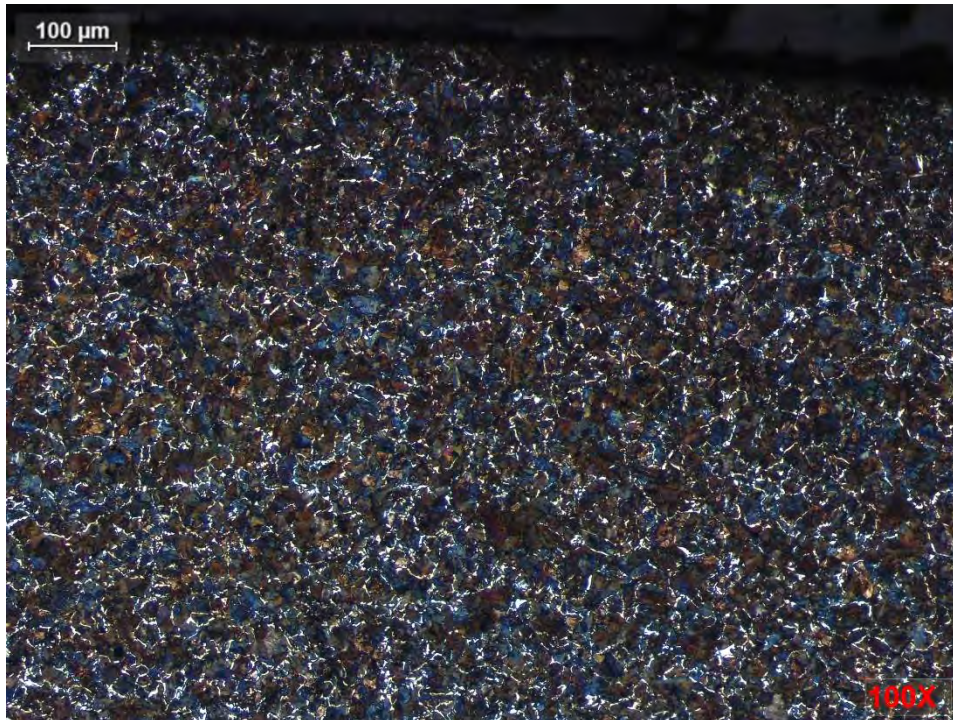


Figura 29. Metalografía en el borde de la superficie de M2. Muestra con ataque: Nital 5%. 100X.

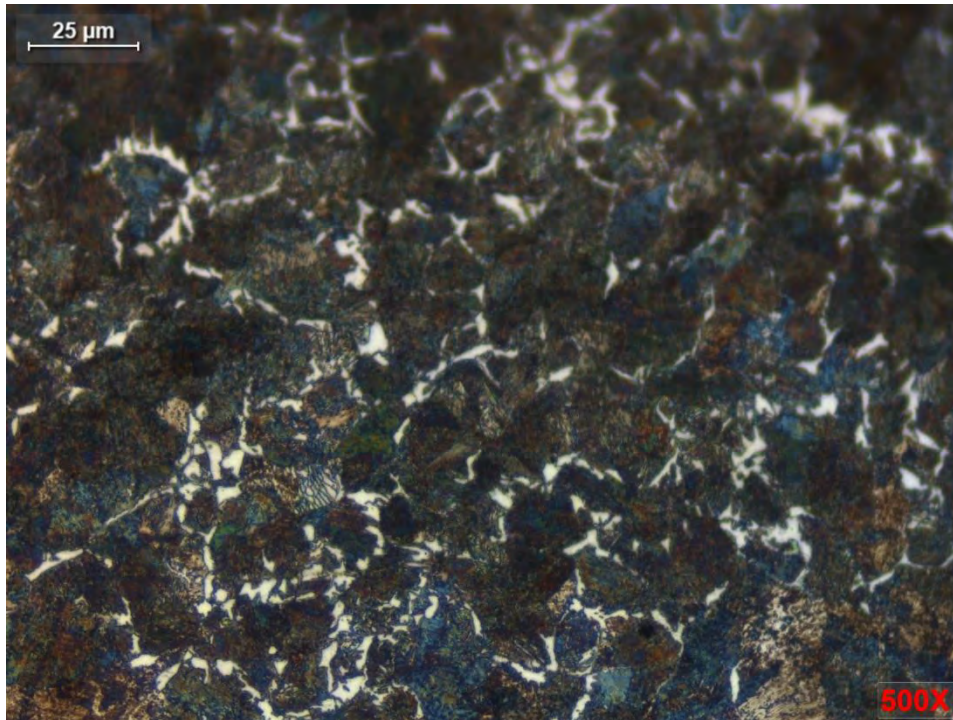


Figura 30. Metalografía en el borde de la superficie de M2. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X.

La Figura 31 y Figura 32 indican la superficie del acero en el núcleo de la muestra a 100 y 500 aumentos, respectivamente. No se observaron diferencias considerables con respecto a las metalografías del borde, salvo un ligero crecimiento de los granos de perlita.

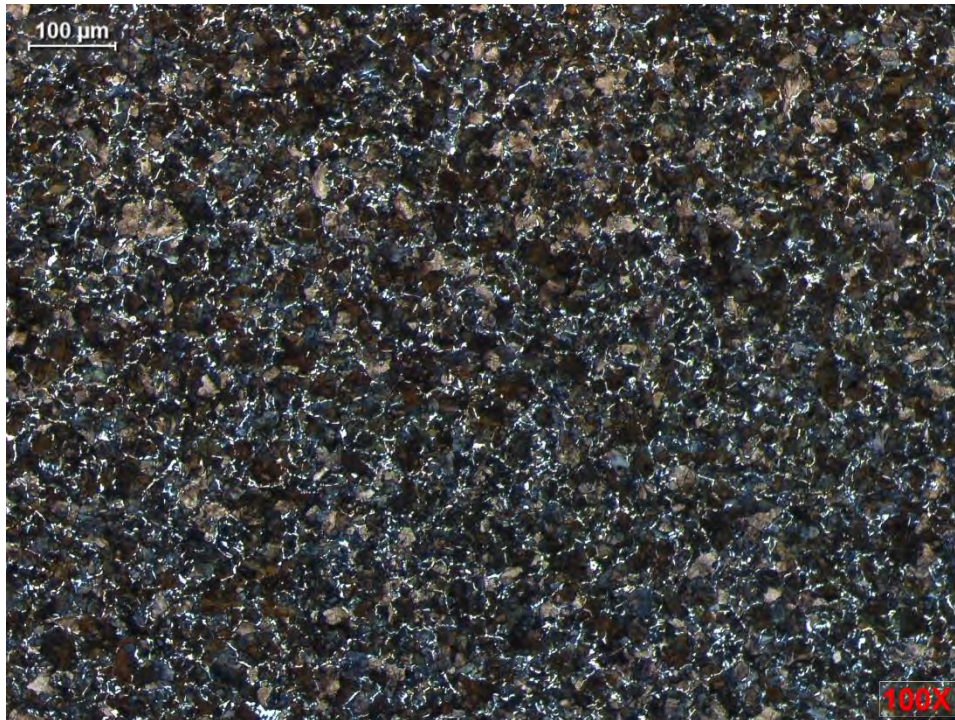


Figura 31. Metalografía en el núcleo de la superficie de M2. Muestra con ataque: Nital 5%. 100X.

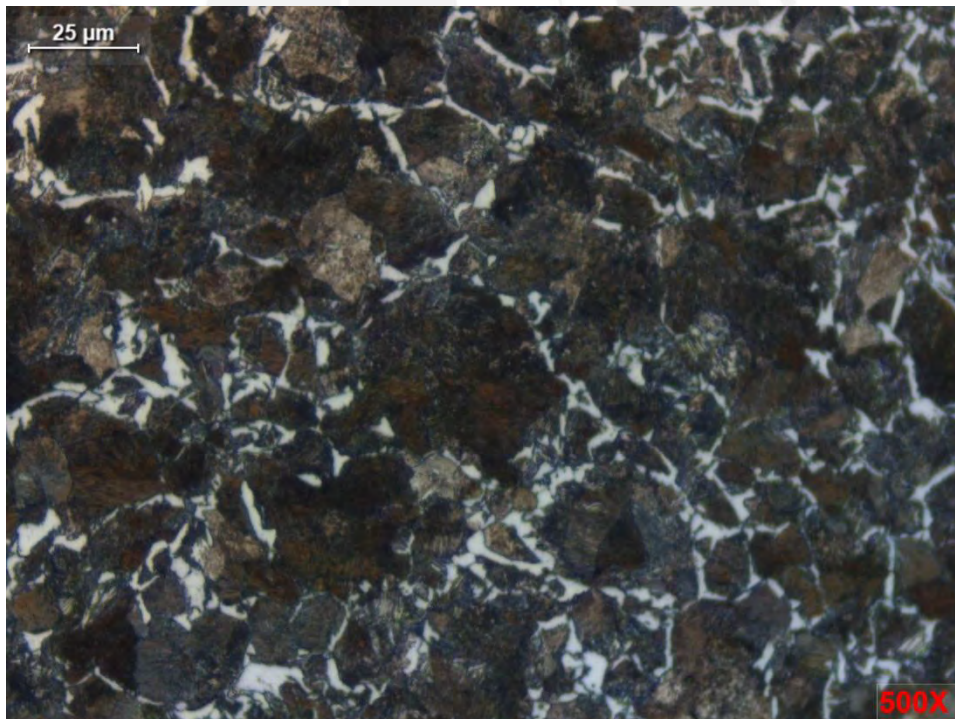


Figura 32. Metalografía en el núcleo de la superficie de M2. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X.

3. RECUPERACIÓN POR SOLDADURA

Luego del análisis de falla sobre el componente fracturado, se desarrolló el procedimiento para la recuperación por soldadura en la zona afectada. La información recopilada en el análisis de falla (caracterización del material) resultó imprescindible para esta etapa de la investigación.

3.1 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental para el proceso de recuperación por soldadura del componente fracturado consistió en los siguientes pasos:

- Elaboración del WPS preliminar
- Calificación del procedimiento de soldadura
- Procedimiento de soldadura en cigüeñal
- Evaluación del procedimiento

3.1.1 Elaboración del WPS preliminar

Se elaboró un WPS preliminar para realizar la calificación del procedimiento de soldadura que será aplicado a la recuperación del cigüeñal.

Se empleó la norma AWS D14.6 Especificación para Soldadura de Elementos Giratorios de Equipos (American Welding Society, 2012). Esta normativa establece los estándares de materiales y mano de obra para fabricación o reparación mediante soldadura de elementos/equipos en aplicaciones dinámicas.

La norma AWS D14.6 requiere el uso de la norma AWS B2.1 Especificación para el Procedimiento de Soldadura y Calificación de Desempeño (American Welding Society, 2009), que proporciona los requisitos para la calificación de los WPS, soldadores y operadores de soldadura para soldadura manual, semiautomática, mecanizada y automática.

3.1.1.1 Material base

De acuerdo a la caracterización mediante análisis químico, se estableció la siguiente información del material base:

a) Grado y especificación

Acero de medio carbono y baja aleación AISI/SAE 1045.

b) Número de material y número de grupo

El acero AISI/SAE 1045 no clasifica dentro de las categorías de número de material y número de grupo establecidas por el código AWS B2.1.

El material base se adquirió mediante el fabricante BÖHLER Voestalpine y certifica la siguiente composición química (Tabla 6):

Tabla 6. Composición química del material base para calificación del procedimiento de soldadura.

Elemento	Porcentaje (%) en peso del elemento químico
C	0.460
Mn	0.640
P	0.014
S	0.002
Si	0.230
Cr	0.160
Ni	0.030
Mo	0.010
Cu	0.020
V	0.001

Además de las siguientes propiedades mecánicas (Tabla 7):

Tabla 7. Propiedades mecánicas del material base AISI/SAE 1045 para calificación del procedimiento de soldadura.

Propiedad	Valor
Límite de fluencia	462 MPa
Resistencia a la tracción	688 MPa
Porcentaje de elongación	22%

c) Espesor

La norma AWS B2.1 establece los límites de espesor de material base para la calificación del procedimiento de soldadura de revestimiento "Cladding". La Tabla 8 indica los espesores para los procesos de Cladding y Hardfacing.

Tabla 8. Limitaciones de espesor para Cladding y Hardfacing para la calificación de procedimientos (American Welding Society, 2009).

Test Weldment Thickness (T), in [mm]	Qualified Base Metal Thickness, in [mm]	
	Minimum	Maximum
Less than 1 [25]	T	Unlimited
1 [25] and over	1 [25]	Unlimited

Se definió el espesor de material base tomando en cuenta el diámetro de la zona afectada del cigüeñal. Dado que el espesor de la zona a recuperar es menor a 1 pulgada, el valor mínimo definido para la calificación es:

$$T = 12 \text{ mm}$$

Donde:

T: Espesor del material base para la calificación del procedimiento [mm]

3.1.1.2 Proceso de soldadura

a) Proceso

Se seleccionó el proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) debido a que representa un proceso de inclusión de bajo hidrógeno sobre el metal de soldadura. Además, este proceso introduce un menor calor de aporte sobre el material base reduciendo así la distorsión en el cigüeñal.

b) Técnica

La técnica definida para la aplicación del proceso de soldadura consiste en la aplicación de múltiples pases de cordones con oscilación.

3.1.1.3 Consumibles de soldadura

a) Material de aporte

Se seleccionó el material de aporte ER90S-B3 según la clasificación establecida por la norma AWS A5.28 Especificación para Electrodo y Varillas de Acero de Baja Aleación para Soldadura por Arco con Protección de Gas (American Welding Society, 2005).

La selección de este material de aporte se hizo tomando en cuenta su resistencia a la tracción, similar a la del metal base en condiciones de temple y revenido. Además, la composición química del material de aporte permite

su uso en la reparación de elementos de acero al carbono en entornos de trabajo exigentes.

El material de aporte adquirido corresponde al fabricante ESAB con nombre comercial de OK Tigrod 13.17. La composición química del material de aporte se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Composición química del material de aporte OK Tigrod 13.17.

Elemento	Porcentaje (%) en peso del elemento químico
C	0.07-0.12
Mn	0.40-0.70
P	≤0.012
S	≤0.025
Si	0.40-0.70
Cr	2.30-2.70
Ni	≤0.20
Mo	0.90-1.20
Cu	≤0.20
V	≤0.03

De la misma forma, las propiedades mecánicas de la varilla de aporte se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Propiedades mecánicas del material de aporte OK Tigrod 13.17.

Propiedad	Valor
Límite de fluencia	462 MPa
Resistencia a la tracción	688 MPa
Porcentaje de elongación	22%

b) Número F y Número A

El anexo C de la norma AWS B2.1/B2.1M:2009 permite agrupar los materiales de aporte según el número F y el número A.

