

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE FALLA DE OREJAS FRACTURADAS PERTENECIENTES A STICK
DE UNA EXCAVADORA HIDRÁULICA**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

Mariano Alejandro Pacheco Rivas

ASESOR:

Mag. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

Lima, Abril, 2024

Informe de Similitud

Yo, **RAÚL CARLOS HURTADO ESPEJO**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada: **ANÁLISIS DE FALLA DE OREJAS FRACTURADAS PERTENECIENTES A STICK DE UNA EXCAVADORA HIDRÁULICA**, del autor **MARIANO ALEJANDRO PACHECO RIVAS**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **12%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **09/04/2024**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, 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 09 de Abril de 2024.

Apellidos y nombres del asesor: HURTADO ESPEJO, RAÚL CARLOS	
DNI: 10610827	Firma 
ORCID: 0000-0002-8511-1767	

RESUMEN

La presente tesis se concentra en utilizar la metodología de un análisis de falla, para determinar la causa más probable que originó la rotura de las dos orejas pertenecientes al *stick* del brazo de una excavadora hidráulica, utilizada para cargar y depositar material en camiones de acarreo de una mina de oro. El análisis de falla de las orejas fue realizado en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de la PUCP.

El presente trabajo presenta en el primer capítulo la descripción de las partes principales y los fundamentos del funcionamiento de una excavadora hidráulica, así como también la definición de un análisis de falla y los ensayos comúnmente realizados para efectuarlos. El segundo capítulo presenta la metodología y el procedimiento de los ensayos efectuados durante la realización del presente análisis de falla, como son la inspección visual, análisis fractográfico, inspección por partículas magnéticas, inspección por radiografía industrial, análisis macrográfico, análisis químico, ensayo de tracción, análisis metalográfico, ensayo de dureza y ensayo de impacto. El tercer capítulo presenta información sobre el componente fallado, la cual fue suministrada por el solicitante del análisis de falla y también muestra los resultados de los ensayos realizados a las orejas fracturadas; utilizándose la evidencia recolectada para determinar la causa de la falla.

Como conclusión, los resultados de los ensayos apuntan a que la causa de falla de las orejas se debe a un mecanismo de fatiga mecánica, iniciado en discontinuidades introducidas durante un procedimiento de reparación por soldadura efectuado al componente durante la realización de su mantenimiento. Adicionalmente, se plantean recomendaciones para evitar fallas similares en componentes semejantes sometidos a procesos de reparación por soldadura.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres Luis y Ana María, quienes me enseñaron a hacer las cosas bien desde que era pequeño y que las cosas que valen siempre requieren de esfuerzo y sacrificio. A mis hermanas Romina y Paola, quienes me enseñaron lo que es el amor incondicional y que, a pesar del tiempo y la distancia, siempre nos querremos por ser hermanitos. A todos los miembros, directos o indirectos, de las familias Pacheco, Ríos, Rivas y Huaricancha, por su amor, muestras de afecto y palabras de apoyo a través de toda mi vida. Los quiero mucho a todos ustedes.

“Only the disciplined ones are free in life. If you are undisciplined, you are a slave to your moods. You are a slave to your passions.”

Eliud Kipchoge

“Everybody wanna be a bodybuilder, but don't nobody wanna lift no heavy ass weight.”

Ronnie Coleman

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer de forma enorme a toda mi familia por todo el apoyo, amor incondicional y palabras de aliento que me han brindado durante todos los momentos de mi vida. Sin su apoyo, no estaría en el lugar en el cual estoy hoy día.

Agradezco al profesor Paul Lean por haberme brindado la oportunidad de ser el becario de la Diplomatura de Ingeniería de Soldadura del año 2022 y con esto, abrirme las puertas en el área de Materiales; evento que sirvió como el origen de un efecto dominó de muchos sucesos en los años 2022 y particularmente 2023, los cuales sirvieron para mi pleno y total desarrollo como persona. Muchísimas gracias profe.

Agradezco a mi asesor Raúl Hurtado y al profesor Daniel Merino por haber depositado su confianza en mí para ayudarnos a realizar análisis de fallas en componentes mecánicos, como fue el AFA de la presente tesis. Asimismo, agradezco al profesor Wilber Carrasco por permitirme ayudarlo a realizar servicios de ensayos no destructivos mediante la visita a múltiples plantas y talleres metalmeccánicos. Todo lo mencionado previamente sirvió como una fuente exorbitante de aprendizaje y me hizo saber orientar mi futuro laboral hacia el área de los materiales y la metalurgia.

Agradezco a todo el personal del Laboratorio de Materiales, INGESOLD y del área de Materiales de la PUCP (Rosel, Santos, Sully, Lourdes, Noemi, Natalia, Rolo, Aníbal, Ronald, Vitocho, Víctor, Eduardo, Alejandro, Patricia y los profes Lazarte, Sakihama y Fosca) por múltiples razones: por haberme hecho sentir parte de una familia desde los primeros días que comencé a visitar sus instalaciones, por siempre brindar ayuda de forma desinteresada, por sus muestras de confianza y por propiciar un ambiente pleno y divertido para laborar.

Agradezco también a todas las personas con las que me he cruzado durante mi existencia, ya sea por periodos breves o extensos, momentos buenos o malos, pues soy parcialmente el resultado de todas las interacciones que he tenido con aquellas personas y la realización de esta tesis no hubiera sido posible sin su participación directa o indirecta.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : “ANÁLISIS DE FALLA DE OREJAS FRACTURADAS PERTENECIENTES A STICK DE UNA EXCAVADORA HIDRÁULICA”

ÁREA : Materiales

PROPUESTO POR : Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

ASESOR : Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

TESISTA : Mariano Alejandro Pacheco Rivas

CÓDIGO : 20161265

FECHA : 21/11/2023

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

El análisis de fallas en componentes mecánicos es un procedimiento que permite determinar la posible causa raíz de la falla y, posteriormente, elaborar propuestas de mejora para prevenir la falla o reducir sustancialmente su frecuencia. Los componentes de equipos mineros pueden enfrentar diversas fallas debido a las duras condiciones en servicio. Algunos de los mecanismos que originan las fallas más comunes son el desgaste por abrasión, desgaste por impacto, la fatiga por carga cíclica, la corrosión, entre otros. En ese sentido, la presente tesis se concentra en determinar la causa más probable que originó la falla de las orejas del brazo de una excavadora hidráulica, la cual era empleada para la carga de material en camiones de acarreo de una mina de oro. Para determinar la causa de la rotura, el presente trabajo realiza un análisis de falla del componente en estudio que consiste en una secuencia de pasos, como la recolección de información, la caracterización del material, los ensayos de laboratorio, entre otros. Por último, a partir de los resultados del análisis, se proponen recomendaciones para evitar que vuelva ocurrir esta falla en componentes similares.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**“ANÁLISIS DE FALLA DE OREJAS FRACTURADAS
PERTENECIENTES A STICK DE UNA EXCAVADORA
HIDRÁULICA”**

Introducción

1. Marco Teórico.
2. Métodos Experimentales.
3. Análisis y discusión de resultados.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo
Asesor

Tabla de contenidos

RESUMEN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
INTRODUCCIÓN	xi
Objetivos.....	xii
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Excavadora Hidráulica	1
1.1.1. Tren inferior	1
1.1.2. Superestructura	2
1.1.3. Brazo de la excavadora.....	3
1.1.3.1. Reconstrucción y barrenado de alojamientos de bocinas.....	5
1.2. Fundiciones de acero	7
1.3. Reparación por soldadura de componentes en servicio	8
1.3.1. Discontinuidades por soldadura de reparación	9
1.3.2. Reparación de fisuras en alojamientos de bocinas.....	10
1.4. Fatiga.....	11
1.5. Análisis de Falla (AFA)	13
1.5.1. Recopilación de información previa	13
1.5.2. Inspección Visual	13
1.5.3. Análisis Fractográfico	14
1.5.4. Inspección por Ensayos No Destructivos	14
1.5.4.1. Inspección por partículas magnéticas	14
1.5.4.2. Inspección por radiografía industrial	15
1.5.5. Análisis macrógrafico.....	15
1.5.6. Análisis químico.....	16
1.5.7. Análisis metalográfico.....	16
1.5.8. Ensayo de tracción.....	17

1.5.9.	Ensayo de dureza.....	19
1.5.9.1.	Ensayo de dureza Vickers.....	19
1.5.10.	Ensayo de impacto.....	20
1.5.10.1.	Ensayo de impacto Charpy	20
2.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	21
2.1.	Recopilación de información previa.....	21
2.2.	Inspección Visual	21
2.3.	Análisis fractográfico	21
2.4.	Inspección por Partículas magnéticas.....	22
2.5.	Inspección por radiografía industrial.....	23
2.6.	Análisis macrográfico	23
2.7.	Análisis químico	24
2.8.	Análisis metalográfico	25
2.9.	Ensayo de tracción	26
2.10.	Ensayo de dureza Vickers.....	27
2.11.	Ensayo de impacto Charpy	28
3.	ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	30
3.1.	Recopilación de información previa.....	30
3.2.	Inspección visual.....	32
3.2.1.	Inspección visual de la oreja A.....	32
3.2.2.	Inspección visual de la oreja B.....	33
3.3.	Análisis fractográfico.....	35
3.3.1.	Análisis fractográfico de la superficie A-1	35
3.3.2.	Análisis fractográfico de superficie de fractura A-2.....	37
3.3.3.	Análisis fractográfico de superficie de fractura B-1	39
3.3.4.	Análisis fractográfico de superficie de fractura B-2.....	41
3.4.	Inspección por partículas magnéticas.....	43
3.4.1.	Inspección por partículas magnéticas a la oreja A.....	43
3.4.2.	Inspección por partículas magnéticas a la oreja B.....	44
3.5.	Inspección por radiografía industrial.....	45
3.6.	Análisis macrográfico	45

3.6.1.	Análisis macrográfico a sección que contenía la superficie de fractura A-1	45
3.6.2.	Análisis macrográfico a sección que contenía la superficie de fractura A-2	47
3.6.3.	Análisis macrográfico a sección que contiene la superficie de fractura B-1	49
3.6.4.	Análisis macrográfico a sección que contiene la superficie de fractura B-2	51
3.6.5.	Análisis macrográfico a una rebanada extraída de la oreja A.....	52
3.7.	Análisis químico	53
3.8.	Análisis metalográfico	54
3.8.1.	Caracterización del material base de las orejas	54
3.8.2.	Análisis metalográfico del origen de falla de la superficie de fractura A-1.....	55
3.8.3.	Análisis metalográfico de zona de origen de superficie de fractura B-1	56
3.8.4.	Análisis metalográfico de aporte localizado en rebanada de oreja A	57
3.9.	Ensayo de tracción	58
3.10.	Ensayo de dureza Vickers.....	59
3.10.1.	Barridos de dureza al origen de falla de la superficie A-1.....	59
3.10.2.	Barrido de dureza a la zona de origen de falla de la superficie B-1	61
3.10.3.	Barridos de dureza a la rebanada extraída de la oreja A.....	62
3.10.3.	Barridos de dureza a aporte localizado en la oreja A	63
3.11.	Ensayo de impacto	64
Conclusiones.....	66
Recomendaciones	67
Bibliografía.....	68

Índice de tablas

Tabla 1: Composición química de la oreja A y un acero ASTM A27 grado 70-40.....	53
Tabla 2: Composición química del metal de soldadura y materiales de aporte compatibles	54
Tabla 3: Resultados del ensayo de tracción de la probeta de la oreja A	59
Tabla 4: Valores de dureza en la zona de origen de falla de la superficie A-1	60
Tabla 5: Valores de dureza en la zona de origen de falla de la superficie B-1	61
Tabla 6: Valores de dureza en el cordón de reparación de la oreja A.....	62
Tabla 7: Valores de dureza en el cordón puntual de la oreja A	63
Tabla 8: Valores de energía absorbida de las probetas extraídas de la oreja A	64



Índice de figuras

Figura 1: Excavadora hidráulica Caterpillar 6040 FS	1
Figura 2: Partes principales de una excavadora hidráulica	1
Figura 3: Tren inferior de una excavadora hidráulica	2
Figura 4: Superestructura de una excavadora hidráulica	3
Figura 5: Pasador de fijación y bocina pertenecientes a componente de excavadora.....	3
Figura 6: Brazo de excavadora con configuración <i>front shovel</i>	4
Figura 7: Brazo de excavadora con configuración <i>back hoe</i>	4
Figura 8: Inserción de pasador de fijación en la instalación de una excavadora	5
Figura 9: Barrenado inicial de agujeros.....	6
Figura 10: Setup de barra para barrenado de alojamientos de bocinas	6
Figura 11: Aporte de material en los alojamientos de bocinas	6
Figura 12: Proceso de fundición con un molde de arena	7
Figura 13: Proceso de reparación de un componente fisurado	8
Figura 14: Inclusiones de escoria en un cordón de soldadura	9
Figura 15: Porosidades en un cordón de soldadura	9
Figura 16: Representación de faltas de fusión en un cordón de soldadura	10
Figura 17: Proceso de reparación por soldadura de alojamiento de bocina.....	10
Figura 18: Representación de las extrusiones e intrusiones de dislocaciones	11
Figura 19: Representación esquemática de una superficie de fractura por fatiga	12
Figura 20: Fractura por fatiga en un eje	13
Figura 21: Funcionamiento de la técnica de partículas magnéticas.....	15
Figura 22: Funcionamiento de la técnica de radiografía industrial	15
Figura 23: Muestras encapsuladas en resina.....	16
Figura 24: Inspección de un material previo al ataque químico	17
Figura 25: Inspección de un material posterior al ataque químico	17
Figura 26: Curva esfuerzo- deformación de un material	18
Figura 27: Ensayo de dureza Vickers	19
Figura 28: Esquema de un ensayo de impacto Charpy.....	20
Figura 29: Yugo magnético Y-7.....	22
Figura 30: Lámpara de luz ultravioleta EV6000	22
Figura 31: Tubo Balteau NDT Ceram 35	23
Figura 32: Estereoscopio Leica S6D	24
Figura 33: Espectrómetro Bruker Magellan Q8	25
Figura 34: Máquina Buehler Simplimet-2.....	25
Figura 35: Máquina Struers LaboPol-25	25
Figura 36: Microscopio Leica DMI 5000 M	26
Figura 37: Máquina de tracción universal Zwick Roell Z250	27
Figura 38: Dimensiones de probeta redonda según ASTM E370-22	27

Figura 39: Durómetro Zwick Roell ZHV30	27
Figura 40: Máquina de impacto Zwick Roell RKP 450	28
Figura 41: Dimensiones de probeta Charpy según ASTM E23-22	29
Figura 42: Vista general de las orejas A y B	30
Figura 43: Articulación del stick con el boom	30
Figura 44: Localización de la fractura en el stick.....	30
Figura 45: Vista posterior del stick fracturado	31
Figura 46: Excavadora hidráulica en el momento de la falla	31
Figura 47: Dimensionamiento general de la oreja A	32
Figura 48: Dimensionamiento del lateral externo de la oreja A	33
Figura 49: Dimensionamiento del lateral interno de la oreja A.....	33
Figura 50: Martilleo en lateral interno de oreja A	33
Figura 51: Dimensionamiento general de la oreja B	34
Figura 52: Dimensionamiento del lateral externo de la oreja B	34
Figura 53: Dimensionamiento del lateral interno de la oreja B.....	34
Figura 54: Identificación de las superficies de fractura de la oreja A	35
Figura 55: Identificación de superficies de fractura de la oreja fracturada B.....	35
Figura 56: Superficie de fractura A-1.....	36
Figura 57: Marcas de playa en la superficie de fractura	36
Figura 58: Presencia de porosidades en la zona inferior superficie de fractura A-1	36
Figura 59: Presencia de porosidades en la parte superior de la superficie de fractura.....	37
Figura 60: Superficie de fractura A-2.....	37
Figura 61: Discontinuidades en orígenes de marcas de playa en la superficie de fractura A-2.....	38
Figura 62: Discontinuidades en la zona superior de la superficie A-2	38
Figura 63: Discontinuidades tipo porosidades en la superficie de fractura A-2	38
Figura 64: Superficie de fractura B-1	39
Figura 65: Origen de marcas de playa en una discontinuidad en la superficie B-1	39
Figura 66: Origen de marcas de playa en cambio sección agudo de la superficie B-1	40
Figura 67: Discontinuidades próximas al origen de marcas de playa de la superficie B-1	40
Figura 68: Superficie de fractura B-2.....	41
Figura 69: Origen de marcas de playa en la superficie B-2.....	41
Figura 70: Inclusiones de escoria en el lugar de origen de las marcas de playa en la superficie B-2.....	42
Figura 71: Presencia de porosidades agrupadas en la superficie B-2	42
Figura 72: Presencia de una posible salpicadura dentro del agujero de la superficie B-2	42
Figura 73: Ubicación de las fisuras 1-A y 2-A	43
Figura 74: Ubicación de la fisura 3-A	43
Figura 75: Ubicación de la fisura 1-B	44
Figura 76: Ubicación de las fisuras 2-B y 3-B	44
Figura 77: Registro radiográfico de la superficie B-1	45
Figura 78: Macrografía de parte posterior de la superficie A-1	46

Figura 79: Macrografía de zona del alojamiento de bocina que contenía la superficie A-1	46
Figura 80: Macrografía realizada a la sección cortada por la mitad de la superficie A-1.....	47
Figura 81: Macrografía de parte posterior de la superficie de fractura A-2	47
Figura 82: Macrografía de zona del alojamiento de bocina que contenía la superficie A-2.....	48
Figura 83: Sección transversal extraída de la superficie A-2	48
Figura 84: Sección transversal que contenía orígenes de marcas de playas de la superficie A-2.....	49
Figura 85: Macrografía de parte posterior de la superficie B-1	49
Figura 86: Macrografía de zona del alojamiento de bocina que contenía la superficie B-1	50
Figura 87: Sección transversal extraída de la superficie B-1.....	50
Figura 88: Sección transversal que contenía orígenes de marca de playa de la superficie B-1	50
Figura 89: Discontinuidad que originó fisuración en la superficie B-1, 16X.....	51
Figura 90: Lateral interno de la sección que contenía la superficie de la fractura B-2.....	51
Figura 91: Macrografía a la zona del alojamiento de bocina que contenía la superficie B-2	51
Figura 92: Rebanada extraída de oreja fracturada A para realizar el análisis macrográfico.....	52
Figura 93: Análisis macrográfico de la rebanada extraída de la oreja A	52
Figura 94: Microestructura del material base de las orejas, 200X, Nital al 2%.....	54
Figura 95: Microestructura del material base de las orejas, 50X, Nital al 2%.....	55
Figura 96: Ferrita en la zona de hendidura de la superficie A-1, 500X, Nital al 2%.....	55
Figura 97: Granos columnares en la zona de la hendidura de la superficie A-1, 50X, Nital al 2%.....	56
Figura 98: Martensita en ZAC del cordón de la hendidura de la superficie A-1, 100X, Nital al 2%	56
Figura 99: Entalla en origen de fisuración de la superficie B-1, 50X, sin ataque químico.....	57
Figura 100: Entalla en origen de fisuración de la superficie B-1, 50X, Nital al 2%.....	57
Figura 101: Martensita en la ZAC del aporte puntual en oreja A, 500X, Nital al 2%.....	58
Figura 102: Inclusiones alineadas en aporte puntual de soldadura, 50X, Nital al 2%.....	58
Figura 103: Curva fuerza-alargamiento de la probeta extraída de la oreja A	59
Figura 104: Puntos de toma de dureza en la zona de origen de falla de la superficie A-1	60
Figura 105: Barrido de dureza en zona de origen de marcas de playa de la superficie B-1	61
Figura 106: Puntos de tomas de dureza realizados a cordón de reparación de la oreja A	63
Figura 107: Puntos de toma de dureza en el aporte puntual de material	64
Figura 108: Superficies de fractura – Probeta #1 de ensayo Charpy	65
Figura 109: Superficies de fractura – Probeta #2 de ensayo Charpy	65
Figura 110: Superficies de fractura – Probeta #3 de ensayo Charpy	65

INTRODUCCIÓN

Según informes estadísticos del año 2022, Perú se ubica entre los principales países productores de elementos metálicos de origen mineral en el mundo, encontrándose en el segundo, tercer y noveno puesto en el ranking mundial para la producción de cobre (2.2 MT), plata (3.1 MT) y oro (1.3 MT), respectivamente. El cuantioso ingreso económico que genera esta actividad minera en el Perú se puede ver reflejada en el porcentaje del Producto Bruto Interno (PBI) que se origina en la minería, habiendo sido de un 16% entre los años 2017 y 2021.

Para llegar a cumplir con la producción de las abundantes cantidades de metales mencionados previamente, es necesario el uso de una flota de gran envergadura de maquinarias pesadas, entre las cuales se encuentran las excavadoras hidráulicas, utilizadas para los procesos iniciales de la extracción y carguío del mineral. Con el fin de evitar una progresiva disminución en el rendimiento y eficiencia de las excavadoras debido a su constante uso, generándose así una disminución en la tasa de metal producido, se debe tener un plan de mantenimiento adecuado para estas.

Ocasionalmente, suelen ocurrir casos en los cuales se detecta una inoperatividad o hasta una rotura en algún componente perteneciente a una excavadora, generando una detención total de esta y ocasionando considerables pérdidas económicas para la mina donde esta operaba. En este tipo de casos, es necesario realizar una investigación denominada como “Análisis de Falla”, la cual tiene como finalidad determinar la causa de la falla del componente en cuestión, como pueden ser un uso inadecuado, una incorrecta fabricación o hasta un mantenimiento efectuado incorrectamente al componente. Esta investigación realizada serviría para evitar fallas repetitivas en componentes similares que tenga la mina y así evitar futuras pérdidas económicas.

La presente tesis muestra un caso de análisis de falla realizado a las orejas pertenecientes al *stick* de una excavadora hidráulica que trabajaba en una mina peruana que producía oro, teniendo como finalidad principal, determinar la causa más probable que generó la rotura de este componente.

Asimismo, se plantea que esta tesis pueda ser utilizada como un texto de ayuda para las industrias metalmecánicas y de maquinaria pesada; a través de las recomendaciones dadas para evitar fallas similares a las que se dieron en la presente tesis en componentes semejantes pertenecientes a excavadoras o a otro tipo de maquinaria utilizada para el movimiento de tierras.

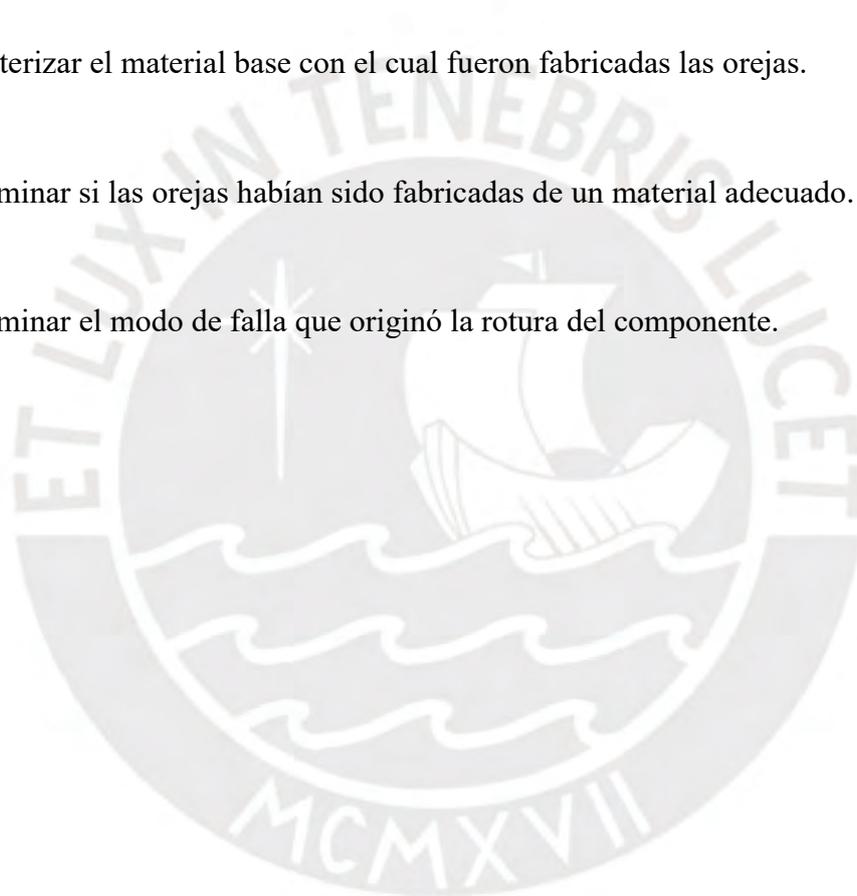
Objetivos

Objetivo general

Determinar la causa más probable que originó la falla de las orejas del *stick* de una excavadora hidráulica.

