



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE  
ARENAS FERROSAS COMO PARTE DEL FUNDENTE UTILIZADO  
EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO  
SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA  
DE JUNTAS SOLDADAS DE ACERO ASTM A572”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA  
MENCIÓN EN MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA**

**MARCELA ESTEFANÍA ACUÑA RIVERA**  
marcela.acunar@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. CARLOS WIME DÍAZ CAMPOVERDE, M.Sc.**  
carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, febrero, 2019

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **MARCELA ESTEFANÍA ACUÑA RIVERA**, bajo mi supervisión.

---

Ing. Carlos Díaz Campoverde M.Sc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **Marcela Estefanía Acuña Rivera**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Marcela Estefanía Acuña Rivera

## DEDICATORIA

A mis padres, quienes con su apoyo han hecho posible el cumplimiento de mis metas académicas, profesionales y personales.

A mi abuelita, quien desde la tierna infancia me procuró sus cuidados con el mayor esmero y amor, ella me enseñó a ser responsable y trabajadora.

Abuelita, tu esencia, tu ejemplo y espíritu de lucha, perdurarán siempre en el corazón de los que amaste.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Escuela Politécnica Nacional por la oportunidad de ser parte de este programa de maestría, por el apoyo recibido para la obtención de este grado académico.

Agradezco al Ing. Carlos Díaz, quien me ha brindado guía y motivación para la culminación de este trabajo. Gracias por compartir sus conocimientos, por su comprensión y disponibilidad.

A todos quienes conforman el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla, en especial a la Ing. Patricia Proaño y al Sr. René Jame, por su solícita ayuda y cooperación. Al Laboratorio de Soldadura, en particular, al Ing. Gabriel Velasteguí por su cooperación en el proceso experimental de este proyecto. Al Laboratorio de Fundición por su colaboración en los análisis para el desarrollo del presente trabajo. Al Departamento de Metalurgia Extractiva por la colaboración en los análisis que forman parte de este proyecto. Al Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, por su colaboración en los ensayos de impacto. Al Laboratorio de Ensayos del Servicio Ecuatoriano de Normalización, en especial, al Ing. Franklin Villa por su colaboración en el desarrollo de los ensayos de tracción. A la Metalmecánica San Bartolo, en especial, a los ingenieros Carlos Bonilla y Alex Núñez por su ayuda en el maquinado de las muestras.

Mi sincero agradecimiento a los ingenieros Fausto Oviedo e Iván Zambrano por brindarme su apoyo y confianza.

A todos los profesores del programa de maestría por los conocimientos y experiencias compartidas que ampliaron mi visión profesional.

A mi familia, en especial a mis padres y a mi tía Olga, gracias por apoyarme para alcanzar mis metas.

A mis compañeros del programa de maestría por su amistad, en especial a Victoria, Daysi, Ricardo, David, Javier y Geovanny.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo general .....	3
Objetivos específicos .....	3
1. MARCO TEÓRICO .....	4
1.1. Acero ASTM A572.....	4
1.2. Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).....	5
1.2.1. El fundente.....	6
1.3. Microestructura del metal de soldadura .....	7
1.3.1. Fases y microconstituyentes presentes en el metal de soldadura .....	8
1.4. Composición química del metal de soldadura .....	13
1.4.1. Influencia de los elementos de aleación en el metal de soldadura .....	14
1.5. Las arenas ferrosas.....	17
2. METODOLOGÍA .....	19
2.1. Preparación de las arenas.....	19
2.2. Caracterización del metal base .....	19
2.2.1. Análisis químico por espectrometría de emisión atómica por chispa (spark-AES) .....	20
2.2.2. Análisis metalográfico .....	21
2.2.3. Ensayo de dureza superficial .....	23
2.2.4. Ensayo de tracción .....	24
2.2.5. Ensayo de impacto Charpy .....	26
2.3. Proceso de soldadura.....	27
2.3.1. Fundente y alambre sólido.....	28
2.3.2. Preparación de las mezclas de fundente y arena.....	29
2.3.3. Procedimiento de soldadura .....	30

2.4. Caracterización de la escoria formada en el proceso de arco sumergido mediante fluorescencia de rayos X (XRF).....	33
2.5. Evaluación de las juntas mediante radiografía industrial .....	34
2.6. Caracterización de las juntas soldadas .....	35
2.6.1. Caracterización mecánica.....	35
2.6.2. Análisis químico por espectrometría de emisión atómica por chispa (spark-AES) del metal del cordón de soldadura. ....	38
2.6.3. Caracterización de la macroestructura y microestructura de las juntas soldadas .....	39
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
3.1. Resultados .....	41
3.1.1. Caracterización del metal base .....	41
3.1.2. Caracterización de la escoria formada en el proceso de arco sumergido mediante fluorescencia de rayos X (XRF).....	46
3.1.3. Evaluación de las juntas mediante radiografía industrial .....	46
3.1.4. Caracterización de las juntas soldadas .....	49
3.2. Discusión.....	72
3.2.1. Metal base .....	72
3.2.2. Continuidad de la unión soldada .....	73
3.2.3. Caracterización mecánica de las juntas soldadas .....	75
3.2.4. Caracterización de la macroestructura.....	76
3.2.5. Análisis de la composición química del metal de soldadura (MS) y análisis microestructural .....	77
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	80
4.1. Conclusiones.....	80
4.2. Recomendaciones.....	82
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>83</b>
ANEXOS .....	88
Anexo 1. Reporte de inspección radiográfica .....	89

Anexo 2. Resultados análisis fluorescencia de rayos X.....	95
Anexo 3. Resultados espectrometría emisión óptica .....	97
Anexo 4. Resultados ensayos de tracción .....	99
Anexo 5. Resultados ensayo de impacto Charpy .....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Comportamiento a impacto ( <i>Charpy V Notch impact behavior</i> ).....	5
Figura 1.2. Esquema de las regiones en una soldadura por fusión.....	7
Figura 1.3. Evolución microestructural en una soldadura (a) pase único, (b) con múltiples pases.....	8
Figura 1.4. (a) Ferrita pro-eutectoide en los bordes de grano de la austenita previamente formada (flechas), (b) ferrita acicular en el cuerpo de los granos de austenita previamente formados.....	10
Figura 1.5. Ferrita pro-eutectoide formada en los bordes de austenita previa (flechas), A - nucleación de ferrita Widmanstätten intergranular, B – inclusiones.....	10
Figura 1.6. Micrografía de la zona de fusión, presencia de bainita y agregados de carburo de ferrita en ferrita de borde de grano gruesa.....	10
Figura 1.7. Morfologías varias de la ferrita en el metal de soldadura.....	11
Figura 1.8. (a) Ferrita acicular constituida de austenita retenida alargada y alineada entre los granos de austenita previa, (b) ferrita granular constituida de austenita retenida dispersa.....	12
Figura 1.9. Microestructuras de juntas soldadas, (a) bainita/martensita con estructura de fases alineadas, (b) bainita granular, placas de ferrita y constituyentes M/A ubicados en los bordes de granos gruesos de la austenita previa (flechas).....	12
Figura 1.10. Representación esquemática de la dilución en la soldadura por fusión.....	13
Figura 1.11. Dilución en junta soldada con multipases.....	14
Figura 1.12. Efecto de elementos de aleación (a) en la dureza del metal de soldadura en uniones con varios pases obtenido por arco sumergido, (b) en la variación de la resistencia a la fluencia por la solución sólida en la ferrita.....	15
Figura 1.13. Espectroscopia de los granos de una muestra de arena.....	18
Figura 2.1. Dimensiones en mm de la muestra de sección reducida para ensayo de tracción del metal base.....	25
Figura 2.2. Tamaño de las muestras para ensayo de impacto Charpy.....	26
Figura 2.3. Muestras de escoria recolectadas (vista posterior).....	33
Figura 2.4. Molino de cuchillas.....	34

Figura 2.5. Muestras de escoria con tamaño de partícula reducido: (a) después de la reducción manual, (b) después de la molienda. ....	34
Figura 2.6. Ubicación de extracción de las muestras para ensayos de caracterización mecánica. ....	36
Figura 2.7. Dimensiones en mm de la muestra de sección reducida para ensayo de tracción de las juntas soldadas. ....	37
Figura 2.8. Muestras de sección reducida para ensayo de tracción – Discontinuidades en la sección reducida para algunas muestras. ....	37
Figura 2.9. Zona de mediciones de análisis químico. ....	39
Figura 2.10. Ubicación de las microindentaciones para barrido de microdureza. ....	40
Figura 3.1. Micrografía del material base sin ataque químico de las muestras de las planchas (a) F, (b) C, (c) A y (d) D. 100X. ....	42
Figura 3.2. Micrografía del material base de las muestras de las planchas (a) F, (b) C, (c) A y (d) D. Ataque químico con nital al 10%, 10 s. 100X. ....	43
Figura 3.3. Muestra TMB – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura. ....	44
Figura 3.4. Superficie de fractura de la muestra CHMB1. ....	45
Figura 3.5. Superficie de fractura de la muestra CHMB2. ....	45
Figura 3.6. Superficie de fractura de la muestra CHMB3. ....	45
Figura 3.7. Apariencia visual del cordón junta 0F, (a) cara, (b) raíz. ....	47
Figura 3.8. Apariencia visual del cordón junta 1C, (a) cara, (b) raíz. ....	47
Figura 3.9. Apariencia visual del cordón junta 2A, (a) cara, (b) raíz. ....	48
Figura 3.10. Apariencia visual del cordón junta 3D. ....	48
Figura 3.11. Muestra TF1 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura. ....	50
Figura 3.12. Muestra TF2 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura. ....	50
Figura 3.13. Muestras TC1 - (a) zona de falla. ....	50
Figura 3.14. Muestra TC2 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura. ....	51
Figura 3.15. Muestras TA1 - zona de falla. ....	51
Figura 3.16. Muestras TA2 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura. ....	51
Figura 3.17. Muestra TD1 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura. ....	52