Dada la composición química y la designación según AWS 5.28, se estableció la siguiente clasificación para el material de aporte (Tabla11):

Tabla 11. Número F y número A del material de aporte.

Clasificación	Valor
Número F	6
Número A	4

c) Clasificación

El material de aporte ER90S-B3 corresponde a una varilla al cromo-molibdeno para soldadura GTAW.

d) Diámetro

Se definió el diámetro del metal de aporte igual a $3/32$ " (2.4 mm).

e) Composición del gas de protección y flujo

Se estableció lo siguiente:

- Composición del gas de protección: 100% Argón
- Caudal o flujo: 12 l/min

3.1.1.4 Diseño de junta

El diseño de junta se estableció para un revestimiento (Cladding) en posición plana. La soldadura de revestimiento se aplicó sobre una placa plana rectangular, tal como se muestra en la Figura 33.

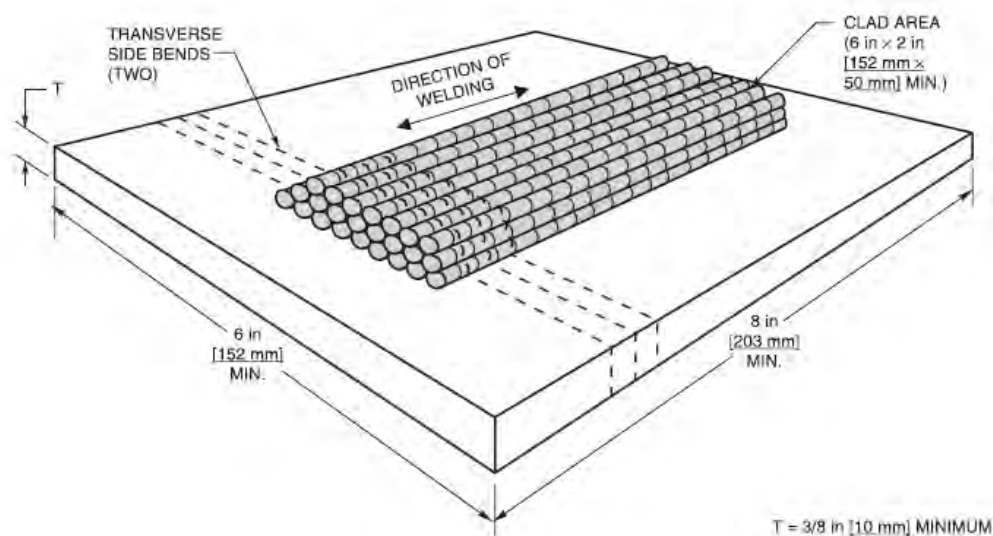


Figura 33. Diseño de junta para calificación del procedimiento (American Welding Society, 2009).

a) Tipo de junta

La junta soldada (Figura 33) consistió en una placa de dimensiones de 8 in x 6 in (203 mm x 152 mm) (Figura 3). En esta placa se aplicó el revestimiento sobre una superficie de 6 in x 2 in (152 mm x 50 mm).

b) Preparación del metal base

El metal base se preparó con el objetivo de asegurar que la superficie no contenga discontinuidades que puedan afectar la calidad o resistencia de la soldadura. La superficie de la placa se sometió a una adecuada limpieza y pulido superficial mediante amolado.

3.1.1.5 Características eléctricas

a) Tipo de corriente

El tipo de corriente establecida, debido al proceso GTAW, fue corriente continua electrodo al negativo (DCEN). Esto para evitar un excesivo calentamiento del electrodo de tungsteno.

b) Amperaje

En función de los parámetros de soldadura recomendados por el fabricante del material de aporte, para un diámetro de varilla de 3/32", se estableció un rango de amperaje de 125-175 Amperios.

c) Voltaje

El rango de voltaje definido para la aplicación del recubrimiento con electrodo ER90S-B3, con diámetro de 3/32", fue de 15-20 Voltios.

d) Velocidad de avance

La velocidad de avance se estableció en un valor mínimo de 100 mm/min.

3.1.1.6 Condiciones de soldadura

a) Calor de aporte

El calor de aporte se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{aporte} = \frac{V I e}{v}$$

Donde:

Q_{aporte} : Calor de aporte de la soldadura [J/mm]

V : Voltaje [V]

I : Amperaje [A]

e : eficiencia del proceso de soldadura

v : velocidad de avance [mm/s]

Considerando valores de voltaje y amperaje promedio dentro del intervalo recomendado y una eficiencia del proceso GTAW de 0.6, se obtuvo:

$$Q_{aporte} = \frac{17.5 * 150 * 0.6}{\frac{100}{60}}$$

$$Q_{aporte} = 945 \text{ J/mm}$$

b) Pre calentamiento

El pre calentamiento sobre el material base fue necesario debido a que, previamente con ayuda del diagrama de Graville, se verificó que el acero tiende a formar microestructuras susceptibles a fisuras durante la soldadura.

La temperatura de pre calentamiento se obtuvo mediante la ecuación de Seferian (Fosca, 2007):

$$T_p = 350\sqrt{C_T - 0.25}$$

Donde:

T_p : Temperatura de pre calentamiento [°C]

C_T : Carbono equivalente total

A su vez, el carbono equivalente total se calculó mediante:

$$C_T = C_q(1 + 0.005T)$$

Donde:

C_q : Factor que depende de la composición química del metal

T : espesor del metal base [mm]

El factor C_q se calculó mediante:

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

En función de los valores de la composición química del material base, mostrados en la Tabla 6, se obtuvo el valor de C_q :

$$C_q = 0.46 + \frac{0.64 + 0.16}{9} + \frac{0.03}{18} + \frac{0.01}{90}$$

$$C_q = 0.55$$

A continuación, el valor del carbono equivalente total fue:

$$C_T = 0.55(1 + 0.005 * 12)$$

$$C_T = 0.58$$

Por lo tanto, la temperatura de precalentamiento es:

$$T_p = 350\sqrt{0.58 - 0.25}$$

$$T_p = 202 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este valor se ajustó y se estableció finalmente en

$$T_p = 220 \text{ } ^\circ\text{C}$$

c) Temperatura entre pasadas

La temperatura entre pasadas no debe ser inferior a la temperatura de precalentamiento, por lo que se estableció un valor máximo de 300 °C para evitar la reducción de resistencia del metal de soldadura.

d) Tratamiento térmico post soldadura (PWHT)

La norma AWS D14.6 sugiere que el PWHT para los materiales del grupo M-1 se realice a una temperatura entre 595 °C a 650 °C, y se mantenga durante 1 hora por 1 pulgada de espesor, más 15 minutos por cada 1 pulgada extra a partir de 2 pulgadas. Sin embargo, dado que el acero AISI/SAE 1045 no clasifica dentro de los grupos de material base de la norma AWS B2.1, se tomará la recomendación del fabricante del metal de aporte.

ESAB recomienda un PWHT de 1h a 690°C para el aporte ER90S-B3. Este valor no difiere demasiado según lo recomendado por la norma AWS D14.6.

3.1.1.7 Posición

La posición definida para el procedimiento de soldadura se muestra en la Figura 34.

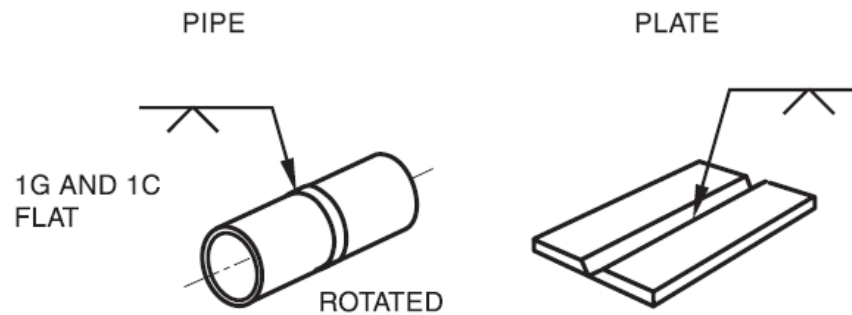


Figura 34. Posición de prueba 1C para soldadura de ranura, Cladding y Hardfacing (American Welding Society, 2009).

La posición de soldadura corresponde a 1C: posición plana para recubrimiento (Cladding).

El WPS preliminar se muestra en la Figura 35.

Especificaciones del Procedimiento de Soldadura (WPS)							
(según AWS B2.1/B2.1M:2009)							
Institución	Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)						
WPS N°	WPS-FS-01	Aprobado por:					
N° de revisión de WPS	1	Fecha:					
N° de PQR de soporte	PQR-FS-01	Fecha de revisión:					
Proceso de soldadura	GTAW	Tipo:		Manual			
Metal Base				Metal de aporte			
N° M		N° de Grupo		N° F	6	N° A	4
Especificación y grado	AISI/SAE 1045			Clasificación según AWS	ER90S-B3		
Otro	Acero de medio carbono			Tamaño/Diámetro	2,4 mm (3/32")		
Rango de espesor de MB	A partir de 12 mm			Nombre comercial	OK Tigrod 13.17		
Junta				Rango de espesor de MA	Mínimo 3 mm		
Tipo de junta	De relleno (Weld Cladding)			Pre calentamiento			
				Temperatura de pre calentamiento (mín.)	220 °C		
				Temperatura entre pasadas (máx.)	300 °C		
				Tratamiento Térmico Post Soldadura (PWHT)			
				Temperatura	690 °C		
				Tiempo	1 hora		
				Posiciones			
				Posición	Plana-1C		
				Progresión	N/A		
				Gas de protección			
				Composición	100% Argón		
				Caudal	12 l/min		
				Otras variables			
				Arrastre u oscilación	Oscilación		
				Pasada simple o múltiple	Múltiple		
Características eléctricas							
Tipo de corriente/Polaridad	Polaridad directa (CCEN)			Tipo de electrodo	EWCe-2		
Corriente pulsada	No			Tamaño de electrodo	2,4 mm (3/32")		
Amperaje	125-175	[A]		Modo de transferencia	N/A		
Voltaje	15-20	[V]					
Velocidad de avance	100	[mm/min]					
Parámetros de Soldadura							
Pase	Proceso	Metal de aporte		Polaridad	Corriente	Voltaje	Vel. Avance
		Tipo	Diámetro [mm]				
N°					[A]	[V]	[mm/min]
1	GTAW	ER90S-B3	2,4	DCEN	125-175	15-20	100
2	GTAW	ER90S-B3	2,4	DCEN	125-175	15-20	100
3	GTAW	ER90S-B3	2,4	DCEN	125-175	15-20	100
Aprobación							
Firma:				Firma:			

Figura 35. WPS preliminar utilizado para la calificación del procedimiento de soldadura

3.1.2 Calificación del procedimiento de soldadura

Para la calificación del procedimiento de soldadura se ejecutó el WPS preliminar mostrado en la Figura 35 sobre la placa de acero 1045. La placa con el revestimiento de soldadura se muestra en la Figura 36.



Figura 36. Placa de acero 1045 con revestimiento de soldadura.

3.1.2.1 Pruebas de calificación del procedimiento

Las pruebas de calificación requeridas para el procedimiento de soldadura se especifican en la norma AWS B2.1 y se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Métodos de ensayos requeridos para la calificación del procedimiento de soldadura (American Welding Society, 2009).

	Fillet Welds					
	Groove Weld	Bend-Break Test	Alternate Shear Test	Stud Welds	Weld Cladding	Hard-Facing
Visual Examination	Yes	Yes	Yes	(Note b)	(Note b)	(Note b)
Guided Bend Tests	Yes ^a	—	—	—	Yes	—
Tension Tests	Yes	—	—	Yes, or Torque	—	—
Macro-Examination	(Note a)	Yes	Yes	Yes ^c	—	(Note b)
Bend-Break	—	Yes	—	—	—	—
Bend Tests	Yes ^a	—	—	Yes	—	—
Torque Tests	—	—	—	Yes, or Tension	—	—
Fracture Toughness Tests	(Note b)	—	—	—	—	—
Shear Tests	—	—	Yes	—	—	—
Penetrant Examination	—	—	—	—	Yes	(Note b)
Chemical Analysis	—	—	—	—	Yes	(Note b)
Hardness Test	—	—	—	—	—	Yes

Adicional a las pruebas indicadas en la Tabla 12, se realizaron dos macro examinaciones, inspección con partículas magnéticas y dos barridos de dureza. Las zonas para la extracción de las muestras para los distintos ensayos se muestran en la Figura 37.

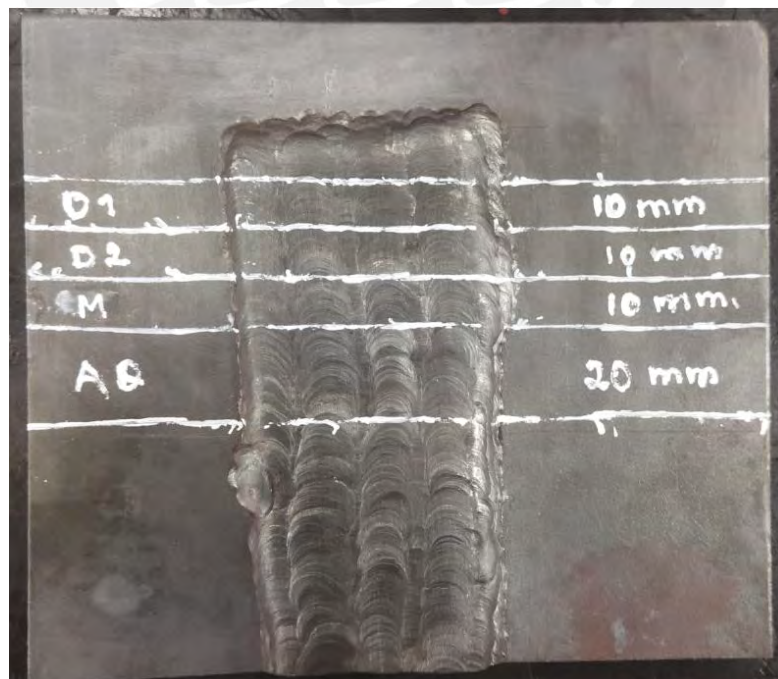


Figura 37. Zonas de extracción de cupones para la calificación del procedimiento de soldadura.

El procedimiento para cada prueba de calificación se describe a continuación:

a) Examen visual

Se realizó una limpieza exhaustiva de la superficie de soldadura y se examinó la apariencia del depósito de soldadura. Se verificaron las dimensiones del depósito, tales como longitud, ancho y espesor, mediante una regla metálica y una galga para soldadura.

b) Líquidos penetrantes

La aplicación de líquidos penetrantes se realizó sobre toda la superficie de relleno según lo especificado por la norma ASTM E165-23: Práctica Estándar para Ensayos de Líquidos Penetrantes para la Industria en General (ASTM International, 2023a).