Objetivos específicos

- Caracterizar el material base con el cual fueron fabricadas las orejas.
- Determinar si las orejas habían sido fabricadas de un material adecuado.
- Determinar el modo de falla que originó la rotura del componente.



1. MARCO TEÓRICO

1.1. Excavadora Hidráulica

Las excavadoras hidráulicas son equipos de maquinaria pesada utilizados para el movimiento de tierra que cuentan con una estructura capaz de girar 360 grados y que accionan sus mecanismos de levante a través del uso de cilindros hidráulicos, mostrándose un ejemplo en la Figura 1. Entre los principales usos que se le da a una excavadora hidráulica se tiene la excavación de tierra y material diseminado, la realización de movimientos desde y hacia bancos de material, el levante de material y su depósito en equipos de acarreo para su posterior transporte, entre otros usos. Las excavadoras hidráulicas suelen ser seccionadas en los siguientes subsistemas: tren inferior, superestructura y brazo; como se puede ver en la Figura 2.



Figura 1: Excavadora hidráulica Caterpillar 6040 FS [1]

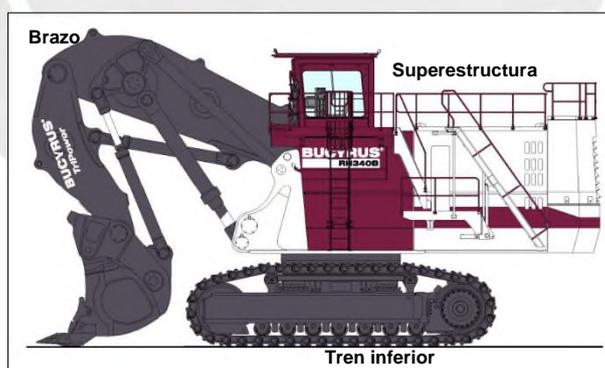


Figura 2: Partes principales de una excavadora hidráulica [2]

1.1.1. Tren inferior

Es el sistema que provee todo el movimiento mecánico para el traslado y giro de la excavadora, proporciona estabilidad y soporta el peso de la máquina. Consiste principalmente de las siguientes partes, las cuales se pueden apreciar en la Figura 3:

- 1) Carrilería: Compuesta por rodillos, ruedas guías, un mando final sprocket, un bastidor y zapatas que le permiten a la excavadora desplazarse por terrenos accidentados e irregulares con facilidad. Tiene como finalidad brindar tracción y movimiento a la excavadora.
- 2) Armadura del tren inferior: Conecta las dos carrilerías de la excavadora, soporta el peso entero de la máquina y es el elemento principal que da estabilidad a la excavadora para absorber las cargas transmitidas desde la superestructura.
- 3) Corona y rodamiento de giro: Conectan el tren inferior y la superestructura y permiten el movimiento rotacional de 360 grados de la excavadora. Esta rotación permite a la excavadora posicionar su cucharón en distintas zonas sin reposicionar la máquina.

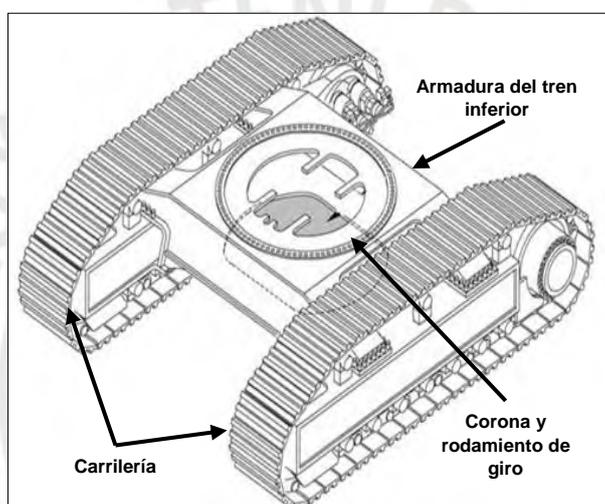


Figura 3: Tren inferior de una excavadora hidráulica [2]

1.1.2. Superestructura

Es el sistema que alberga los componentes principales necesarios para el funcionamiento de la excavadora hidráulica. En la Figura 4 se muestran algunas de las partes más importantes de la superestructura, las cuales son las siguientes:

- 1) Cabina del operador: Lugar donde se ubican todos los controles y mandos del operador de la excavadora. Desde aquí, el operador controla los accionamientos del brazo y los movimientos de rotación y traslación de la excavadora.
- 2) Motor: Encargado de brindar potencia al sistema hidráulico a través de bombas y de generar el movimiento de la excavadora a través del tren inferior.
- 3) Tanques de almacenamiento: Almacenan combustible, fluido hidráulico, aceites y otros lubricantes.
- 4) Contrapeso: Ayuda a la excavadora en mantener el equilibrio y estabilidad cuando se realizan las actividades de carga o excavación de material.

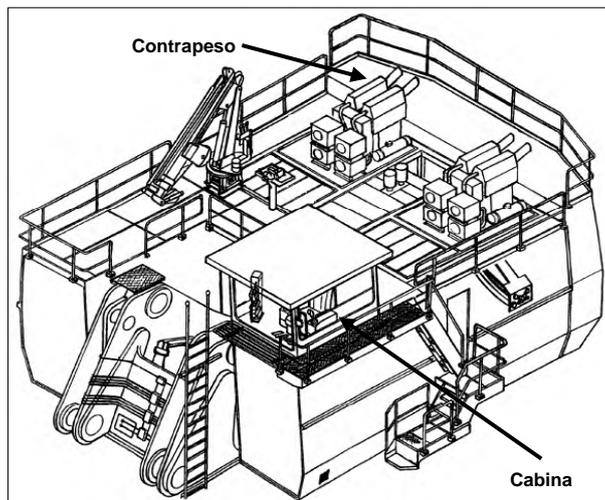


Figura 4: Superestructura de una excavadora hidráulica [2]

1.1.3. Brazo de la excavadora

Es el sistema que se encarga de realizar la actividad de excavado o levante de material de una excavadora. Las partes principales de los brazos de las excavadoras suelen ser las siguientes:

- 1) *Boom* o pluma: Es el componente de mayor tamaño del brazo de la excavadora. Está conectado directamente a la estructura de la excavadora mediante una articulación pivotante. Esta conexión permite que el brazo suba y baje relativo a la estructura de la excavadora y que se pueda extender o acortar el alcance del brazo.
- 2) *Stick*: Está ubicado entre el *boom* y el cucharón. Tiene un movimiento pivotante con respecto al *boom*, permitiéndose así que el cucharón se aleje o se acerque a la excavadora, así como controlar la altura del cucharón relativa a la superficie de ataque.
- 3) Cucharón o *bucket*: Está ubicado al extremo final del brazo y sirve para excava y recolectar materiales.
- 4) Cilindros hidráulicos: Son los componentes que impulsan los movimientos de las piezas a los cuales están conectados. Los cilindros se encuentran interconectados entre el *boom*, *stick* y el cucharón.
- 5) Pasadores de fijación: Son elementos cilíndricos fabricados de acero endurecido que se introducen en agujeros con bocinas en el *boom*, *stick*, cucharón y cilindros hidráulicos y sirven para mantener los componentes unidos. En la Figura 5 se muestran pasadores de fijación y las bocinas utilizadas en maquinarias de movimiento de tierras.



Figura 5: Pasador de fijación y bocina pertenecientes a componente de excavadora [6]

La configuración del brazo de una excavadora hidráulica puede ser de dos tipos: configuración *front shovel* y configuración *back hoe*. Las excavadoras con configuración de brazo *front shovel*, la cual se puede apreciar en la Figura 6, tienen el cucharón con alimentación hacia adelante. Es capaz de arrancar material diseminado desde el mismo nivel del piso que se encuentra la excavadora. En este tipo de configuración, el cucharón presenta una compuerta en su parte inferior, la cual es accionada mediante un cilindro para su apertura y cierre. Las excavadoras con configuración de brazo *back hoe* tienen el cucharón con alimentación hacia atrás, como se puede ver en la Figura 7. Debido a la posición del cucharón, es necesario que este tipo de excavadora esté en una posición superior con respecto a los equipos de acarreo en donde va a depositar el material.

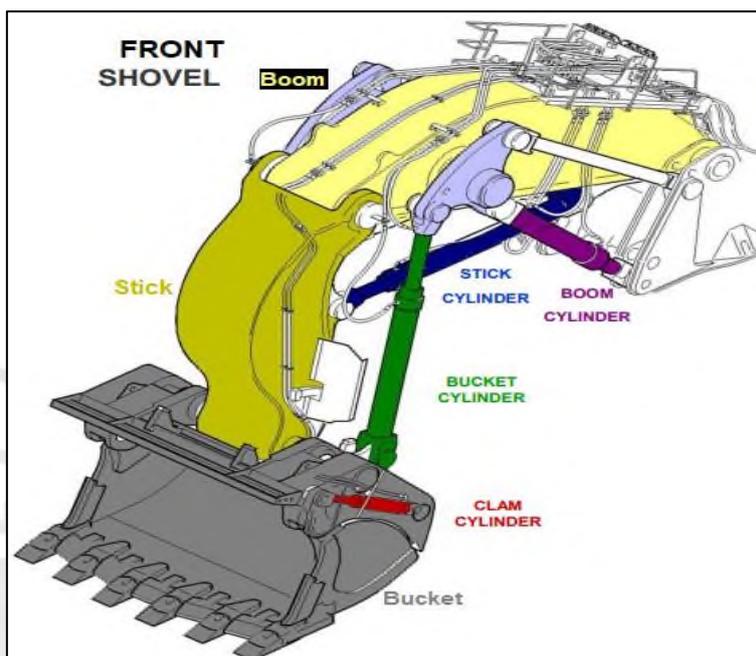


Figura 6: Brazo de excavadora con configuración *front shovel* [2]

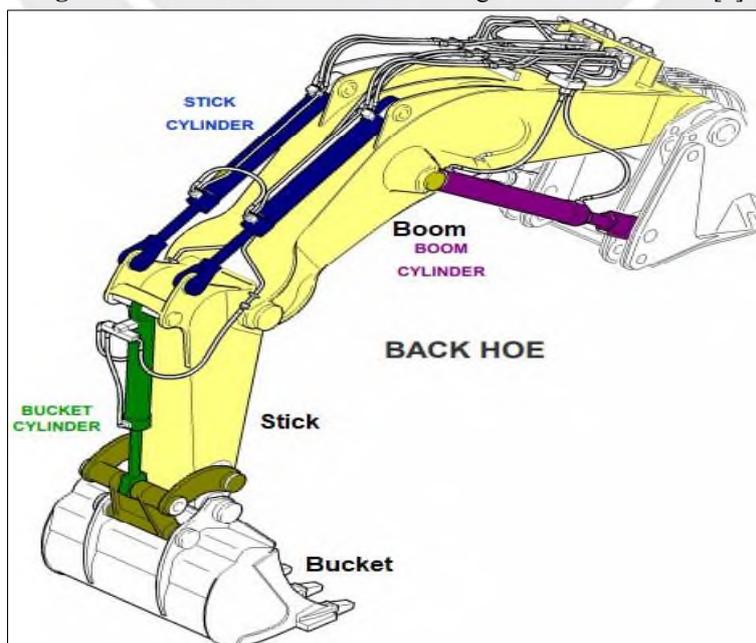


Figura 7: Brazo de excavadora con configuración *back hoe* [2]

1.1.3.1. Reconstrucción y barrenado de alojamientos de bocinas

Los componentes del brazo de una excavadora hidráulica son unidos mediante pasadores de fijación introducidos dentro de bocinas contenidas dentro de agujeros, también conocidos en el argot industrial como “alojamientos de bocinas”. En la Figura 8 se muestra como son introducidos los pasadores dentro de las bocinas durante la instalación de una excavadora.



Figura 8: Inserción de pasador de fijación en la instalación de una excavadora [8]

Debido a las cargas y movimientos a las que está sometido el brazo hidráulico, se puede generar movimiento relativo entre la bocina y el alojamiento de bocina, generándose en este desgaste y/o deformación plástica. Esto resulta en la destrucción de las tolerancias dimensionales entre la bocina y el alojamiento, generándose así una pérdida del ajuste que hubo entre estos dos elementos. La pérdida del ajuste puede causar que componentes del brazo se sacudan durante su operación, afectándose de forma negativa la eficiencia de la excavadora.

Para que los alojamientos de bocinas vuelvan a tener las tolerancias dimensionales originales de diseño, estos deberán pasar por un proceso de reconstrucción, el cual consiste en procedimientos de barrenado y aporte de material.

El proceso usual de reconstrucción consiste en un barrenado inicial, donde se elimina todo el material deformado y/o desgastado del alojamiento mediante arranque de viruta hecho con una herramienta de corte, la cual es colocada en una barra circular que tiene un movimiento simultáneo de rotación y de traslación, con respecto al eje central de los alojamientos. La barra y la herramienta de corte son introducidos dentro del alojamiento de bocina, arrancándose material metálico de toda la superficie del agujero a medida esta barra gira y se traslada. Este proceso de arranque de material puede observarse en la Figura 9. Para asegurar el posicionamiento correcto de la barra dentro de los agujeros a través de todo el barrenado, la barra es colocada en dos posicionadores, los cuales son fijados a la parte exterior del alojamiento de bocinas mediante soldaduras puntuales. El *setup* de la barra puede ser observado en la Figura 10.



Figura 9: Barrenado inicial de agujeros [10]



Figura 10: *Setup* de barra para barrenado de alojamientos de bocinas [10]

Posterior al barrenado inicial, se realiza el paso de adición de material, en el cual comúnmente se realiza un proceso de soldadura debido a su alta tasa de deposición de metal y bajo costo económico. En trabajos de alta calidad, se coloca la antorcha del proceso de soldadura en la misma barra donde se colocó la herramienta de corte y a medida que la barra realiza el movimiento de rotación y traslación, se irá añadiendo material a toda la superficie del alojamiento de bocina, como se puede apreciar en la Figura 11.



Figura 11: Aporte de material en los alojamientos de bocinas [10]

El último paso para la reconstrucción de los alojamientos es el barrenado final. En este proceso se arranca material de exceso que haya sido depositado durante el proceso de soldadura para que el alojamiento tenga las tolerancias dimensionales requeridas y se vuelva a lograr tener un ajuste entre el alojamiento y la bocina.

1.2. Fundiciones de acero

Son productos obtenidos mediante el proceso de fundición, donde se vierte un acero en estado líquido desde un crisol hacia un molde que tiene una cavidad interior con la forma y dimensiones del producto final. El molde donde se vierte el metal suele contar con un agujero en la parte superior por donde ingresa el acero líquido, el cual fluirá hacia las cavidades que hay en el molde, generándose así la forma deseada. El proceso para la obtención de fundiciones en molde de arena puede verse en la Figura 12.



Figura 12: Proceso de fundición con un molde de arena [12]

Una característica importante que presentan los productos de acero obtenidos mediante fundición es que estos presentan propiedades mecánicas isotrópicas, a comparación de los productos obtenidos por forja, los cuales presentan propiedades anisotrópicas en el sentido de forjado.

Los aceros utilizados para hacer productos fundidos suelen estar clasificados según su porcentaje de carbono y de elementos aleantes; teniéndose las siguientes clasificaciones:

- Fundiciones de acero de bajo carbono: Cuando el elemento aleante principal es el carbono y su porcentaje de carbono es menor a 0.20 %
- Fundiciones de acero de medio carbono: Cuando el elemento aleante principal es el carbono y su porcentaje de carbono está entre 0.20 % y 0.50 %.
- Fundiciones de acero de alto carbono: Cuando el elemento aleante principal es el carbono y su porcentaje de carbono es mayor a 0.50 %.
- Fundiciones de acero de baja aleación: Además de contener carbono, contienen elementos aleantes que le brindan propiedades mecánicas mejoradas.

Las fundiciones de acero deben cumplir con propiedades mecánicas y requerimientos químicos especificados en normas de entidades reguladoras, como son la ASTM o la ISO. Entre las normas más utilizadas para la caracterización de estas fundiciones se encuentran:

- ASTM A27: Standard Specification for Steel Castings, Carbon, for General Applications
- ASTM A148: Standard Specification for Steel Castings, High Strength, for Structural Purposes
- ISO 14737: Carbon and low alloy cast steels for general applications

1.3. Reparación por soldadura de componentes en servicio

“Habitualmente las reparaciones por soldeo se aplican fundamentalmente en la recuperación de piezas y uniones soldadas con discontinuidades no aceptables producidas durante las diversas fases de su fabricación o durante el servicio. Independientemente de cuando se hayan desarrollado, el momento en que se detectan y se procede a su reparación puede ser antes o después de entrar en servicio” (CESOL 2016: 5).

Las reparaciones por soldadura efectuadas durante la vida de los componentes mecánicos son comúnmente aplicadas para resanar fisuras que hayan aparecido en el componente o volver a tener tolerancias dimensionales en componentes que hayan sufrido algún tipo de desgaste.

El proceso usual de reparación a componentes que hayan sufrido la aparición de fisuras durante su servicio consiste en la remoción completa de material de la zona que tenga la presencia de fisuras mediante métodos mecánicos o químicos, validándose la ausencia total de fisuras mediante la realización de ensayos no destructivos. A la cavidad formada por la remoción de material se le deberá dar una adecuada preparación para su posterior llenado mediante un proceso de soldadura, utilizándose un procedimiento de soldadura calificado y realizado por soldadores homologados. Se deberán realizar ensayos no destructivos durante y una vez finalizado el llenado para confirmar la ausencia de defectos en la soldadura. Finalmente, el componente deberá ser maquinado para que tenga la forma y dimensiones requeridas para su servicio. Los pasos mencionados pueden apreciarse en la Figura 13.

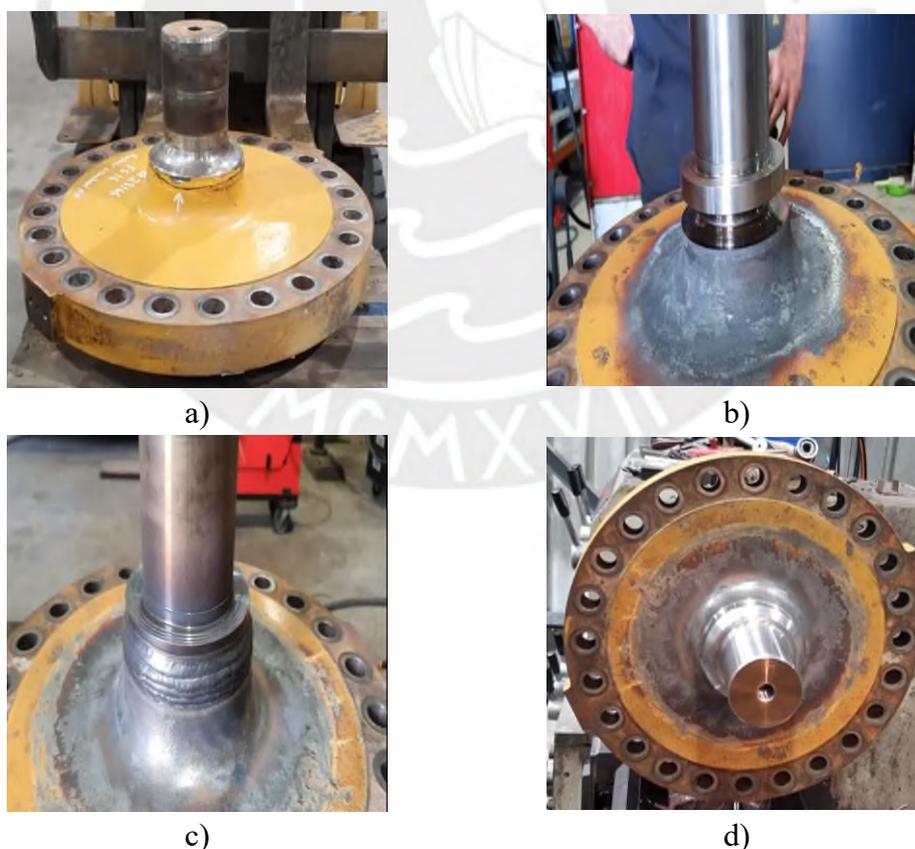


Figura 13: Proceso de reparación de un componente fisurado. A) Componente fisurado. B) Cavidad preparada para ser rellenada. C) Cavidad rellenada mediante soldadura. D) Componente después de haber sido maquinado a dimensiones de diseño. [14]

1.3.1. Discontinuidades por soldadura de reparación

Al igual que en los procesos de soldadura de fabricación, las reparaciones efectuadas por procesos de soldadura pueden introducir discontinuidades y defectos en el material reparado. Las discontinuidades pueden introducirse debido a errores u omisiones antes, durante o después del proceso de soldadura por parte del personal involucrado en el proceso de reparación. Los tipos de discontinuidades encontrados están directamente ligadas al proceso de soldadura que se haya efectuado, teniéndose entre las más comunes las siguientes:

- **Inclusiones de escoria:** Son productos que se generan durante la deposición del metal de soldadura en procesos que usan protección por medio de un fundente, como pueden ser la soldadura por electrodo revestido (SMAW) o soldadura con alambre tubular (FCAW). Estos productos pueden aparecer debido a técnicas de soldadura no adecuadas o de una limpieza deficiente entre pases. Un ejemplo de inclusión de escoria en el cordón de soldadura puede verse en la Figura 14.



Figura 14: Inclusiones de escoria en un cordón de soldadura [15]

- **Porosidades:** Son causadas por atrapamiento de gases durante la solidificación del metal de soldadura. Suelen tener una forma esférica. Entre las causas más comunes para su aparición se encuentra la contaminación del componente a ser soldado o de los metales de aporte o por una falta de gases de protección en procesos que utilizan protección gaseosa durante la soldadura. En la Figura 15 se muestran porosidades encontradas en un cordón de soldadura.



Figura 15: Porosidades en un cordón de soldadura [15]

- **Falta de fusión:** Es la ausencia de fusión que ocurre entre el metal de soldadura y el metal base o entre los pases de soldadura que se sueldan uno posterior al otro, como puede observarse en el esquema de la Figura 16. Puede ser causada por técnicas de soldadura no apropiadas, preparación incorrecta, junta inadecuada o inclusiones que puedan interferir con la fusión del material.

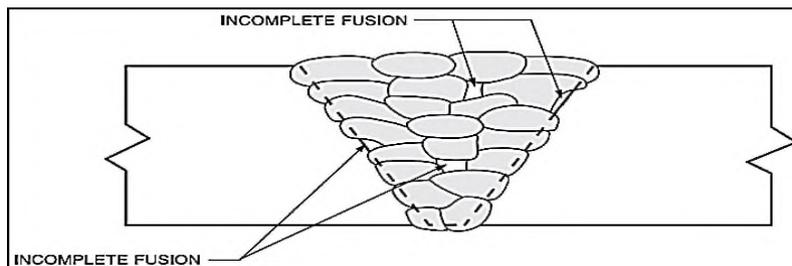


Figura 16: Representación de faltas de fusión en un cordón de soldadura [15]

1.3.2. Reparación de fisuras en alojamientos de bocinas

Aparte de las superficies deformadas y/o desgastadas que se pueden encontrar en los alojamientos de las bocinas, es posible encontrar fisuras dentro o en zonas contiguas al agujero. Es imperativo realizar un procedimiento de reparación por soldadura a estas fisuras, pues si no son eliminadas, estas continuarán creciendo y podrían causar la fractura total del componente. Una vez realizada la reparación por soldadura, se debe realizar un barrenado final a los alojamientos para que estos puedan tener las dimensiones requeridas y se pueda lograr tener un ajuste entre el alojamiento y la bocina. Este proceso puede observarse en la Figura 17.