Figura 3.18. Muestra TD2 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura. ....	52
Figura 3.19. Superficies de fractura, (a) muestra BA2, (b) muestra BD1, (c) muestra BD3, (d) muestra BD4. ....	57
Figura 3.20. Superficies de fractura, (a) muestra CHF1, (b) muestra CHF2, (c) muestra CHF3. ....	58
Figura 3.21. Superficies de fractura, (a) muestra CHC1, (b) muestra CHC2, (c) muestra CHC3. ....	59
Figura 3.22. Superficies de fractura, (a) muestra CHA1, (b) muestra CHA2, (c) muestra CHA3. ....	60
Figura 3.23. Superficies de fractura, (a) muestra CHD1, (b) muestra CHD2, (c) muestra CHD3. ....	61
Figura 3.24. Macroestructura de la junta 0F. ....	63
Figura 3.25. Macroestructura de la junta 1C. ....	63
Figura 3.26. Macroestructura de la junta 2A. ....	64
Figura 3.27. Macroestructura de la junta 3D. ....	64
Figura 3.28. Zonas del cordón de soldadura con microestructuras características, (1) pases superiores e intermedios, (2) zona entre pases y pases inferiores, (3) zona afectada por el calor, (4) metal base. ....	65
Figura 3.29. Junta 0F, zona 1, pases superiores e intermedios, (a) nital 2% 40 s y vilella 8 s, $\alpha$ ferrita pro-eutectoide, $\alpha_w$ ferrita Widmanstätten, 100X (b) nital 2% 40 s, $\alpha_w$ lámina de ferrita Widmanstätten, P regiones de perlita, 50X. ....	66
Figura 3.30. Junta 1C, zona 1, nital 2% 40 s y vilella 16 s (a) $\alpha$ granos gruesos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, 100X (b) $\alpha$ granos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, F-C agregados de carburo de ferrita, P perlita, 50X. ....	66
Figura 3.31. Junta 2A, zona 1, nital 2% 40 s y vilella 16 s (a) $\alpha$ granos gruesos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, 100X (b) $\alpha$ granos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, F-C agregados de carburo de ferrita, P perlita, 50X. ....	67
Figura 3.32. Junta 3D, zona 1, nital 2% 40 s y vilella 16 s (a) $\alpha$ granos gruesos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, 100X (b) $\alpha$ granos de ferrita pro-	

eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, F-C agregados de carburo de ferrita, P perlita, 50X.....	67
Figura 3.33. Junta 0F, zona 2, (a) estructura de grano fino, 100X, (b) F granos de ferrita, P perlita intergranular, 50X.....	68
Figura 3.34. Junta 1C, zona 2, (a) estructura de grano fino, 100X (b) F granos de ferrita, FA ferrita con una fase alineada, P perlita, F-C carburos de ferrita, 50X. ....	68
Figura 3.35. Junta 2A, zona 2, (a) estructura de grano fino, 100X (b) F ferrita, P perlita, FA ferrita con una fase alineada, F-C carburos de ferrita, 50X. ....	68
Figura 3.36. Junta 3D, zona 2, (a) estructura de grano fino, 100X (b) F ferrita, P perlita, FA ferrita con una fase alineada, F-C carburos de ferrita, 50X. ....	69
Figura 3.37. Transición metal de soldadura - ZAC, (a) junta 0F, (b) junta 1C, (c) junta 2A, (d) junta 3D, 100X.....	69
Figura 3.38. Variación de microdureza vertical en el cordón de soldadura.....	70
Figura 3.39. Variación de dureza horizontal del cordón de soldadura – ZAC. ....	71
Figura 3.40. Variación de la macroestructura de las juntas soldadas. ....	77
Figura 3.41. Contenido de elementos aleantes en el metal de soldadura. ....	78

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de fundente según el índice de basicidad.....	7
Tabla 1.2. Composición mineralógica mediante análisis de difracción de rayos X de las arenas ferrosas.....	17
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas espectrómetro de emisión óptica.....	21
Tabla 2.2. Especificaciones del equipo modular automático.....	22
Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico invertido.....	23
Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del durómetro Rockwell.....	23
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.....	24
Tabla 2.6. Especificaciones técnicas del equipo de ensayo Charpy.....	26
Tabla 2.7. Composición del fundente bajo especificación F7A2.....	28
Tabla 2.8. Composición química del alambre electrodo EM12K y análisis químico del sistema fundente-electrodo.....	29
Tabla 2.9. Propiedades mecánicas del material depositado usando el sistema F7A2/EM12K-18.....	29
Tabla 2.10. Distribución del tamaño de partícula del fundente.....	29
Tabla 2.11. Relaciones en peso utilizadas en el proceso experimental.....	30
Tabla 2.12. Especificaciones técnicas de la balanza de precisión.....	30
Tabla 2.13. Especificaciones técnicas de la soldadora.....	31
Tabla 2.14. Variables del procedimiento de soldadura para la junta 0F.....	31
Tabla 2.15. Variables del procedimiento de soldadura para la junta 1C.....	31
Tabla 2.16. Variables del procedimiento de soldadura para la junta 2A.....	32
Tabla 2.17. Variables del procedimiento de soldadura para la junta 3D.....	32
Tabla 2.18. Identificación de las muestras de escoria.....	33
Tabla 2.19. Especificaciones del equipo de rayos X.....	35
Tabla 2.20. Condiciones de trabajo para tomas radiográficas.....	35
Tabla 2.21. Tipo de ensayos mecánicos y número de muestras extraídas.....	36
Tabla 2.22. Identificación de muestras para ensayos mecánicos.....	36

Tabla 2.23. Identificación de las muestras análisis químico del metal de soldadura. ....	39
Tabla 2.24. Especificaciones técnicas del estereomicroscopio. ....	40
Tabla 3.1. Resultados de composición química metal base. ....	41
Tabla 3.2. Resultados de la dureza superficial del material base. ....	43
Tabla 3.3. Resultados ensayo tracción material base. ....	44
Tabla 3.4. Resultados ensayo Charpy material base. ....	44
Tabla 3.5. Resultados análisis elemental de las muestras de escoria. ....	46
Tabla 3.6. Discontinuidades detectadas en las juntas. ....	48
Tabla 3.7. Resultados ensayo tracción muestras de uniones soldadas. ....	49
Tabla 3.8 Resultados ensayo de doblado lateral junta 0F. ....	53
Tabla 3.9. Resultados ensayo de doblado lateral junta 1C. ....	54
Tabla 3.10. Resultados ensayo de doblado lateral junta 2A. ....	55
Tabla 3.11. Resultados ensayo de doblado lateral junta 3D. ....	56
Tabla 3.12. Resultados ensayo impacto muestras de uniones soldadas. ....	57
Tabla 3.13. Resultados de composición química metal de soldadura. ....	62
Tabla 3.14. Concentración esperada de los elementos de aleación. ....	62
Tabla 3.15. Resumen de medición en de la macroestructura. ....	64
Tabla 3.16. Resultados del ensayo de microdureza. ....	70
Tabla 3.17. Comparación composición química material base con especificaciones estándar. ....	72
Tabla 3.18. Comparación requerimientos tracción. ....	73
Tabla 3.19. Requerimientos de especificación según AWS D1.1. ....	75

## RESUMEN

El presente estudio experimental establece la influencia al reemplazar parte del fundente del proceso de soldadura por arco sumergido con arenas ferrosas sobre las propiedades mecánicas y microestructurales del metal de soldadura. El principal objetivo es determinar la factibilidad de incorporar arena ferrosa sin procesar al fundente para obtener una junta soldada de acero de alta resistencia y baja aleación con propiedades comparables a una obtenida usando un fundente comercial. Las juntas fueron soldadas usando fundente neutro. Se utilizaron relaciones en peso entre 0,1 y 0,3 para incorporar la arena. La resistencia a la tracción, la energía de impacto y el comportamiento a flexión de las juntas soldadas fueron caracterizados. Se desarrolló el análisis microestructural y medición de microdureza en el metal de soldadura. Se realizó el análisis de composición química por espectrometría de emisión óptica para establecer la variación de los elementos de aleación. Los resultados muestran que la cantidad de manganeso y silicio se reducen, lo cual conduce a formar estructuras diferentes a la ferrita acicular. Se determina que ante cargas de flexión el comportamiento de la junta obtenida con una relación en peso de 0,1 permanece invariable, pero, la resistencia a la tracción, el límite de fluencia y el porcentaje de elongación se ven comprometidos por la presencia de porosidades atribuidas al oxígeno proveniente de los minerales contenidos en la arena durante la soldadura. Se establece un potencial uso de arenas ferrosas como un componente en la elaboración de fundentes con la aplicación previa de un método de reducción para incluirlo en forma controlada e incrementar la penetración del depósito.

**Palabras clave:** composición del metal de soldadura, elementos de aleación, ensayos mecánicos, microconstituyentes.

## ABSTRACT

This experimental study establishes the influence of replacing part of the flux used in SAW process with ferruginous sand, over, the mechanical properties and microstructure of the weld metal. The aim of this study is to determine the feasibility of incorporating raw ferruginous sand to obtain a welded joint of ASTM A572 steel with comparable properties to one obtained using commercial flux. Weld beads (along the joints) were made using neutral flux, incorporating sand in weight ratios between 0,1 and 0,3. Ultimate tensile strength, toughness, and bending behavior of the welded joints was characterized. Additionally, micrographic analysis and measurements of microhardness on weld metal were performed. The chemical composition of the weld metal samples was analyzed using optical emission spectrometry to verify the variation of alloying elements. The results show that the amount of manganese and silicon is reduced, leading to the formation of nucleate structures different to acicular ferrite. The bending behavior of welded joints obtained when the weight ratio is 0,1 remains unchanged, however, the tensile strength, yielding point, and the percentage of elongation decreases due to the presence of porosity, as a result of the oxygen released from the minerals contained in sand during the process. It is established that ferrous sands have a potential use as components to elaborate welding fluxes. Ferrous sands should be treated previously using a reduction method, in order to include them in a controlled way to the flux and to increase the penetration of the deposit.

**Keywords:** alloying elements, mechanical testing, microconstituents, weld metal composition.

# **ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE ARENAS FERROSAS COMO PARTE DEL FUNDENTE UTILIZADO EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA DE JUNTAS SOLDADAS DE ACERO ASTM A572**

## **INTRODUCCIÓN**

Incrementar la productividad y reducir costos de los procesos de fabricación de estructuras soldadas sin sacrificar la calidad de las uniones es uno de los principales objetivos de los fabricantes. Obras de ingeniería civil e industrial como puentes, estructuras para edificaciones, tanques, tuberías, etc. requieren procesos de soldadura automática de ingeniería robusta para elaborar juntas extensas; la soldadura por arco sumergido (SAW) es un proceso principalmente usado en estas aplicaciones [1]–[3]. El proceso SAW presenta ventajas frente a otros procesos de soldadura: la tasa de depósito es alta, la penetración es profunda, el tiempo efectivo de soldadura es elevado, la calidad de las juntas soldadas es elevada. El proceso presenta un ambiente de trabajo mejorado comparado con otros métodos, pero, a pesar de que el polvo del fundente residual (que no se funde) se recupera y reutiliza, el uso y el manejo de este producto añaden complejidad al proceso [3].

Varios estudios se han enfocado en establecer la influencia de la composición del fundente en las propiedades mecánicas de las uniones soldadas. Singh et al. [4] han demostrado que al añadir  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{FeMn}$  y  $\text{NiO}$  se puede desarrollar fundentes aglomerados para soldadura por arco sumergido. En su investigación, correlacionan las propiedades de dureza y tenacidad de las juntas obtenidas, con la composición química de los fundentes utilizados, así como también con la microestructura del metal fundido en las soldaduras. Paniagua et al. [5] también investigaron la influencia de la composición química de varios fundentes en el proceso de arco sumergido en la microestructura y resistencia a la tracción de uniones soldadas. Estudios para reutilización de escoria tratada del proceso de arco sumergido también han sido llevados a cabo, con el objetivo de establecer el efecto en la calidad de la soldadura de aceros [2], [6]. En particular, Garg y Singh [1] han desarrollado un proceso para reciclar la escoria generada en la soldadura por arco sumergido y han evaluado la ductilidad de las juntas soldadas mediante ensayos de flexión de tales juntas.