La limpieza de la superficie se realizó mediante removedor MR 85. Se aplicó líquido penetrante en aerosol rojo y fluorescente MR 68 C. Además, se utilizó un revelador húmedo no acuoso MR 70.

c) Partículas magnéticas

De igual manera se inspeccionó la superficie del relleno por soldadura mediante partículas magnéticas siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E709-21.

Se utilizaron equipos de la marca Magnaflux para la realización del ensayo, tales como yugo electromagnético tipo Y-7, aerosol Magnaglo 14 AM y lámpara de luz UV5000.

d) Ensayo de doblado

La norma AWS B2.1 indica que se deben extraer dos probetas para ensayo de doblado. La forma de extracción de las muestras se indica en la Figura 33. Las dimensiones de las probetas para el ensayo de doblado se deben preparar de acuerdo a la Figura 38 y la Tabla 13.

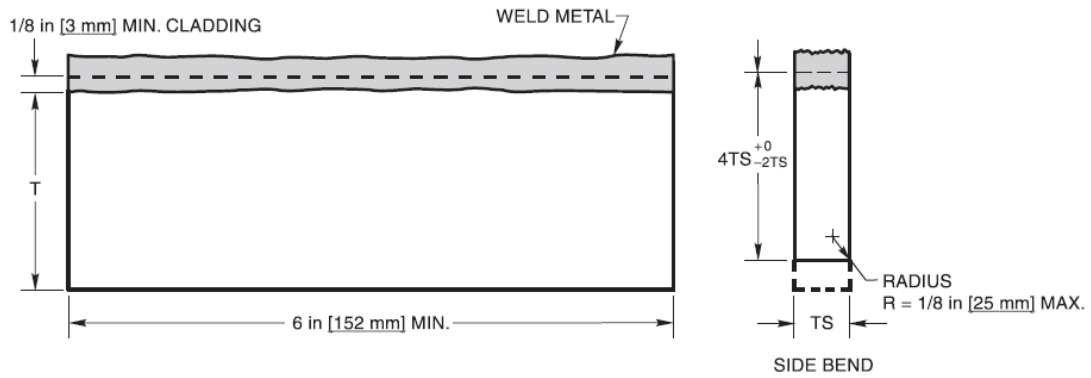


Figura 38. Dimensiones de las probetas para el ensayo de doblado (American Welding Society, 2009).

Tabla 13. Dimensiones del espesor de la muestra para ensayo de doblado (American Welding Society, 2009).

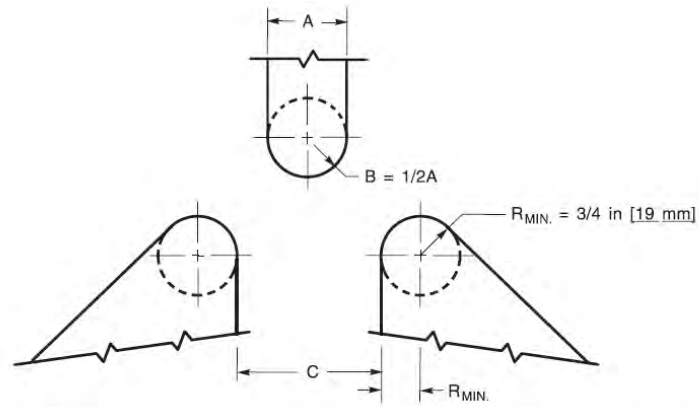
INCHES		MILLIMETERS	
T ^a	TS ^b	T ^a	TS ^b
1/8 to 3/8	T	3 to 10	T
Over 3/8	3/8	Over 10	10

El valor de T indica el espesor del material base. El valor de TS indica el espesor de la muestra para el ensayo de doblado. Teniendo en cuenta que el espesor del material base es mayor a 10 mm, se tiene que el espesor de la muestra es:

$$TS = 10 \text{ mm}$$

TS: espesor de la muestra para el ensayo de doblado [mm]

De igual manera, en la Figura 37 se indica la configuración del equipo para el ensayo de doblado.



Base Metal ^b	INCHES			MILLIMETERS		
	TS ^a	A	C	TS ^a	A	C
M-23 (as welded)				M-23 (as welded)		
M-35 except B148 and B271	<1/8	(16-1/2)TS	(18-1/2)TS + 1/16	M-35 except B148 and B271	<3	(16-1/2)TS (18-1/2)TS + 1/16
All base metal welded with F-23 filler metals	1/8	2-1/16	2-3/8	All base metals welded with F-23 consumables	3	<u>50</u> <u>57</u>
M-11				M-11		
M-23 (annealed)	<3/8	(6-2/3)TS	(8-2/3)TS + 1/8	M-23 (annealed)	<10	(6-2/3)TS (8-2/3)TS + 3
M-25	3/8	2-1/2	3-3/8	M-25	10	<u>67</u> <u>90</u>
M-35, B148, and B271				M-35, B148, and B271		
M-24 (annealed)	≤3/8	8TS	10TS + 1/8	M-24 (annealed)	≤10	8TS 10TS + 3
M-27, M-61, and M-62				M-27, M-61, and M-62		
M-52 and M-53	≤3/8	10TS	12TS + 1/8	M-52 and M-53	≤10	10TS 12TS + 3
M-54	≤3/8	14TS	16TS + 1/8	M-54	≤10	14TS 16TS + 3
All other M-Number metals	<3/8	4TS	6TS + 1/8	All other M-Number metals	<10	4TS 6TS + 3
	3/8	1-1/2	2-3/8		10	<u>40</u> <u>63</u>

Figura 39. Configuración del equipo para el ensayo de doblado (American Welding Society, 2009).

Se utilizó un equipo de la marca Mohr Federhaff Losenhausen para ensayo de doblado (Figura 40).



Figura 40. Máquina para ensayo de doblado.

e) Macro examinación

Se realizaron dos macrográficas sobre la cara lateral de dos cupones extraídos de la placa soldada. Una muestra fue sometida al PWHT especificado en el WPS, mientras que la otra muestra fue extraída previo al tratamiento térmico.

Las dimensiones de las muestras fueron las mismas que las utilizadas durante el ensayo de doblado. Las superficies de ensayo fueron sometidas a pulido con lijas número 240, 320, 400 y 600. Luego del pulido, ambas superficies fueron atacadas con Nital al 5%.

El procedimiento se llevó a cabo utilizando lo descrito por la norma ASTM E340-23 Práctica Estándar para Macroataque de Metales y Aleaciones (ASTM International, 2023b).

f) Ensayos de dureza

Sobre las superficies de la macro examinación se realizaron dos barridos de dureza Vickers. Se efectuaron 18 indentaciones en cada muestra distribuidas sobre el material base, la zona afectada por el calor y sobre el material de aporte.

Los ensayos de dureza Vickers se realizaron según lo especificado por la norma ASTM E92-17. Se utilizó un durómetro Vickers ZHV Zwick/Roell, con una carga de 10 kg.

g) Análisis químico

Se realizó el análisis químico sobre una muestra extraída de la placa con revestimiento. La norma AWS B2.1 especifica la muestra para el análisis químico (Figura 41).

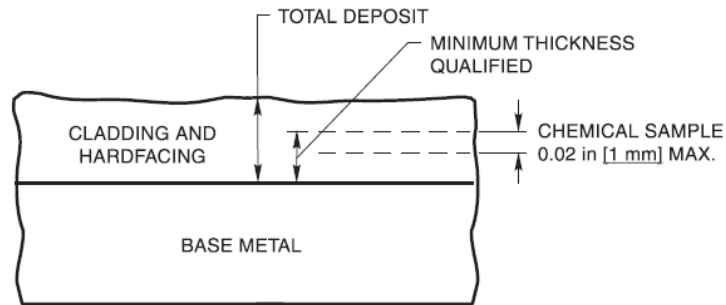


Figura 41. Muestra para análisis químico del revestimiento de soldadura (American Welding Society, 2009).

La muestra, en la superficie de soldadura, fue sometida a un proceso de mecanizado para el correspondiente análisis (Figura 42).

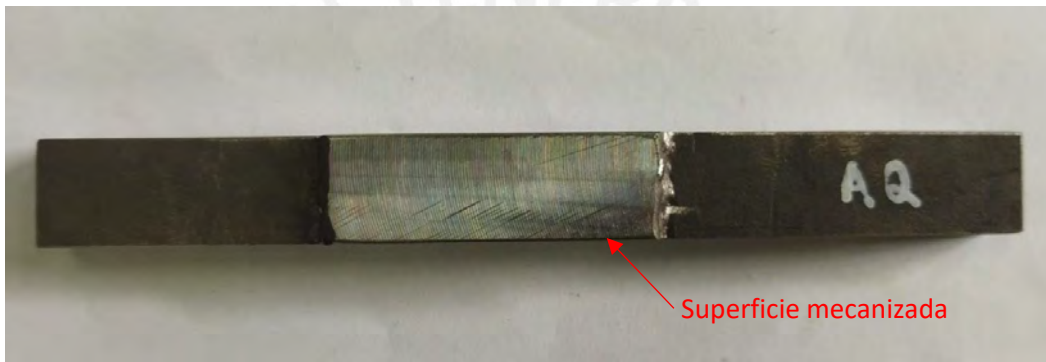


Figura 42. Muestra preparada para análisis químico del revestimiento de soldadura.

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM E415-21 y se utilizó un espectrómetro de emisión óptica Bruker Magellan Q8.

Los resultados de la muestra de análisis químico fueron comparados con la composición química típica del material de aporte en soldadura.

3.1.2.2 Resultados de las pruebas

a) Examen visual

El examen visual se realizó sobre la superficie de revestimiento en la placa de acero y no se encontraron defectos superficiales. Se registró un depósito con dimensiones de 153 x 62 mm. Además, se verificó el espesor de relleno de 5 mm (Figura 43). Se evidenció una ligera distorsión de la placa debido al aporte de calor.



Figura 43. Verificación del espesor del revestimiento mediante galga de soldadura.

b) Líquidos penetrantes

La superficie de soldadura ensayada con líquidos penetrantes se muestra en la Figura 44. No se encontraron indicaciones lineales sobre el revestimiento. Se encontraron dos indicaciones circulares en la terminación de dos cordones de soldadura



Figura 44. Superficie de soldadura ensayada con líquidos penetrantes.

Los criterios de aceptación exigen lo siguiente:

- No debe haber indicaciones lineales mayores a $1/16$ in [1.5 mm]
- No debe haber indicaciones redondeadas mayores a $1/16$ in [1.5 mm] y separadas entre sí por una distancia menor a $1/16$ in [1.5 mm]

Las indicaciones circulares mostradas en la Figura 44 presentaron dimensiones de 1.5 mm y una separación de 18 mm, por lo que se acepta el cupón de soldadura.

c) Partículas magnéticas

Durante el ensayo de partículas magnéticas sobre la superficie de soldadura (Figura 45), no se encontraron indicaciones relevantes. Las indicaciones corresponden a los bordes entre cordones de soldadura y bordes entre cordón y metal base.

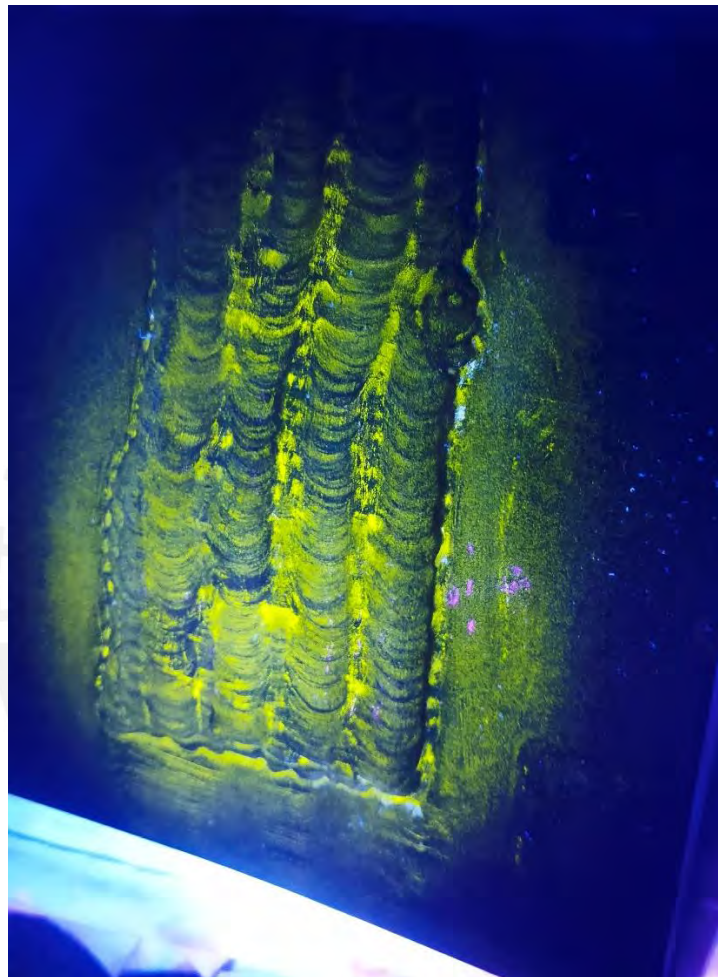


Figura 45. Superficie de soldadura ensayada con partículas magnéticas.

d) Ensayo de doblado

La ejecución del ensayo de doblado sobre un cupón de soldadura se muestra en la Figura 46.



Figura 46. Probeta de soldadura durante ensayo de doblado.

Las dos probetas dobladas se muestran en la Figura 47. Se pueden observar dos discontinuidades sobre la interfaz de dos cordones de soldadura.

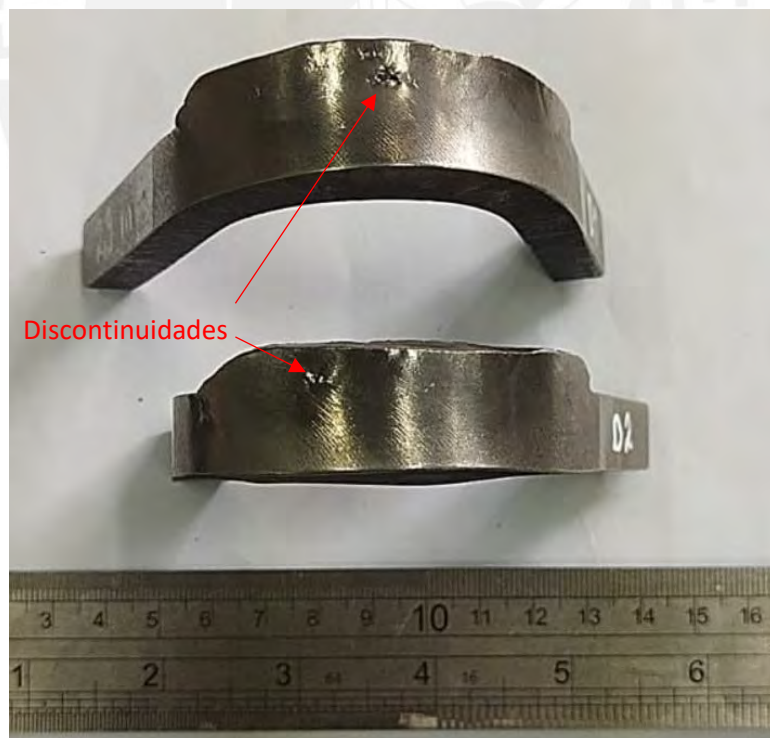


Figura 47. Cupones de soldadura sometidos a ensayo de doblado.