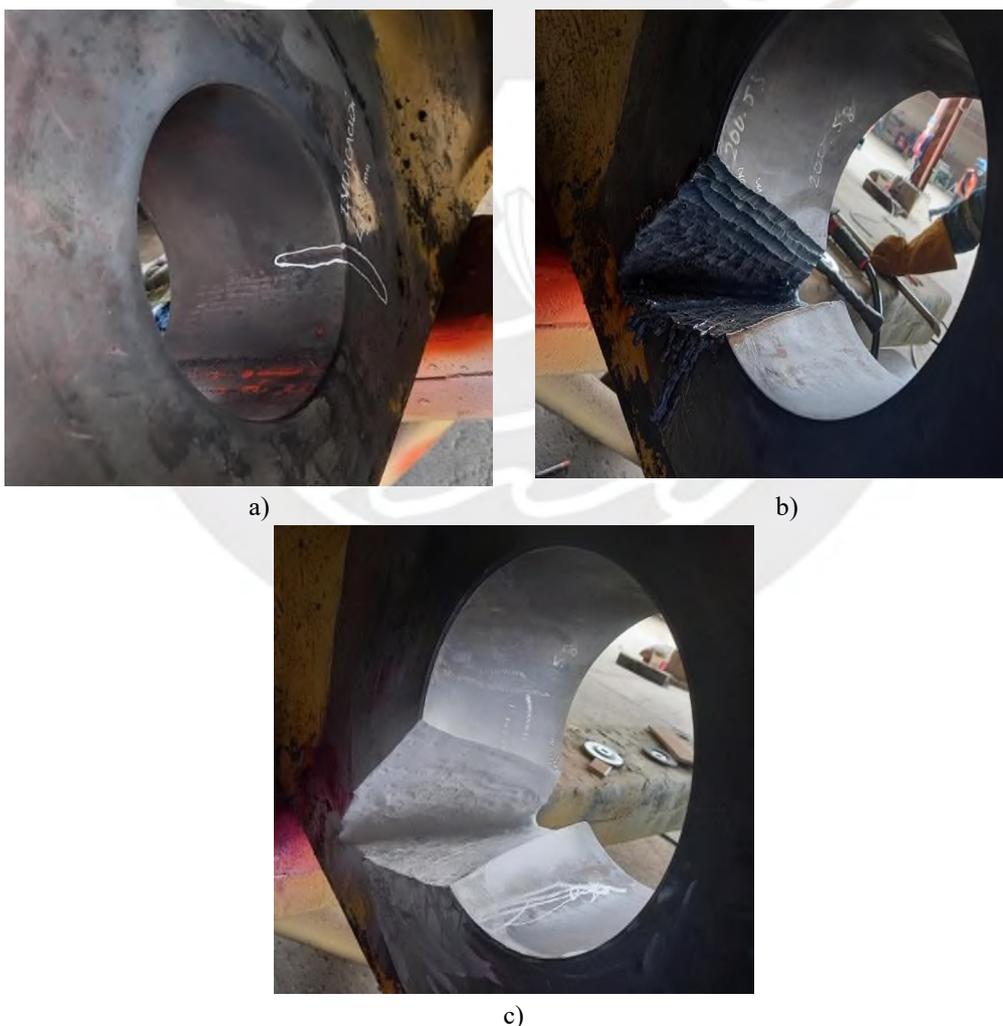


Figura 17: Proceso de reparación por soldadura de alojamiento de bocina. A) Detección de fisura. B) Eliminación de material donde haya habido presencia de fisura. C) Aplicación de ensayos no destructivos para asegurar remoción completa de fisura.

1.4. Fatiga

Es el fenómeno que conlleva a fracturas en componentes que están sometidos a esfuerzos repetitivos o fluctuantes en el tiempo, con un valor máximo de esfuerzo menor a la resistencia a la tracción del material que está siendo sometido a los esfuerzos. Puede ocurrir en todo tipo de elementos mecánicos que están sometidos a esfuerzos en forma de tensión, compresión, flexión, torsión, vibración, expansión térmica, etc. [16]

El fenómeno de fatiga se presenta en tres etapas:

- **Etapa 1 - Nucleación de fisuras:** Debido a las cargas repetitivas y fluctuantes con el tiempo, se inducen cambios en la microestructura de los materiales, los cuales generan aparición de escalones de dislocaciones en el material conocidos como intrusiones y extrusiones, como se ve en la Figura 18. Estos escalones actúan como microconcentradores de tensiones, en donde si la energía de deformación acumulada supera ciertos valores, se puede dar la nucleación de microfisuras en el material. Estas microfisuras se iniciarán en las zonas del componente que estén sometidas a los mayores esfuerzos nominales. El número de microfisuras que aparecerán dependerá de la geometría del componente, su ambiente, esfuerzos a los que esté sometido, condiciones metalúrgicas, resistencia mecánica y condiciones de servicio.

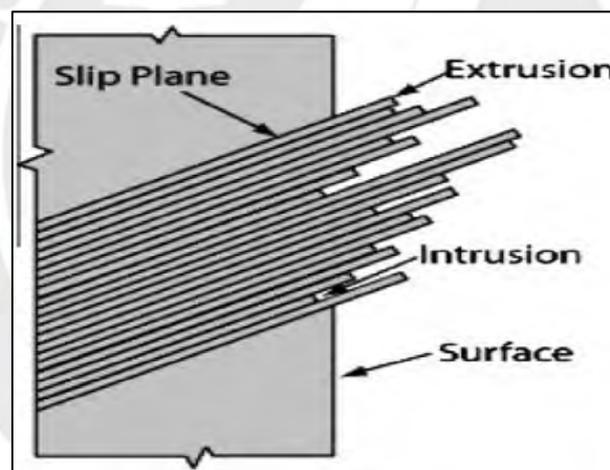


Figura 18: Representación de las extrusiones e intrusiones de dislocaciones [17]

- **Etapa 2 - Propagación de fisura:** La microfisura tiene una punta con una terminación en ángulo agudo y por ende actúa como un concentrador de tensiones, lo cual hace que, al momento de cada aplicación de un esfuerzo de tracción en el componente, la microfisura vaya incrementando de tamaño y, por ende, se vaya propagando gradualmente a través de una sección del componente en una dirección perpendicular a los esfuerzos de tracción.
- **Etapa 3 - Rotura final por sobrecarga:** A medida que la fisura por fatiga continúe creciendo, el área transversal que soporte los esfuerzos en el componente se irá reduciendo gradualmente. Eventualmente se llegará a un tamaño crítico, en donde el área transversal remanente no podrá soportar los esfuerzos aplicados y el componente terminará fracturándose, como se puede apreciar en el esquema de la Figura 19.

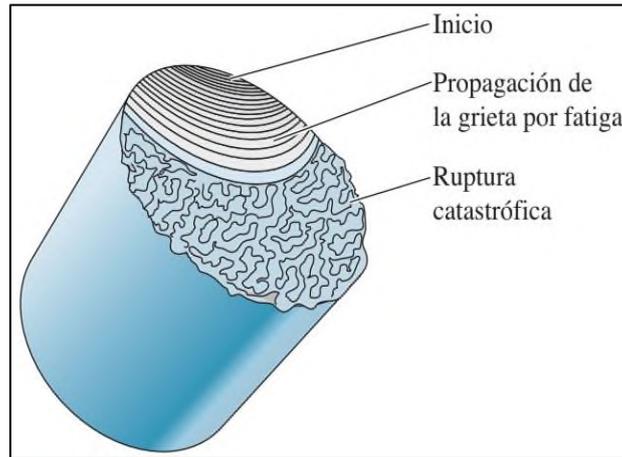


Figura 19: Representación esquemática de una superficie de fractura por fatiga [18]

Macroscópicamente, las fracturas por fatiga pueden ser identificadas por la aparición de las siguientes características particulares y que además pueden observarse en la Figura 20:

- **Ausencia de deformación:** Como los esfuerzos a los que está sometido un componente que ha fallado por fatiga están por debajo de la resistencia a la tracción y en muchas ocasiones también por debajo del límite de fluencia del componente, se espera encontrar nula deformación plástica en la zona inicial donde se nucleó la fisura de fatiga.
- **Marcas de playa:** Son marcas macroscópicas que indican la interrupción de la propagación de la fisura en la etapa de propagación. Estas marcas de playa indican el origen, la dirección de propagación de la fisura y las variaciones de los esfuerzos a los cuales estuvo sometido el componente mientras la fisura se propagaba en el componente. Las marcas de playa tienden a tener una apariencia lisa en la zona de inicio de la fatiga y se tornan progresivamente más rugosas a medida que se propagan a través de la superficie del componente.
- **Zona de rotura final por sobrecarga:** Como se mencionó previamente, la etapa final de la fatiga es la fractura por sobrecarga del área transversal remanente en el componente. El tamaño de la zona de rotura final brinda una idea cualitativa sobre la magnitud de los esfuerzos a los que estuvo sometido el componente cuando ocurrió rotura final; si el tamaño de la zona de rotura final es grande, se podrá inferir que el componente estuvo sometido a esfuerzos nominales altos al momento de la fractura, mientras que, si el tamaño es pequeño, se podrá decir que el componente estuvo sometido a esfuerzos nominales bajos al momento de la fractura. El tipo de rotura final que haya sufrido el componente puede clasificarse como forma dúctil o forma frágil según la morfología que presente la zona de rotura final. [19]

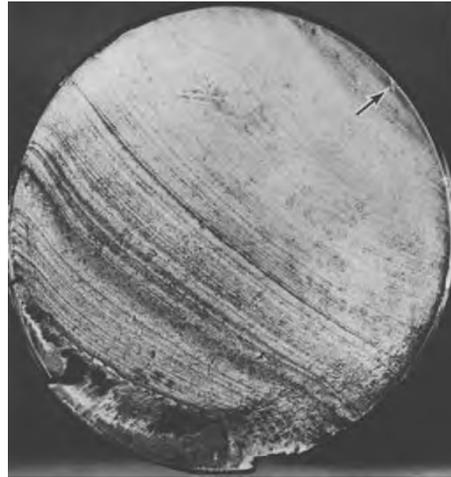


Figura 20: Fractura por fatiga en un eje [20]

1.5. Análisis de Falla (AFA)

Un análisis de falla es un procedimiento de investigación sistemática, que busca determinar la o las causas físicas de una falla mediante la realización de ensayos y técnicas especializadas, utilizadas en una secuencia de pasos establecida para la realización del análisis de los casos. En los análisis de falla de componentes mecánicos es común seguir los pasos y recomendaciones dadas por la ASM (American Society for Metals) dadas en el ASM Handbook: Volume 11 Failure Analysis [21]. Esta secuencia de pasos puede estar sujeta a variaciones según sea el caso o componente al que se esté realizando un análisis de falla. Los pasos más utilizados para la realización de un análisis de falla son los siguientes:

1.5.1. Recopilación de información previa

Esta es la etapa inicial de toda investigación de análisis de falla y tiene como finalidad obtener todos los detalles pertinentes al caso en cuestión, recolectando información sobre el proceso de fabricación, forma de procesamiento, historial de servicio y modo en el cual se desarrolló la falla del componente investigado.

Entre los detalles importantes del historial de servicio del componente se tienen los ciclos y tipos de carga a las que estuvo sometido, condiciones ambientales en las que trabajaba, historial de reparaciones, horas de servicio antes de la falla, entre otros datos que pueda ofrecer la entidad que trabajaba con el elemento fallado.

1.5.2. Inspección Visual

La inspección visual consiste en la observación detallada del componente a ojo desnudo o con ayuda instrumental auxiliar (Díaz 2017: 25). Esta se realiza inicialmente al componente tal cual fue recibido y luego se realiza posterior a su limpieza. Una inspección visual realizada correctamente puede permitir lo siguiente:

- Obtener las dimensiones generales del componente.
- Determinar algún mecanismo de daño por corrosión o desgaste.
- Detectar algún tipo de discontinuidad superficial en el componente.

1.5.3. Análisis Fractográfico

Consiste en el análisis de las características de las superficies de fractura de los componentes examinados, sirviendo para relacionarlas a las causas y mecanismos que originaron la fractura de los componentes.

El análisis fractográfico puede ser realizado a escala macroscópica y microscópica utilizando un microscopio electrónico de barrido. El análisis macrográfico se realiza en un rango de 1 a 100 aumentos y sirve para determinar:

- El punto de origen de una fractura y su dirección de propagación, evidenciado por marcas radiales en roturas frágiles y marcas de playa en fracturas por fatiga.
- El área de rotura final de los componentes que fallaron por fatiga.
- El tipo de esfuerzos a los que estaba sometido el componente previo o al momento de la falla.
- La presencia de concentradores de tensiones en la superficie de fractura que contribuyeron a la falla del componente.
- La magnitud de los esfuerzos a los que estuvo sometido el componente al momento de la falla.

1.5.4. Inspección por Ensayos No Destructivos

Los ensayos no destructivos sirven para poder detectar la presencia de discontinuidades en el elemento inspeccionado sin alterar sus propiedades, dimensiones y comportamiento en servicio. Entre los ensayos no destructivos más utilizados en la realización de análisis de fallas se tiene la inspección por partículas magnéticas y la radiografía industrial.

1.5.4.1. Inspección por partículas magnéticas

Es usada para la detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Este ensayo basa su funcionamiento en la detección de fugas de flujo magnético producidos por discontinuidades en el material mediante finas partículas de polvo de hierro cuando se hace pasar un campo magnético de alta intensidad a través del material inspeccionado. La representación del funcionamiento de esta técnica se muestra en la Figura 21. Un requerimiento para la detección de discontinuidades es que estas se deben encontrar perpendiculares a las líneas del campo magnético.

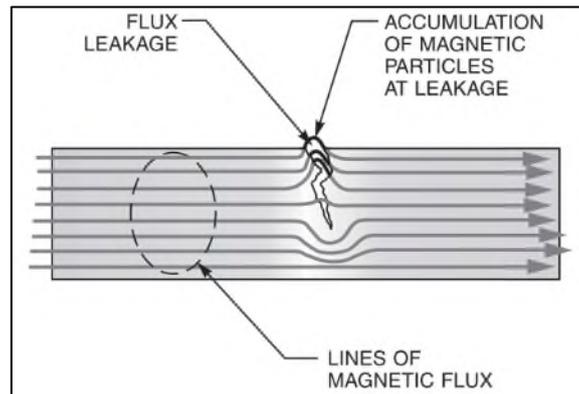


Figura 21: Funcionamiento de la técnica de partículas magnéticas [23]

1.5.4.2. Inspección por radiografía industrial

Utiliza radiación ionizante para la identificación de discontinuidades volumétricas en un material. Las radiaciones tienen la propiedad de atravesar materiales opacos a la luz visible e impresionar emulsiones fotográficas, obteniéndose así registros permanentes. A medida que la radiación atraviesa zonas con mayor o menor espesor o densidad, la radiación irá atenuándose en distintas cantidades, incidiendo así con mayor o menor energía en la película radiográfica y dejando impresiones con distintas tonalidades en la película. Las ubicaciones de las zonas claras en la película radiográfica indican que esas zonas del objeto inspeccionado tenían mayor densidad o espesor comparado con las ubicaciones de la película donde habían zonas oscuras. Un esquema representativo de la técnica se muestra en la Figura 22.

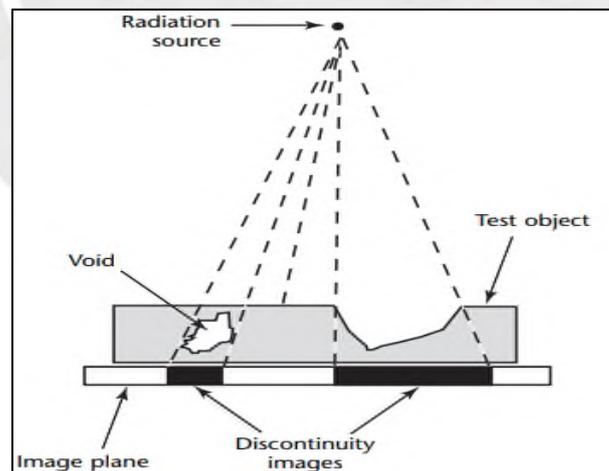


Figura 22: Funcionamiento de la técnica de radiografía industrial [24]

1.5.5. Análisis macrográfico

Consiste en la inspección con nulos o bajos aumentos a un metal que ha sido sometido a un ataque químico, con la finalidad de revelar ciertos aspectos de su calidad y estructura [25]. El procedimiento para este análisis comienza con la selección de una superficie a analizar de un componente. Se extrae una sección mediante métodos de corte mecánico o corte térmico

que contenga a la superficie y posteriormente esta es preparada mediante secuencias de desbaste, con un pulido opcional. A la superficie preparada se le realizará un ataque químico con un reactivo adecuado que revele las características y/o discontinuidades presentes en el material. El paso final de este análisis es la observación con nulos o bajos aumentos.

Un análisis macrográfico realizado correctamente puede revelar una variedad de condiciones en un material, como, por ejemplo:

- Estructura dendrítica de solidificación
- Porosidades
- Inclusiones no metálicas
- Zonas endurecidas
- Discontinuidades en cordones de soldadura

1.5.6. Análisis químico

El análisis químico sirve para determinar el porcentaje másico de cada elemento químico que se encuentre presente en la composición del material inspeccionado.

1.5.7. Análisis metalográfico

El objetivo principal de este análisis es determinar las inclusiones y la microestructura del metal observado a través de un microscopio óptico. La detección de las inclusiones deberá ser realizada previo a un ataque con un reactivo químico y la observación de la microestructura deberá realizarse posterior al ataque con un reactivo químico. Para realizar un análisis metalográfico, se deben seguir los siguientes pasos:

- **Seccionamiento:** Consiste en la extracción de una sección representativa del material que se quiere analizar. El método elegido para el seccionamiento no deberá alterar la microestructura de la sección extraída, ya sea por exceso de temperatura o por excesiva deformación.
- **Montaje de la sección:** La sección extraída es colocada dentro de una resina en forma de un polvo termofusible. A continuación, esta resina se coloca a una temperatura y presión establecidas para que llegue a un estado líquido y luego se deja enfriar para que llegue a un estado sólido. De esto se obtiene una briqueta, objeto que facilita los siguientes pasos del análisis metalográfico. Distintos tipos de briquetas pueden observarse en la Figura 23.



Figura 23: Muestras encapsuladas en resina [28]

- **Desbaste:** La muestra se frota contra partículas abrasivas para eliminar cualquier capa de material alterado que pueda existir en la superficie de la muestra.
- **Pulido:** Se restriegan partículas abrasivas suspendidas en un líquido contra la superficie de la muestra desbastada. Al final de este paso, la superficie de la muestra debe tener un acabado especular.
- **Determinación de inclusiones no metálicas y discontinuidades:** La muestra pulida es observada a través de un microscopio óptico para poder determinar el contenido de inclusiones no metálicas y discontinuidades y así clasificarlas según su morfología, tamaño y cantidad. Un ejemplo de una muestra sin ataque químico se muestra en la Figura 24.
- **Ataque químico:** La muestra es atacada con un reactivo químico adecuado, el cual revela la microestructura de la muestra.
- **Inspección de la microestructura:** Es el paso final del análisis metalográfico y sirve para poder observar la microestructura del metal a distintos aumentos en un microscopio óptico [29]. En la Figura 25 se observa la muestra vista en la Figura 24 después de haber sido sometida a un ataque químico.

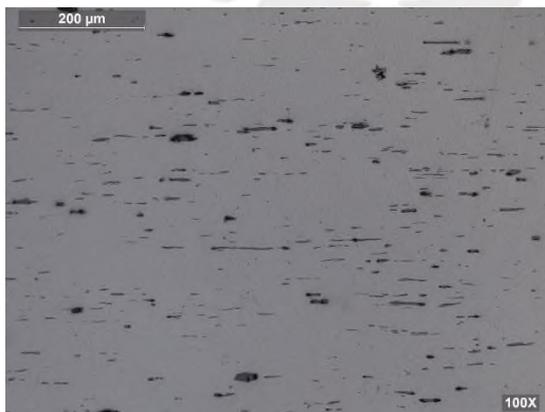


Figura 24: Inspección de un material previo al ataque químico



Figura 25: Inspección de un material posterior al ataque químico

1.5.8. Ensayo de tracción

Consiste en someter una probeta de dimensiones conocidas y marcada con una longitud calibrada a una fuerza creciente uniaxial, la cual hará que la probeta presente un alargamiento en el sentido de la fuerza aplicada. El ensayo concluirá cuando la probeta haya sido fracturada en dos pedazos. Con los valores de fuerza y alargamiento obtenidos a través de la duración del ensayo, se obtiene una curva fuerza-alargamiento. Al dividir los valores de la fuerza entre el área inicial de la probeta y del alargamiento entre la longitud calibrada inicial de la probeta, se obtiene la curva de esfuerzo-deformación [26].

El ensayo de tracción sirve para obtener propiedades mecánicas del material, entre las cuales se tienen la resistencia a la tracción, el límite a la fluencia y la ductilidad.

La resistencia a la tracción sirve para determinar el esfuerzo máximo que puede soportar el material antes de romperse.

$$\sigma_{M\acute{a}x} = \frac{F_{max}}{A_o} \text{ (MPa)}$$

- $\sigma_{M\acute{a}x}$: Resistencia a la tracción
- F_{max} : Fuerza máxima que soportó la probeta
- A_o : Área inicial de la probeta

El límite a la fluencia sirve para determinar el esfuerzo en el cual el material dejará de ser deformado elásticamente y comenzará a ser deformado plásticamente.

$$\sigma_y = \frac{F_{fluencia}}{A_o} \text{ (MPa)}$$

- σ_y : Límite a la fluencia
- $F_{fluencia}$: Fuerza a la cual el material comenzó a deformarse plásticamente
- A_o : Área inicial de la probeta

La ductilidad es un indicador de cuanto se podrá deformar un material sin fracturarse. Esta puede ser obtenida según el porcentaje de alargamiento.

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_o}{L_o} * 100\%$$

- ε : Porcentaje de alargamiento del material.
- L_f : Longitud final entre las marcas iniciales, la cual se obtiene al hacer la medición entre las marcas al unir las partes fracturadas de la probeta.
- L_o : Longitud calibrada inicial marcada en la probeta.

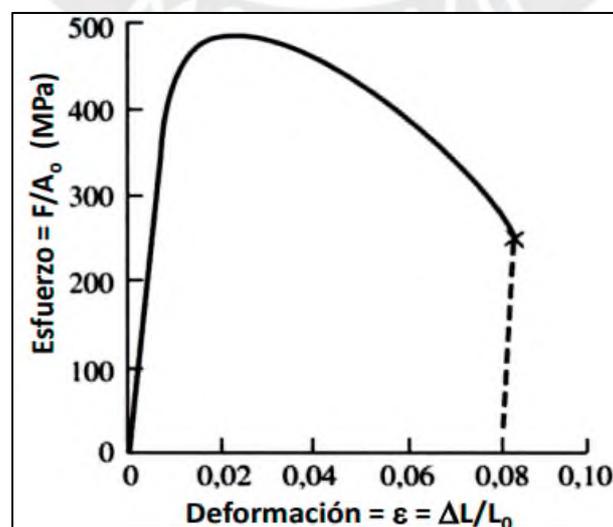


Figura 26: Curva esfuerzo- deformación de un material [27]

1.5.9. Ensayo de dureza

La dureza es la propiedad mecánica que mide la resistencia que opone un material a ser deformado plásticamente; en este caso, a ser penetrado superficialmente por otro material más duro.