Varias investigaciones reportan el tratamiento de la escoria generada en el proceso de arco sumergido para su reutilización como fundente sin perjudicar las propiedades mecánicas

de la junta. Los métodos utilizados para procesar la escoria incluyen la reposición de elementos de aleación consumidos durante la soldadura [1], [2]. Además, en la literatura disponible se encuentran estudios sobre la influencia en las propiedades mecánicas de las uniones soldadas al adicionar compuestos a fundentes comerciales para específicas aplicaciones [4], [7]. Un estudio previo indica el uso de base de escoria de recursos brutos minerales (provenientes de la zona Ural en Rusia) para elaborar un fundente y utilizarlo en el proceso SAW [8]. Estudios experimentales previos evalúan los efectos sobre las propiedades mecánicas, composición química y microestructura de la soldadura al incrementar aditivos a los fundentes en el proceso de arco sumergido [9].

En resumen, existe la necesidad de estudiar métodos para mejorar la productividad del proceso de arco sumergido a través del reemplazo total o parcial de fundentes comúnmente utilizados por materiales de residuo o materiales que estén disponibles en un territorio con el objetivo de optimizar la calidad de las uniones.

El estudio experimental de este proyecto consiste en el uso una mezcla de un fundente neutro con un índice de basicidad (BI) igual a 1,1 para arco sumergido con arena ferrosa. A diferencia de otras investigaciones reportadas en la literatura, este estudio propone el uso de un material que tiene alto contenido de óxidos de hierro que podrían presentar un potencial uso para la fabricación de fundentes, por lo que se estudia la influencia en las propiedades mecánicas del metal de soldadura, como la resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, tenacidad, comportamiento a flexión, así como, en la evolución microestructural.

La metodología desarrollada en este estudio evidencia la variación en la calidad de las juntas soldadas obtenidas mediante soldadura de arco sumergido, con una mezcla de arenas ferrosas y fundente comercial, mediante la evaluación de las propiedades mecánicas. Se valora, además, la influencia de los componentes predominantes de las arenas ferrosas en la microestructura y composición química del metal fundido.

Los resultados de este estudio tienen la capacidad de contribuir en el ámbito científico y de aplicación a la industria de la fabricación de estructuras soldadas. El logro de los objetivos de este estudio proporciona a la comunidad una visión global del potencial de las arenas ferrosas para utilizarse como consumible en el proceso de arco sumergido.

Esta investigación provee un acercamiento a la influencia de los componentes de la arena ferrosa sobre las propiedades de la junta, y en consecuencia permite determinar preliminarmente la capacidad de este material para utilizarse en la fabricación de fundentes basados en materia prima nacional. Por otra parte, este estudio diversifica el posible uso

de las arenas ferrosas y podría promover nuevas dinámicas productivas en el sector industrial.

## **Objetivo general**

Estudiar la influencia de la incorporación de arena ferrosa como parte del fundente utilizado en el proceso de soldadura por arco sumergido sobre las propiedades mecánicas, y microestructura de juntas soldadas de acero ASTM A572.

## **Objetivos específicos**

1. Realizar el proceso de soldadura por arco sumergido para obtener juntas incorporando la arena ferrosa al fundente en diferentes porcentajes en peso hasta determinar el porcentaje en el que se afecta la calidad de la junta soldada.
2. Determinar la composición química del metal de soldadura y de la escoria obtenida de cada junta soldada.
3. Caracterizar las juntas soldadas por ensayos mecánicos de tracción, flexión, dureza e impacto.
4. Caracterizar la macroestructura y microestructura de las juntas soldadas.
5. Establecer la influencia del porcentaje en peso de arena ferrosa añadido al fundente sobre las propiedades mecánicas ensayadas, la composición química del metal de soldadura y la macroestructura y microestructura de las uniones soldadas.

# 1. MARCO TEÓRICO

En esta sección se incluye una revisión de la literatura relevante relacionada con el presente estudio. Se incluye información del material base, el proceso de soldadura por arco sumergido y el fundente utilizado como protección, la variación microestructural de juntas soldadas, la influencia de los elementos de aleación en las propiedades del metal de soldadura y las características de las arenas ferrosas.

## 1.1. Acero ASTM A572

Los aceros estructurales bajo especificación ASTM A572 son aceros de baja aleación y alta resistencia. Estos aceros contienen bajo porcentaje en peso (wt.%) de carbono (C), 0,05 a 0,25 wt.%, y contienen manganeso (Mn) en un rango de 0,75 a 1,35 wt.%. A estos aceros se los denomina también micro-aleados ya que contienen elementos de aleación como niobio (Nb), vanadio (V), titanio (Ti), y otros, que están presentes en concentraciones bajas ( $\leq 0,1$  wt.%) y que se adicionan para alcanzar propiedades mecánicas específicas [10], [11]. En estos aceros los elementos de aleación se combinan con el carbono (C) o con el nitrógeno (N) para formar carburos o nitruros que proveen capacidad de refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y mejoran la capacidad de deformación plástica [11]. La microestructura típica de estos aceros consiste principalmente en ferrita (F) y perlita (P) con pequeñas cantidades de carburos o nitruros en función del tipo de proceso de fabricación recibido [12].

Existen cinco grados (42, 50, 55, 60 y 65) de aceros bajo esta especificación en función de su composición química y propiedades mecánicas [10]. El presente proyecto utiliza acero grado 50 como material base en el proceso experimental.

### **Propiedades mecánicas a tracción**

La resistencia a la fluencia mínima de los aceros ASTM A572 varían entre 290 MPa (42 ksi) y 450 MPa (65 ksi). Su resistencia mínima a la tracción se encuentra entre 415 MPa (60 ksi) y 550 MPa (80 ksi). El porcentaje de elongación mínimo está entre 17 y 24 % en muestras con longitud calibrada de 50 mm [10].

### **Comportamiento a impacto**

La energía absorbida en un ensayo de impacto Charpy en función de la temperatura para un acero ASTM A572 (metal base) y para el metal de soldadura de una junta soldada de este acero con procesos SMAW y FCAW se muestra en la Figura 1.1. Esta curva de comportamiento a impacto fue obtenida experimentalmente en el estudio realizado por

Bianchi K.E. et al. [13] a muestras estándar de juntas soldadas de acero bajo especificación ASTM A572. En esta curva se observa que la energía de impacto del metal de soldadura para dos procesos diferentes se incrementa aproximadamente en un 215% respecto de la energía de impacto del metal base a una temperatura de 0°C.

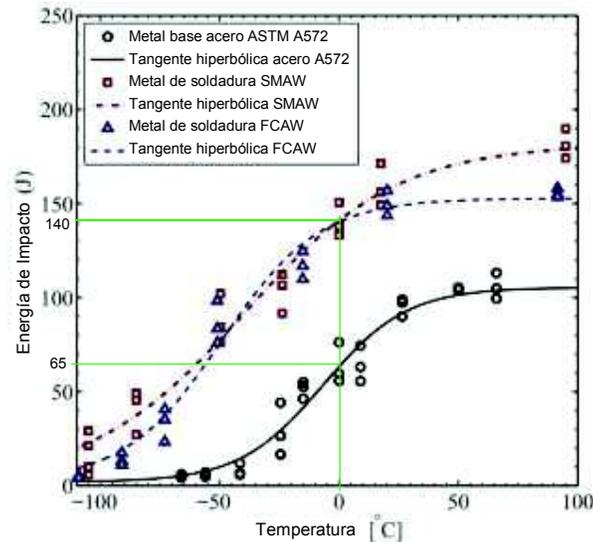


Figura 1.1. Comportamiento a impacto (*Charpy V Notch impact behavior*).

(Fuente: Correlation of fracture toughness with charpy impact energy for low alloy, structural steel welds, Bianchi K.E. et al. [13])

## 1.2. Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW)

La soldadura por arco sumergido es un proceso de unión que utiliza el arco eléctrico establecido entre un alambre electrodo consumible y el metal base para elevar la temperatura y alcanzar la fusión y coalescencia de los materiales. El arco eléctrico está protegido con una capa de fundente granular que lo estabiliza, protege al metal fundido de los componentes presentes en el aire, forma escoria en la superficie del cordón actuando como aislante térmico y provee acabado superficial uniforme [3]. Las propiedades de la junta soldada pueden ser mejoradas controlando su microestructura. Propiedades como la resistencia mecánica, dureza, ductilidad, pueden variar en función de las condiciones del procesamiento por el que se genera la unión [14]. La soldadura por arco sumergido es ampliamente utilizada en la industria, en la fabricación de estructuras en general, debido a su elevada tasa de depósito, buena resistencia mecánica de la junta y buena calidad superficial [15].

Las principales variables que determinan las características de la soldadura en el proceso de arco sumergido son: (1) corriente, (2) voltaje, (3) velocidad de soldadura, (4) diámetro

del electrodo, (5) extensión del electrodo (*stick-out*), (6) ángulo de arrastre, (7) composición química del electrodo y (8) tipo de fundente [3], [11]. En este estudio se preseleccionó y se mantuvieron invariantes: el tipo de alambre electrodo y su diámetro, la extensión del electrodo, el ángulo de arrastre, la velocidad de desplazamiento del cabezal de soldadura, la preparación de junta y el número de pases, el tipo de corriente y polaridad; la intensidad de corriente y el voltaje se ajustaron en la misma posición en la fuente de poder y en el sistema de alimentación. El consumible usado como protección es la variable de este estudio, se utilizó un único tipo de fundente para arco sumergido, pero, se incorporó arena ferrosa en diferentes relaciones en peso.

### 1.2.1. El fundente

La composición del fundente utilizado como protección en el proceso de arco sumergido juega un papel vital en la soldadura y en las propiedades mecánicas obtenidas. El fundente influye en la estabilidad del arco y las propiedades de la unión se deciden por la composición de este [16]. Una función principal del fundente es añadir elementos de aleación al metal fundido y controlar su composición [3], [15], [17]. Además, la combinación del sistema fundente-electrodo es de fundamental importancia en la soldadura debido a que si se varía esta combinación resultará en diferentes propiedades del metal de soldadura obtenido [3], [11].

El fundente se caracteriza por el índice de basicidad (BI), que es una medida de la capacidad de transferencia de oxígeno al metal de soldadura durante el proceso. El índice de basicidad se definió inicialmente por Jackson C. [18] de acuerdo a la relación de la Ecuación 1.1. Tulliani S., Boniszewski T. y Eaton N. [19] definieron al índice de basicidad con la Ecuación 1.2

$$BI = \frac{\text{suma de los óxidos básicos}}{\text{suma de los óxidos ácidos}}$$

Ecuación 1.1

$$BI = \frac{\%CaO + \%MgO + \%BaO + SrO + \%Na_2O + \%K_2O + Li_2O + \%CaF_2 + 0,5(\%MnO + \%FeO)}{\%SiO_2 + 0,5(\%Al_2O_3 + \%TiO_2 + ZrO_2)}$$

Ecuación 1.2

Donde, el símbolo % representa la composición elemental en porcentaje en peso de los componentes del fundente. Mediante el índice de basicidad se clasifican los fundentes como se observa en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Tipos de fundente según el índice de basicidad.