Los criterios de aceptación de la norma AWS B2.1 indican lo siguiente:

- La probeta no debe presentar ninguna discontinuidad abierta mayor a 1/16 in [1.5 mm] en el revestimiento, medida en cualquier dirección de la superficie convexa.
- La probeta no debe presentar ningún defecto abierto mayor a 1/8 in [3 mm] en la interfaz de la soldadura después del ensayo.

No se encontraron discontinuidades en el revestimiento. Las dimensiones de las discontinuidades abiertas en la interfaz de la soldadura corresponden a 2.9 mm y 2.7 mm, por lo que se aprueba la calificación del procedimiento en el ensayo de doblado.

e) Macro examinación

La Figura 48 muestra el resultado del macroataque sobre la cara lateral del cupón sin tratamiento térmico post soldadura. Se indican las zonas del material de aporte (MA), material base (MB) y zona afectada por el calor (ZAC).

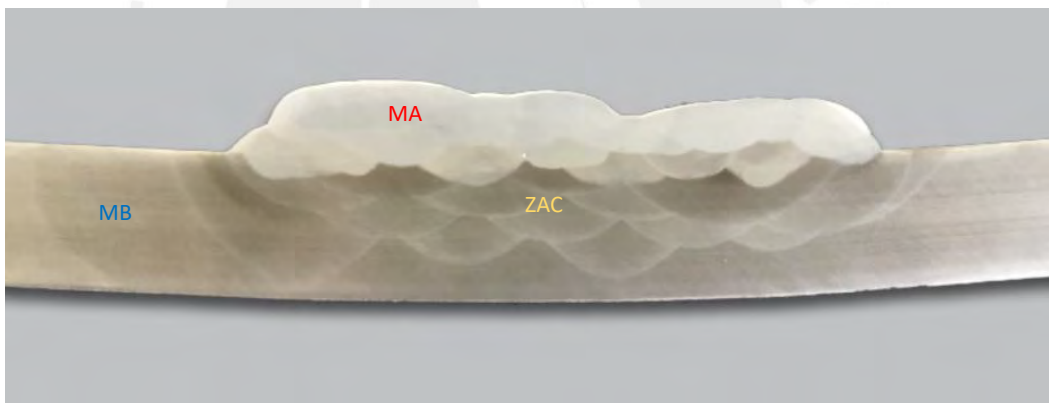


Figura 48. Macrografía de cupón de soldadura sin PWHT.

La Figura 49 muestra el resultado del macroataque sobre la cara lateral del cupón sometido a PWHT. De igual forma, se indican las zonas de metal de aporte, metal base y zona afectada por el calor.

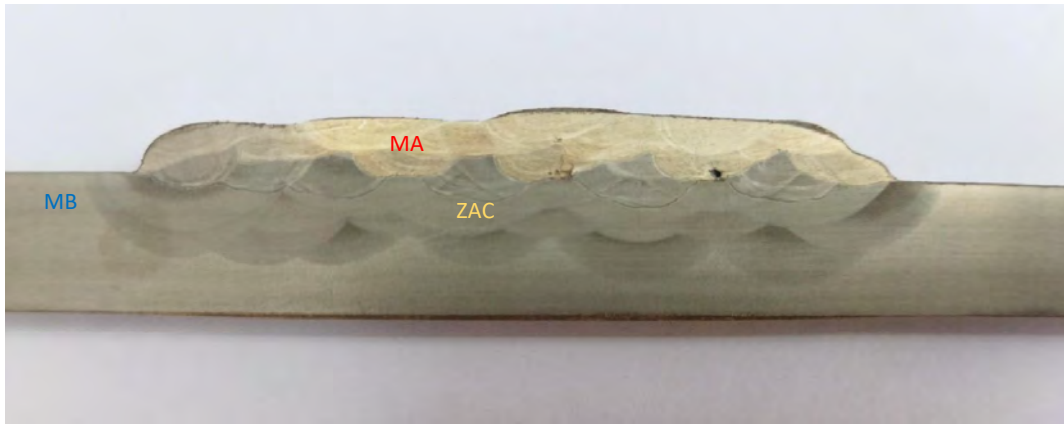


Figura 49. Macrografía de cupón de soldadura sometido a PWHT.

Se puede evidenciar la diferencia de tamaño de la ZAC entre la muestra sometida a PWHT y la que no fue tratada térmicamente. El tamaño de la ZAC se reduce luego del PWHT. Además, la zona afectada por el calor se distribuye de manera uniforme sobre el espesor del material base, debido al efecto del revenido durante el PWHT.

f) Ensayos de dureza

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 14. Los valores indican el promedio de dureza obtenido al realizar 4 indentaciones en el metal base, 8 indentaciones en la ZAC y 6 indentaciones sobre el metal de aporte. Además, se indica la condición de muestra, con y sin PWHT.

Tabla 14. Valores promedio de dureza HV10 en los cupones de soldadura.

Condición de muestra	Dureza Vickers [HV10]		
	Material Base	Metal de aporte	ZAC
Sin PWHT	195	300	222
Con PWHT	195	269	209

Se puede evidenciar la disminución de dureza al aplicar el tratamiento térmico post soldadura en el material de aporte y la ZAC, a excepción del material base, el cual no ha sufrido variación alguna. También se puede evidenciar que el metal de aporte presenta los mayores valores de dureza.

La Figura 50 muestra el barrido de dureza realizado, indicando la ubicación y el número de indentaciones realizadas sobre la probeta sin PWHT. Para la probeta con PWHT el barrido se realizó de forma similar.

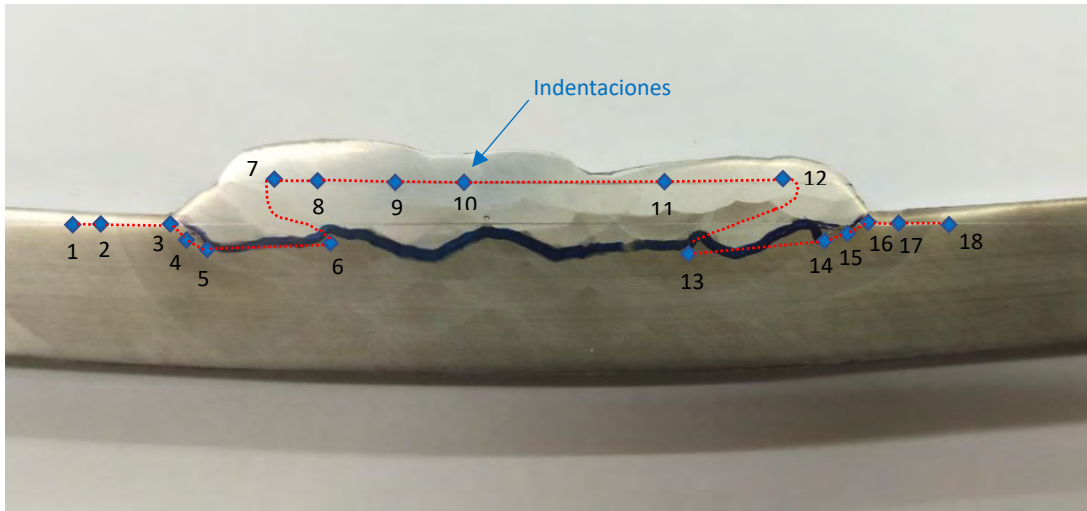


Figura 50. Barrido de dureza Vickers realizado sobre la probeta sin PWHT.

A partir de ello, se elaboró la gráfica que se muestra en la Figura 51. Sobre esta figura se aprecia la diferencia de dureza entre las zonas ZAC, MB y MA, además de la disminución de dureza al aplicar el PWHT.

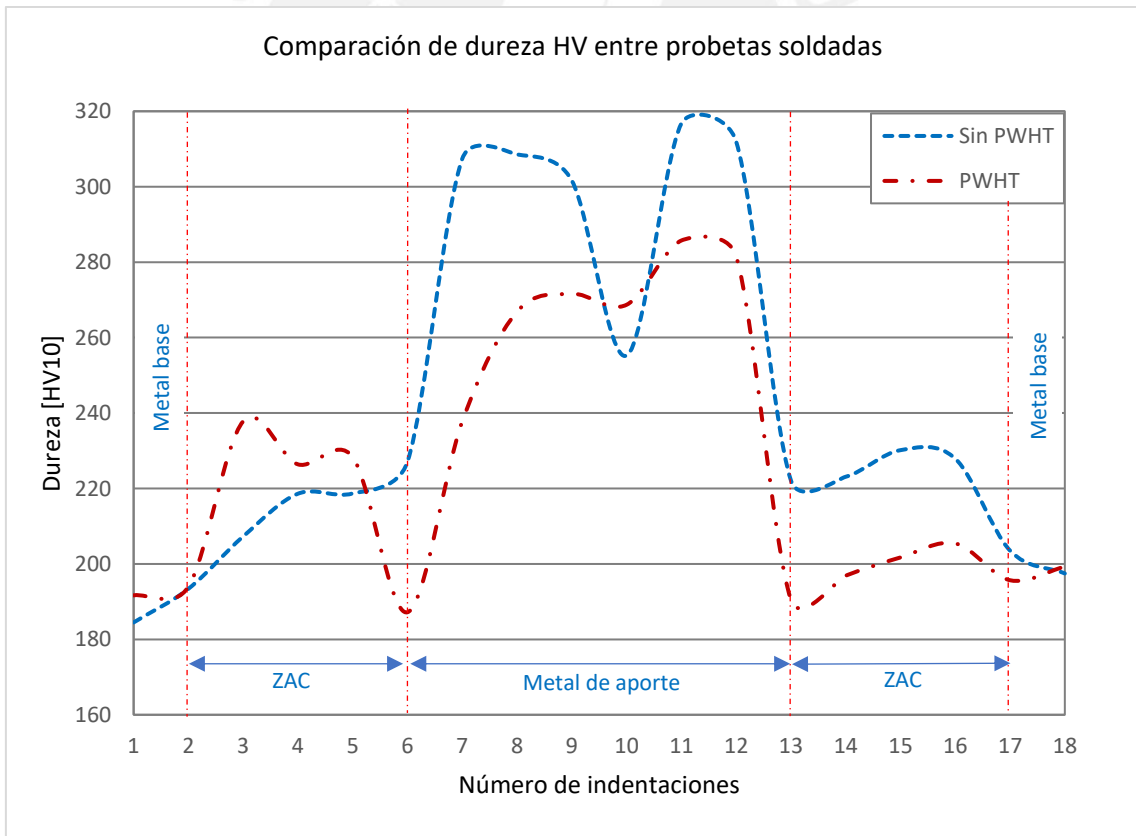


Figura 51. Gráfica comparativa de dureza en la ZAC, MB y MA entre las probetas con y sin PWHT.

La dureza máxima medida correspondió a 317 HV10 ubicada sobre el metal de aporte en la probeta sin tratamiento térmico. Así mismo, las indentaciones 3 y 16, ubicadas en el borde de la soldadura y el material base, presentaron los mayores valores de dureza de la ZAC en ambas condiciones de tratamiento térmico. Se puede observar que en las 6 y 13 hay una disminución considerable de dureza entre las condiciones de tratamiento térmico. Existe una disminución que va desde los 225 HV hasta los 190 HV, aproximadamente.

g) Análisis químico

Se realizó la comparación del análisis químico obtenido en el depósito de soldadura y la composición típica del metal de soldadura que indica el fabricante de la varilla de aporte ER90S-B3. La Tabla 15 muestra esta comparación.

Tabla 15. Comparación de la composición química entre el depósito de soldadura y la información proporcionada por el fabricante del metal de aporte.

Elemento	Porcentaje (%) obtenido en Análisis Químico	Composición (%) del metal de soldadura según el fabricante
C	0.0930	0.0800
Mn	0.5600	0.6000
P	0.0049	0.0090
S	0.0054	0.0090
Si	0.5176	0.5000
Cr	2.2690	2.4000
Ni	0.0280	-
Mo	0.7970	0.9000
Cu	0.0480	-
V	0.0020	-

No se encontraron diferencias considerables en la composición química a nivel elemental entre el revestimiento sobre la placa de acero AISI/SAE 1045 y la información que brinda el fabricante del metal de aporte.

En base a los resultados obtenidos en los ensayos para la calificación del procedimiento, se aprobó el procedimiento preliminar y se procedió a ejecutar el procedimiento de recuperación por soldadura.

3.1.3 Procedimiento de soldadura en cigüeñal

El procedimiento de recuperación por soldadura se realizó en el Laboratorio de Manufactura de la PUCP y se ejecutó sobre dos cigüeñales de motor Honda GX100.

3.1.3.1 Preparación de la superficie

La superficie de la zona a recuperar en los cigüeñales fue preparada mediante amolado con disco abrasivo (Figura 52).



Figura 52. Superficie de cigüeñales preparada previo a ejecución de soldadura.

3.1.3.2 Pre calentamiento

El pre calentamiento del componente se realizó mediante un equipo de oxiacetileno (Figura 53). El control de la temperatura de pre calentamiento se efectuó mediante un pirómetro de marca Fluke, modelo 62 Mini.



Figura 53. Pre calentamiento de cigüeñal mediante equipo oxiacetilénico.

Se controló que el calentamiento se realice de manera uniforme sobre todo el cigüeñal, hasta obtener una temperatura mínima de 220 °C.

3.1.3.3 Control de parámetros de soldadura

La soldadura de revestimiento sobre el cigüeñal se aplicó mediante una soldadora para proceso GTAW, marca Miller, modelo Dynasty 200 DX.

Se verificaron los valores de corriente y voltaje mediante un multímetro digital Fluke 337 (Figura 54), los cuales debían estar en el rango de 125-175 Amperios y 15-20 Voltios, respectivamente.



Figura 54. Medición de voltaje y amperaje en el equipo de soldadura.

Además, se verificó que el caudal de gas argón en el flujómetro del equipo de soldadura indique 12 l/min (Figura 55).