Este ensayo consiste en la aplicación de una fuerza a través de un indentador de forma y dimensiones conocidas y durante un tiempo establecido contra la superficie de un material, generándose así una indentación. Posteriormente, se elimina la carga aplicada retirando el indentador y se miden las dimensiones de la huella dejada en el material para poder hallar el valor de la dureza. [30]

Para la realización de análisis de fallas en componentes mecánicos, los ensayos de dureza más utilizados son el ensayo de dureza Rockwell, ensayo de dureza Brinell y el ensayo de dureza Vickers.

1.5.9.1. Ensayo de dureza Vickers

El ensayo de dureza Vickers usa un indentador de diamante con forma de pirámide de base cuadrada con ángulo entre caras de 136° . Las cargas aplicadas en este ensayo pueden estar entre 1 y 120 kgf y el tiempo de penetración está establecido entre 10 y 15 segundos. El valor de dureza Vickers se obtiene dividiendo la fuerza aplicada entre el área de la huella generada por el indentador en el material.

$$HV = \frac{F}{S} \left(\frac{kgf}{mm^2} \right)$$

- HV: Dureza Vickers
- F: Fuerza de penetración en el ensayo
- S: La superficie verdadera de la huella.

La superficie S es función de las diagonales medidas en la huella del ensayo

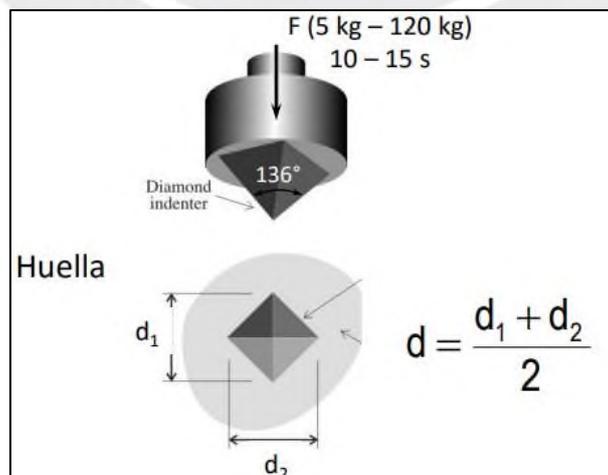


Figura 27: Ensayo de dureza Vickers [27]

1.5.10. Ensayo de impacto

Determina el comportamiento de un material sometido a cargas dinámicas bajo un estado de esfuerzos triaxial. Este comportamiento es determinado midiendo la capacidad de absorción de energía que tiene el material cuando la carga se realiza en un intervalo de tiempo muy corto y con la presencia de una entalla en el material. [30].

Uno de los métodos más utilizados para obtener la energía absorbida es el ensayo de impacto Charpy.

1.5.10.1. Ensayo de impacto Charpy

Consiste en someter una probeta de dimensiones conocidas con una entalla en V a una carga de impacto generada por la acción de un péndulo con una masa conocida, el cual atravesará a la probeta por el lado opuesto de su entalla. El péndulo es soltado desde una posición inicial de una altura conocida y terminará en una posición final con una altura menor a la inicial. Tomando en cuenta la pérdida de energía por fricción, la energía que la probeta haya absorbido será igual a la diferencia en energía potencial que haya sufrido el péndulo entre la altura inicial y la altura final.

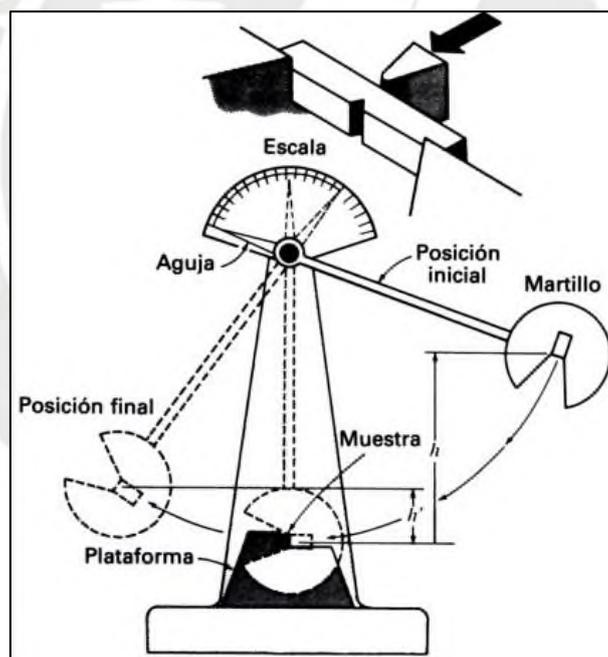


Figura 28: Esquema de un ensayo de impacto Charpy [27]

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental para la resolución de este caso se hizo siguiendo la metodología y las recomendaciones dadas en el ASM Handbook: Volume 11 Failure Analysis. Adicionalmente, los ensayos realizados en la presente tesis se hicieron en base a los lineamientos y procedimientos establecidos por el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

El procedimiento experimental servirá para explicar los instrumentos o máquinas, elementos involucrados y normativas que se utilizaron en cada paso realizado en este análisis de falla.

2.1. Recopilación de información previa

Instrumento(s) utilizado(s)

La información previa relacionada al caso fue suministrada por la empresa que solicitó el servicio del análisis de falla.

2.2. Inspección Visual

Instrumento(s) utilizado(s)

Se utilizaron reglas marca Mitutoyo para realizar el dimensionamiento de las piezas utilizadas en este caso.

Elemento(s) inspeccionado(s)

Los elementos inspeccionados durante la inspección visual fueron las dos orejas fracturadas del *stick*.

Procedimiento utilizado

La inspección visual del presente análisis de falla se realizó con una iluminación mayor a 1000 lux, según lo indicado en el artículo 9 “Visual Examination” del código ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sección V: “Nondestructive Examination” [31].

La limpieza de las orejas inspeccionadas se realizó siguiendo los lineamientos del anexo A1. “Cleaning of parts and materials” de la norma ASTM E165/E165M-18 “Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry” [32]. Las orejas primero fueron limpiadas con un removedor de pintura para eliminar la capa de recubrimiento que tenían y luego fueron limpiadas utilizando un solvente volátil, con un cepillado suave utilizando un cepillo de bronce.

2.3. Análisis fractográfico

Instrumento(s) utilizado(s)

La inspección fractográfica se realizó a ojo desnudo.

Elemento(s) inspeccionado(s)

La inspección fractográfica se realizó a las cuatro superficies de fractura que presentaban las orejas.

Procedimiento utilizado

Se realizó cumpliendo los requisitos de iluminación del artículo 9 “Visual Examination” del código ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sección V: “Nondestructive Examination”, teniéndose una iluminación mayor a 1000 lux para la correcta realización del análisis fractográfico. Para remover cualquier tipo de capa alterada por corrosión que hubo en las superficies de fractura, estas fueron limpiadas utilizando un solvente volátil y cepillando suavemente utilizando un cepillo de bronce.

2.4. Inspección por Partículas magnéticas

Instrumento(s) utilizado(s)

Se usaron partículas magnéticas húmedas fluorescentes MagnaFlux. La magnetización se realizó usando un yugo electromagnético MagnaFlux Y-7. Se empleó una lámpara de luz ultravioleta MagnaFlux EV6000 para la observación de las indicaciones. El yugo y la lámpara pueden apreciarse en las Figuras 29 y 30, respectivamente.



Figura 29: Yugo magnético Y-7



Figura 30: Lámpara de luz ultravioleta EV6000

Elemento(s) inspeccionado(s)

La inspección por partículas magnéticas fue realizada a ambas orejas fracturadas.

Procedimiento utilizado

La inspección por partículas magnéticas se hizo según el artículo 7 “Magnetic Particle Inspection” del código ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V: Nondestructive Examination [33] y según la norma ASTM E709: Standard Guide for Magnetic Particle Testing [34]. Se aplicó el método continuo para la inspección de las orejas, en donde las orejas fueron magnetizadas con corriente alterna utilizando el yugo electromagnético a la vez que las partículas magnéticas fluorescentes eran aplicadas sobre las zonas de inspección. Posteriormente, las indicaciones fueron observadas utilizando una lámpara de luz ultravioleta. Finalmente, las indicaciones fueron ubicadas y dimensionadas.

2.5. Inspección por radiografía industrial

Instrumento(s) utilizado(s)

Se utilizó un tubo de rayos X Balteau NDT Ceram 35, el cual se observa en la Figura 31 y películas radiográficas Structurix AGFA Tipo D7.



Figura 31: Tubo Balteau NDT Ceram 35

Elemento(s) inspeccionado(s)

La inspección radiográfica fue realizada a una sección que contenía a una superficie de fractura de una oreja.

Procedimiento utilizado

La realización de la inspección por radiografía industrial de este análisis de falla se realizó según el artículo 2 “Radiographic Examination” del código ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sección V: Nondestructive Examination [35].

El elemento inspeccionado fue colocado a una distancia de la fuente a la película de 700 mm. Para la toma de la radiografía, se utilizó un voltaje de 250 kV, una corriente de 5 mA y un tamaño de foco de 2.5x2.5 mm. Posteriormente, se procedió a revelar la película radiográfica en un proceso de estándar de revelado; primero sumergiéndola por 5 minutos en un revelador, luego realizándole un lavado intermedio, para posteriormente sumergirla en un fijador por 2 minutos y finalmente realizándole un lavado final.

2.6. Análisis macrográfico

Instrumento(s) utilizado(s)

La observación se realizó a ojo desnudo y también se utilizó un estereoscopio Leica S6 D, mostrado en la Figura 32, para la inspección a mayores aumentos.

Elemento(s) inspeccionado(s)

El análisis macrográfico fue realizado a secciones cortadas que contenían a las cuatro superficies de fractura encontradas en las orejas. Se inspeccionaron tanto las superficies que se encontraban al reverso de las superficies de fractura, como las superficies del alojamiento de las bocinas que estaban contenidas en las secciones. Asimismo, se inspeccionaron muestras

que fueron cortadas en sentido perpendicular a algunas superficies de fractura y muestras que fueron extraídas de zonas alejadas a las superficies de fractura de las orejas.



Figura 32: Estereoscopio Leica S6D

Procedimiento(s) utilizado(s)

Para la realización del análisis macrográfico se siguieron los lineamientos de las normas ASTM E3-11(2017): “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens” [36] y ASTM E340-15:” Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys” [37]. Las muestras extraídas fueron desbastadas utilizando lijas de carburo de silicio de granulometría 100, 240, 320, 400 y 600. Posteriormente, se atacaron utilizando una solución de Nital al 5%.

2.7. Análisis químico

Instrumento(s) utilizado(s)

Un espectrómetro de emisión óptica marca Bruker modelo Magellan Q8 fue empleado para realizar el análisis químico. Ver Figura 33.

Elemento(s) inspeccionado(s)

El análisis químico fue realizado a una superficie utilizada en el análisis macrográfico que contenía metal de soldadura. Se analizó la composición química del material base de las orejas, como la composición del metal de soldadura.

Procedimiento utilizado

Se realizó según la norma ASTM E415-21: “Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry” [38]. La muestra fue acondicionada superficialmente utilizándose lijas de carburo de silicio de granulometría 100, 240 y 320. En este estado, se le realizó el análisis químico



Figura 33: Espectrómetro Bruker Magellan Q8

2.8. Análisis metalográfico

Instrumento(s) utilizado(s)

La máquina Buehler Simplimet-2 fue utilizada para la encapsulación de las muestras extraídas dentro de la resina termofusible. La máquina Struers LaboPol-25 sirvió para la realización del desbaste y pulido de las muestras encapsuladas. Se utilizó un microscopio Leica modelo DMI 5000 M para realizar la observación de las inclusiones, discontinuidades y de la microestructura. El microscopio cuenta con una cámara digital con la cual se pudieron registrar las imágenes de este caso. Estos equipos se muestran en las Figuras 34, 35 y 36.

Elemento(s) inspeccionado(s)

En el análisis metalográfico, se analizaron muestras que contenían los orígenes de falla de algunas superficies de fractura. También se inspeccionaron muestras que, durante el análisis macrográfico, se detectó que contenían evidencia de algún tipo de aporte de material a través de un proceso de soldadura y muestras alejadas de las zonas de falla y sin presencia de metal de soldadura, con la intención de caracterizar el material base utilizado para la fabricación de las orejas.



Figura 34: Máquina Buehler Simplimet-2



Figura 35: Máquina Struers LaboPol-25



Figura 36: Microscopio Leica DMI 5000 M

Procedimiento utilizado

Las muestras fueron extraídas mediante corte mecánico y posteriormente encapsuladas en una resina termofusible. Seguidamente, las muestras fueron sometidas a un desbaste grueso con un paño MD-Piano, utilizando agua como medio de refrigeración y a un desbaste fino con un paño MD-Largo y una suspensión de diamante DiaPro Largo ($9\ \mu\text{m}$). Acto seguido se les realizó un pulido inicial utilizando un paño MD-Dac y una suspensión de diamante DiaPro Dac ($3\ \mu\text{m}$) y un pulido final con un paño MD-Chem y una suspensión de óxido de silicio OP-S ($0.25\ \mu\text{m}$).

En este estado se observaron las superficies al microscopio metalográfico en busca de inclusiones y discontinuidades. Posteriormente se atacaron químicamente con una solución de Nital al 2% de concentración para poder determinar la microestructura de las muestras. Todos estos pasos se hicieron siguiendo los lineamientos dados en las normas ASTM E3 – 11 “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens” [36] y ASTM E407-07 “Standard Practice for Microetching Metals and Alloys” [40].

2.9. Ensayo de tracción

Instrumento(s) utilizado(s)

Para realizar el ensayo de tracción se utilizó una máquina de tracción universal Zwick Roell Z250, la cual se ve en la Figura 37.

Elemento(s) inspeccionado(s)

El ensayo de tracción fue realizado a una probeta extraída de una oreja fracturada.



Figura 37: Máquina de tracción universal Zwick Roell Z250

Procedimiento utilizado

Para este análisis de falla, la norma que se usó para realizar el ensayo de tracción y obtener las dimensiones de la probeta utilizada fue la ASTM A370-22: “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products” [39]. La geometría de la probeta utilizada se puede ver en la Figura 38.

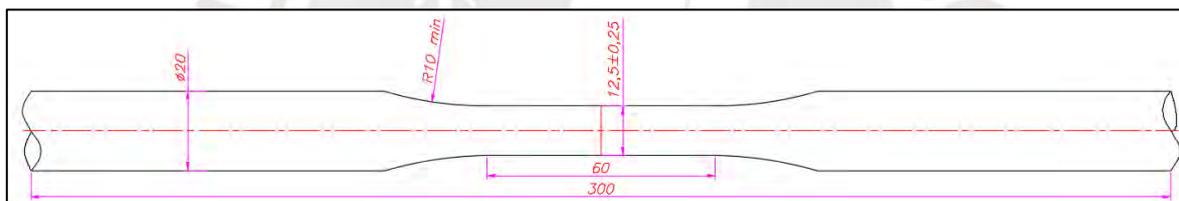


Figura 38: Dimensiones de probeta redonda según ASTM E370-22

2.10. Ensayo de dureza Vickers

Instrumento(s) utilizado(s)

El durómetro Zwick Roell ZHV30, mostrado en la Figura 39, fue utilizado para la realización de los ensayos de dureza Vickers.



Figura 39: Durómetro Zwick Roell ZHV30

Elemento(s) inspeccionado(s)

El ensayo de dureza Vickers se realizó a muestras analizadas durante los análisis macrográfico y metalográfico. Algunas de las muestras ensayadas contenían a los orígenes de fallas de algunas superficies de fractura y otras contenían heterogeneidades que se detectaron en los análisis previos.

Procedimiento utilizado

Para la realización de los ensayos de dureza en este análisis de falla, se utilizó la norma ASTM E92-17: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials [41]. Las cargas utilizadas para ensayar las muestras fueron de 5 kg y 10 kg.

2.11. Ensayo de impacto Charpy

Instrumento(s) utilizado(s)

La máquina de impacto Zwick Roell modelo RKP450 fue utilizada para la realización de los ensayos de impacto Charpy. La máquina de impacto se presenta en la Figura 40.



Figura 40: Máquina de impacto Zwick Roell RKP 450

Elemento(s) inspeccionado(s)

Se evaluó la tenacidad al impacto del material utilizado para la fabricación de las orejas. Se ensayaron tres muestras, las cuales fueron extraídas de una zona alejada de los orígenes de falla y sin presencia de cordones de reparación por soldadura.

Procedimiento utilizado

La norma que se utilizó para realizar el ensayo de impacto y obtener las dimensiones de las probetas fue la ASTM E23-22: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials [42]. Los ensayos fueron realizados a temperatura ambiental al momento de la realización del ensayo (22.8 °C). La geometría de las probetas utilizadas se muestra en la Figura 41

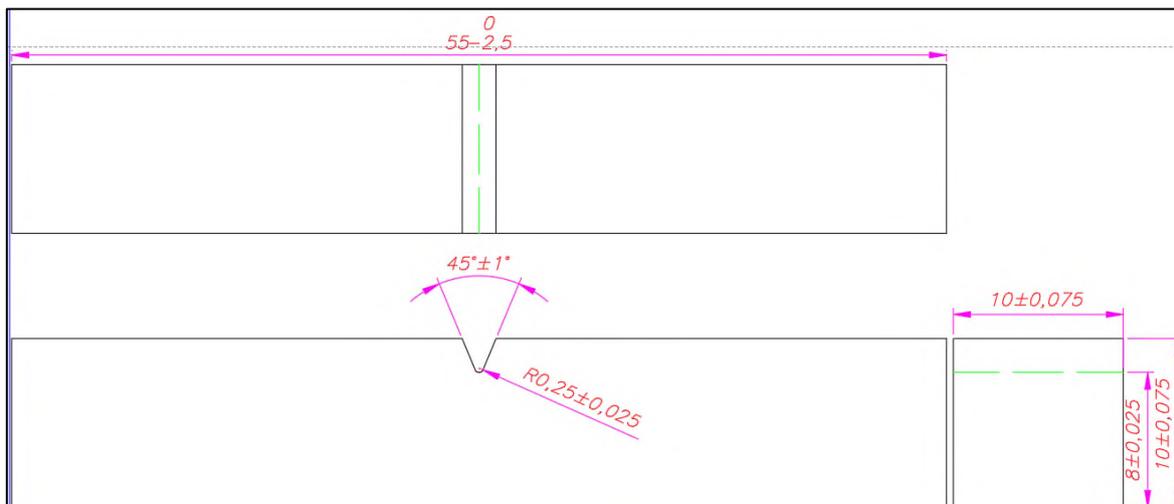
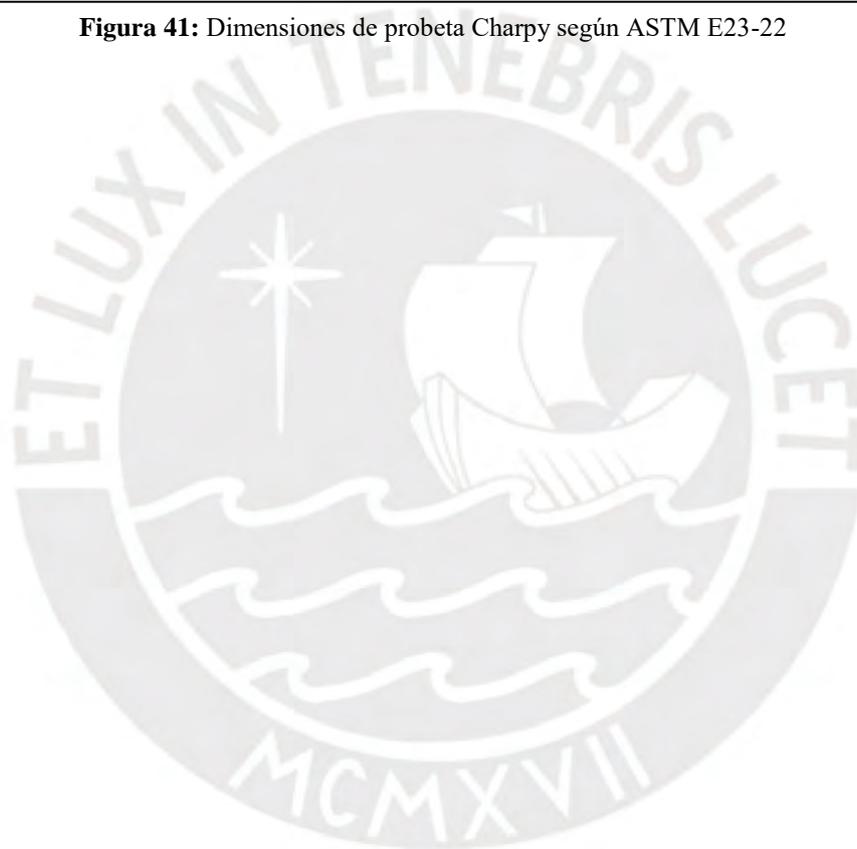


Figura 41: Dimensiones de probeta Charpy según ASTM E23-22



3. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Recopilación de información previa

Los componentes a los cuales se les realizó el análisis de falla son dos orejas fracturadas con un peso aproximado de 50 kg cada una, mostradas en la Figura 42.



Figura 42: Vista general de las orejas A y B

Estas orejas se encontraban en la parte posterior del *stick* de una excavadora hidráulica, la cual tenía una configuración de brazo *front shovel*, como se ve en la Figura 43.

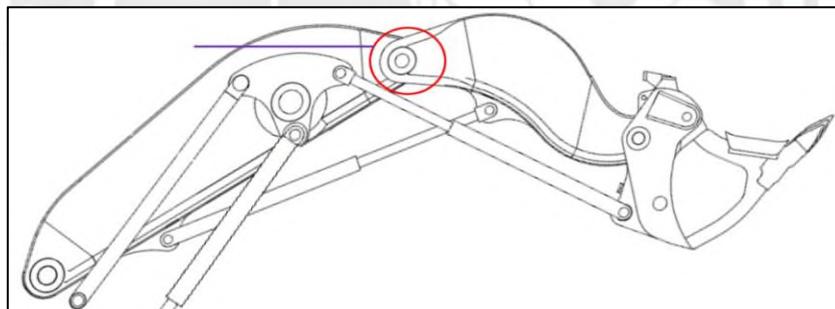


Figura 43: Articulación del *stick* con el boom

La ubicación de la rotura de las orejas en el *stick* se muestra en la Figura 44 y en la Figura 45 se muestra el *stick* fracturado. Las orejas fueron arbitrariamente denominadas como oreja A y oreja B para la realización del presente Análisis de Fallas.

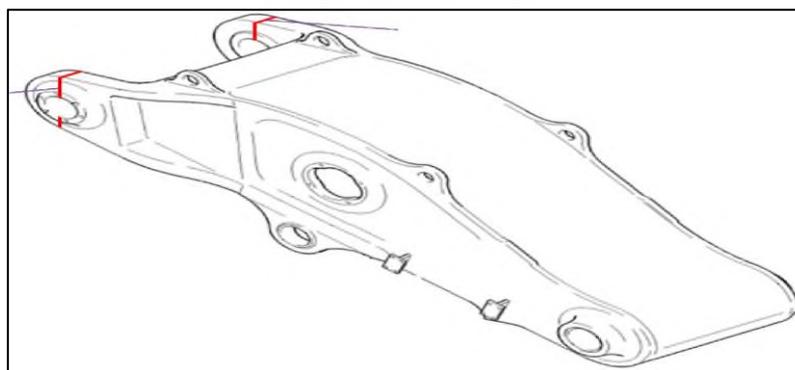


Figura 44: Localización de la fractura en el *stick*



Figura 45: Vista posterior del *stick* fracturado

El componente al cual pertenecían las orejas tenía un tiempo de servicio de aproximadamente 11000 horas de trabajo, trabajaba en un rango de temperaturas entre 5 °C y 30 °C y era utilizado para cargar material concentrado de oro hacia camiones mineros.

Según la empresa que solicitó el servicio del análisis de falla, este componente había sido sometido a una reparación a los alojamientos de bocinas en Mayo del 2020 (no se especificó si había sido una reconstrucción y barrenado de los alojamientos debido a una pérdida del ajuste entre el alojamiento y la bocina o fue una reparación por presencia de fisuras en los alojamientos), dos años y cinco meses previos a la realización de este análisis de falla.