Tipo de fundente	Índice de basicidad	Contenido de oxígeno en peso [ppm]
Ácido	<0,9	>750
Neutro	0,9-1,1	550-750
Básico	1,2-2,0	300-550
Altamente básico	>2,0	<300

(Fuente: Submerged arc welding, Welding Processes Handbook, K. Weman [3])

Los fundentes ácidos y neutros poseen excelentes características de soldadura y producen cordones de buena apariencia aunque las propiedades mecánicas de la soldadura resultan menores, en contraste, los fundentes básicos y con alta basicidad mejoran las propiedades mecánicas a expensas del rendimiento de la soldadura [3].

### 1.3. Microestructura del metal de soldadura

Las regiones que se distinguen en una junta soldada por fusión han sido investigadas desde 1960, uno de los más recientes esquemas (2015) que identifican las regiones de la sección transversal de una soldadura por fusión fue presentado por Lippold J. [20] y se muestra en la Figura 1.2. La zona de fusión se considera formada por: (1) la región compuesta (*composite zone*), en la que el metal base y el metal de aporte se mezclan para formar un “compuesto” (ver dilución en sección 1.4), (2) la región no mezclada (*unmixed zone*) que presenta, además, (3) una zona de transición (*transition zone*) entre la región compuesta cuando se trata de soldadura heterogénea (composición del metal de aporte diferente al del metal base). La zona afectada por el calor se considera formada por: (4) la región parcialmente fundida (*partially melted zone*), zona de transición entre la zona de fusión y (5) la región denominada zona afectada por el calor real (*true – heat affected zone*), en la que todas las transformaciones de fase y reacciones ocurren en estado sólido [20].

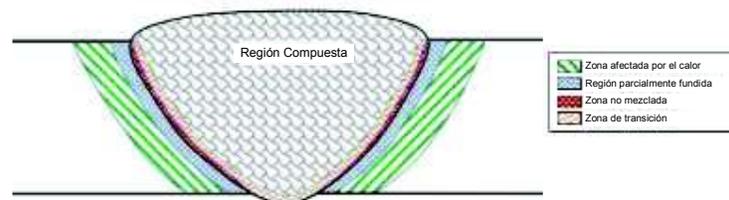


Figura 1.2. Esquema de las regiones en una soldadura por fusión.  
(Fuente: Welding Metallurgy and Weldability, Lippold J. [20])

En la soldadura por fusión las estructuras de las juntas solidifican por crecimiento epitaxial a partir de granos parcialmente fundidos en la zona afectada por el calor del metal base. La microestructura del metal de soldadura consiste en un crecimiento columnar de dendritas o células en el metal fundido a partir de los granos de la ZAC en direcciones cristalográficas preferentes, similar a las estructuras fundidas (*as cast structures*). Como

consecuencia del crecimiento epitaxial durante la solidificación se forman granos orientados favorablemente en una única dirección, los granos tienden a seguir el máximo gradiente de temperatura [11], [12].

La evolución microestructural del metal de soldadura y de la zona afectada por el calor de las juntas de acero soldadas con múltiples pases es diferente comparada con las características de juntas con pases únicos. La microestructura varía de manera diferente debido al recalentamiento de los pases subyacentes y al traslape de las regiones presentes en la zona afectada por el calor [20]. En la Figura 1.3 se observa la diferencia en la variación microestructural para un único pase (a) y una junta con múltiples pases (b). En una estructura con múltiples pases la zona de fusión presenta zonas recristalizadas de grano grueso y de grano fino bajo las zonas de crecimiento columnar característico del metal de soldadura, en las que se forman granos gruesos en dirección del flujo de calor debido al modo de solidificación presente durante el proceso [12], [20].

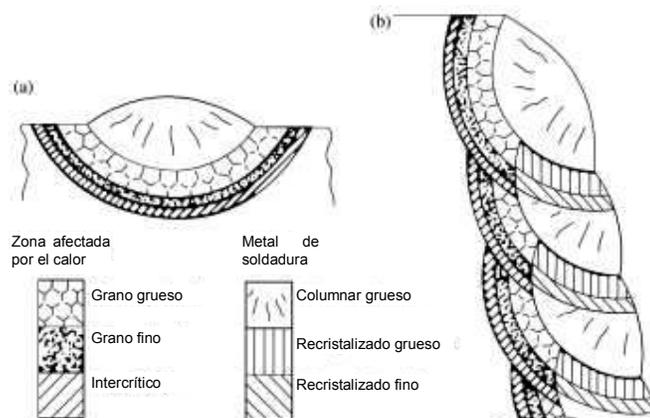


Figura 1.3. Evolución microestructural en una soldadura (a) pase único, (b) con múltiples pases.  
(Fuente: Welding Metallurgy and Weldability, Lippold J. [20])

### 1.3.1. Fases y microconstituyentes presentes en el metal de soldadura

Durante la solidificación del metal de soldadura en aceros de bajo contenido de carbono la primera fase estable que se presenta es la austenita ( $\gamma$ ) a temperaturas en un rango de 1350 - 950 °C en forma de granos gruesos, posteriormente se producen transformaciones de fase que generan productos como:

(1) Morfologías varias de la ferrita que incluyen:

(Temperaturas de transformación citadas a continuación dependen de la composición química)

- Ferrita de borde de grano (*grain boundary ferrite*) ( $\alpha$ ), llamada también ferrita alotropomórfica (*allotromorphic ferrite*) [11] ferrita pro-eutectoide (*pro-eutectoid ferrite*) [21]

o ferrita primaria (*primary ferrite*) [22]. Formación a temperaturas entre 1000 - 650°C en los bordes de grano de la austenita previamente formada [22]. La presencia de ferrita de borde de grano es perjudicial para la tenacidad, debido a que ofrece poca resistencia a la propagación de fisuras [11]. (Ver Figura 1.4, Figura 1.5 y Figura 1.7)

- Ferrita Widmanstätten (*side-plates*) ( $\alpha_w$ ).

Formación a temperaturas entre 750 - 650°C en los bordes de grano de la austenita previamente formada, apariencia de placas laterales separadas por un ángulo menor respecto del borde de grano [22]. Este constituyente se considera no deseable en la microestructura ya que conduce a una escasa tenacidad a la fractura [11]. (Ver Figura 1.5)

- Ferrita acicular (*acicular ferrite*) ( $\alpha_a$ ).

Formación a temperaturas bajo los 650°C entre los bordes de grano de la austenita previamente formada [22]. Provee incremento en la tenacidad y mejora la resistencia del metal de soldadura, por lo que se constituye en una microestructura deseada. Su morfología es de placas alargadas aleatoriamente ubicadas que forman un patrón entrecruzado que impide la propagación de fisuras y la tenacidad se ve mejorada [11]. Según se reporta en la literatura, se consideraba que la ferrita acicular era una forma de ferrita Widmanstätten que nucleaba en forma intergranular, otros estudios realizados posteriormente determinaron que son nucleaciones intergranulares de bainita [23], [24]. Los estudios realizados revelan que la ferrita acicular nuclea de forma intergranular alrededor de inclusiones [21], mientras que la bainita se forma intergranularmente pero no en inclusiones [11]. (Ver Figura 1.4, Figura 1.7 y Figura 1.8)

- Ferrita con estructuras internas alineadas (*lath structure*) (B).

Estructuras que son probablemente bainíticas, llamadas también ferrita bainítica (*bainitic ferrite*). Formación a temperaturas bajo los 500°C [22]. (Ver Figura 1.6, Figura 1.7, Figura 1.8 y Figura 1.9)

(2) Constituyentes menores llamados “microfases”, “microconstituyentes” o “constituyentes M/A” (*martensite/austenite constituents*) que pueden ser austenita, martensita, agregados de carburos de ferrita (F-C), perlita o cementita [11], [22], [25]. (Ver Figura 1.6)

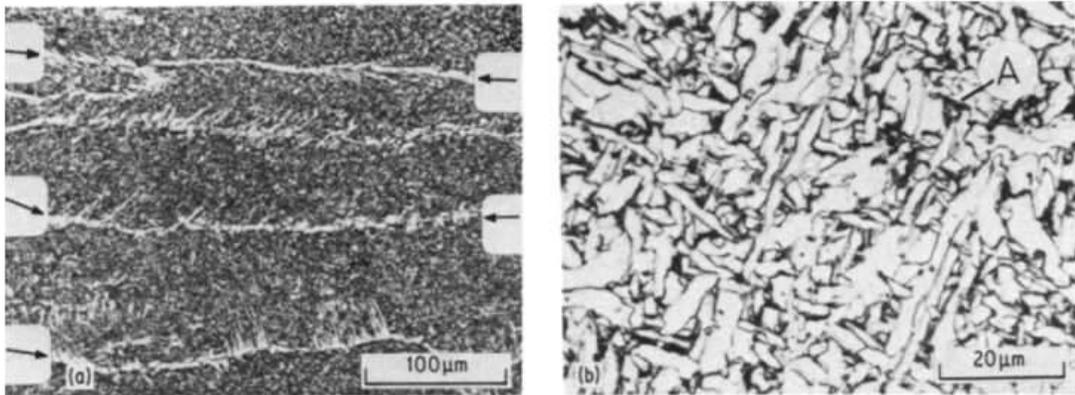


Figura 1.4. (a) Ferrita pro-eutectoide en los bordes de grano de la austenita previamente formada (flechas), (b) ferrita acicular en el cuerpo de los granos de austenita previamente formados.  
 (Fuente: The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals, R Ricks, R., Howell, P., Barritte, G. S. [21])

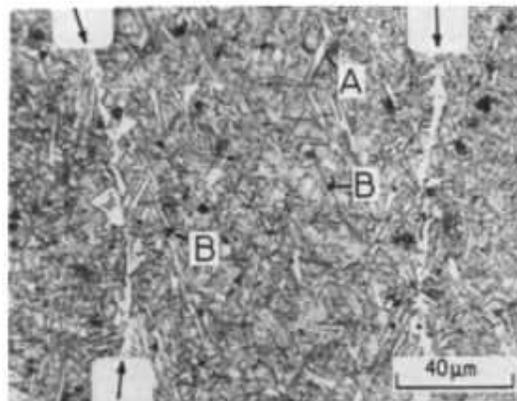


Figura 1.5. Ferrita pro-eutectoide formada en los bordes de austenita previa (flechas), A - nucleación de ferrita Widmanstätten intergranular, B - inclusiones.  
 (Fuente: The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals, R Ricks, R., Howell, P., Barritte, G. S. [21])