Figura 55. Verificación del caudal de gas argón.

3.1.3.4 Control de temperatura entre pasadas

El control de temperatura entre pasadas se realizó de la misma forma que el control del precalentamiento (Figura 56). Se verificó que la temperatura no supere los 300 °C.



Figura 56. Medición de temperatura entre pasadas mediante pirómetro.

3.1.4 Evaluación del procedimiento de recuperación

A continuación, se describen los ensayos realizados para evaluar el procedimiento de recuperación por soldadura en el cigüeñal.

3.1.4.1 Inspección visual

Se realizó una inspección visual sobre la superficie de revestimiento en los cigüeñales soldados (Figura 57).



Figura 57. Cigüeñales con soldadura de revestimiento.

No se encontraron defectos superficiales y se comprobó que el espesor del revestimiento cumpla con lo especificado en el procedimiento (mínimo 5 mm de espesor).

3.1.4.2 Inspección mediante partículas magnéticas

Se inspeccionó la superficie de relleno mediante partículas magnéticas fluorescentes (Figura 58), siguiendo el mismo procedimiento realizado en el análisis de falla y en la calificación del procedimiento.

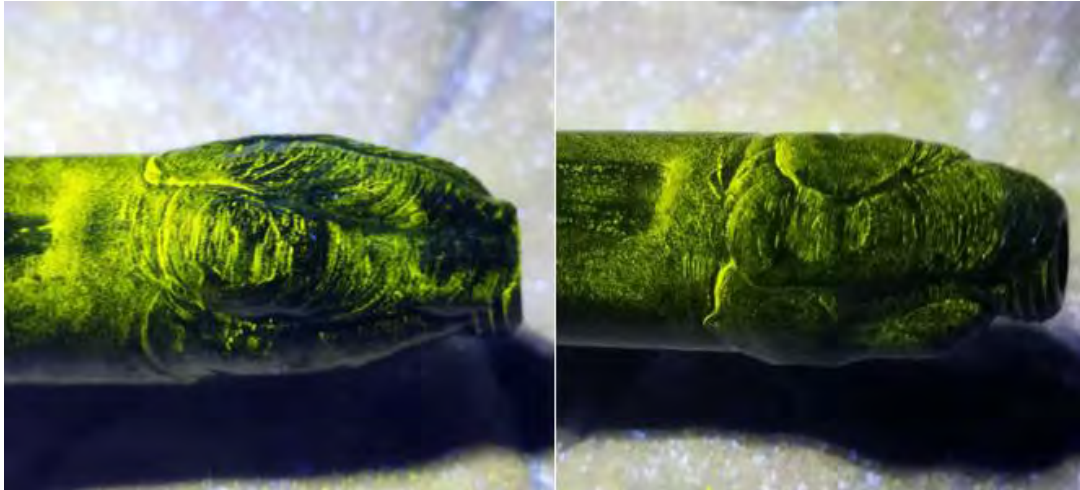


Figura 58. Aplicación de partículas magnéticas sobre cigüeñales soldados.

No se encontraron indicaciones relevantes sobre las superficies de soldadura.

3.1.4.3 Tratamientos térmicos post soldadura

Según lo especificado por el procedimiento de soldadura, el componente soldado debía someterse a un PWHT a 690 °C durante una hora; sin embargo, para poder estudiar el efecto del tratamiento térmico sobre el material depositado, se realizaron cortes transversales en las zonas recuperadas y así poder obtener 4 muestras para 4 tratamientos térmicos diferentes.

Las muestras seccionadas e identificadas como P1, P2, P3 y P4, se muestran en la Figura 59. Los tratamientos térmicos definidos para cada muestra se describen a continuación:

- **P1:** PWHT a 690 °C durante 1 hora.
- **P2:** PWHT a 500 °C durante 1 hora.
- **P3:** PWHT a 400 °C durante 1 hora.
- **P4:** PWHT a 300 °C durante 1 hora.

Todos los tratamientos térmicos se realizaron a partir de la temperatura ambiente, a una velocidad de calentamiento de 30 °C/min y enfriamiento en horno.



Figura 59. Muestras seccionadas para aplicación de PWHT.

Los tratamientos térmicos se realizaron en un horno de resistencias eléctricas, marca Carbolite, modelo CWF 1300 (Figura 60). Se programaron las distintas temperaturas y tiempos de mantenimiento, así como la rampa de calentamiento en un controlador EUROTHERM.



Figura 60. Horno utilizado para realizar los tratamientos térmicos.

3.1.4.4 Macrografías

A partir de las muestras sometidas a los diferentes tratamientos térmicos, se realizaron las macrografías de las superficies obtenidas mediante los cortes transversales. Las muestras fueron encapsuladas y las superficies sometidas a pulido y ataque químico con Nital al 5%.

- **Muestra P1:** La macrografía correspondiente a la muestra P1 se indica en la Figura 61.

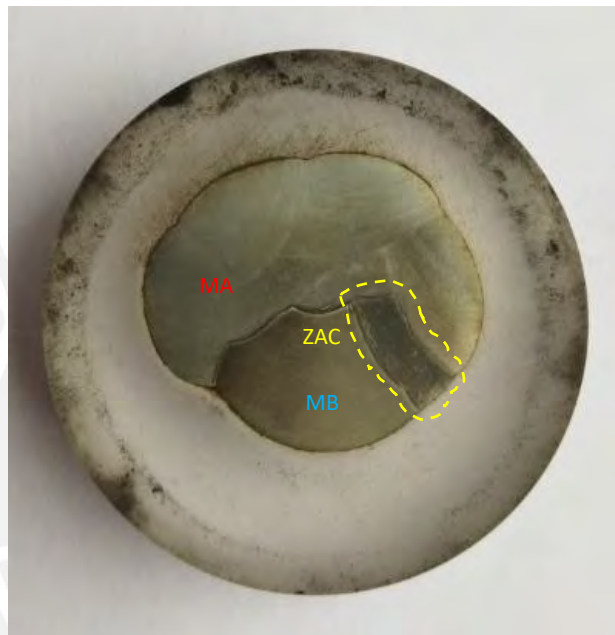


Figura 61. Macrografía de la muestra P1.

En la muestra P1 no se observaron defectos, ni discontinuidades en la superficie. Se pudo evidenciar una zona oscura ubicada en la ZAC, encerrada por la línea amarilla discontinua, con posibilidad de presencia de martensita.

- **Muestra P2:** La macrografía correspondiente a la muestra P2 se indica en la Figura 62.

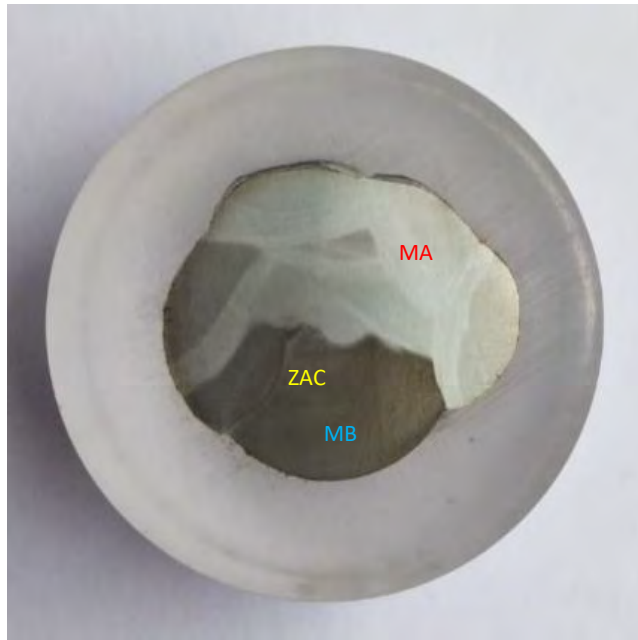


Figura 62. Macrografía de la muestra P2.

En la muestra P2 no se observaron defectos, ni discontinuidades en la superficie. La superficie analizada corresponde al mismo corte con el que se obtuvo P1, pero a diferencia de esta última, no se observa la zona oscura en la ZAC.

- **Muestra P3:** La macrografía correspondiente a la muestra P3 se indica en la Figura 63.

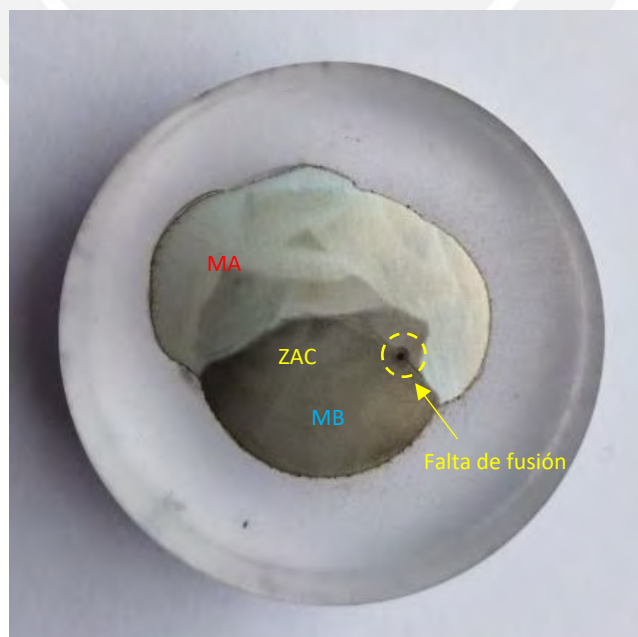


Figura 63. Macrografía de la muestra P3.

En la muestra P3 se pudo evidenciar una zona de falta de fusión en la interfaz del material de aporte y el metal base. No se observan zonas marcadas en la ZAC.

- **Muestra P4:** La macrografía correspondiente a la muestra P4 se indica en la Figura 64.

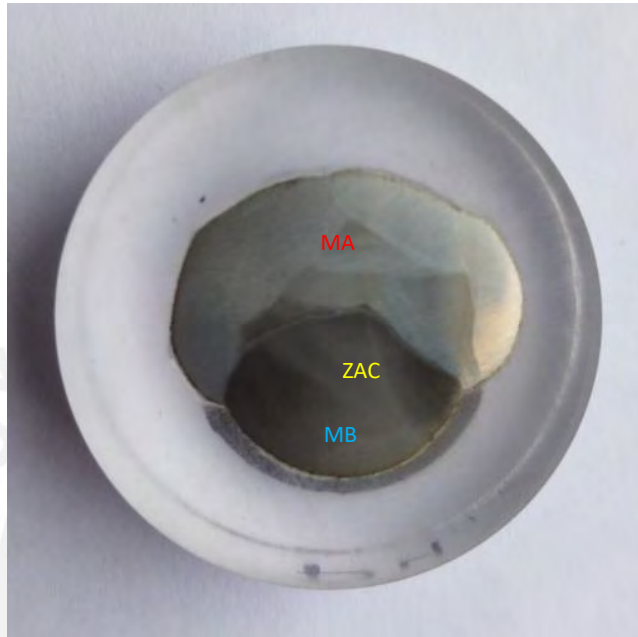


Figura 64. Macrografía de la muestra P4.

No se observan defectos sobre la superficie de la muestra P4. Se observan zonas de ZAC más grandes que en la muestra P3.

3.1.4.5 Ensayos de dureza

Se realizaron barridos de dureza sobre las superficies de las muestras. Se hicieron 16 indentaciones en cada muestra, 4 en el metal base, 6 en la ZAC y 6 en el metal de aporte.

La Figura 65 muestra el barrido de dureza realizado sobre la superficie de la muestra P1. Para esta muestra se indica la ubicación y el número de indentaciones. Esta secuencia de indentación se replicó en las muestras P2, P3 y P4.

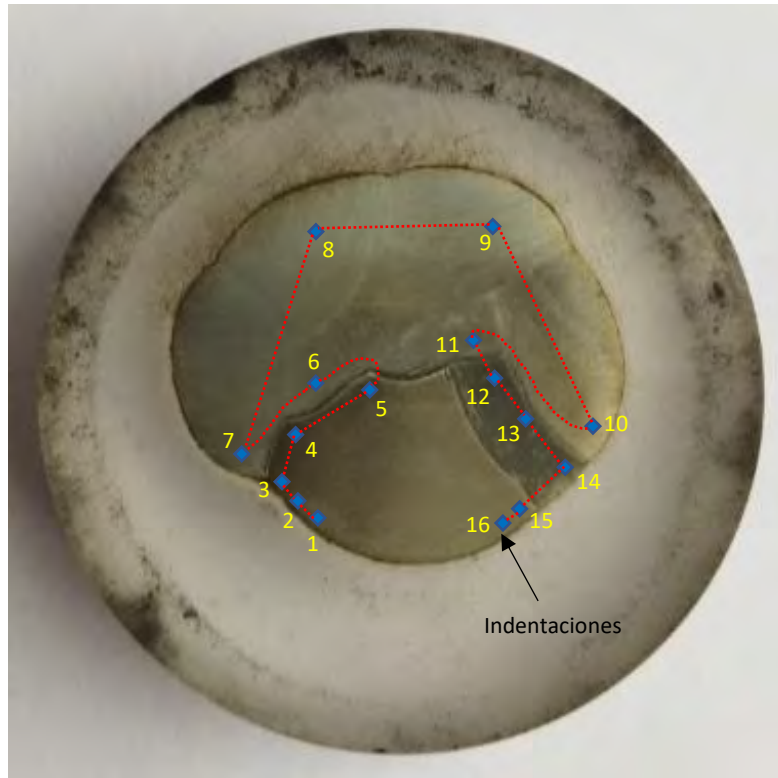


Figura 65. Ubicación de indentaciones sobre muestra P1.

Se elaboró la gráfica mostrada en la Figura 66, donde se comparan las durezas entre la muestra P1 y P2, en el MB, ZAC y MA. De igual forma, en la Figura 67, se muestra la comparativa de durezas entre las muestras P3 y P4.

La Tabla 16 indica los valores promedio de dureza en las muestras en las zonas de análisis.

Tabla 16. Valores promedio de dureza en las muestras P1, P2, P3 y P4.