La fractura de las orejas se dio en operación, mientras el operador giraba el chasis inferior de la excavadora utilizando el *bucket* como punto de apoyo para poder realizar la carga de mineral. En la Figura 46 se muestra la excavadora en campo, momentos posteriores a la rotura del *stick*.

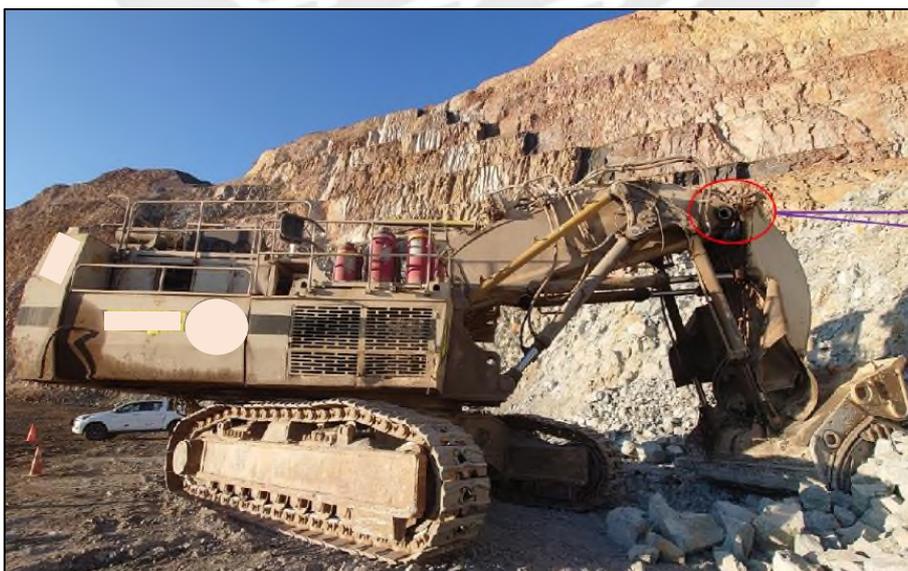


Figura 46: Excavadora hidráulica en el momento de la falla

3.2. Inspección visual

Como primer paso de la inspección visual, se realizó un control dimensional a los segmentos de las orejas fracturadas A y B. Adicionalmente, se examinaron ambas orejas con la intención de buscar indicios de la reparación efectuada.

3.2.1. Inspección visual de la oreja A

La oreja A tenía unas dimensiones generales de 515 mm de longitud, 174 mm de ancho y 140 mm de espesor. Ver Figura 47

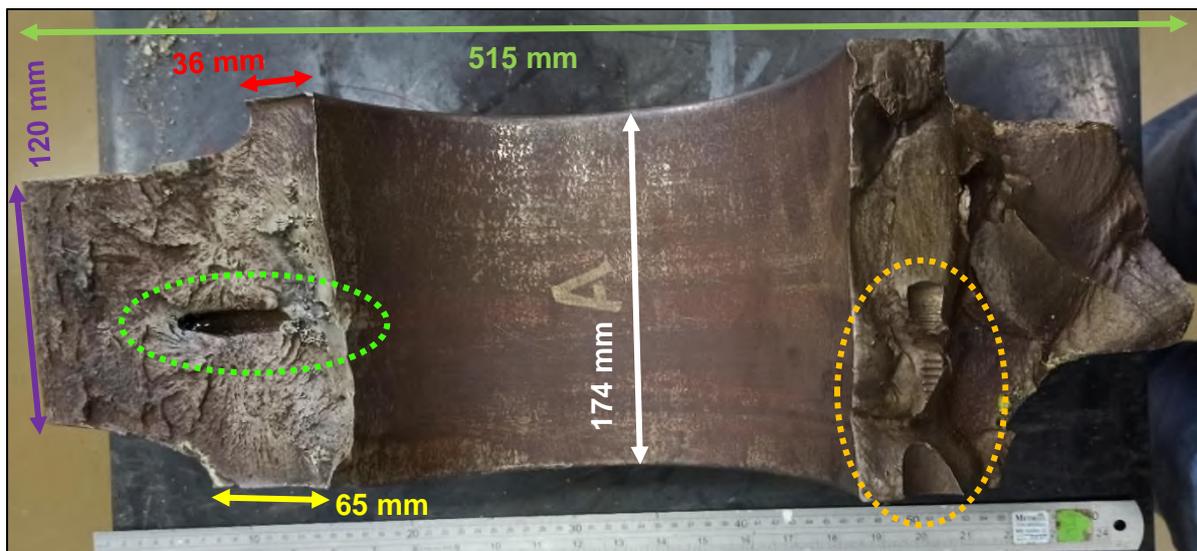


Figura 47: Dimensionamiento general de la oreja A

La oreja presentaba en su cara lateral interna un cambio de sección brusco (140 mm a 36 mm) mientras que la cara lateral externa presentaba un cambio de sección más suave (140 mm a 65 mm). Esto puede verse en las Figuras 48 y 49. Asimismo, en el lateral externo se observó la presencia de un agujero con un diámetro de 31 mm, dentro del cual se encontraba un pedazo de un elemento metálico. Esto es compatible con los pernos de sujeción utilizados para sujetar la cubierta que tapa la bocina y el pasador de fijación que van dentro de la oreja. Una superficie de fractura de la oreja A presentaba una zona próxima al lateral externo donde había remanentes del agujero roscado (elipse naranja en Figura 47). Se observó la presencia de un agujero en la parte media de una superficie de fractura de la oreja A, compatible con un agujero de engrase (elipse verde en Figura 47).

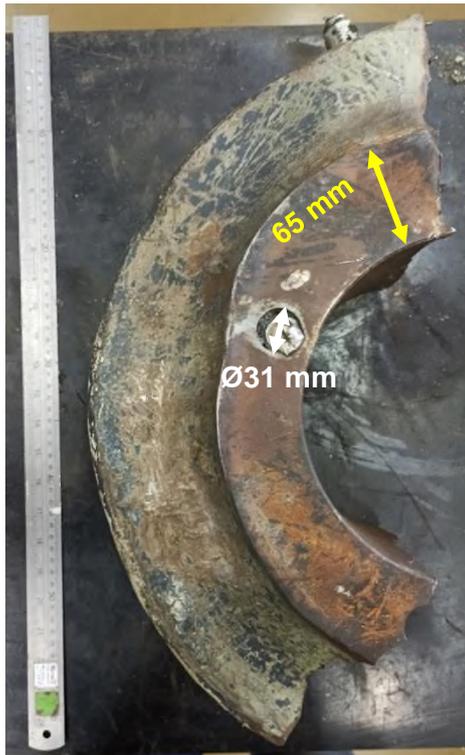


Figura 48: Dimensionamiento del lateral externo de la oreja A



Figura 49: Dimensionamiento del lateral interno de la oreja A

Se encontraron marcas puntuales de deformación plástica en una zona próxima al cambio de sección del lateral interno de la oreja, lo que se muestra en la Figura 50. La morfología y tamaño de los puntos son compatibles con un proceso de martilleo, técnica utilizada para remover escoria depositada en un proceso de soldadura e introducir esfuerzos de compresión en componentes que han sido sometidos a procesos de soldadura.



Figura 50: Martilleo en lateral interno de oreja A

3.2.2. Inspección visual de la oreja B

La oreja B presentaba unas dimensiones generales de 485 mm de longitud, 174 mm de ancho y 142 mm de espesor. Ver Figura 51.



Figura 51: Dimensionamiento general de la oreja B

Como se observa en las Figuras 52 y 53, la oreja presentaba en su cara lateral interna un cambio de sección brusco (142 mm a 37 mm), mientras que la cara lateral externa presentaba un cambio de sección más gradual (142 mm a 69 mm). En el lateral externo también se encontró un agujero (con un diámetro de 30 mm), dentro del había restos de un perno de sujeción utilizado para sujetar la cubierta que tapa la bocina y el pasador que van dentro de la oreja. Una superficie de fractura de la oreja B presentaba restos de un agujero roscado (elipse color naranja en Figura 51). En la parte media de una superficie de fractura de la oreja B se observó un agujero, el cual era compatible con un agujero de engrase (elipse verde en Figura 51).



Figura 52: Dimensionamiento del lateral externo de la oreja B

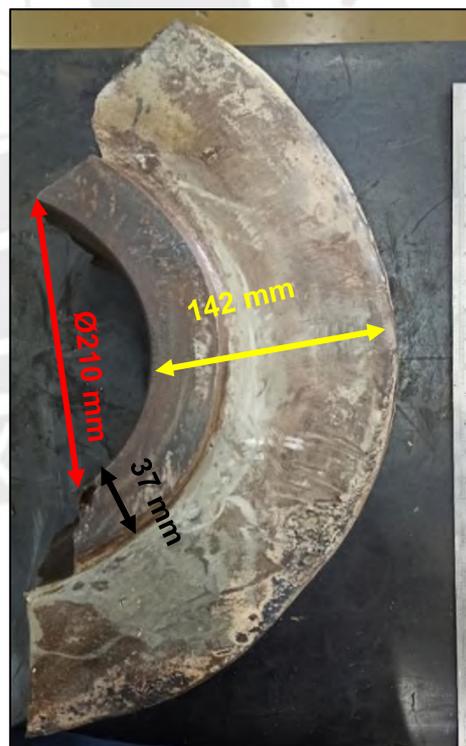


Figura 53: Dimensionamiento del lateral interno de la oreja B

Basado en la forma geométrica y dimensiones de las orejas fracturadas, se puede esperar que el principal proceso de manufactura utilizado para la fabricación de las orejas haya sido un proceso de fundición.

3.3. Análisis fractográfico

Las orejas fracturadas A y B presentaban dos superficies de fractura cada una y para facilitar su identificación, las superficies de fractura de la oreja A fueron denominadas A-1 y A-2, indicado en la Figura 54 y las superficies de fractura de la oreja B fueron identificadas como B-1 y B-2, como se ve en la Figura 55.



Figura 54: Identificación de las superficies de fractura de la oreja A



Figura 55: Identificación de superficies de fractura de la oreja fracturada B

3.3.1. Análisis fractográfico de la superficie A-1

La superficie de fractura A-1, mostrada en la Figura 56, presentaba una falla compatible con fatiga mecánica. La fatiga se originó en una hendidura ubicada en la parte inferior de la superficie de fractura y en la superficie del alojamiento de la bocina, evidenciado por las marcas de playa que se propagaban de esa hendidura (contorno amarillo en Figura 57). La zona de la oreja A donde estaba contenida la superficie A-1 estuvo sometida a altos esfuerzos nominales al momento de la fractura, indicada por el área de rotura final de tipo frágil que abarcaba un 80% de la superficie de fractura.



Figura 56: Superficie de fractura A-1

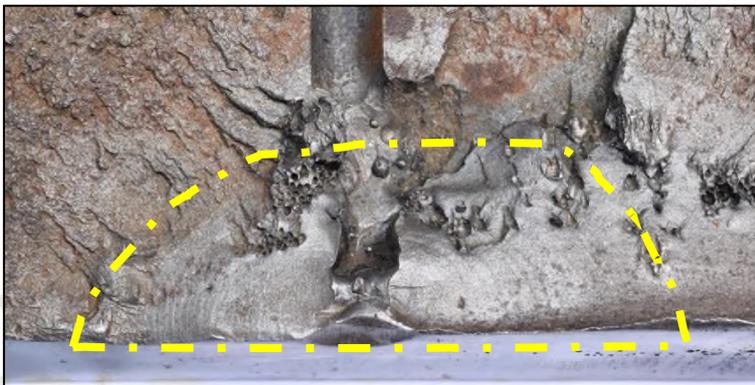


Figura 57: Marcas de playa en la superficie de fractura

Adicionalmente, se encontraron discontinuidades compatibles con porosidades agrupadas en la parte inferior (ver Figura 58) y en la parte superior, cercanas al lateral externo de la superficie de fractura (ver Figura 59). Esto indica que se realizaron procesos de aporte de material mediante soldadura a distintas partes de la oreja A.

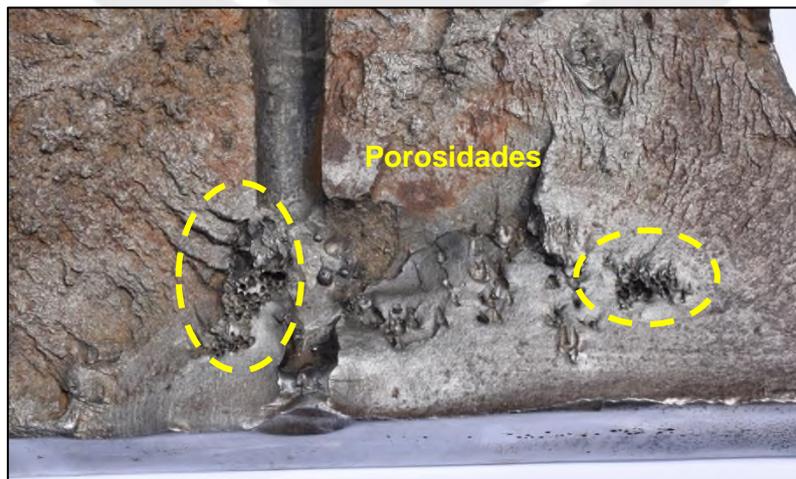


Figura 58: Presencia de porosidades en la zona inferior superficie de fractura A-1

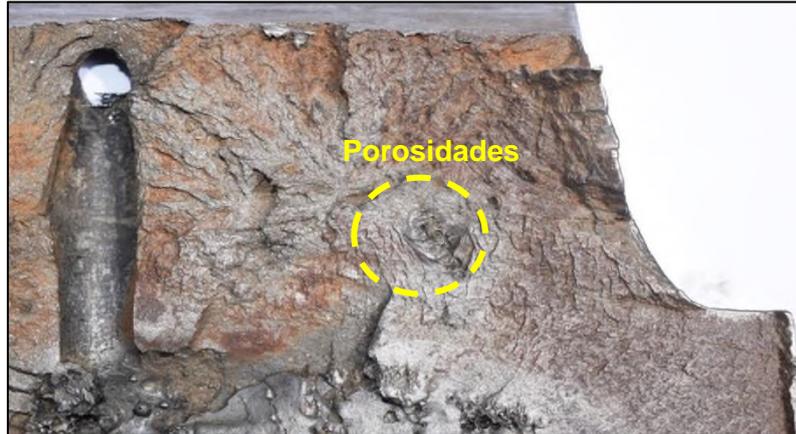


Figura 59: Presencia de porosidades en la parte superior de la superficie de fractura

3.3.2. Análisis fractográfico de superficie de fractura A-2

En la superficie de fractura A-2, mostrada en la Figura 60, habían marcas de playa en distintas direcciones de propagación, lo cual es compatible con un mecanismo de falla por fatiga con distintos orígenes de fisuración. La zona de la oreja A a la cual pertenecía la superficie de fractura A-2 se encontraba a bajos esfuerzos nominales al momento de la rotura, evidenciado por la casi nula presencia de una zona de rotura final.



Figura 60: Superficie de fractura A-2

Se observaron que algunas marcas de playa tenían su origen en discontinuidades presentes en la superficie de fractura; como en un punto que se ubicaba arriba de la superficie del alojamiento de bocina (ver Figura 61) o en la zona superior de la superficie de fractura (ver Figura 62).

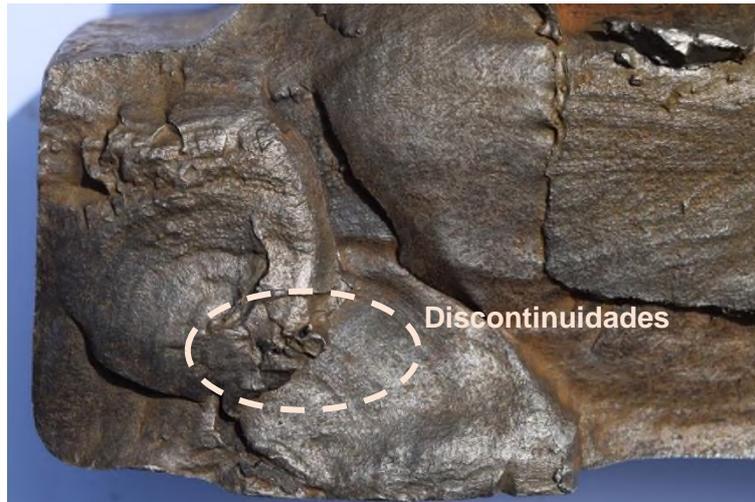


Figura 61: Discontinuidades en orígenes de marcas de playa en la superficie de fractura A-2



Figura 62: Discontinuidades en la zona superior de la superficie A-2

Se encontraron discontinuidades compatibles con porosidades en una zona cercana a la superficie del alojamiento de bocina y a los restos de un agujero roscado (ver Figura 63).

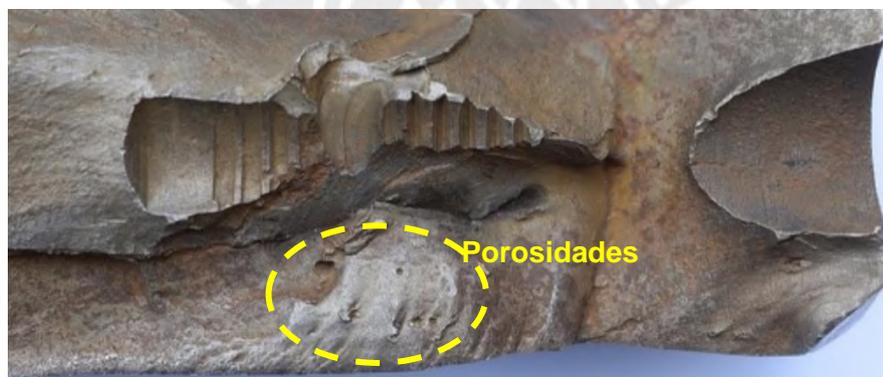


Figura 63: Discontinuidades tipo porosidades en la superficie de fractura A-2

3.3.3. Análisis fractográfico de superficie de fractura B-1

En la Figura 64 se observa la superficie de fractura B-1. Esta presentaba una falla compatible con fatiga mecánica, evidenciado por las marcas de playa presentes en la superficie y un área de rotura final de tipo frágil. La superficie presentaba marcas de playa que se originaban en dos puntos y que tenían distintas direcciones de propagación.



Figura 64: Superficie de fractura B-1

Un origen de las marcas de playa se daba en una discontinuidad que se encontraba en la parte inferior de la superficie de fractura en una zona próxima a la superficie del alojamiento de bocina (ver Figura 65) y el segundo origen era el cambio de sección del lateral interno de la superficie (ver Figura 66).



Figura 65: Origen de marcas de playa en una discontinuidad en la superficie B-1



Figura 66: Origen de marcas de playa en cambio sección agudo de la superficie B-1

De las marcas de playa observadas, las marcas de playa que se propagaban de la discontinuidad tenían una apariencia brillante y lisa comparadas con las marcas de playa que tenían su origen en el cambio de sección, los cuales tenían una apariencia más rugosa. Los esfuerzos nominales a los cuales estaba sometida la zona de la oreja B que contenía a la superficie de fractura B-1 eran de magnitud intermedia, evidenciados por la igualdad de área entre zona fatigada y zona de rotura final por sobrecarga.

Adicionalmente, se encontraron discontinuidades ubicadas a la izquierda de la discontinuidad de donde se originaban marcas de playa (ver Figura 67). Finalmente, la zona de rotura final tipo frágil se originaba en la zona fatigada originada en el cambio de sección, indicada por las marcas radiales que apuntaban a esa zona fatigada.



Figura 67: Discontinuidades próximas al origen de marcas de playa de la superficie B-1

3.3.4. Análisis fractográfico de superficie de fractura B-2

La superficie de fractura B-2, la cual se puede apreciar en la Figura 68, presentaba una falla compatible con fatiga mecánica, evidenciado la presencia de marcas de playa y áreas de rotura final de tipo frágil.



Figura 68: Superficie de fractura B-2

La superficie presentaba orígenes de fisuración en una zona que contenía discontinuidades de color negro compatibles con inclusiones de escoria, indicado por las marcas de playa que se propagaban de estas inclusiones (ver Figuras 69 y 70). Las marcas de playa que se originaban en estas inclusiones tenían una apariencia brillante y una textura lisa, mientras que las marcas de playas en la zona superior de la superficie tenían una tonalidad más opaca y una textura más rugosa, evidenciando que la fisura nucleó en las inclusiones de escoria (zona inferior de la superficie B-2) y fue propagándose hacia la parte superior de la superficie. Los esfuerzos nominales a los cuales estaba sometida la zona de la oreja B que contenía la superficie de fractura B-2 eran nominalmente bajos, demostrado por la pequeña área de superficie de rotura final que se encontraba en la parte derecha de la superficie de fractura.



Figura 69: Origen de marcas de playa en la superficie B-2



Figura 70: Inclusiones de escoria en el lugar de origen de las marcas de playa en la superficie B-2

Adicionalmente, se encontraron porosidades agrupadas en la superficie de fractura (ver Figura 71) y una zona con posibles salpicaduras dentro del agujero de engrase que había en la superficie B-2 (ver Figura 72). Esto evidencia que la oreja B fue sometida a procesos de aporte de material mediante soldadura.

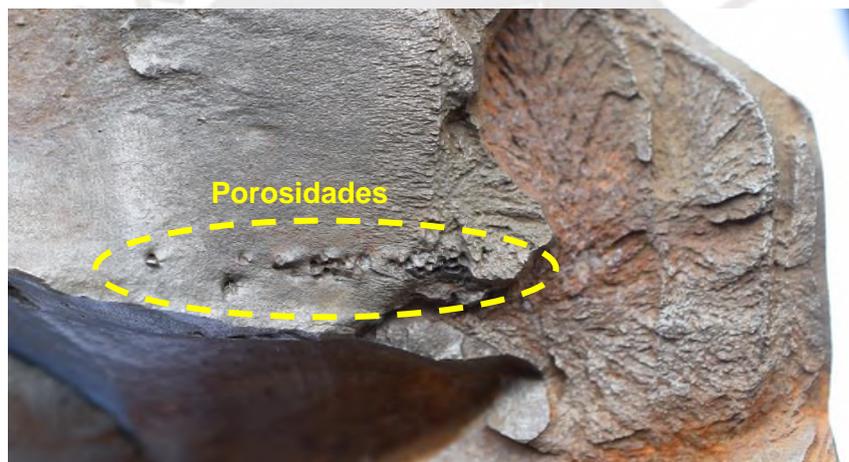


Figura 71: Presencia de porosidades agrupadas en la superficie B-2



Figura 72: Presencia de una posible salpicadura dentro del agujero de la superficie B-2

3.4. Inspección por partículas magnéticas

3.4.1. Inspección por partículas magnéticas a la oreja A

Se encontró la presencia de tres fisuras abiertas a la superficie en la oreja fracturada A. Las fisuras fueron identificadas como Fisuras 1-A, 2-A y 3-A. Las fisuras 1-A y 2-A tenían una longitud aproximada de 91 mm y de 11 mm, respectivamente. Ambas fisuras tenían su origen en la superficie de fractura A-2 y se propagaban a lo largo del lateral interno de la oreja (ver Figura 73).