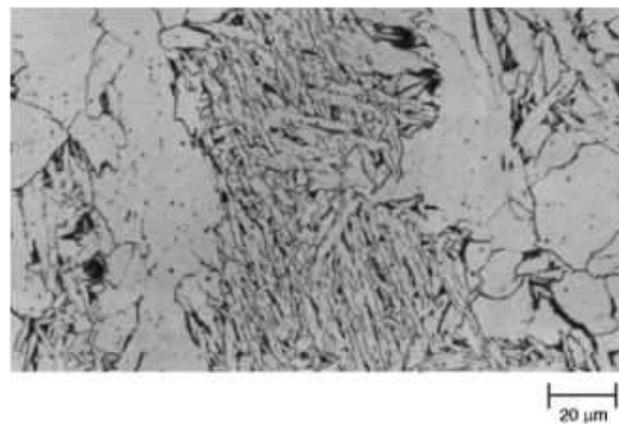
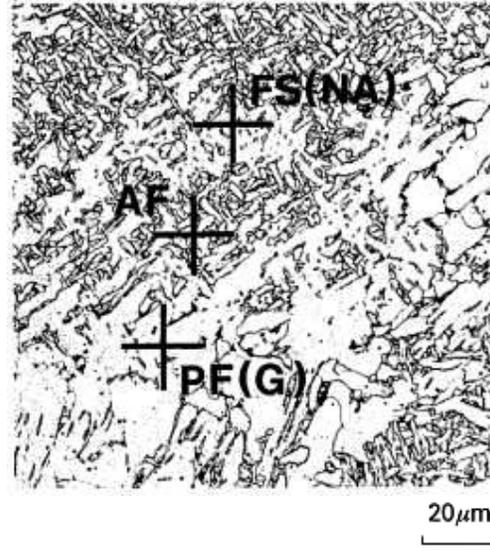
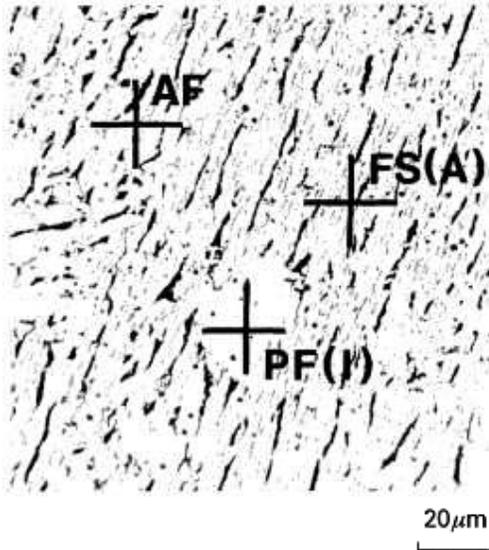


Figura 1.6. Micrografía de la zona de fusión, presencia de bainita y agregados de carburo de ferrita en ferrita de borde de grano gruesa.

(Fuente: Metallography and Microstructures Handbook, ASM [12])



- PF** – Ferrita Primaria (Primary ferrite),
- PF(G)** – Ferrita de borde de grano (Grain boundary ferrite),
- PF(I)** – Ferrita poligonal intergranular (Intergranular polygonal ferrite),
- AF** – Ferrita acicular (Acicular ferrite),
- FS(A)** – Ferrita con fases internas alineadas (Ferrite with aligned second phase),
- FS(NA)** – Ferrita sin fases internas alineadas (Ferrite with non-aligned)

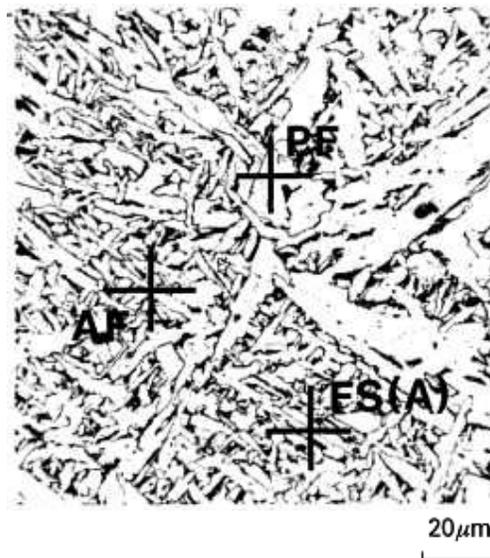
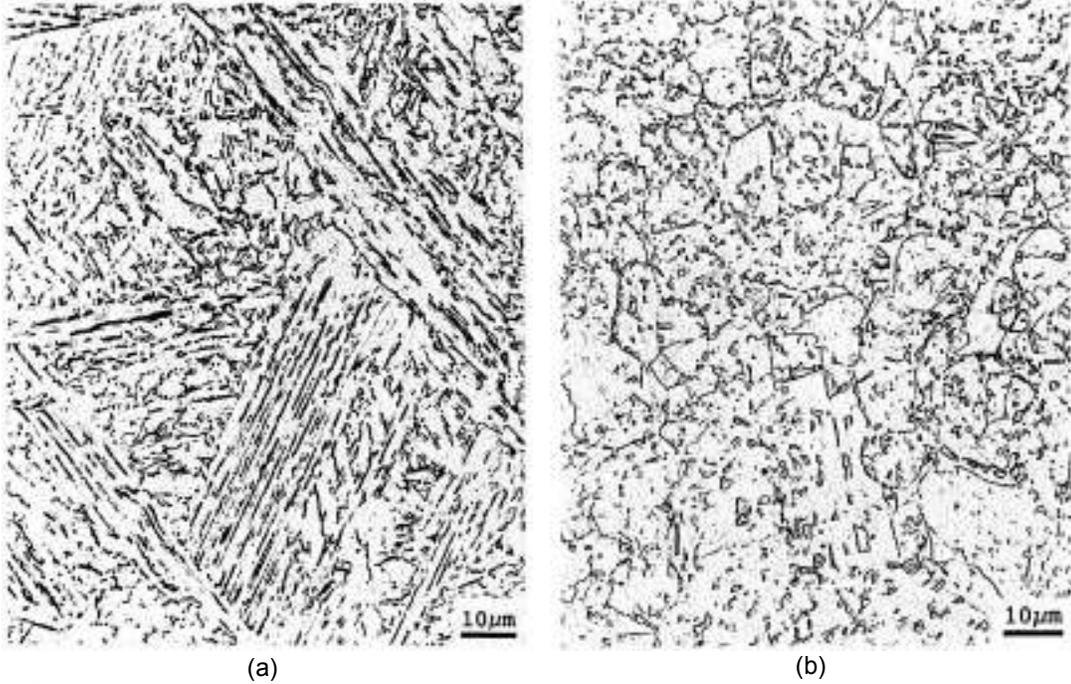
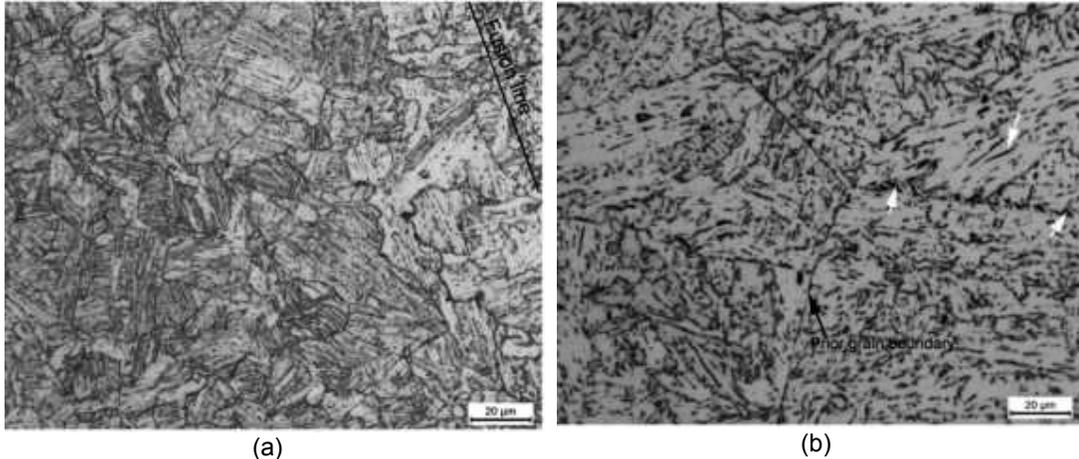


Figura 1.7. Morfologías varias de la ferrita en el metal de soldadura.

(Fuente: Factors influencing as-deposited strength, microstructure, and toughness of manual metal arc welds suitable for C-Mn steel fabrications, Abson, D., Pargeter, R. [22])



(a) (b)  
 Figura 1.8. (a) Ferrita acicular constituida de austenita retenida alargada y alineada entre los granos de austenita previa, (b) ferrita granular constituida de austenita retenida dispersa.  
 (Fuente: Ferritic Microstructures in Continuously Cooled Low- and Ultralow-carbon Steels, Krauss, G. Thompson, S. [24])



(a) (b)  
 Figura 1.9. Microestructuras de juntas soldadas, (a) bainita/martensita con estructura de fases alineadas, (b) bainita granular, placas de ferrita y constituyentes M/A ubicados en los bordes de granos gruesos de la austenita previa (flechas).  
 (Fuente: Influence of microstructural aspects on impact toughness of multi-pass submerged arc welded HSLA steel joints, Lan L. et al. [25])

- Inclusiones en el metal de soldadura.

Las inclusiones han sido relacionadas por varios autores como puntos de nucleación de ferrita acicular en el metal de soldadura [21], [25], [26]. En relación a las propiedades mecánicas, las inclusiones son un factor importante para controlar la tenacidad del metal de soldadura puesto que actúan como puntos de inicio de procesos de fractura por clivaje [26].

## 1.4. Composición química del metal de soldadura

La composición del metal de soldadura se determina principalmente por la composición química del alambre electrodo que se funde completamente y que se mezcla con una pequeña porción del material base que se funde para formar la pileta de soldadura. En general, la composición química del material base es diferente a la del metal del alambre electrodo (material de aporte) y la zona de fusión final puede exhibir una composición entre las dos composiciones del metal base y el alambre electrodo [11], [27], a esto se lo conoce como dilución. La composición final, la microestructura y las propiedades de la zona de fusión se determinará en función del nivel de dilución el cual depende de la penetración del metal de soldadura y que se funde en el metal base.

En los procesos de soldadura por fusión, la dilución ( $D$ ) se establece mediante una relación geométrica (ver Ecuación 1.3) que incluye la porción de metal base fundido ( $A_{MB}$ ) y la porción de material aportado ( $A_{MA}$ ) (ver Figura 1.10) [27].

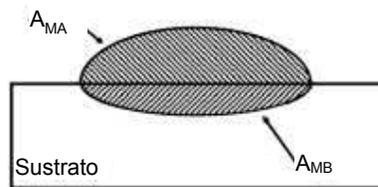


Figura 1.10. Representación esquemática de la dilución en la soldadura por fusión.  
(Fuente: Dilution in Fusion Welding, ASM Handbook, Welding Fundamentals and Processes [27])

$$D = \frac{A_{MB}}{A_{MB} + A_{MA}}$$

Ecuación 1.3. [27]

La concentración esperada de cualquier elemento de aleación ( $i$ ) en el metal de soldadura ( $C_{MS}^i$ ) se determina mediante la dilución ( $D$ ) y las concentraciones del elemento ( $i$ ) en el metal base ( $C_{MB}^i$ ) y en el material de aporte ( $C_{MA}^i$ ) [27], como se indica en la Ecuación 1.4.

$$C_{MS}^i = DC_{MB}^i + (1 - D)C_{MA}^i$$

Ecuación 1.4. [27]

En una unión soldada con varios pases, la dilución puede variar según la posición de la junta como se observa en la Figura 1.11. La dilución puede ser alta cerca de la raíz, en la que una porción mayor del material base se funde, mientras que la dilución se reduce al acercarse al centro de los cordones superiores donde la cantidad de metal base fundido es mínima [27].

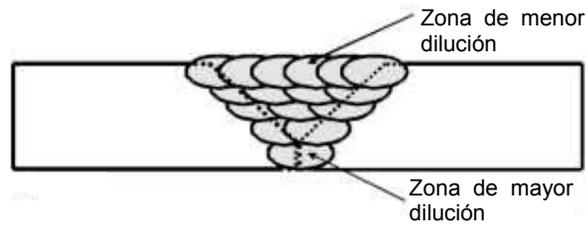


Figura 1.11. Dilución en junta soldada con multipases.