Muestra	Dureza Vickers [HV10]		
	Material Base	Metal de aporte	ZAC
P1 $T_{PWHT} = 690^{\circ}\text{C}$	165	237	236
P2 $T_{PWHT} = 500^{\circ}\text{C}$	242	327	256
P3 $T_{PWHT} = 400^{\circ}\text{C}$	236	347	277
P4 $T_{PWHT} = 300^{\circ}\text{C}$	243	339	244

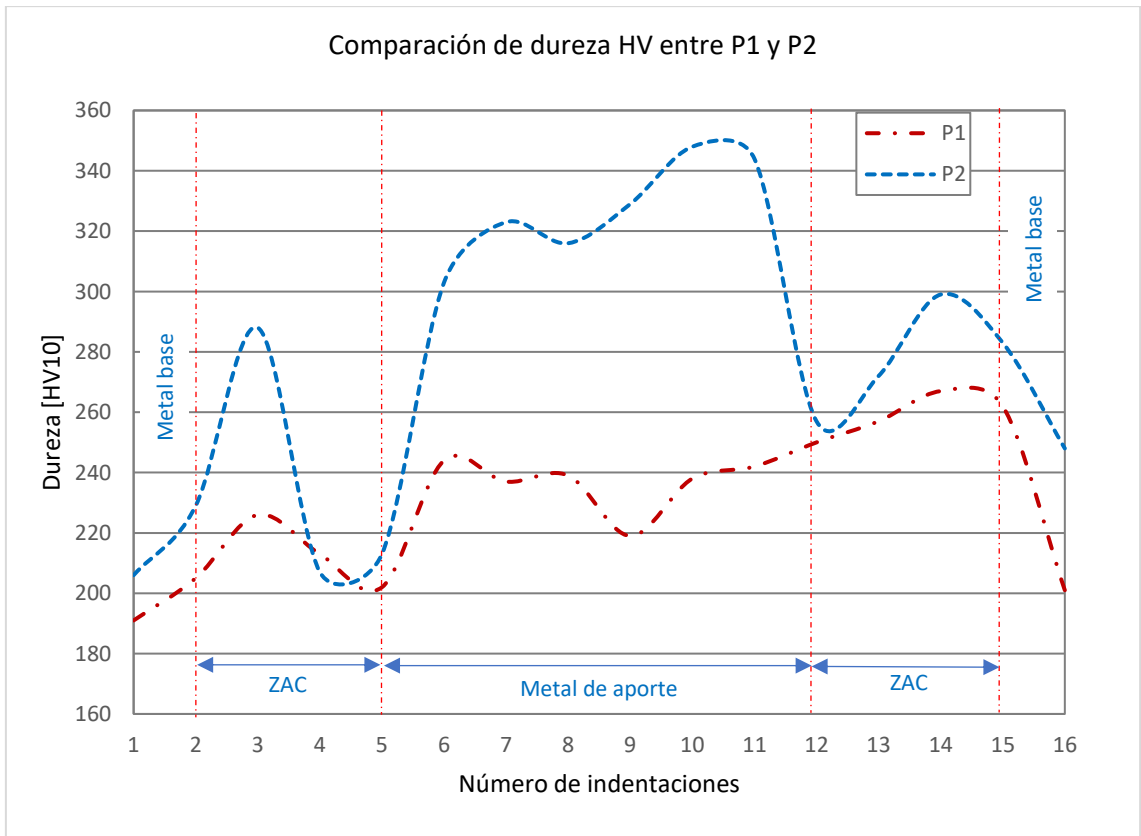


Figura 66. Gráfica comparativa de dureza en la ZAC, MB y MA entre las muestras P1 y P2.

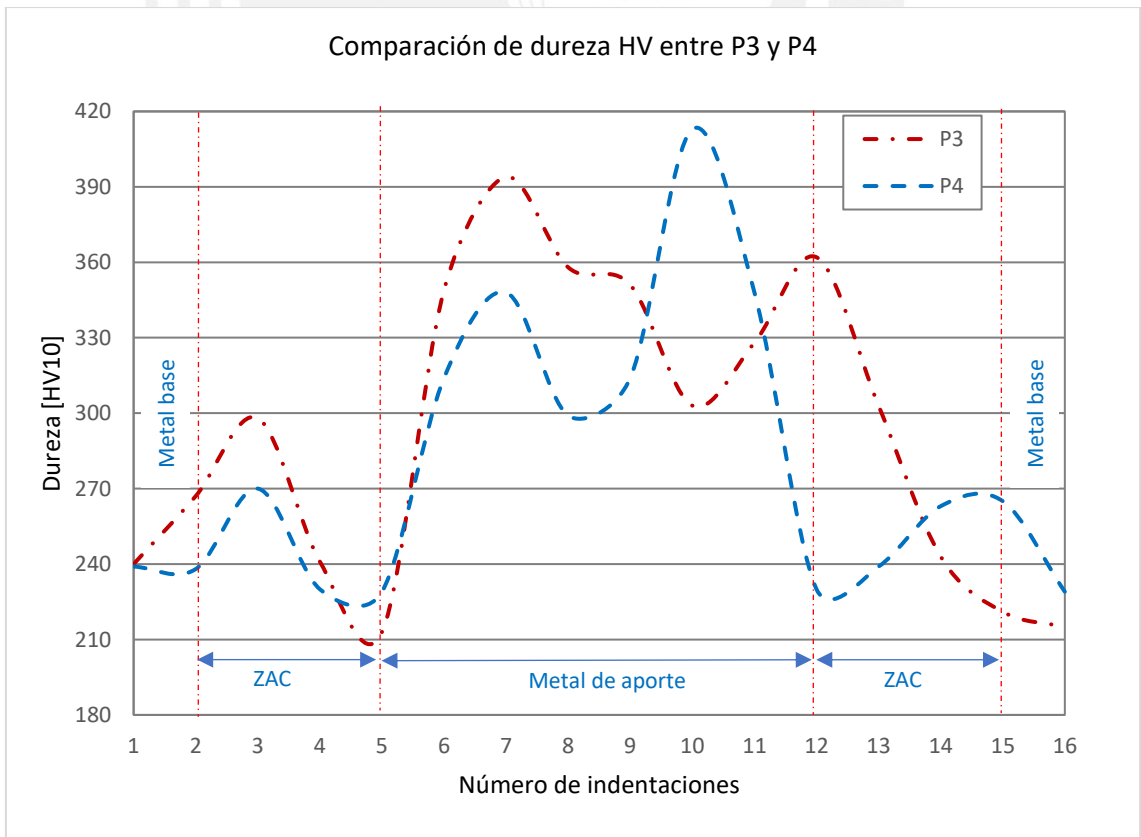


Figura 67. Gráfica comparativa de dureza en la ZAC, MB y MA entre las muestras P3 y P4.

Los resultados de los barridos de dureza en las muestras indican lo siguiente:

- a) La dureza más alta se obtuvo en P4: PWHT a 300 °C, en la zona del material de aporte. El valor máximo obtenido fue de 413 HV10 (Figura 67).
- b) La temperatura del tratamiento térmico post soldadura influye de manera directa sobre la dureza del recubrimiento. El perfil de dureza a una mayor temperatura de PWHT posee valores más bajos y se comporta de manera uniforme.
- c) En promedio, la dureza de la ZAC no varía en grandes proporciones según el tratamiento térmico (236 HV en P1 y 277 HV en P3); sin embargo, la dureza del recubrimiento varía desde 237 HV en P1 a 339 HV en P4.
- d) En todos los PWHT se observó que el perfil de dureza en el MA posee valores más altos que en la ZAC y el MB, a excepción de P1, donde el valor máximo de dureza es de 267 HV y se ubicó en la ZAC de la muestra (Figura 66).

3.1.4.6 Metalografías

Luego del barrido de dureza, se realizó la preparación superficial para el análisis metalográfico. El procedimiento se llevó a cabo de la misma forma que en estudio de análisis de falla. Se analizaron las muestras P1, P2, P3 y P4, en el metal base, metal de aporte y ZAC.

3.1.4.6.1 Análisis metalográfico en el metal base

En las cuatro muestras analizadas se observó una microestructura constituida por granos de perlita en una matriz ferrítica.

En la muestra P1 se observó granos de perlita contenidos en una red fina de ferrita. Los granos de perlita presentaron un tamaño mayor y con menor concentración de cementita con respecto a las demás muestras. Se encontraron zonas con agrupación de granos de perlita.

En la muestra P2 se observó una distribución uniforme de los granos de perlita, con un tamaño menor a la muestra P1, pero con una mayor

concentración de láminas de cementita. La red de ferrita se separó en granos con forma irregular.

En la muestra P3 se evidenció el aumento considerable en la concentración de granos de perlita. Los granos de ferrita mantuvieron su forma irregular, pero en menor proporción que las muestras P1 y P2.

La muestra 4 evidenció el agrupamiento de granos de perlita, formando zonas oscuras y con mayor concentración de láminas de cementita.

La Figura 68 muestra la metalografía de P1 en el metal base a 500X.

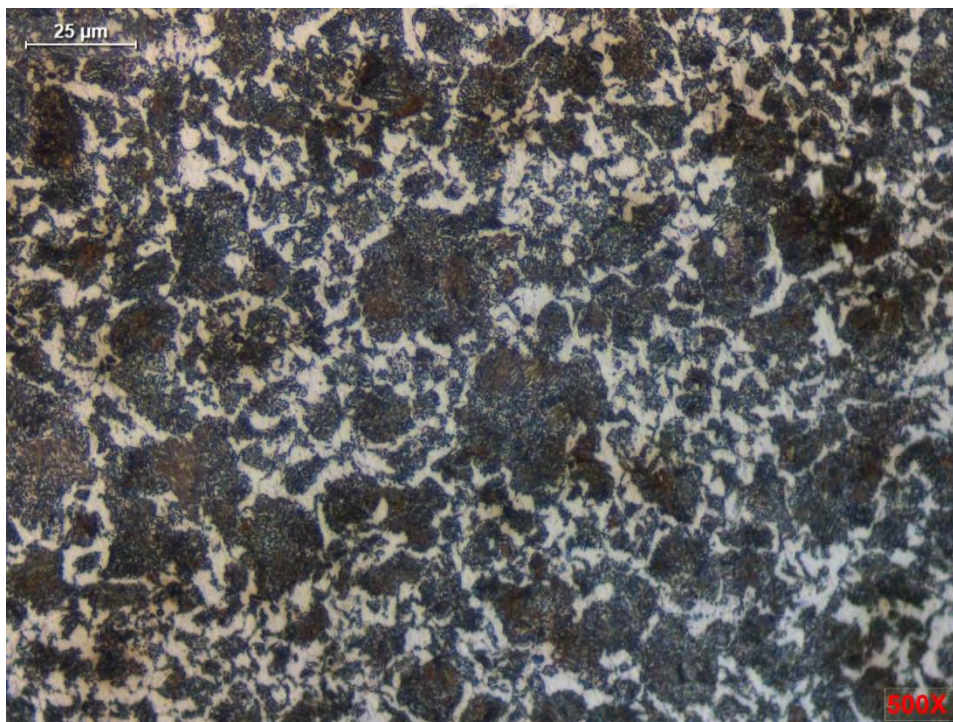


Figura 68. Metalografía del MB de P1. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X.

La Figura 69 muestra la metalografía de P2 en el metal base a 500X.

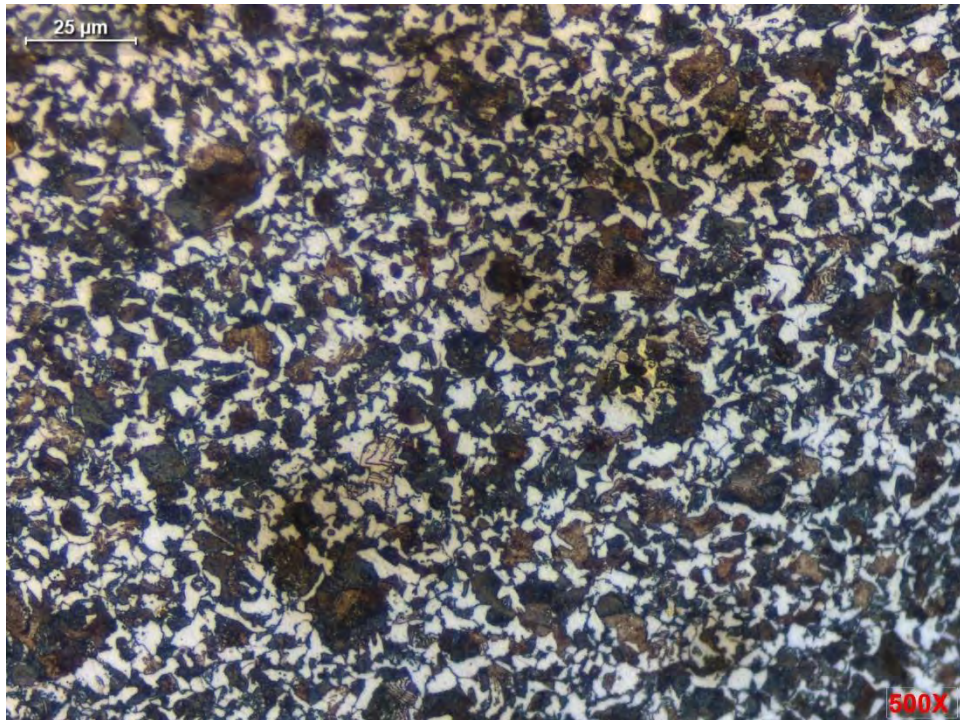


Figura 69. Metalografía del MB de P2. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X.
La Figura 70 muestra la metalografía de P3 en el metal base a 500X.

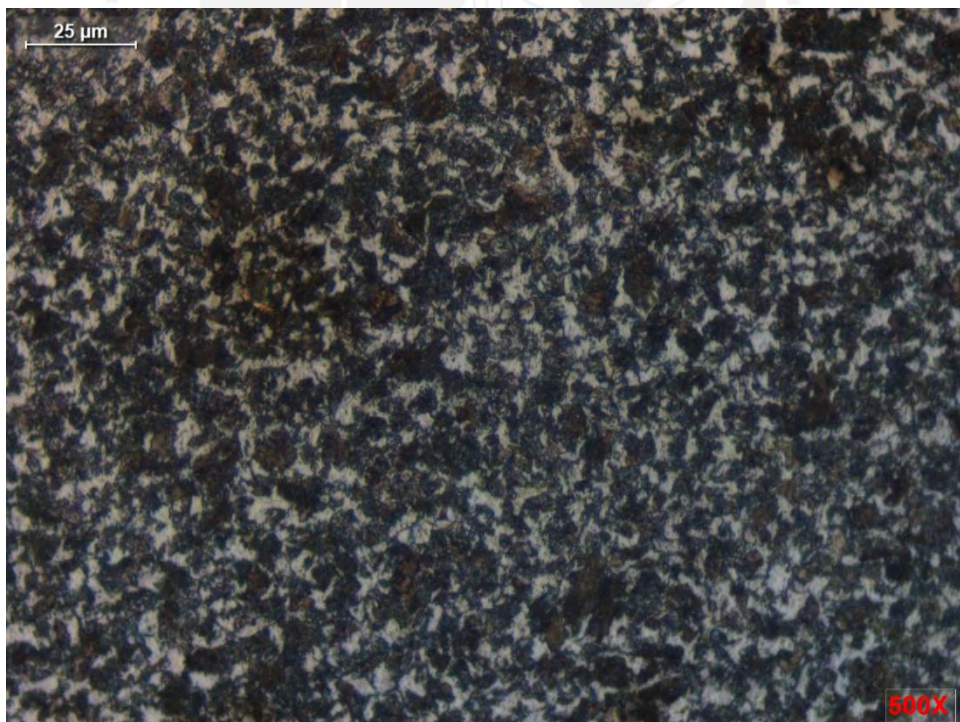


Figura 70. Metalografía del MB de P3. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X
La Figura 71 muestra la metalografía de P4 en el metal base a 500X.