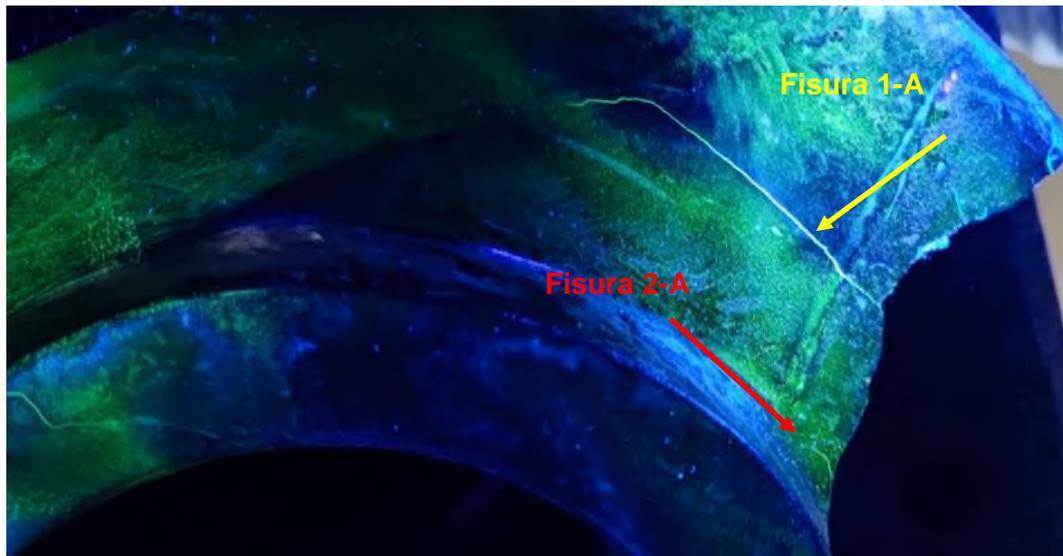


Figura 73: Ubicación de las fisuras 1-A y 2-A

La fisura 3-A tenía una longitud aproximada de 109 mm y se propagaba a lo largo del redondeo del lateral interno, llegando a su culminación en el borde de la oreja (ver Figura 74).

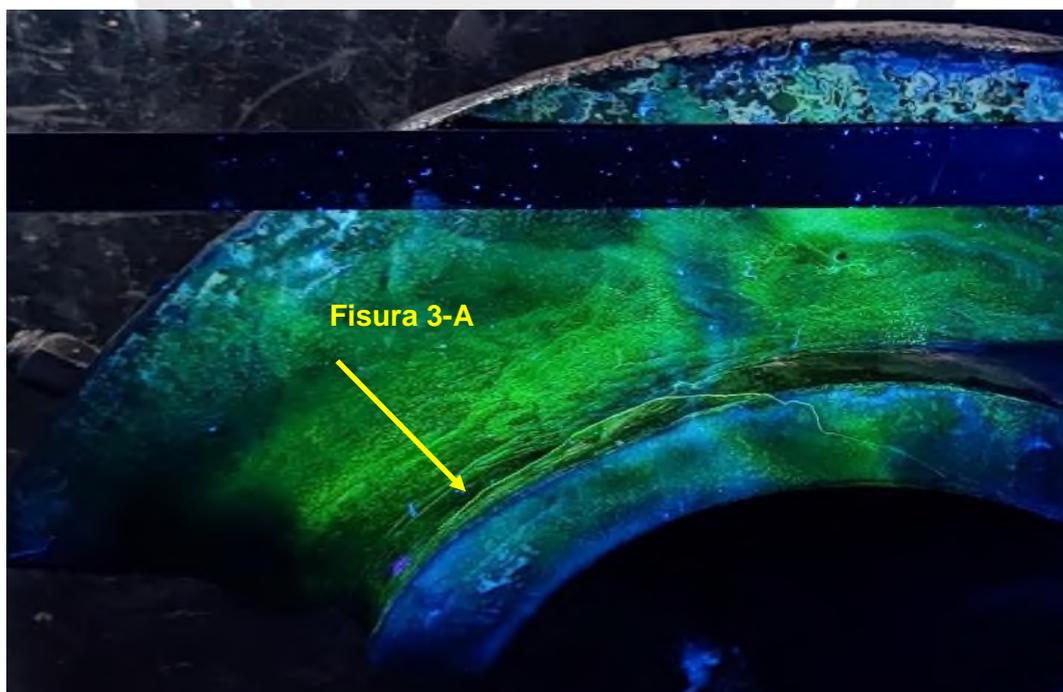


Figura 74: Ubicación de la fisura 3-A

3.4.2. Inspección por partículas magnéticas a la oreja B

En la oreja B se encontró la presencia de tres fisuras abiertas a la superficie. Las fisuras fueron identificadas como Fisuras 1-B, 2-B y 3-B. La fisura 1-B (ver Figura 75) se originaba en la superficie de fractura B-1 y tenía una longitud aproximada de 108 mm. Esta fisura corresponde a la fisura que se originaba en la discontinuidad de la superficie B-1 (mostrada en la Figura 65), la cual se propagó inicialmente en el plano de esa superficie y posteriormente se propagó hacia el interior de la oreja B.



Figura 75: Ubicación de la fisura 1-B

La fisura 2-B tenía una longitud aproximada de 184 mm y se originaba en la superficie de fractura B-2, propagándose por el redondeo del lateral interno, culminando en ese mismo redondeo. La fisura 3-B tenía una longitud aproximada de 23 mm y se originaba en el redondeo del lateral interno, propagándose hasta el borde de la oreja (ver Figura 76).

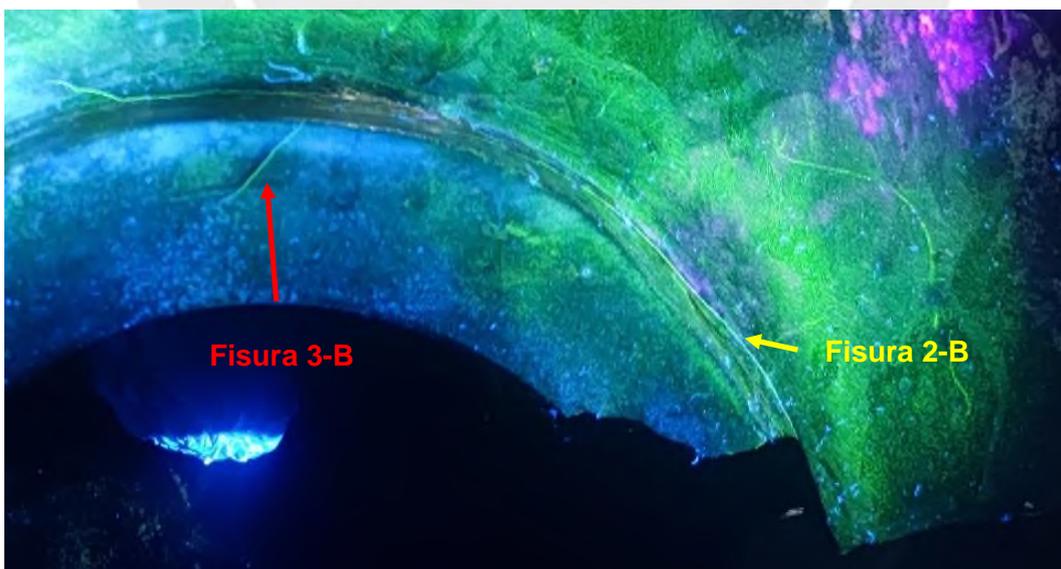


Figura 76: Ubicación de las fisuras 2-B y 3-B

En las inspecciones por partículas magnéticas a ambas orejas se encontraron fisuras que se propagaban en direcciones aproximadamente perpendiculares a los planos de las superficies de fractura de las orejas. Esto indica que las direcciones de los esfuerzos de tracción a los cuales

estaban sometidas las orejas cambiaban de dirección a través del tiempo, lo cual es un comportamiento normal en componentes de movimiento de tierras. Esto es posiblemente causado por las variaciones de ángulo, posición y por los periodos de carga y descarga de material que ocurren en el *stick* al cual pertenecían las orejas.

3.5. Inspección por radiografía industrial

La inspección radiográfica fue realizada a la oreja B, específicamente a una sección que contenía a la superficie de fractura B-1. Se encontró una aglomeración de puntos negros en la parte detrás de la discontinuidad de donde se nucleaban marcas de playa en la superficie B-1 (ver Figura 77). Estos puntos negros vistos en la película radiográfica eran compatibles con discontinuidades tipo porosidades agrupadas. Esto indica que la zona donde se encontró la discontinuidad de donde se propagaban las marcas de playa de la superficie B-1 había sido sometido un proceso de soldadura.

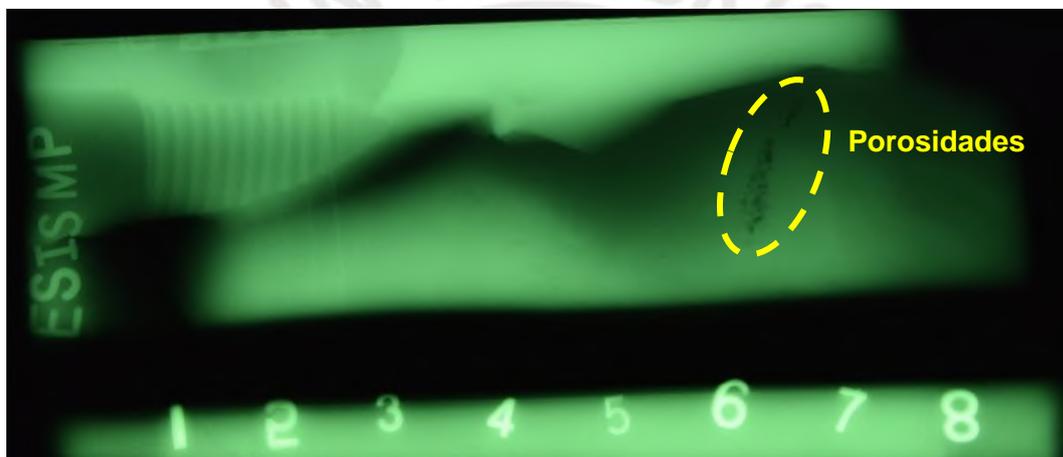


Figura 77: Registro radiográfico de la superficie B-1

3.6. Análisis macrográfico

Para hallar evidencia que indicara la extensión de la reparación por soldadura a los alojamientos de las bocinas y cualquier reparación adicional que hubiera sido realizada a las orejas, se realizaron análisis macrográficos a secciones de las orejas que contenían a las superficies de fractura y a una rebanada alejada de cualquier superficie de fractura.

3.6.1. Análisis macrográfico a sección que contenía la superficie de fractura A-1

En la parte posterior de la sección extraída que contenía la superficie de fractura A-1, se encontró evidencia de una reparación por soldadura con múltiples pases, la cual estaba ubicada en el redondeo del lateral interno de la oreja. Asimismo, se encontró la presencia de metal de soldadura en la esquina inferior de la sección, lo cual confirmaba que la superficie del alojamiento de bocina de la oreja A había sido sometida a una reparación (ver Figura 78).

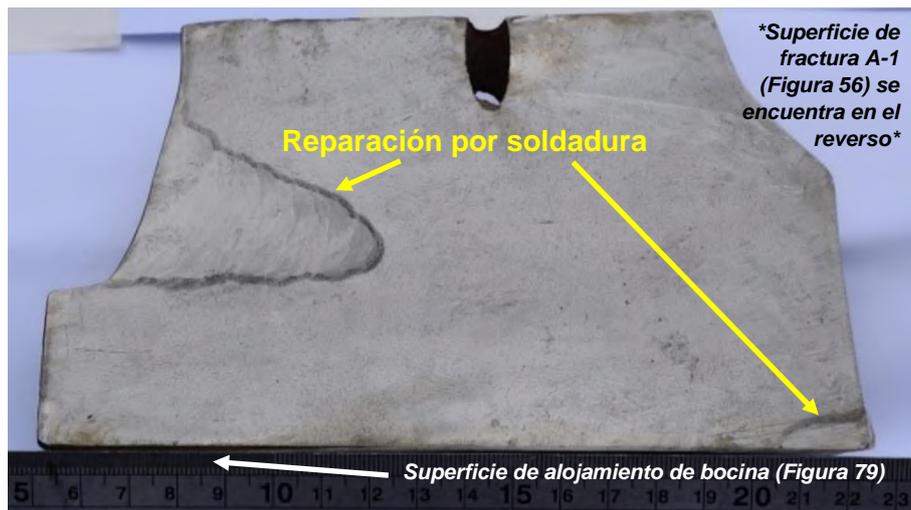


Figura 78: Macrografía de parte posterior de la superficie A-1

Realizando un análisis macrográfico en la superficie del alojamiento de la bocina, se observó la presencia irregular de metal de soldadura y de discontinuidades tipo porosidades agrupadas abiertas a la superficie (ver Figura 79). Se notó que el plano de rotura de la superficie de fractura A-1 se encontraba dentro de la zona del alojamiento de la bocina que había sido reparada mediante soldadura.



Figura 79: Macrografía de zona del alojamiento de bocina que contenía la superficie A-1

Finalmente, se cortó por la mitad a la sección que contenía la superficie de fractura A-1 y se le realizó una macrografía. En esta se encontró que la hendidura de la cual se originaba la fisura que originó la falla de la superficie A-1 (mostrada en la Figura 57) estaba conformada en su totalidad por metal de soldadura (ver Figura 80).



Figura 80: Macrografía realizada a la sección cortada por la mitad de la superficie A-1

3.6.2. Análisis macrográfico a sección que contenía la superficie de fractura A-2

En la parte posterior de la sección extraída que contenía la parte inferior de la superficie de fractura A-2, se encontró evidencia de una reparación por soldadura con múltiples pases ubicada en el redondeo del lateral interno de la oreja. Asimismo, se encontró la presencia de metal de soldadura en la esquina inferior de la sección, correspondiente a una reparación efectuada en la superficie del alojamiento de bocina (ver Figura 81).



Figura 81: Macrografía de parte posterior de la superficie de fractura A-2

Realizando un análisis macrográfico en la superficie del alojamiento de bocina contenido dentro de la sección, se confirmó que se había realizado una reparación por soldadura esta zona, evidenciado por la presencia de metal de soldadura (ver Figura 82). Asimismo, se observó que el plano de rotura de la superficie de fractura A-2 se encontraba dentro de la zona del alojamiento de bocina que había sido reparada.



Figura 82: Macrografía de zona del alojamiento de bocina que contenía la superficie A-2

Finalmente, se realizó una macrografía a una muestra en sentido transversal de una zona de la superficie de fractura A-2 que contenía el origen de algunas marcas de playa (ver Figura 83).



Figura 83: Sección transversal extraída de la superficie A-2

Se observaron fisuras que se propagaban hacia el interior del material. Estas fisuras nucleaban de los mismos puntos de donde se originaban las marcas de playa en la superficie A-2. Además, se encontraron porosidades próximas al punto de origen de estas fisuras. Toda la sección que había sido extraída estaba conformada por metal de soldadura (ver Figura 84).

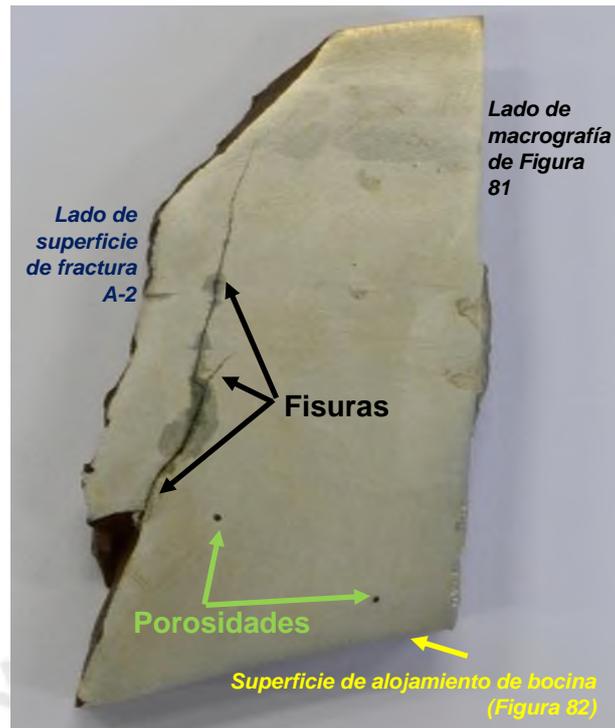


Figura 84: Sección transversal que contenía orígenes de marcas de playas de la superficie A-2

3.6.3. Análisis macrográfico a sección que contiene la superficie de fractura B-1

En la parte posterior de la sección extraída que contenía la parte inferior de la superficie de fractura B-1, se encontró evidencia de una reparación por soldadura con múltiples pases ubicada en la zona del redondeo del lateral interno de la oreja, la cual intersecaba con soldadura de reparación efectuada a la superficie del alojamiento de bocina. Asimismo, se encontró presencia de metal de soldadura en la esquina inferior opuesta al lateral interno, lo cual correspondía a la reparación del alojamiento de bocina de la oreja B (ver Figura 85).

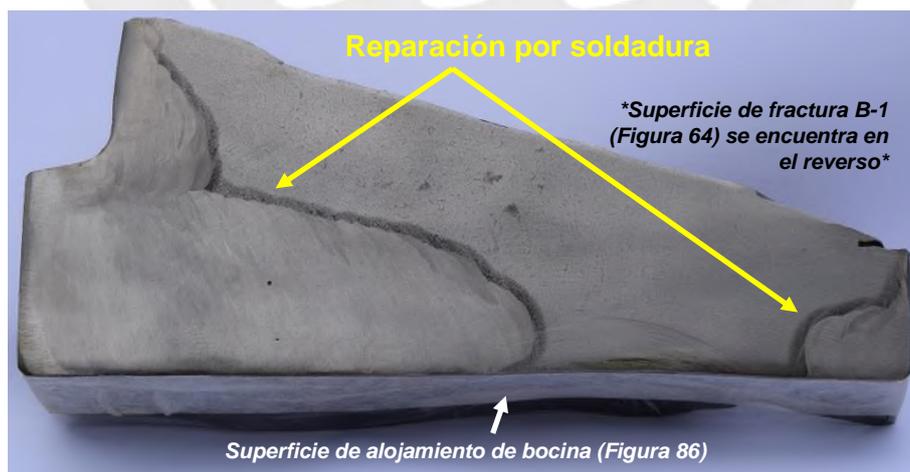


Figura 85: Macrografía de parte posterior de la superficie B-1

En la superficie del alojamiento de bocina se observó la presencia de metal de soldadura en ambos lados de la superficie. Adicionalmente, se encontraron discontinuidades compatibles con inclusiones de escoria dentro del metal de soldadura (ver Figura 86).



Figura 86: Macrografía de zona del alojamiento de bocina que contenía la superficie B-1

Finalmente, se realizó una macrografía a una muestra que contenía a un origen de las marcas de playa de la superficie B-1. La muestra fue extraída en sentido perpendicular a la superficie de fractura (ver Figura 87).



Figura 87: Sección transversal extraída de la superficie B-1

Se observaron discontinuidades compatibles con porosidades agrupadas dentro del metal de soldadura de la reparación (ver Figura 88), siendo las mismas que se observaron durante la inspección radiográfica (mostradas en la Figura 77).

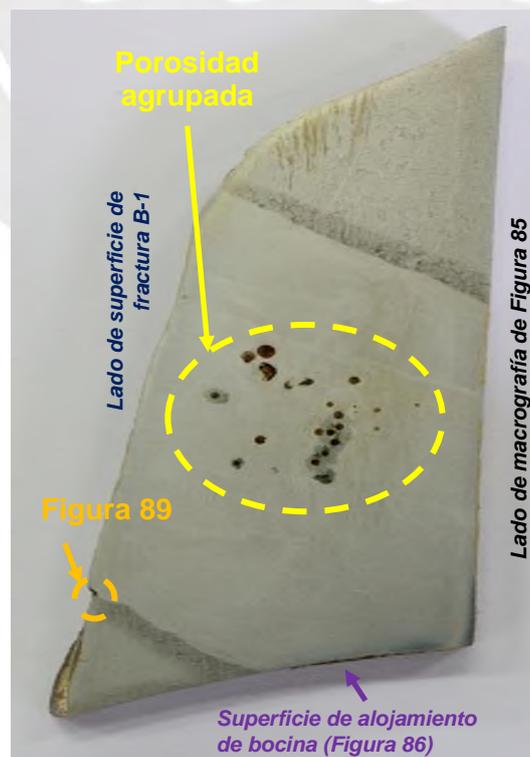


Figura 88: Sección transversal que contenía orígenes de marca de playa de la superficie B-1

También se descubrió que la discontinuidad de donde se propagaban las marcas de playa de la superficie B-1 se ubicaba en la zona de transición entre el metal de soldadura y la zona afectada por el calor del cordón de soldadura (ver Figura 89). Esta discontinuidad era compatible con una discontinuidad tipo falta de fusión.



Figura 89: Discontinuidad que originó fisuración en la superficie B-1, 16X

3.6.4. Análisis macrográfico a sección que contiene la superficie de fractura B-2

Se encontró evidencia de una reparación mediante soldadura en el lateral interno de la oreja B-2 (ver Figura 90).



Figura 90: Lateral interno de la sección que contenía la superficie de la fractura B-2

Adicionalmente, el análisis macrográfico a la superficie del alojamiento de bocina presentaba evidencia de reparación por soldadura en los lados del lateral interno y externo (ver Figura 91).



Figura 91: Macrografía a la zona del alojamiento de bocina que contenía la superficie B-2

La reparación de esa zona confirmaría que las inclusiones de escoria que fueron encontradas en el análisis fractográfico (mostradas en la Figura 70), las cuales generaron las fisuras que originaron la falla de la superficie B-2 fueron introducidas durante el proceso de reparación por soldadura.

3.6.5. Análisis macrográfico a una rebanada extraída de la oreja A

Con la intención de ver la extensión de la reparación por soldadura en la oreja A, se extrajo una rebanada de aproximadamente media pulgada de espesor en una zona alejada a la superficie de fractura A-2 (ver zona de extracción en Figura 92).



Figura 92: Rebanada extraída de oreja fracturada A para realizar el análisis macrográfico

Se encontró la presencia de dos zonas donde hubo aporte de material a través de un proceso de soldadura. El primero correspondía a la reparación por soldadura que se había realizado al lateral interno de la oreja A, lo cual deja en evidencia que esta reparación se realizó a lo largo de la mayoría de la oreja y no solamente en los planos de fractura. Dentro de este cordón se encontró una discontinuidad compatible con una porosidad. La segunda zona correspondía a metal refundido localizado, ubicado en el redondeo del lateral externo (Figura 93). Esta zona presentaba un tamaño pequeño, por cual no se puede afirmar si esta correspondía a un cordón de reparación, a un golpe de arco o que en esta zona se haya hecho un cordón de fijación para los posicionadores de la barra utilizada para el barrenado (procedimiento mostrado en la Figura 10).



Figura 93: Análisis macrográfico de la rebanada extraída de la oreja A

3.7. Análisis químico

El análisis químico fue realizado a la rebanada extraída de la oreja A (mostrada en la Figura 93). El análisis químico fue realizado al material base y metal de soldadura. Los resultados de estos análisis se muestran en la Tabla 1 y Tabla 2.

El material con el que fueron fabricadas las orejas fracturadas corresponde a un acero de bajo carbono y con un contenido de manganeso mayor a 1%, compatible con un acero para fundiciones ASTM A27 Grado 70-40 [43].

Utilizando como referencia la fórmula establecida por el Instituto Internacional de Soldadura (IIW) [44], se procedió a determinar el Carbono Equivalente (CE_{IIW}) del material que conformaban las orejas, con el fin de poder determinar la facilidad de generar microestructuras duras en las zonas afectadas por el calor de los cordones de soldadura depositados en el material.

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

$$CE_{IIW} = 0.42$$

En este análisis, se obtuvo un Carbono Equivalente de 0.42, denotando que el material tiene mediana templabilidad. El tamaño de las orejas, sumado con este valor de carbono equivalente y el valor de carbono indican que la formación de microestructuras duras en la zona afectada por el calor es una posibilidad si no se toman precauciones al momento de soldar.

Tabla 1: Composición química de la oreja A y un acero ASTM A27 grado 70-40

Elemento	Muestra Oreja A	ASTM A27 Grado 70-40
	Contenido (%)	Contenido (%) ^(a)
C	0.15	0.25
Si	0.48	0.80
Mn	1.39	1.20 ^(b)
P	0.012	0.035
S	0.005	0.035
Cr	0.094	-
Mo	0.046	-
Ni	0.102	-
Cu	0.056	-
V	0.003	-

(a): Valores máximos

(b): Por cada reducción de 0.01% de carbono por debajo del máximo especificado, un incremento de 0.04 % de manganeso por encima del máximo especificado será permitido hasta un 1.40 % para el grado 70-40.