(Fuente: Dilution in Fusion Welding, ASM Handbook, Welding Fundamentals and Processes [27])

#### 1.4.1. Influencia de los elementos de aleación en el metal de soldadura

En el proceso de soldadura por arco sumergido, los elementos de aleación en el metal de soldadura provienen del alambre electrodo, el metal base y el fundente. La mayoría de elementos de aleación, a excepción del cobalto (Co) incrementan la templabilidad debido al endurecimiento por solución sólida intersticial con elementos como carbono C y nitrógeno N, o sustitucional con elementos como silicio Si o magnesio (Mg) en el metal de soldadura.[11]. En la Figura 1.12 (a) se muestra la variación de la dureza en el metal de soldadura en cordones obtenidos por arco sumergido. El incremento en la resistencia de la ferrita debido al endurecimiento por solución sólida de los elementos de aleación se muestra en la Figura 1.12 (b).

Al adicionar elementos aleantes se presentan variaciones en la microestructura y en las propiedades mecánicas, como por ejemplo, al añadir manganeso (Mn), cromo (Cr), níquel (Ni), o molibdeno (Mo) se incrementa la templabilidad del metal de soldadura y decrece la cantidad de ferrita de borde de grano ( $\alpha$ ) [28].

El metal de soldadura de algunos aceros con alta resistencia y baja aleación, como los que contienen elementos aleantes como C-Mn con Ti, V, o Nb, exhiben microestructuras clásicas similares a las soldaduras de aceros C-Mn, las cuales consisten en una variación de cantidades de ferrita acicular, ferrita alotropomórfica, ferrita Widmanstätten y microfases. Si la templabilidad se incrementa, la microestructura cambia a una mezcla de ferrita acicular, bainita, martensita de bajo carbono y microfases, como una microestructura

de fases alineadas. Una microestructura clásica presenta elevados esfuerzos de fluencia, usualmente en el rango de 500 a 700 MPa. [26].

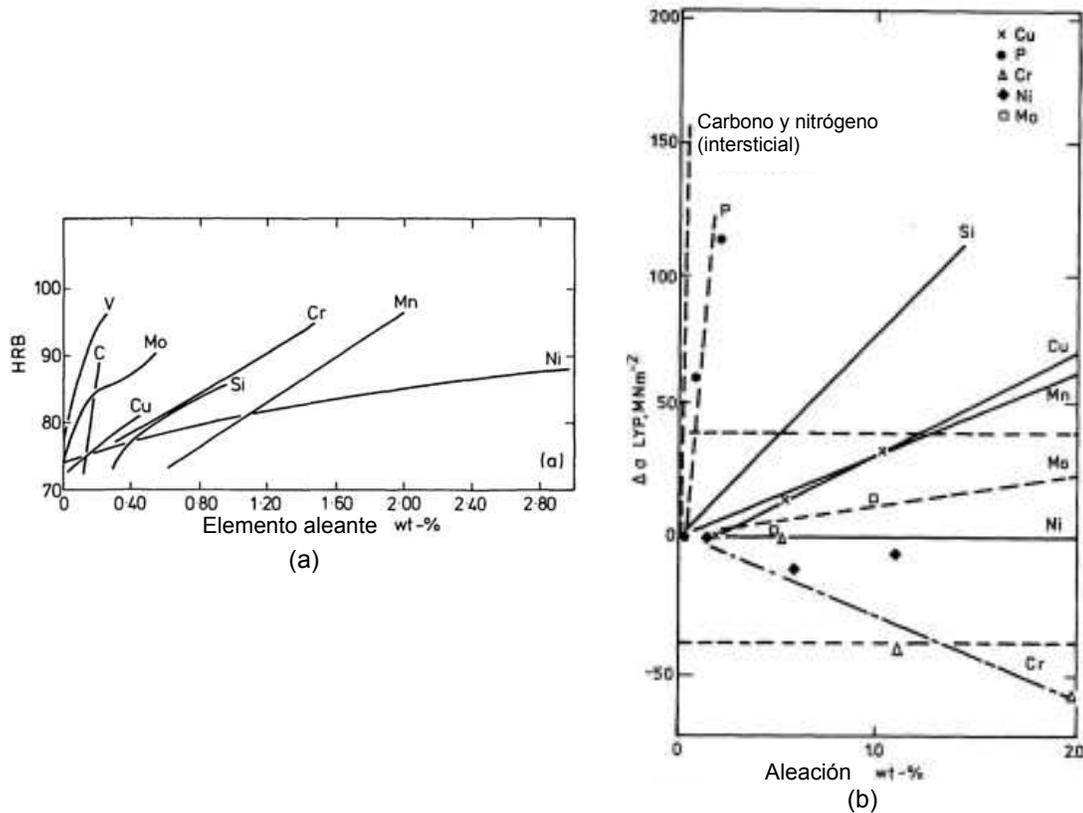


Figura 1.12. Efecto de elementos de aleación (a) en la dureza del metal de soldadura en uniones con varios pases obtenido por arco sumergido, (b) en la variación de la resistencia a la fluencia por la solución sólida en la ferrita.

(Fuente: Factors influencing as-deposited strength, microstructure, and toughness of manual metal arc welds suitable for C-Mn steel fabrications, Abson, D., Pargeter, R. [22], [29], [30] )

A continuación, se resume el efecto de los elementos de aleación sobre la evolución de la microestructura y las propiedades mecánicas.

- Carbono (C): principal elemento aleante que controla la microestructura de un acero, eleva la resistencia debido al endurecimiento por solución sólida intersticial, provee refinamiento de grano e incrementa la templabilidad [11]. En el metal de soldadura tiene un marcado efecto de endurecimiento comparado con otros elementos de aleación [22]. El endurecimiento se debe a la formación de carburos, que cuando se presentan en un elevado nivel en el metal de soldadura son perjudiciales para la microestructura ya que pueden actuar como puntos de iniciación fisuras [31].

- Manganeso (Mn): tiene un efecto moderado en el endurecimiento por solución sólida y provee un leve efecto desoxidante en el metal de soldadura [11]. Tiene un gran efecto en

la templabilidad, incrementan la cantidad de ferrita acicular a expensas de la ferrita alotropomórfica [26].

- Níquel (Ni): tiene efecto sobre la templabilidad y promueve la formación de ferrita acicular disminuyendo la ferrita alotropomórfica, debido a que retarda su crecimiento [11], pero, además provee potencial para el endurecimiento por solución sólida [26].

- Cromo (Cr): promotor de la formación de bainita a expensas de la ferrita acicular [26].

El efecto combinado de la presencia de Mn, Ni, Cr y Mo puede promover la formación de martensita de bajo carbono y microfases [26].

- Silicio (Si): En revisiones de literatura se reporta que metales de soldadura en los que se ha incrementado el porcentaje en peso de Si desde 0,2 a 0,4 wt.% la microestructura cambia de ferrita Widmanstätten a ferrita acicular [11].

- Aluminio (Al): Es un potencial creador de óxidos y nitruros en el metal de soldadura. En el estudio desarrollado por Oldland P. et al. [32] en el que se varió el tipo de fundente utilizado, con fundentes completamente básicos, se concluyó que dado que el nivel de oxígeno en el metal de soldadura se elevó debido al fundente, el valor óptimo del aluminio asociado con la formación de AF también se incrementó.

- Oxígeno (O): El oxígeno en el metal de soldadura proviene principalmente de la descomposición de los constituyentes del fundente y de la atmósfera. El oxígeno tomado de la atmósfera es menor que el proveniente del fundente y su contenido puede ser controlado [11], [33]. Lau, T. Weatherly G. y Mc Lean, A. [33] determinaron los niveles de oxígeno en el metal de soldadura obtenidos por arco sumergido utilizando fundentes elaborados con índices de basicidad diferentes, los resultados mostraron que fundentes con mayor índice de basicidad (fundentes básicos) entregan contenidos mayores de oxígeno, mientras que fundentes con índices de basicidad neutros entregan contenidos menores. Además, concluyen que partículas atrapadas de la descomposición del fundente en la columna del arco eléctrico deben ser consideradas como las mayores fuentes de contaminación por oxígeno durante la soldadura.

Las porosidades en el metal de soldadura son el resultado de los gases generados durante la soldadura y que permanecen atrapados en el metal fundido que posteriormente solidifica [34], [35]. En el estudio realizado por Wei, Q. et al. [34] en el que se efectuó soldadura por fusión de aceros con gas de protección constituido por una mezcla de oxígeno y nitrógeno la cantidad de poros en el metal de soldadura se incrementó rápidamente y alcanzó un valor extremo con una mezcla de 80% de oxígeno y 20% de nitrógeno.

## 1.5. Las arenas ferrosas

Las arenas ferrosas, también conocidas como arenas negras o arenas ferruginosas son definidas como un sedimento dendrítico coloreado por óxidos de hierro, este tipo de arenas que se extraen en el Ecuador, de acuerdo con el reporte de minería del Banco Central del 2016, son utilizadas en la construcción, la fabricación de vidrio, fundiciones, pulimentación, filtración, etc. [36]. Las arenas ferruginosas son abundantes, se ubican en las zonas costeras [37] y constituyen el tercer mineral no metálico que presenta mayores reservas existentes en el Ecuador, en el 2009, las reservas probadas de este mineral correspondían a 12300 millones de toneladas [38]. Entre los años 2010 y 2016 la producción minera reportada de arenas ferruginosas fue de 43 282,42 toneladas [39].

En soldadura, estas arenas se han utilizado en estudios como materia prima para obtener consumibles para soldadura. R. Quintana-Puchol et al. [40], [41] elaboraron consumibles para soldadura manual y por arco sumergido con la escoria de una carga metalúrgica fundida a partir de arenas negras, esta escoria fue procesada por aglomeración y se utilizó para soldar cordones que presentaron buenas características tecnológicas.

Las arenas ferrosas utilizadas en el presente proyecto son arenas extraídas de la playa Ostional ubicada en Mompiche, provincia de Esmeraldas, en la zona de concesión minera denominada Ostional Bloque 1, que fueron recolectadas en el proyecto denominado “Estudio y obtención de metal de hierro a partir de arenas ferruginosas” [37]. Los autores del mencionado trabajo no hacen referencia a una técnica de muestreo específica que haya sido aplicada en la recolección de la arena. Esta misma arena recolectada fue utilizada en un trabajo de titulación para elaborar un depósito de arenas ferrosas sobre sustrato vítreo [42], en el cual se caracteriza la composición mineralógica y química de estas arenas mediante difracción de rayos X y espectroscopía RAMAN, además se caracteriza el tamaño de partícula de los granos de arena mediante microscopía. En la Tabla 1.2. se resume la composición mineralógica de una muestra de arena en la que se evidencia que existe alto contenido de minerales que contienen hierro, como la ilmenita, la magnetita y la hematita.

Tabla 1.2. Composición mineralógica mediante análisis de difracción de rayos X de las arenas ferrosas.