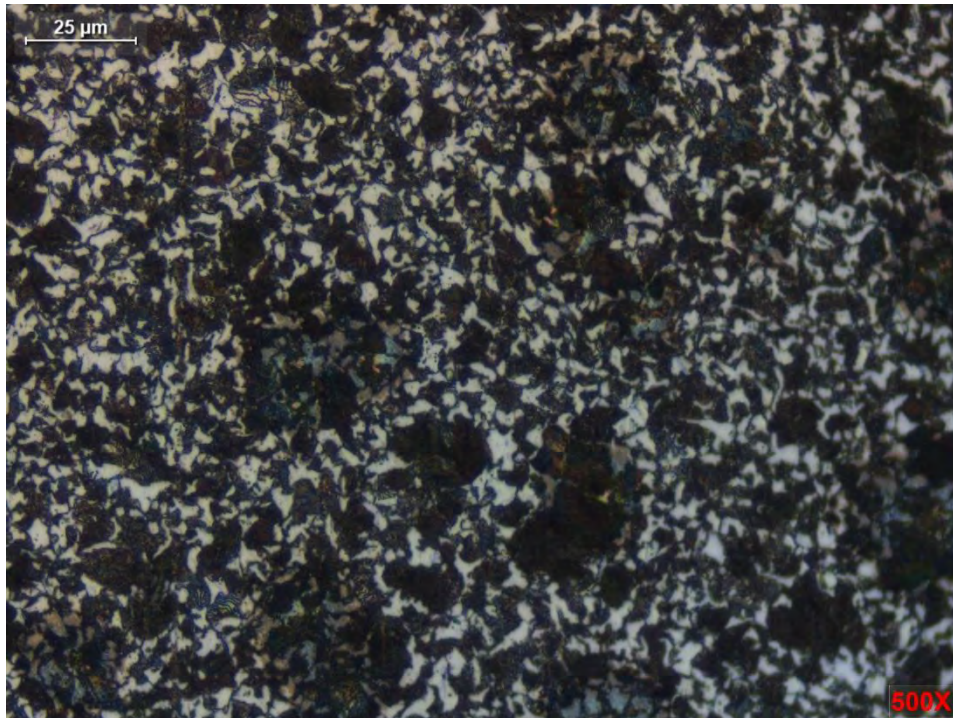


Figura 71. Metalografía del MB de P4. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X.

3.1.4.6.2 Análisis metalográfico en la zona afectada por el calor

La zona afectada por el calor se caracterizó por la presencia de martensita rodeada una fina red de ferrita. Se observó una disminución del tamaño de los granos en donde se formó la martensita, obteniendo una red más grande en P1, en comparación con las demás muestras. Además, se pudo observar la presencia de carburos precipitados en P4 y en una mayor concentración en P3. El contraste de las muestras indicó una mayor presencia de martensita en P4, disminuyendo hasta la muestra P1. A un mayor aumento, en P1, se observó el efecto del revenido sobre la martensita, con la presencia de martensita acicular distribuida de manera uniforme. Además, se pudo observar una similitud en las metalografías de P1 y P4, con diferencias en la forma y grosor de la red de ferrita, contraste y en la uniformidad de los granos.

La Figura 72 muestra la metalografía de P1 en la zona afectada por el calor a 200X.

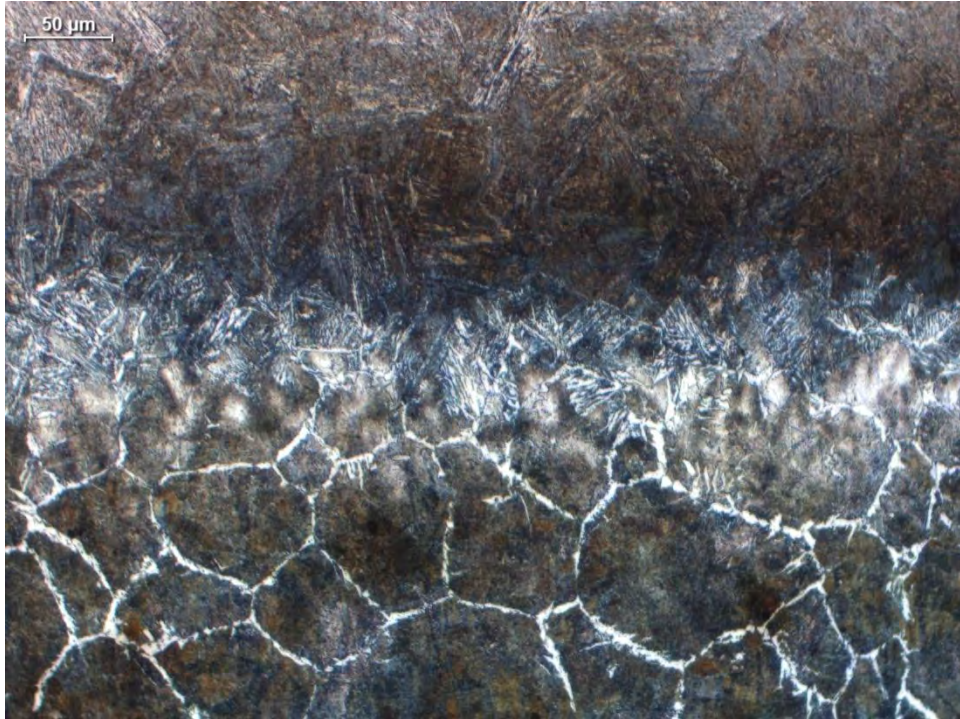


Figura 72. Metalografía de la ZAC de P1. Muestra con ataque: Nital 5%. 200X.

La Figura 73 muestra la metalografía de P2 en la zona afectada por el calor a 200X.

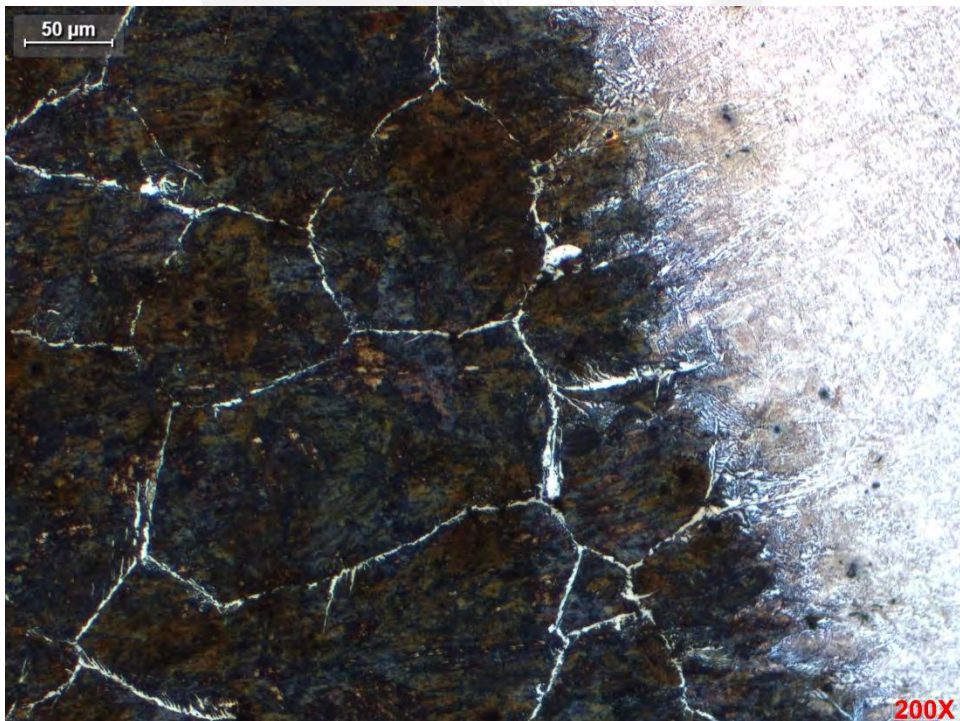


Figura 73. Metalografía de la ZAC de P2. Muestra con ataque: Nital 5%. 200X.

La Figura 74 muestra la metalografía de P3 en la zona afectada por el calor a 200X.

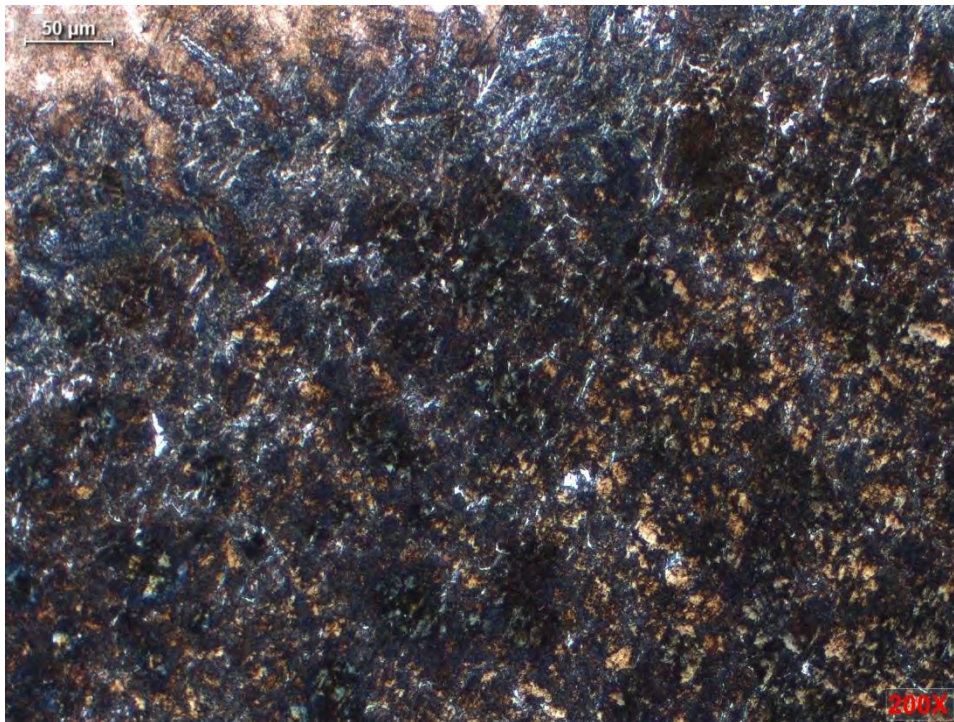


Figura 74. Metalografía de la ZAC de P3. Muestra con ataque: Nital 5%. 200X.

La Figura 75 muestra la metalografía de P4 en la zona afectada por el calor a 200X.

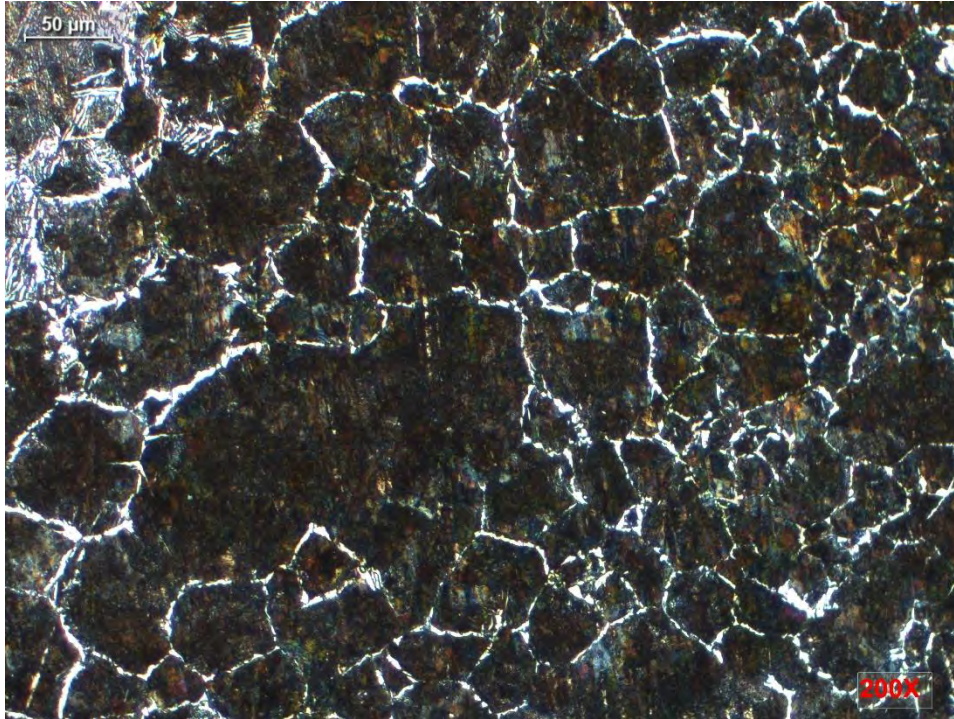


Figura 75. Metalografía de la ZAC de P4. Muestra con ataque: Nital 5%. 200X.

3.1.4.6.3 Análisis metalográfico en el metal de aporte

En las metalografías correspondientes al metal de aporte se observó una matriz homogénea compuesta principalmente de cromo y molibdeno. El contraste de cada muestra varió desde P1 hasta P4, mostrándose un metal más claro en P1 y más oscuro en P4. Se evidenció una estructura dendrítica en las muestras, con dendritas más grandes en P1 y reduciéndose hasta P4 en una forma más compacta y agrupada. En P4 se pudo observar la presencia de dendritas más pequeñas y agrupadas.

La Figura 76 muestra la metalografía de P1 en el metal de aporte a 500X.



Figura 76. Metalografía del MA de P1. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X.

La Figura 77 muestra la metalografía de P2 en el metal de aporte a 500X.