El metal de soldadura es compatible con un acero de bajo carbono y un contenido de manganeso mayor a 1%. Esto es compatible con un material de aporte AWS A5.1 E7018, con un ligero exceso de Manganeso, en el caso de haberse usado un proceso SMAW para la reparación por soldadura o con un material de aporte AWS A5.20 E71T en el caso de haberse utilizado un proceso FCAW para la reparación por soldadura [45]. Basado en los resultados del análisis químico del metal de soldadura, se espera encontrar una microestructura predominantemente ferrítica en las zonas donde haya presencia de metal de soldadura.

Tabla 2: Composición química del metal de soldadura y materiales de aporte compatibles

Elemento	Metal de soldadura Contenido (%)	Electrodo AWS A5.1 E7018 Contenido (%) ^(a)	Alambre AWS A5.20 E71T Contenido (%) ^(a)
C	0.047	0.15	0.30
Si	0.482	0.75	0.60
Mn	1.686	1.60	1.75
P	0.016	0.035	0.03
S	0.002	0.035	0.03
Cr	0.022	0.20	0.20
Mo	0.007	0.30	0.30
Ni	0.011	0.30	0.50
Cu	0.013	---	0.35
V	0.014	0.08	0.08

(a): Valores máximos

3.8. Análisis metalográfico

3.8.1. Caracterización del material base de las orejas

Se extrajo una muestra (de una zona alejada a los orígenes de la falla y sin presencia de cordones de soldadura) perteneciente a la oreja B. La oreja B estaba conformada por granos de ferrita fina con morfología equiaxial y acicular y por granos de perlita. La microestructura del componente era compatible con un material que había sido sometido a un tratamiento térmico de normalizado (ver Figura 94).

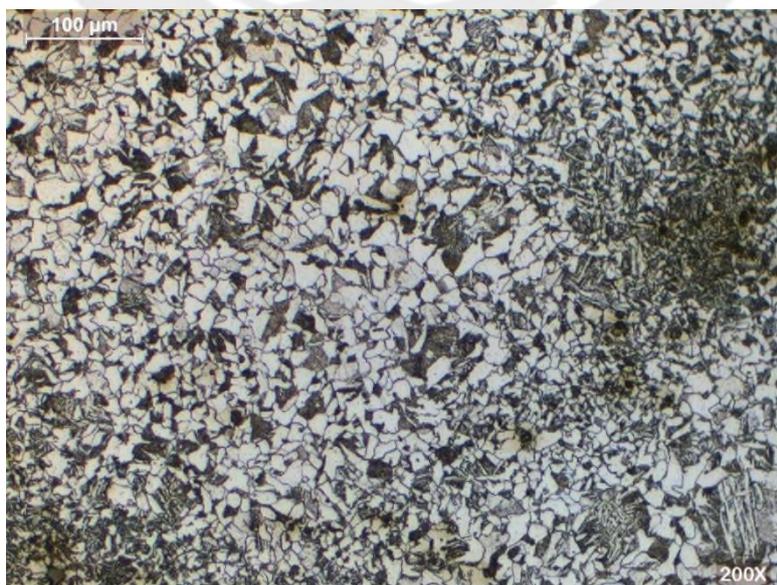


Figura 94: Microestructura del material base de las orejas, 200X, Nital al 2%

Adicionalmente, presentaba segregaciones dendríticas (ver Figura 95), microestructura característica de componentes fabricados mediante fundición, confirmándose así el proceso de fabricación de las orejas.

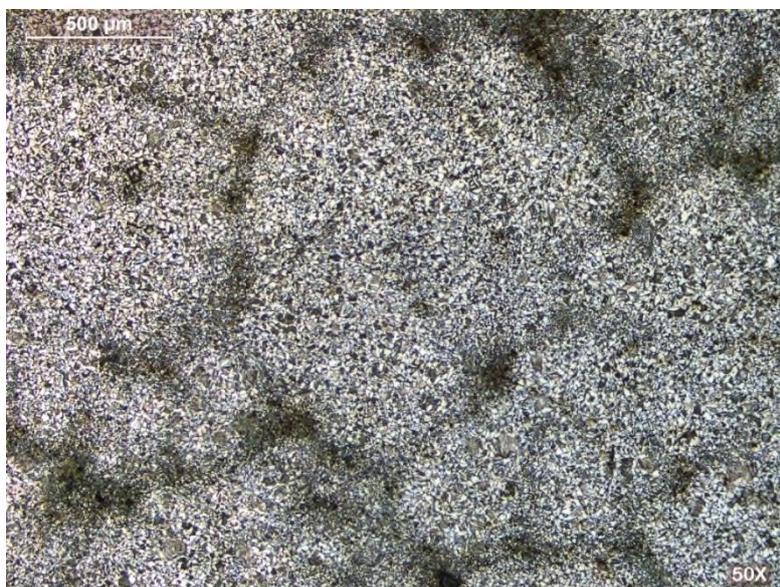


Figura 95: Microestructura del material base de las orejas, 50X, Nital al 2%

3.8.2. Análisis metalográfico del origen de falla de la superficie de fractura A-1

La hendidura de donde se originó la falla de la superficie A-1 (mostrada primero en la Figura 57 y luego en la Figura 80) estaba conformada enteramente por metal de soldadura, evidenciado por su microestructura completamente ferrítica (ver Figura 96) y por la presencia de granos columnares (Figura 97), característico de un proceso de soldadura.

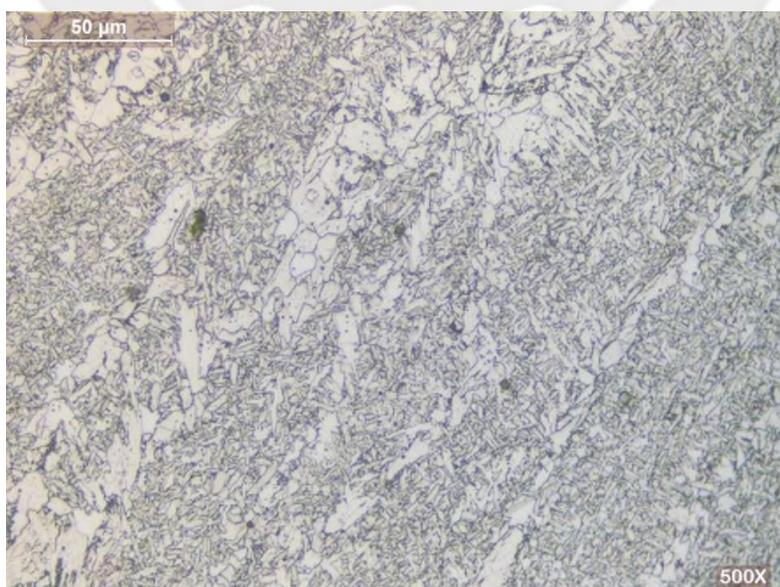


Figura 96: Ferrita en la zona de hendidura de la superficie A-1, 500X, Nital al 2%

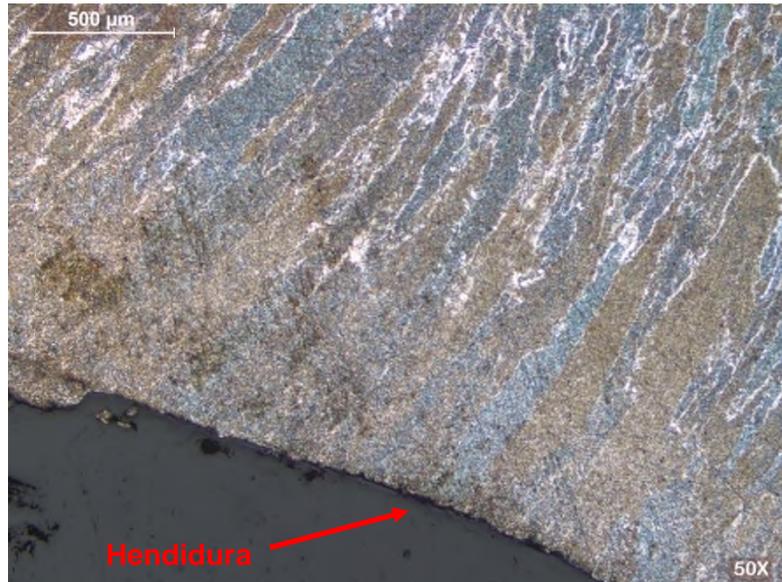


Figura 97: Granos columnares en la zona de la hendidura de la superficie A-1, 50X, Nital al 2%

Se observó una microestructura martensítica en la zona afectada por el calor de la soldadura de la hendidura, indicando así un enfriamiento muy rápido en la soldadura realizada en esa zona (ver Figura 98), posiblemente debido a un procedimiento inadecuado de soldadura.

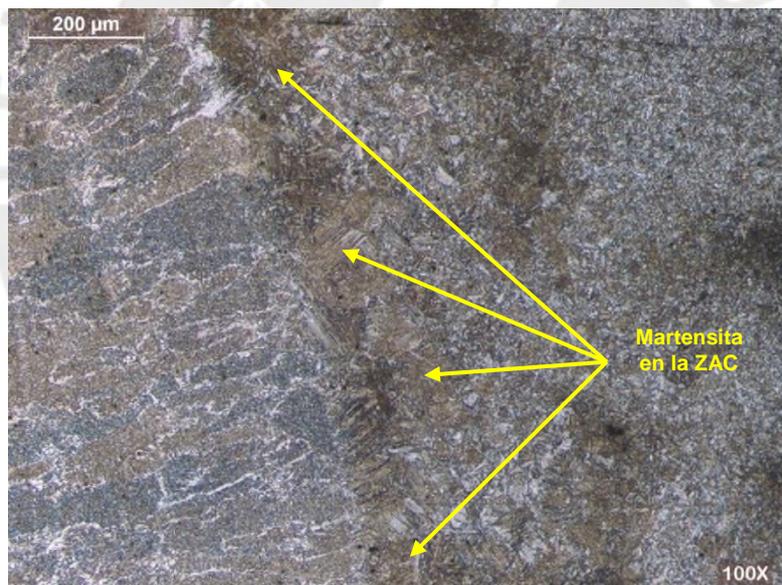


Figura 98: Martensita en ZAC del cordón de la hendidura de la superficie A-1, 100X, Nital al 2%

3.8.3. Análisis metalográfico de zona de origen de superficie de fractura B-1

Se realizó un análisis metalográfico sin y con ataque químico a la discontinuidad de donde originaban marcas de playa en la superficie B-1 (mostrada en la Figura 89).

La metalografía sin ataque químico mostró que la discontinuidad tenía una forma esquinada, haciendo que actuara como un concentrador de tensiones (ver Figura 99). De esta misma discontinuidad se nucleaba una fisura con una longitud aproximada de 0.9 mm y que se propagaba hacia el interior del material.

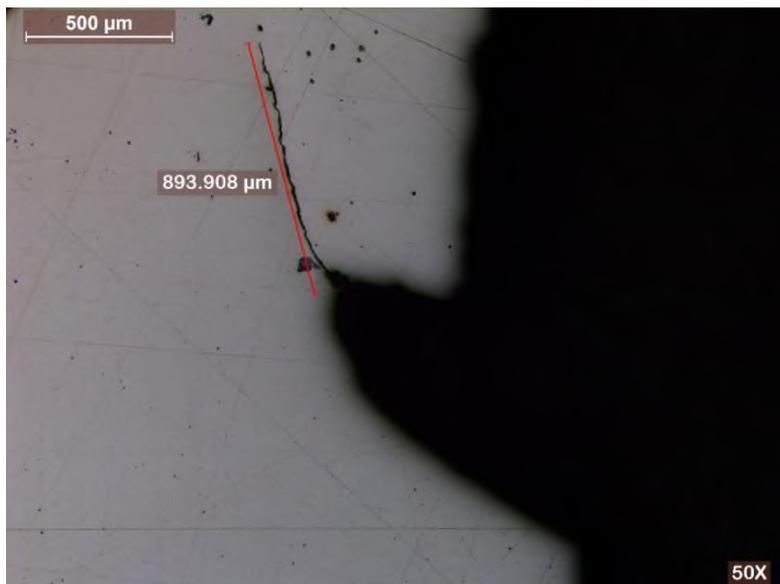


Figura 99: Entalla en origen de fisuración de la superficie B-1, 50X, sin ataque químico

La metalografía con ataque químico mostró que la discontinuidad se encontraba en la línea de fusión entre el metal de soldadura y la zona afectada por el calor, confirmando que esta discontinuidad era compatible con una falta de fusión introducida durante un proceso de reparación con soldadura (ver Figura 100).



Figura 100: Entalla en origen de fisuración de la superficie B-1, 50X, Nital al 2%

3.8.4. Análisis metalográfico de aporte localizado en rebanada de oreja A

Se analizó el aporte de metal puntual encontrado en la macrografía de la rebanada extraída de la oreja A (visto en la Figura 93). Se encontró la presencia de una microestructura martensítica en la zona afectada por el calor del metal refundido. (ver Figura 101)

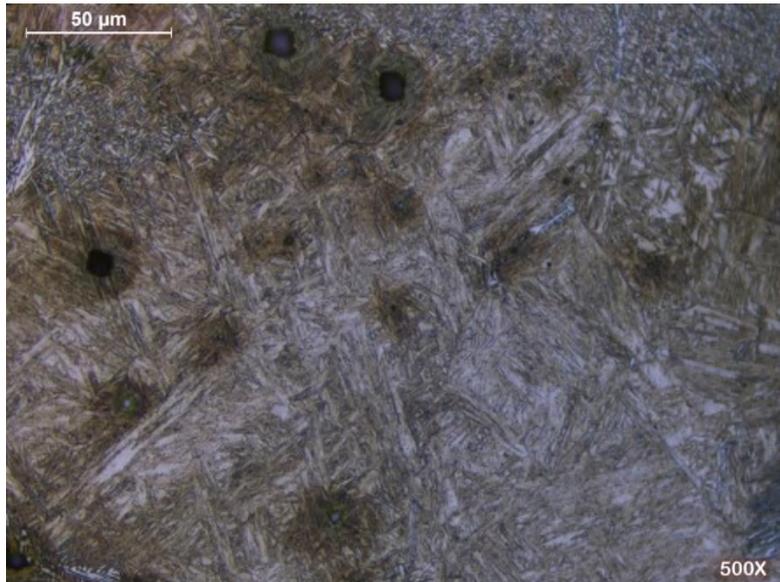


Figura 101: Martensita en la ZAC del aporte puntual en oreja A, 500X, Nital al 2%

Esto evidencia que esta zona había sido sometida a un aporte de calor muy puntual y no fue realizada siguiendo procedimientos adecuados. Adicionalmente, se encontraron inclusiones alineadas que se originaban en la zona afectada por el calor y se extendían hasta el metal base de la oreja (ver Figura 102).

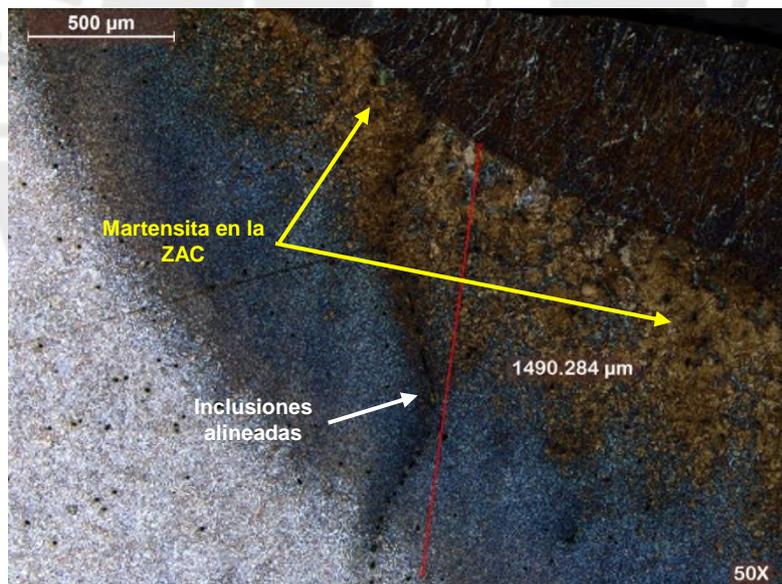


Figura 102: Inclusiones alineadas en aporte puntual de soldadura, 50X, Nital al 2%

3.9. Ensayo de tracción

Se realizó un ensayo de tracción a una probeta circular de sección reducida extraída de la oreja fracturada A. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3 y la curva de fuerza-alargamiento se muestra en la Figura 103.

El material con el que fueron fabricadas las orejas fracturadas cumple con los requerimientos mecánicos solicitados para un acero para fundiciones ASTM A27 Grado 70-40.

Los valores de las propiedades mecánicas son compatibles con valores esperados para un acero de bajo carbono, el cual tiene una microestructura conformada predominantemente por ferrita y perlita, tal como se vio en el análisis metalográfico.

Tabla 3: Resultados del ensayo de tracción de la probeta de la oreja A

Muestra extraída de oreja A		Resultados	ASTM A27 Grado 70-40
Sección transversal	Diámetro (mm)	12.74	-
	Área (mm ²)	127.48	-
Cargas (kN)	Fluencia	42.68	-
	Máxima	67.60	-
Esfuerzos (MPa)	Limite a la fluencia	335	>275
	Resistencia a la tracción	530	>485
Longitud inicial entre marcas (mm)		50.00	-
Longitud final entre marcas (mm)		64.96	-
Alargamiento (%)		30	>22

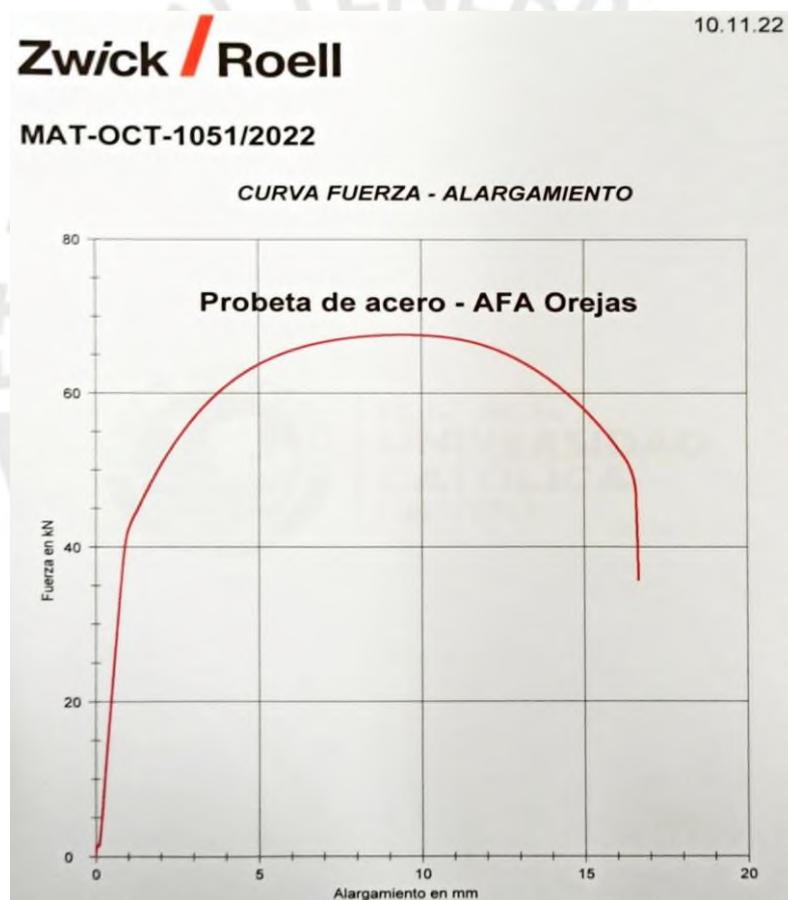


Figura 103: Curva fuerza-alargamiento de la probeta extraída de la oreja A

3.10. Ensayo de dureza Vickers

3.10.1. Barridos de dureza al origen de falla de la superficie A-1

Se realizaron barridos de dureza Vickers a la misma muestra utilizada en el análisis metalográfico de la hendidura (ver Figuras 96, 97 y 98), la cual había sido determinada como el lugar en donde se nucleó la fisura que ocasionó la falla de la superficie A-1. Estos barridos atravesaban el metal de soldadura, la zona afectada por el calor y el metal base de los cordones

de soldadura realizados en esa zona. Los resultados de los barridos de dureza se muestran en la Tabla 4. Los puntos de donde se tomaron los valores de dureza se muestran en la Figura 104.

Tabla 4: Valores de dureza en la zona de origen de falla de la superficie A-1

Número de indentación	Zona del cordón	Dureza Vickers HV 5 kg		
		L1	L2	L3
1	Metal de soldadura	211	219	252
2		211	218	255
3		401	298	254
4	Zona afectada por el calor	358	196	197
5		219	166	---
6	Metal Base	172	177	170

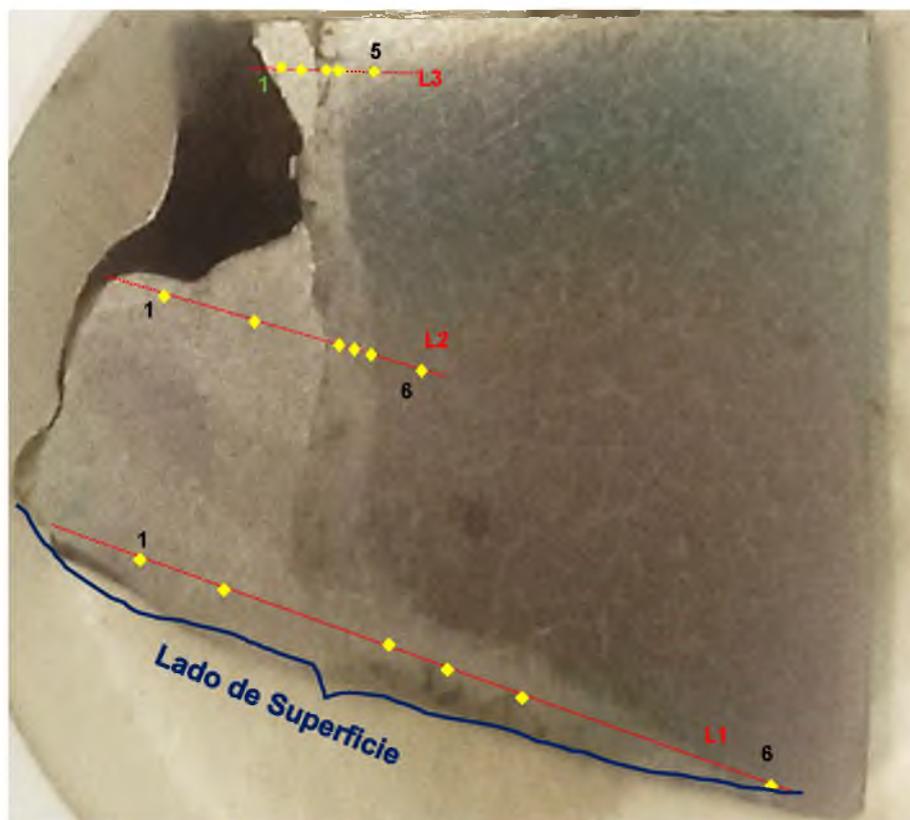


Figura 104: Puntos de toma de dureza en la zona de origen de falla de la superficie A-1

Los valores de dureza encontrados en la zona del metal base son compatibles con lo encontrado en el análisis químico y el análisis metalográfico de las orejas, es decir, un acero de bajo carbono con una microestructura ferrítica-perlítica.

Los valores encontrados en la zona afectada por el calor de las Líneas 2 y 3 son valores esperados para zonas afectadas por el calor que han sido sometidas a posteriores procesos térmicos, como el depósito de siguientes pases de soldadura. Sin embargo, en la zona afectada por el calor correspondiente a los últimos pases de soldadura (Línea 1) se encontraron valores de dureza superiores a 350 HV. Estos valores son compatibles con valores de dureza

encontrados en microestructuras duras, como sería la microestructura martensítica encontrada en el análisis metalográfico de esta zona (vista en la Figura 98).