Mineral	Fórmula	Contenido (%)	Mineral	Fórmula	Contenido (%)
Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>	45	Rutilo	TiO <sub>2</sub>	2
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	35	Tenorita	CuO	1
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17			

(Fuente: Estudio y caracterización física de arenas ferrosas depositadas sobre sustrato vítreo con aplicaciones industriales [42])

En la Figura 1.13, se presenta la espectroscopia de los granos de una muestra de arena caracterizada en el estudio mencionado, en la cual se reconocen picos fundamentales Raman característicos de los minerales magnetita ( $663,589 - 670 \text{ cm}^{-1}$ ) y hematita ( $220 - 289 \text{ cm}^{-1}$ ). El tamaño de partícula promedio de los granos de arena que fue reportado en ese estudio corresponde a  $223,3 \mu\text{m}$  [42].

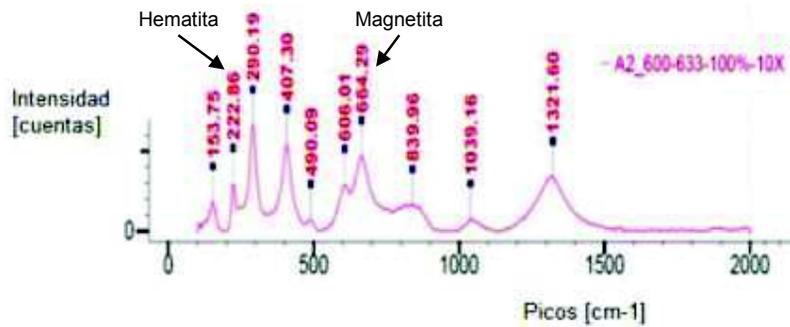


Figura 1.13. Espectroscopia de los granos de una muestra de arena.  
(Fuente: Estudio y caracterización física de arenas ferrosas depositadas sobre sustrato vítreo con aplicaciones industriales [42])

## **2. METODOLOGÍA**

En esta sección se detallan (1) los materiales utilizados en el proceso de soldadura por arco sumergido, (2) los métodos de caracterización empleados para el material base, (3) las variables de los procedimientos de soldadura empleados para realizar las juntas, (4) el método de inspección no destructiva, (5) el método de caracterización de la escoria formada en el proceso de soldadura, (6) los métodos de caracterización de las propiedades mecánicas, composición química, microestructura, y macroestructura de las uniones soldadas.

### **2.1. Preparación de las arenas**

En la sección 1.5 se señaló que las arenas ferrosas utilizadas en el presente estudio fueron recolectadas para un estudio previo directamente de la playa Ostional por lo que es necesario realizar una preparación previa para utilizarlas en el proceso experimental para eliminar las sales mezcladas con la arena.

Se realizó el lavado de la arena, para lo cual se colocó la arena en un recipiente con agua destilada y se removió manualmente durante un intervalo de 5 a 10 minutos. Se dejó reposar el conjunto durante 30 minutos, se procedió a eliminar el exceso de agua con las impurezas. Utilizando un colador se filtró la arena. Se repitió el lavado con agua destilada 3 veces más.

Para secar la arena húmeda se utilizó una mufla a una temperatura de permanencia de 200°C durante 2 horas [40], [42]. Se reservó la arena para su posterior utilización.

### **2.2. Caracterización del metal base**

Se utilizó acero estructural ASTM A-572 como metal base de las juntas soldadas. El material utilizado proviene de 4 planchas de retal del proceso de fabricación de estructuras metálicas, a cada plancha de se le asignó una letra para identificación, A, C, D, F. El acero estructural utilizado tiene un espesor de 15 mm. Las muestras para caracterizar el metal base se extrajeron de una misma plancha de acero (plancha F), excepto para el ensayo de dureza y el análisis metalográfico, los cuales se hicieron en muestras extraídas de cada plancha. El corte se realizó utilizando una sierra circular de corte para metales que permite realizar corte en frío mediante una hoja de sierra de acero templado con dientes de punta de carburo.

### **2.2.1. Análisis químico por espectrometría de emisión atómica por chispa (spark-AES)**

El análisis químico del material base se realizó en el Laboratorio de Fundición (LF) de la EPN. El método para determinar el porcentaje de fracción en masa de los elementos aleantes del metal base utilizado como referencia se basa en el método estándar para análisis de aceros al carbono y de baja aleación por espectrometría de emisión atómica por chispa de la American Society of Testing Materials (ASTM) [43].

#### **2.2.1.1. Preparación de la muestra**

El tamaño de la muestra utilizado fue 38 x 15 mm para el área de medición y 10 mm de espesor. La muestra se identificó con el código "QMB". El tamaño del área de medición permitió cubrir adecuadamente el orificio de apertura de la cámara de la chispa y realizar 3 quemaduras en la superficie. La preparación de la superficie después del corte se realizó en húmedo mediante una desbastadora de disco con lija de lona para metales, abrasivo de óxido de aluminio de granulometría 100 granos/in<sup>2</sup>. Posteriormente se utilizaron lijas de agua de carburo de silicio de 240, 320, 400 y 600 granos/in<sup>2</sup> en húmedo. Para el acabado final se utilizó lija de agua 1200 granos/in<sup>2</sup> en seco.

#### **2.2.1.2. Preparación de los materiales de referencia**

Los materiales de referencia del laboratorio corresponden a varias muestras de acero de diferentes fabricantes. La superficie de los materiales de referencia es maquinada luego de que toda la superficie disponible ha sido utilizada, debido a que durante la medición la chispa quema la superficie de este. El material de referencia utilizado presentaba un área de medición disponible para la preparación del equipo, por lo que no se realizó ninguna preparación adicional.

#### **2.2.1.3. Procedimiento de medición**

Se utilizó un espectrómetro de emisión óptica para realizar las mediciones, las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 2.1.

Se reguló el flujo de argón en el sistema de alimentación del gas de protección. Se seleccionó el método de análisis que utilizará el software. Se preparó el equipo mediante verificación usando el material de referencia, a esto se le conoce como purga del equipo, para lo cual se realizan mediciones en la superficie del material de referencia hasta alcanzar las especificaciones del fabricante. Antes de realizar las mediciones se limpió el

electrodo para retirar cualquier residuo contaminante. Se colocó la superficie preparada de la muestra sobre el orificio de la cámara de chispa. La ubicación de la muestra debe alinearse con el electrodo de tungsteno para que la medición se realice en dicha ubicación. Se debe asegurar que la muestra selle adecuadamente la cámara. Se cierra el circuito de medición. Se inició la medición mediante los controladores del software. Durante la medición, se genera la chispa que quema la superficie del material gracias al flujo de argón que aísla la cámara. Luego de la medición, el software utiliza el método de análisis seleccionado para realizar los cálculos automáticamente y muestra los resultados de la fracción en masa de los elementos. El método de la ASTM tomado como referencia indica que las mediciones deben realizarse por duplicado y se debe reportar el promedio de estos resultados [43]. Para una medición posterior se debe retirar la muestra, limpiar nuevamente el electrodo, y volver a ubicarla en una nueva posición donde la superficie no se encuentre quemada.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas espectrómetro de emisión óptica.

Marca	BRUKER	
Modelo	Q2 ION	
Características eléctricas	Voltaje	110 [V]
	Amperaje	25 [A]
	Potencia (durante medición)	200 [W]
Software para análisis	Elemental Suite OES	
Condiciones de ensayo	Atmósfera	Argón
	Flujo durante medición	2,5 [L/min]
	Método de análisis	Fe110

(Fuente: <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/optical-emission-spectrometry/q2-ion/technical-details.html>)

### 2.2.2. Análisis metalográfico

Se realizó el análisis metalográfico del metal base para caracterizar la microestructura e identificar la dirección del laminado de cada plancha. Es necesario identificar la dirección del laminado debido a que los materiales que se obtienen por un proceso de laminación en caliente, como en el caso del material base en estudio, presentan un comportamiento anisótropo debido a que durante el proceso de deformación se genera una microestructura de cristales o granos alargados y direccionados en el mismo sentido de la laminación, por lo que sus propiedades mecánicas variarán en función de la dirección en la que se apliquen las sollicitaciones mecánicas. Por lo tanto, se requiere conocer la dirección del laminado para (1) realizar el corte de las muestras para los ensayos mecánicos de tracción e impacto (los ejes longitudinales de las muestras deben coincidir con la dirección de laminación), y (2) establecer la ubicación de corte de las placas para realizar el proceso de soldadura de

manera que las placas se unan manteniendo la dirección de laminación y que el eje del cordón sea perpendicular a dicha dirección.

### 2.2.2.1. Preparación de la muestra

Se extrajo una muestra por corte de 25 x 15 x 10 mm por plancha, se realizó el montaje de en resina poliéster y se procedió con la preparación mecánica de las superficies en húmedo utilizando primero una desbastadora de disco con lija de lona para metales, abrasivo de óxido de aluminio de granulometría 100 granos/in<sup>2</sup>. A continuación, se usó un equipo modular automático que permite realizar desbaste fino y pulido de muestras, las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 2.2. En este equipo se empleó secuencialmente los siguientes abrasivos: lijas de agua de carburo de silicio de 240, 320, 400, 600 y 1200 granos/in<sup>2</sup> y polvo de óxido de aluminio (alúmina) de tamaño 0,3 µm en dispersión.

Tabla 2.2. Especificaciones del equipo modular automático.

Marca	FORCIPOL		
Modelo desbastadora/pulidora	FORCIPOL 2v		
Características eléctricas	Voltaje	110	[V]
	Potencia	562,5	[W]
Condiciones de trabajo	Velocidad	50-600	[rpm.]
Modelo cabezal	FORCIMAT		
Características eléctricas	Motor	DC	
	Potencia	90	[W]
Condiciones de trabajo	Velocidad	120	[rpm]
	Sistema de sujeción de muestras	Individual neumático	
	Fuerza	5-60	[N]
	Número de muestras máximo	6	u

(Fuente: [http://www.worldoftest.com/pdf/Qualitest\\_Brochure\\_Forcipol.pdf](http://www.worldoftest.com/pdf/Qualitest_Brochure_Forcipol.pdf))

### 2.2.2.2. Procedimiento

#### 1. Visualización meso-estructural

Una vez preparada mecánicamente la superficie se realizó la visualización utilizando un microscopio óptico metalográfico invertido, en la Tabla 2.3 están las especificaciones técnicas del mismo, esto se realizó para identificar el tamaño y distribución de las inclusiones en el material.

#### 2. Ataque químico

Se realizó el ataque químico de la muestra por inmersión utilizando el reactivo nital al 10% (ácido nítrico diluido en alcohol etílico). El tiempo de ataque fue 10 s aproximadamente.

### 3. Análisis metalográfico

La muestra se visualizó en el microscopio óptico metalográfico invertido para realizar el análisis metalográfico en el que se caracterizó la microestructura del material base y, en este caso, se identificó la dirección del laminado.

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico invertido.