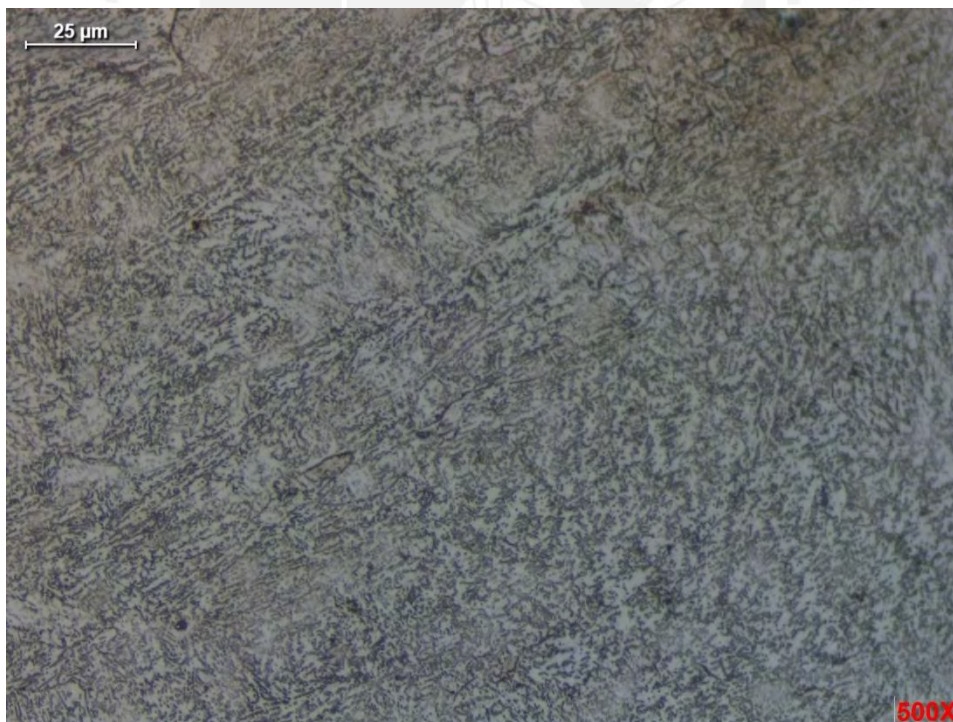


Figura 77. Metalografía del MA de P2. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X.

La Figura 78 muestra la metalografía de P3 en el metal de aporte a 500X.

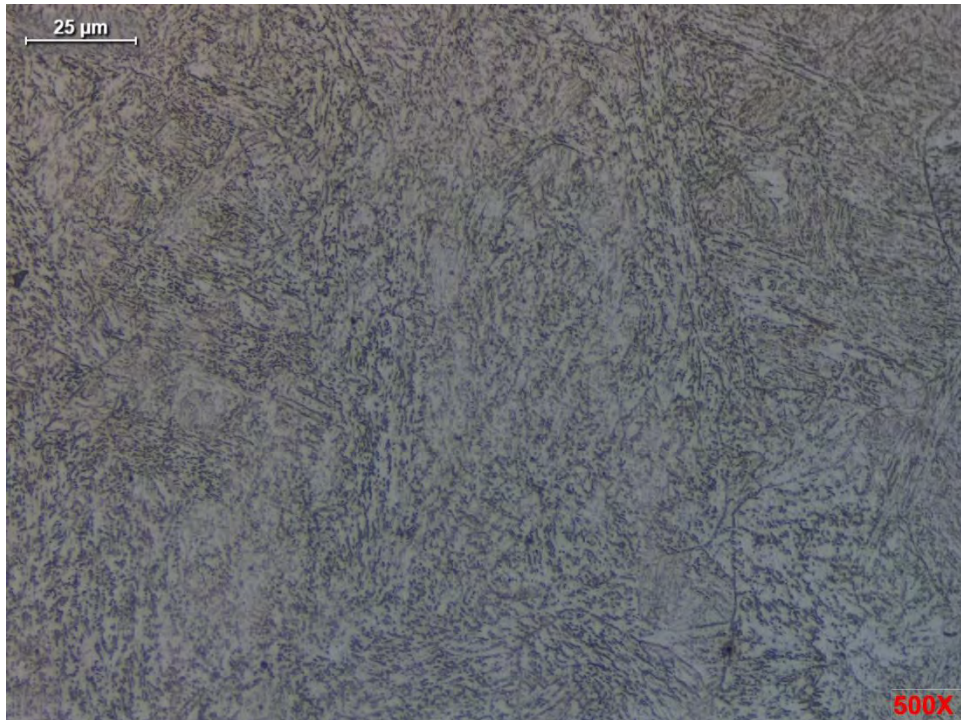


Figura 78. Metalografía del MA de P3. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X

La Figura 79 muestra la metalografía de P4 en el metal de aporte a 500X.

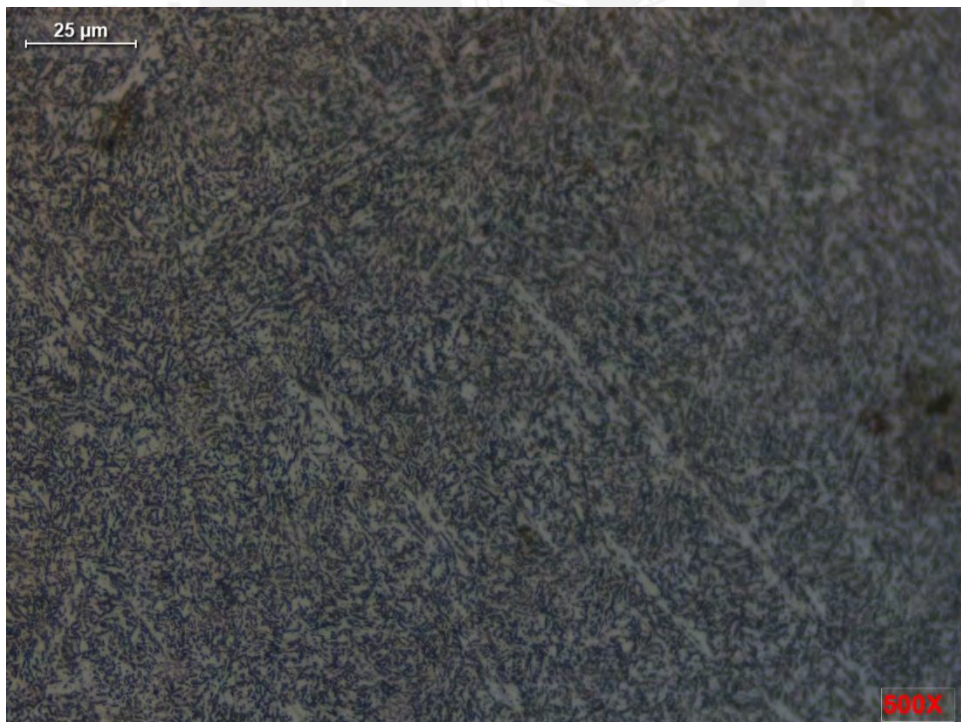


Figura 79. Metalografía del MA de P4. Muestra con ataque: Nital 5%. 500X

CONCLUSIONES:

- El análisis de la superficie de fractura determinó que el fallo en el componente se produjo debido a la presencia de un concentrador de tensiones geométrico (canal chavetero) y, a su vez, esfuerzos dinámicos que causaron fatiga torsional (marcas de playa presentes en la superficie). Las condiciones de operación del cigüeñal causaron una fractura frágil transgranular (clivaje).
- Mediante el análisis químico se estableció que el acero utilizado para la fabricación del cigüeñal corresponde a un acero de medio contenido de carbono AISI/SAE 1045.
- La caracterización mecánica determinó que el acero utilizado en la fabricación del cigüeñal fue sometido a un tratamiento térmico superficial, debido al aumento de dureza en la superficie, obteniéndose características de resistencia mecánica similares a las de un acero AISI/SAE 1045 en condiciones de temple y revenido.
- Se determinó un proceso de soldadura GTAW con material de aporte ER90S-B3, con condiciones de precalentamiento (220 °C) y tratamiento térmico post soldadura (690 °C durante una hora) para la recuperación de la zona afectada.
- Se evaluó el efecto del PWHT sobre la dureza de la zona recuperada mediante soldadura. Se determinó que la dureza del material de aporte se reduce significativamente, desde un valor promedio de 339 HV10, hasta 237 HV10, al aumentar la temperatura de mantenimiento en el PWHT desde 300 °C a 690 °C.
- Mediante el análisis metalográfico se pudo identificar la presencia de fases duras en las muestras soldadas. El aumento de perlita y martensita en el MB y ZAC; acompañado de estructuras dendríticas de cromo compactas en el MA, favorecen al aumento de la dureza en el acero 1045 si no se ejecuta el PWHT a la temperatura y tiempo recomendado por el fabricante del material de aporte (PWHT a 690° durante una hora).

RECOMENDACIONES:

- Para un mejor análisis de la superficie de fractura, se recomienda utilizar la técnica de microscopia electrónica de barrido para obtener imágenes de alta resolución de la superficie de fractura. Con ello se podría identificar con mayor precisión las zonas de nucleación y propagación de las grietas causantes de la fractura.
- En caso de querer evitar el fallo prematuro del elemento estudiado, se podría analizar la aplicación de un tratamiento térmico sobre el componente para aumentar la dureza superficial, principalmente en la zona de falla.
- Durante la ejecución del procedimiento de soldadura, se recomienda evitar la aplicación excesiva de calor, controlando los parámetros eléctricos y la velocidad de avance, con el fin de evitar la distorsión del elemento.
- Con el fin de estudiar de manera más completa el efecto del PWHT sobre el elemento recuperado, se sugiere variar las condiciones de la rampa de calentamiento y los tiempos de mantenimiento en el horno.
- Se recomienda que, durante el proceso de mecanizado, se realice la corrección de la zona roscada y que el canal chavetero se mecanice sobre el material de aporte (metal con mayor dureza).

REFERENCIAS:

- American Welding Society. (2005). Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. In *American Welding Society (AWS)* (5th ed.).
- American Welding Society. (2009). *AWS B2.1/B2.1M:2009 Specification for Welding Procedure and Performance Qualification* (6th ed.).
- American Welding Society. (2012). *AWS D14.6/D14.6M:2012 Specification for Welding of Rotating Elements of Equipment* (4th ed.).
- American Welding Society. (2020a). *AWS A3.0M/A3.0:2020 Standard Welding Terms and Definitions* (13th ed.).
- American Welding Society. (2020b). *AWS D1.1/D1.1M:2020 Código de soldadura estructural - acero* (24th ed.).
- ASM Handbook Committee. (1993). *ASM Handbook, Volume 6, Welding, Brazing and Soldering* (Vol. 6).
- ASM Handbook Committee. (2002). *ASM Handbook, Volume 11, Failure Analysis and Prevention* (Vol. 11).
- ASM Handbook Committee. (2004). *ASM Handbook, Volume 9, Metallography and Microstructures* (Vol. 9).
- ASTM International. (2017a). *ASTM E92-17, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials* (pp. 1–27). <https://doi.org/10.1520/E0092-17>
- ASTM International. (2017b). *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* (pp. 1–12). <https://doi.org/10.1520/E0003-11R17>
- ASTM International. (2019). *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness* (pp. 1–25). <https://doi.org/10.1520/E0140-12R19E01>
- ASTM International. (2021a). *ASTM E415-21, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry* (pp. 1–12). <https://doi.org/10.1520/E0415-21>
- ASTM International. (2021b). *ASTM E709-15, Standard Guide for Magnetic Particle Testing* (pp. 1–48). <https://doi.org/10.1520/E0709-21>
- ASTM International. (2022a). *ASTM E18-22, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials* (pp. 1–39). <https://doi.org/10.1520/E0018-22>
- ASTM International. (2022b). *Standard Terminology Relating to Metallography* (pp. 1–35). <https://doi.org/10.1520/E0007-22>
- ASTM International. (2023a). *Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry* (pp. 1–19). https://doi.org/10.1520/E0165_E0165M-23
- ASTM International. (2023b). *Standard Practice for Macroetching Metals and*

- Alloys* (pp. 1–11).
- ASTM International. (2023c). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys* (pp. 1–22). <https://doi.org/10.1520/E0407-23>
- Ceac. (2003). *Manual CEAC del automóvil* (1st ed., Vol. 1). Grupo Editorial Ceac.
- Chivu, O., Rontescu, C., Cicic, D., & Balan, G. (2016). The effects of reconditioning by welding of crankshafts in automotive industry. In *55 METALURGIJA* (Vol. 55).
- Duffuaa, S., Raouf, A., & Campbell, J. (2000). *Sistemas de mantenimiento. Planeación y control* (1st ed., Vol. 1). LIMUSA, S.A. de C.V.
- Elsevier Butterworth-Heinemann. (2004). *Smithells Metals Reference Book* (W. Gale & T. Totemeier (Eds.); 8th ed.). Elsevier.
- Fonte, M., Duarte, P., Reis, L., Freitas, M., & Infante, V. (2015). Failure mode analysis of two crankshafts of a single cylinder diesel engine. *Engineering Failure Analysis*, *56*, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.02.014>
- Fosca, C. (2007). *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura* (7th ed.). PUCP.
- HONDA. (2016, November 29). *GX100 RAMMER*. <https://www.honda-engines-eu.com/es/productos/motores/gx100-rammer>
- Jaramillo, H., Alba de Sánchez, N., Canizales, J., & Toro, Á. (2008). *Introducción a la mecánica de la fractura y análisis de fallas* (1st ed., Vol. 1). Universidad Autónoma del Occidente.
- Kareem, B. (2015). Evaluation of failures in mechanical crankshafts of automobile based on expert opinion. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, *3*, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2014.11.001>
- Myagkov, L. L., Mahkamov, K., Chainov, N. D., & Makhkamova, I. (2014). Advanced and conventional internal combustion engine materials. In *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance: Towards Zero Carbon Transportation*. <https://doi.org/10.1533/9780857097422.2.370>
- Otegui, J. L. (2013). *Análisis de Fallas: fundamentos y aplicaciones en componentes mecánicos*. (1st ed.). EUEDEM.
- Payri, F., & Desantes, J. M. (2015). *Motores de combustión interna alternativos* (5th ed., Vol. 1). REVERTÉ, S. A.
- Rajput, R. (2005). *Internal Combustion Engines* (1st ed., Vol. 1). Laxmi Publications.
- Rovira, A., & Muñoz, M. (2015). *Motores de Combustión Interna* (1st ed., Vol. 1). UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA.
- Sergeev, V. V., Spiridonov, Y. L., & Farakhshin, I. I. (2004). Reconditioning crankshafts of domestic and foreign diesel engines by electric arc metallising. *Welding International*, *18*(7), 578–580. <https://doi.org/10.1533/wint.2004.3331>

- Wang, C., Zhao, C., & Wang, D. (2005). Analysis of an unusual crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis*, 12(3), 465–473. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.01.006>
- Witek, L., Sikora, M., Stachowicz, F., & Trzepiecinski, T. (2017). Stress and failure analysis of the crankshaft of diesel engine. *Engineering Failure Analysis*, 82, 703–712. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.001>
- Zhang, Y. F., Li, M. R., & Wang, J. C. (2014). Study on surfacing technics of 18CrNiWA engine crankshaft surfacing welding with flux-cored wire. *Advanced Materials Research*, 926–930, 246–249. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.926-930.246>