Los valores de dureza del metal de soldadura son los esperados para un material de aporte con una microestructura ferrítica, como la que fue encontrada en el análisis metalográfico de esta zona.

3.10.2. Barrido de dureza a la zona de origen de falla de la superficie B-1

Se realizó un barrido de dureza Vickers en una zona próxima a la discontinuidad de donde se nucleaban marcas de playa en la superficie B-1 (visto en la Figuras 88). Este barrido atravesaba el metal de soldadura, la zona afectada por el calor y el metal base de los cordones de soldadura realizados en esa zona. Los resultados de los barridos de dureza se muestran en la Tabla 5. Los puntos de donde se tomaron los valores de dureza se muestran en la Figura 105.

Tabla 5: Valores de dureza en la zona de origen de falla de la superficie B-1

Número de indentación	Zona del cordón	Dureza Vickers HV 10 kg
		L1
1	Metal Base	175
2		185
3	Zona afectada por el calor	220
4		206
5		202
6	Metal de soldadura	194
7		196
8		200
9	Zona afectada por el calor	194
10		193
11	Metal Base	169

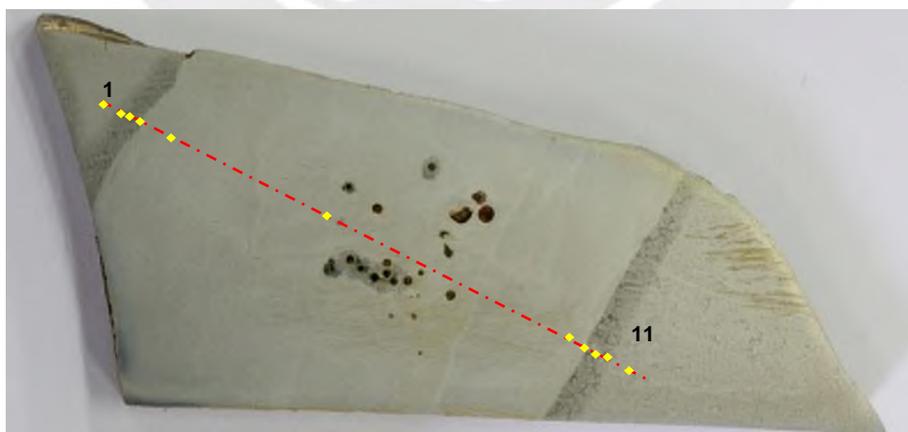


Figura 105: Barrido de dureza en zona de origen de marcas de playa de la superficie B-1

Los valores de dureza encontrados en la zona del metal base son compatibles con un acero de bajo carbono con una microestructura ferrítica-perlítica.

Los valores encontrados en la zona afectada por el calor corresponden a valores esperados para zonas afectadas por el calor que han sido sometidas a posteriores procesos térmicos, como son el depósito de siguientes pases de soldadura.

Los valores de dureza del metal de soldadura son los esperados para un material de aporte con microestructura ferrítica.

3.10.3. Barridos de dureza a la rebanada extraída de la oreja A

Se realizaron barridos de dureza Vickers al cordón de reparación encontrado en la rebanada extraída de la oreja A (visto en la Figura 93). Estos barridos atravesaban el metal de soldadura, la zona afectada por el calor y el metal base de ese cordón. Se hizo con la intención de determinar si se realizó un correcto procedimiento de soldadura para realizar esta reparación. Los resultados de las mediciones de los barridos de dureza se muestran en la Tabla 6. Los puntos en donde se tomaron la dureza se muestran en la Figura 106.

Tabla 6: Valores de dureza en el cordón de reparación de la oreja A

Número de indentación	Zona del cordón	Dureza Vickers HV 10 kg		
		L1	L2	L3
1	Metal Base	176	188	175
2		181	176	175
3	Zona afectada por el calor	199	205	275
4		221	198	265
5		224	213	276
6	Metal de soldadura	165	209	243
7		204	227	229
8		239	219	235
9	Zona afectada por el calor	359	205	221
10		242	196	213
11		181	177	192
12	Metal Base	182	175	182
13		182	181	170

Los valores de dureza encontrados en la zona del metal base son compatibles con un acero de bajo carbono con una microestructura ferrítica-perlítica.

Los valores encontrados en la zona afectada por el calor de las Líneas 2 y 3 son valores esperados para zonas afectadas por el calor que han sido sometidas a posteriores procesos térmicos, como el depósito de siguientes pases de soldadura. Sin embargo, en la zona afectada por el calor correspondiente a los últimos pases de soldadura (Línea 1) se encontraron valores de dureza superiores a 350 HV. Estos son compatibles con valores de dureza encontrados en microestructuras duras, como una microestructura martensítica. Esto indica que no se tuvo un enfriamiento lento para los últimos pases en el cordón de reparación.

Los valores de dureza del metal de soldadura son los esperados para un material de aporte con microestructura ferrítica.

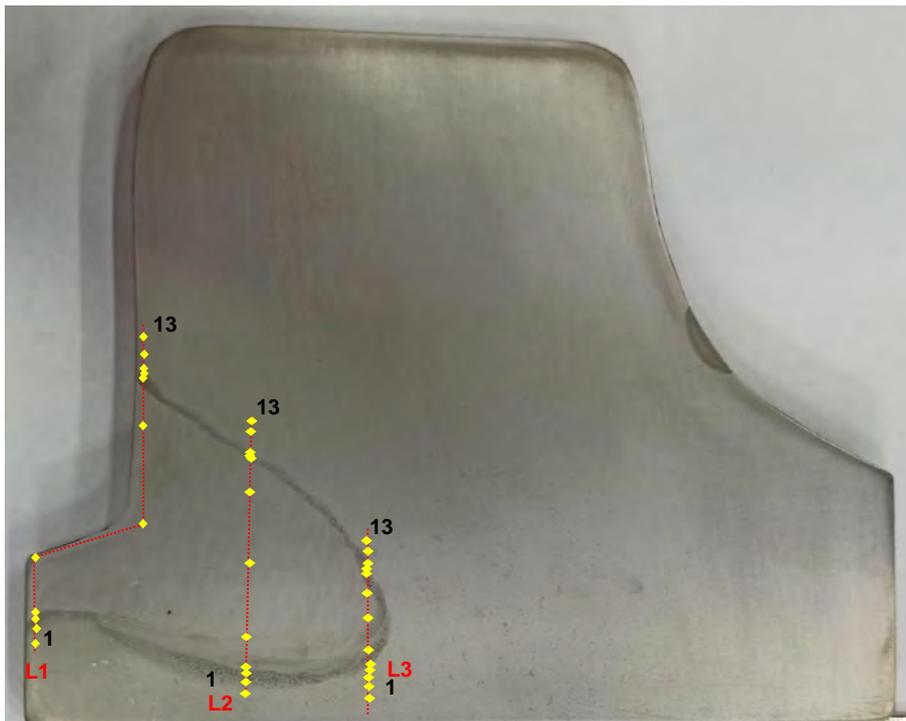


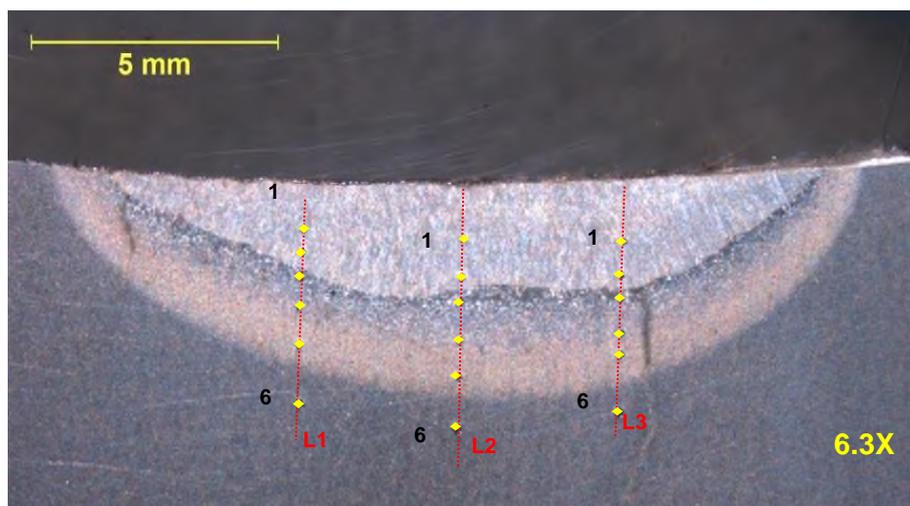
Figura 106: Puntos de tomas de dureza realizados a cordón de reparación de la oreja A

3.10.3. Barridos de dureza a aporte localizado en la oreja A

Se realizaron barridos de dureza Vickers a la zona de material de aporte localizado en la rebanada de la oreja A (visto en la Figura 93). Estos barridos atravesaban el metal de soldadura, la zona afectada por el calor y el metal base de ese cordón. Los resultados de las mediciones de los barridos de dureza se muestran en la Tabla 7. Los puntos en donde se tomaron la dureza se muestran en la Figura 107.

Tabla 7: Valores de dureza en el cordón puntual de la oreja A

Número de indentación	Zona del cordón	Dureza Vickers HV 5 kg		
		L1	L2	L3
1	Metal de soldadura	319	331	335
2		309	309	302
3		413	446	469
4	Zona afectada por el calor	341	339	283
5		223	228	244
6		Metal Base	180	174



Los valores de dureza encontrados en la zona del metal base son compatibles con un acero de bajo carbono con una microestructura ferrítica-perlítica.

Los valores encontrados en las indentaciones #3 de las tres líneas de los barridos de dureza se encuentran por encima de 400 HV, lo cual es compatible con valores de dureza en microestructuras duras, compatible con la microestructura martensítica encontrada en el análisis metalográfico de esta muestra (como se vio en la Figura 101).

Los valores de dureza del metal de soldadura se encuentran por encima de 350 HV, lo cual sugiere que no se realizó ningún tipo de aporte térmico posterior a la realización de este aporte localizado de material. Esto podría indicar que este aporte de material corresponde a un golpe de arco o a un cordón de fijación para los posicionadores de la barra utilizada para el barrenado y no a un aporte de material destinado a una reparación.

3.11. Ensayo de impacto

De una zona alejada de los orígenes de falla y sin presencia de cordones de reparación por soldadura en la oreja A, se extrajeron tres probetas para la realización del ensayo de impacto Charpy. Los ensayos se realizaron a una temperatura ambiental de 22.8 °C. Los resultados del ensayo se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Valores de energía absorbida de las probetas extraídas de la oreja A

Muestra	Energía absorbida (J)	Energía promedio (J)
1	150	
2	133	142
3	143	

A través de los resultados obtenidos en el ensayo, se determinó que el material utilizado para la fabricación de las orejas fracturadas corresponde a un material con una alta tenacidad al impacto, evidenciado por sus altos valores de energía absorbida a temperatura ambiente y por presentar probetas con superficies de fractura con aproximadamente 70 % de rotura dúctil y 30 % de rotura frágil (como se aprecia en las Figuras 108, 109 y 110).

Debido a las solicitaciones de impacto a las cuales puede estar sometido un componente de movimiento de tierras, el uso de un material con alta tenacidad al impacto para la fabricación de las orejas es lo adecuado.

Los valores de energía absorbida de las probetas son compatibles con los valores esperados para un material de bajo carbono y una microestructura conformado a partir de granos finos de ferrita y de perlita.



Figura 108: Superficies de fractura – Probeta #1 de ensayo Charpy



Figura 109: Superficies de fractura – Probeta #2 de ensayo Charpy

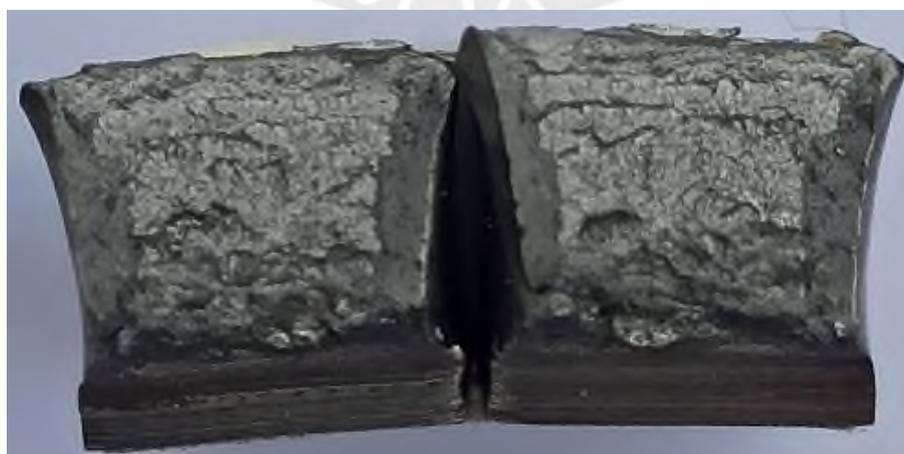


Figura 110: Superficies de fractura – Probeta #3 de ensayo Charpy

Conclusiones

De los ensayos realizados se puede concluir lo siguiente:

1. Las orejas fueron fabricadas a través de un proceso de fundición y se utilizó un acero de bajo carbono con un contenido de manganeso mayor a 1%, compatible con un acero ASTM A27 Grado 70-40. Después de su fabricación por fundición, el componente fue posiblemente sometido a un tratamiento térmico de normalizado, evidenciado por su microestructura ferrítica-perlítica de tamaño de grano fino, así como sus propiedades mecánicas de tenacidad al impacto y resistencia mecánica.
2. La ausencia de discontinuidades inherentes al proceso de fundición cercanas a los orígenes de falla de las orejas y la utilización de un acero compatible con el ASTM A27 Grado 70-40, el cual es un material de uso común para la fabricación de componentes obtenidos a través de fundición, indican que la falla de las orejas no puede ser atribuido a un problema de fabricación ni al uso de un material inadecuado.
3. De la evidencia obtenida de los ensayos realizados durante este análisis de falla, se determinó que el modo de falla de las orejas fracturadas era compatible con un mecanismo de fatiga mecánica.
4. Las discontinuidades inherentes a un proceso de soldadura, las cuales generaron las fracturas de las orejas y la presencia de microestructuras martensíticas de elevada dureza en las zonas afectadas por el calor de los cordones de reparación, evidencian que las orejas fueron sometidas a un proceso de reparación por soldadura inadecuado.
5. Las fisuras que generaron las fracturas de las orejas nuclearon en discontinuidades introducidas durante el procedimiento de reparación por soldadura efectuado al componente. Estas discontinuidades actuaron como concentradores de tensiones y se convirtieron en puntos de nucleación de microfisuras, las cuales fueron aumentando de tamaño a lo largo del tiempo de servicio del *stick* debido a los esfuerzos alternantes a los que estaban sometidas las orejas. Eventualmente, se generó la rotura final de tipo frágil en las orejas, pues sus secciones remanentes ya no eran capaces de soportar los esfuerzos a los cuales estaban sometidas las orejas, ocurriendo así la falla catastrófica de las orejas pertenecientes al *stick*.

Recomendaciones

- Realizar inspecciones rutinarias de mantenimiento preventivo a través de ensayos no destructivos superficiales, como líquidos penetrantes o partículas magnéticas fluorescentes a componentes similares. Estas técnicas no destructivas permitirán detectar la presencia de discontinuidades abiertas a la superficie, para así poder reparar las que superen un valor aceptable (ASTM A903: Standard Specification for Steel Castings, Surface Acceptance Standards, Magnetic Particle and Liquid Penetrant Inspection [46]) antes que estas lleguen a un tamaño crítico que causen la rotura catastrófica de los componentes.
- Realizar las soldaduras de reparación a componentes similares utilizando procedimientos de soldadura calificados y soldadores homologados, según las exigencias de códigos y estándares empleados en la industria, para realizar reparaciones en componentes de acero fundido pertenecientes a equipos de movimiento de tierra, como puede ser la normativa ASTM A488: Standard Practice for Steel Castings, Welding, Qualifications of Procedures and Personnel [47].
- Realizar inspecciones mediante ensayos no destructivos volumétricos, como ultrasonido industrial, durante el proceso de reparación por soldadura a componentes similares. Esto permitirá detectar la presencia de discontinuidades introducidas durante el proceso de reparación y poder subsanarlas durante el acto de la reparación.
- Debido al gran tamaño y a la mediana templabilidad que suelen tener los componentes de acero fundido empleados para el movimiento de tierra (valores de Carbono Equivalente superiores a 0.41), se recomienda un control exigente de los parámetros empleados en el procedimiento de reparación, como pueden ser el control de temperatura de precalentamiento, temperatura entre pasadas o temperaturas o tiempos de tratamiento térmico post-soldadura. Esto evitará la aparición de microestructuras duras y además reducirá las tensiones residuales (las cuales pueden reducir la vida a la fatiga de los componentes) causadas durante el proceso de soldadura.

Bibliografía

- [1] FERREYROS
Palas hidráulicas sobre orugas 6040/6040 FS.
<https://www.ferreyros.com.pe/equipo/6040-6040-fs/?parent=1922>
- [2] APAZA NINA, José
 2023 Palas Hidráulicas
- [3] YANDRAM
What is an excavator? What is it made of?
<https://yandram.com/blog/what-is-an-excavator/#what-are-the-core-building-blocks-of-an-excavator>
- [4] TEXAS FINAL DRIVE
20 Excavator Terms You Should Know
<https://info.texasfinaldrive.com/shop-talk-blog/20-terms-everyone-in-the-excavators-industry-should-know>
- [5] H&R CONSTRUCTION EQUIPMENT PARTS
How Does the Arm of an Excavator Work?
<https://www.hrparts.com/blog/post/how-does-excavator-arm-work-diagram>
- [6] ALIEXPRESS
Buje para excavadora, brazo y pasadores de brazo
<https://es.aliexpress.com/i/1005004848004424.html?gatewayAdapt=glo2esp>
- [7] APAZA NINA, José
 2023 “Palas hidráulicas y eléctricas”. Lima, 2023
- [8] MINING EXCAVATOR
 CAT 6040 FS Assembly

https://www.youtube.com/watch?v=owqsC_99YCg

[9] HUITONG MACHINERY

How to do the wear and repair of the shaft hole of the excavator arm

<https://www.gochinaht.com/repair-the-excavator-arm.html>

[10] CUTTING EDGE ENGINEERING AUSTRALIA

Repair Excavator Quick Hitch | Line boring & Welding

<https://www.youtube.com/watch?v=DPWJSJwIDfM&t=198s>

[11] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE

1990 “Steel Castings”. *Metals Handbook Volume 1 Properties and Selection: Irons, Steel, and High-Performance Alloys*. Ohio: ASM International, pp. 363-379.

[12] DIE CASTING MOULD

What Is a Foundry – Difference Between Casting and Foundry

<https://www.diecasting-mould.com/news/what-is-a-foundry-difference-between-casting-and-foundry>

[13] CESOL

2016 “Reparación por soldeo”. Material de la diplomatura *Ingeniería de Soldadura*. Lima: INGESOLD

[14] CUTTING EDGE ENGINEERING AUSTRALIA

Repair a CRACKED Caterpillar 789 Dump Truck Suspension Part | Machining & Welding

<https://www.youtube.com/watch?v=CfR94njAV2s&t=2086s>

[15] AMERICAN WELDING SOCIETY

2015 *AWS B1.11M/B1.11:2015, Guide for the Visual Examination of Welds*. Tercera edición.

[16] ASKELAND, Donald y WRIGHT, Wendelin

2017 “Propiedades mecánicas: segunda parte”. *Ciencia e Ingeniería de materiales*. Ciudad de México: Cengage Learning, pp. 245.

[17] FOSCA PASTOR, Carlos

2022 *Tema 7. Mecanismos de daño asistidos por esfuerzos mecánicos. Sección 7: quinta parte – A. Fractura por fatiga: mecanismo de la falla por fatiga* [diapositiva].

[18] ASKELAND, Donald y WRIGHT, Wendelin

2017 “Propiedades mecánicas: segunda parte”. *Ciencia e Ingeniería de materiales*. Ciudad de México: Cengage Learning, pp. 246.

[19] WULPI, Donald

2013 “Fatigue Fracture”. *Understanding how components fail*. Ohio: ASM International, pp. 117-167.

[20] WULPI, Donald

2013 “Fatigue Fracture”. *Understanding how components fail*. Ohio: ASM International, pp. 151.

[21] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE

1986 “General Practice in Failure Analysis”. *Metals Handbook Volume 11 Failure Analysis and Prevention*. Ohio: American Society for Metals, pp. 15-32.

[22] DÍAZ CÁCERES, Jorge

2017 *Determinación mediante la realización de análisis de falla de las causas más comunes de falla en ejes de equipos industriales*. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

[23] AMERICAN WELDING SOCIETY

2016 *AWS B1.10M/B1.10:2016, Guide for the Nondestructive Examination of Welds*. Quinta edición.

[24] AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING

2008 “Introduction to Magnetic Testing”. *Nondestructive Testing Handbook Volume 8 Magnetic Testing*. Ohio, pp. 9.

- [25] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE
1992 “Carbon and Alloy Steels”. *Metals Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures*. Ohio: ASM International, pp. 170-172.
- [26] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE
1992 “Tension Testing”. *Metals Handbook Volume 8 Mechanical Testing*. Ohio: ASM INTERNATIONAL, pp. 19-27.
- [27] MERINO PONCE, Daniel
2022 *ENSAYOS DESTRUCTIVOS DE MATERIALES Y UNIONES SOLDADAS* [diapositiva]
- [28] NUÑEZ MONRROY, Rolando
2022 *METALOGRAFÍA* [diapositiva]
- [29] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE
1992 “Carbon and Alloy Steels”. *Metals Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures*. Ohio: ASM International, pp. 165-170.
- [30] CESOL
2016 “Ensayos destructivos de materiales y uniones soldadas”. Material de la diplomatura *Ingeniería de Soldadura*. Lima: INGESOLD
- [31] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS
2019 “Article 9 Visual Examination”. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V – Nondestructive Examination*. Nueva York: ASME, pp. 283-284
- [32] ASTM INTERNATIONAL
2023 *ASTM E165/165M-23 Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry*.
- [33] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

2019 “Article 7 Magnetic Particle Inspection”. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V – Nondestructive Examination*. Nueva York: ASME, pp. 224-245

[34] ASTM INTERNATIONAL

2021 *ASTM E709-21 Standard Guide for Magnetic Particle Testing*.

[35] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

2019 “Article 2 Radiographic Examination”. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V – Nondestructive Examination*. Nueva York: ASME, pp. 39-83

[36] ASTM INTERNATIONAL

2017 *ASTM E3-11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*.

[37] ASTM INTERNATIONAL

2015 *ASTM E340-15 Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys*.

[38] ASTM INTERNATIONAL

2021 *ASTM E415-21 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*.

[39] ASTM INTERNATIONAL

2022 *ASTM A370-22 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*.

[40] ASTM INTERNATIONAL

2015 *ASTM E407-07(2015) Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*.

[41] ASTM INTERNATIONAL

2017 *ASTM E92-17 Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*.

[42] ASTM INTERNATIONAL

2022 *ASTM E23-22 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*.

[43] ASTM INTERNATIONAL

2020 *ASTM A27/A27M-20 Standard Specification for Steel Castings, Carbon, for General Application.*

[44] ASTM INTERNATIONAL

2023 *ASTM A6/A6M-23 Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling.*

[45] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

2019 *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part C – Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals.* Nueva York: ASME.

[46] ASTM INTERNATIONAL

2017 *ASTM A903/A903M-99 Standard Specification for Steel Castings, Surface Acceptance Standards, Magnetic Particle and Liquid Penetrant Inspection.*

[47] ASTM INTERNATIONAL

2020 *ASTM A488/A488M-18e2 Standard Practice for Steel Castings, Welding, Qualifications of Procedures and Personnel.*