Marca	OLYMPUS		
Modelo	GX41		
Características eléctricas	Voltaje alimentación	110	[V]
Sistema de iluminación	Luz reflejada halógena	30	[W]
Magnificación	Lentes	5x, 10x, 50x, 100x	
Sistema de enfoque	Manual		
	Carrera	9	[mm]
	Resolución	0,2	[mm]
Portamuestras	Carrera	120 (X) x 78 (Y) [mm]	
Sistema de visualización	Binocular		
Accesorios	Cámara		
Software	OLYMPUS Stream Basic		

(Fuente: [https://www.olympus-ims.com/es/microscope/gx41/#!cms\[tab\]=%2Fmicroscope%2Fgx41%2Fspecifications](https://www.olympus-ims.com/es/microscope/gx41/#!cms[tab]=%2Fmicroscope%2Fgx41%2Fspecifications))

### 2.2.3. Ensayo de dureza superficial

Se realizó un ensayo de dureza bajo método Rockwell, se utilizó como referencia el método estándar para dureza Rockwell de materiales metálicos de la ASTM [44]. Las especificaciones técnicas del durómetro se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del durómetro Rockwell.

Marca	HARDROCKER		
Modelo	HR 150-A		
Sistema de carga	Aplicación de peso muerto		
	Carga total disponible	60, 100, 150	[kgf]
	Carga menor o precarga	10	[kgf]
	Control de carga	Sistema de amortiguador hidráulico	
Sistema de medición	Dial indicador analógico		
	Resolución	1	[u]
Escalas disponibles	Conforme método estándar ASTM E-18 si se dispone del indentador requerido		

(Fuente: <http://www.worldoftest.com/hardrocker-150-analog-rockwell-hardness-tester-basic-economy-model>)

### 2.2.3.1. Preparación de muestra

Se utilizó la misma muestra usada en el análisis metalográfico, puesto que durante la preparación se logran obtener 2 superficies paralelas y el espesor cumple con el mínimo valor requerido para ejecutar el ensayo de dureza.

### 2.2.3.2. Procedimiento para realizar el ensayo

Se utilizó la escala Rockwell B (carga 100 kgf e indentador esférico de carburo de tungsteno de diámetro 1/16 in). Se realiza el procedimiento de medición como está detallado en el método estándar ASTM E-18. Se hicieron 7 mediciones, se reporta la dureza promedio.

### 2.2.4. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó en el Laboratorio de Ensayos del Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN.

Se tomó como referencia las especificaciones definidas en los métodos estándar y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero de la ASTM [45].

Se utilizó una máquina universal de ensayos cuyas especificaciones técnicas se señalan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.

Marca	TINIUS OLSEN	
Sistema de carga	Tornillos	
	Capacidad	300 [kN]
Sistema de medición	Galgas extensométricas, encoder	
Condiciones del ensayo	Velocidad de desplazamiento	2 [mm/s]

(Fuente: Servicio de Normalización Ecuatoriano INEN)

#### 2.2.4.1. Preparación de la muestra

La muestra se extrajo de manera que el eje longitudinal coincida con la dirección de laminación determinada en el análisis metalográfico del material base (ver sección 2.2.2), este tipo de muestra se denomina muestra longitudinal.

Se cortó una muestra de 285 x 52 x 15 mm de espesor, la misma que se maquinó posteriormente para alcanzar las dimensiones mostradas en la Figura 2.1, el tamaño de la muestra corresponde a las dimensiones establecidas en el método estándar definido en la ASTM A-370 para una longitud calibrada de 50 mm [45]. La muestra se identifica con las letras "TMB".

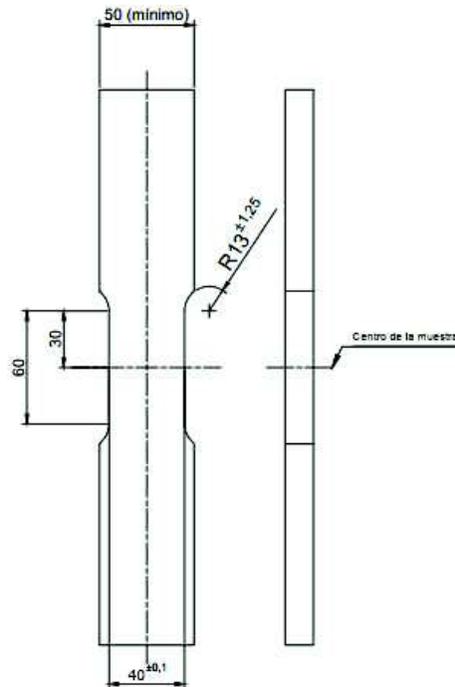


Figura 2.1. Dimensiones en mm de la muestra de sección reducida para ensayo de tracción del metal base.

#### 2.2.4.2. Procedimiento del ensayo

La máquina universal de ensayos utilizada se calibra cada 6 meses conforme a requerimientos de acreditación, por lo cual, antes de realizar ensayo solo se reguló la velocidad de desplazamiento y se introdujo en el software controlador las mediciones del ancho y espesor de la sección reducida de la muestra. Se marcó la longitud calibrada en la sección reducida de la muestra para calcular posteriormente la elongación.

Se sujetó la muestra en la mesa fija del equipo y se desplazó la mesa móvil para sujetar la muestra en las mordazas de esta. Se inició el proceso de carga mediante el desplazamiento de la mesa móvil. Durante el proceso de carga se verifica que la muestra se encuentre adecuadamente sujeta y no deslice respecto de las mordazas. El proceso de carga se realizó hasta que la muestra alcanzó la rotura.

Para realizar la medición posterior de la longitud calibrada se retiraron del equipo las secciones de la muestra fracturada y se unieron cuidadosamente las superficies de fractura. El software del equipo calcula automáticamente y muestra en pantalla los valores de resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, y porcentaje de elongación.

## 2.2.5. Ensayo de impacto Charpy

El ensayo de impacto del metal base se realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la EPN.

Se utilizó como referencia las especificaciones definidas en los métodos estándar y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero de la ASTM [45].

Las especificaciones del equipo utilizado y las condiciones del ensayo se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Especificaciones técnicas del equipo de ensayo Charpy.

Marca	TINIUS OLSEN	
Sistema de carga	Tipo péndulo	
	Capacidad	264 [ft.lbf]
Condiciones del ensayo	Temperatura	$0 \pm 1$ [°C]

(Fuente: Servicio de Normalización Ecuatoriano INEN)

### 2.2.5.1. Preparación de las muestras

Se extrajeron 3 muestras longitudinales del material base de dimensiones 65 x 11 x 15 mm. Las muestras se identifican con los códigos CHMB1, CHMB2, CHMB3. Para alcanzar la sección de las muestras estándar para ensayo Charpy de 10 x 10 mm se utilizó en húmedo la desbastadora de disco con lija de lona para metales de óxido de aluminio de 100 granos/in<sup>2</sup> y el acabado final de las muestras se realizó con lijas de agua de 240 granos/in<sup>2</sup>. Para elaborar la muesca en "V" de 2 mm de profundidad en las muestras se utilizaron limas triangulares. Las dimensiones finales de las muestras están en correspondencia a las especificaciones del método estándar definido en el ASTM A-370 [45] y se muestran en la Figura 2.2.

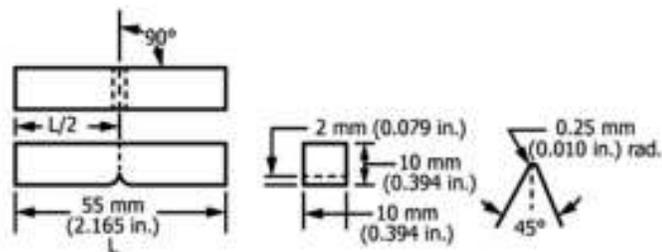


Figura 2.2. Tamaño de las muestras para ensayo de impacto Charpy.

(Fuente: ASTM A-370 17a. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products [45])

### **2.2.5.2. Procedimiento del ensayo**

El ensayo fue realizado una temperatura diferente a la del ambiente. Para establecer la temperatura del ensayo se consideraron las condiciones de trabajo menos favorables de las aplicaciones comunes del tipo de material en cuestión. Debido a que el material es utilizado en aplicaciones estructurales [10], que en general, se encuentran a la intemperie se establece una temperatura de ensayo de 0°C considerando que en el Ecuador las temperaturas más bajas registradas en las estaciones de control del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) del último anuario meteorológico publicado en el 2012 corresponde a -0,2 °C [46].

Con el objetivo de alcanzar la temperatura del ensayo se utilizó hielo seco (CO<sub>2</sub> sólido) y alcohol industrial para enfriar las muestras. Las muestras permanecieron al menos 5 minutos en el medio de enfriamiento antes de ser colocadas en el equipo. Se utilizó un medidor de temperatura y una termocupla tipo "K" para verificar la temperatura de la muestra. Una vez alcanzada la temperatura del ensayo se soltó el péndulo del equipo. Se anotó el valor de la energía absorbida mostrada en la escala del equipo y se recogieron las muestras fracturadas. Se reporta el valor promedio de la energía absorbida por las tres muestras.

## **2.3. Proceso de soldadura**

El presente proyecto utiliza una metodología experimental que consiste en efectuar la soldadura de varias juntas por el proceso de arco sumergido manteniendo invariantes los parámetros del procedimiento de soldadura como son: (1) el tipo de alambre electrodo y su diámetro, (2) la extensión del electrodo, (3) el ángulo de arrastre, (4) la velocidad de desplazamiento del cabezal de soldadura, (4) la preparación de junta y el número de pases. En cuanto a las variables eléctricas, se utilizó corriente continua electrodo positivo (DCEP o DC+) para todos los pases, la corriente y el voltaje se seleccionaron en la misma posición en los controles de la fuente de poder y del sistema de alimentación para cada pase y se registraron los valores de voltaje, intensidad de corriente, y velocidad de alimentación del alambre, directamente de los medidores analógicos de los equipos (las variables eléctricas registradas variaron dentro de un rango). El parámetro que se varió para cada junta fue la composición del fundente para la protección del proceso. Inicialmente se realizaron pruebas para determinar las variables eléctricas del procedimiento de soldadura por arco sumergido en varios pases utilizando únicamente fundente para obtener una junta soldada de buena apariencia superficial y sin defectos internos en el cordón de soldadura. Una vez

definidas dichas variables de soldadura se procedieron a soldar cuatro juntas, la primera utilizando sólo fundente y las tres siguientes variando la composición en peso del fundente para incorporar arenas ferrosas.

### 2.3.1. Fundente y alambre sólido

El fundente comercial aplicado en el proceso tiene un índice de basicidad igual a 1,1 (valor determinado con base en la Ecuación 1.2 [47]) y corresponde al fundente F7A2 bajo especificación AWS 5.17. La composición del fundente utilizado se presenta en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Composición del fundente bajo especificación F7A2.

Componente	Porcentaje <sup>1</sup>	Porcentaje <sup>2</sup>
SiO <sub>2</sub>	21	21
MnO	10	10
MgO	21	21
CaF <sub>2</sub>	10	10
Na <sub>2</sub> O	2	2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31	31
CaO	1	1
TiO <sub>2</sub>	1	1
FeO	-	1
Metales de aleación (máx)	3	-

(Fuente: 1 Hoja técnica del fundente [48], 2 certificado del producto del fundente [47])

El alambre sólido ocupado en el proceso corresponde a la designación EM12K de acuerdo con la especificación AWS 5.17. La selección se realizó con base en el valor aproximado de resistencia a la tracción obtenido de la tabla “Table 3 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-austenitic Steels (Rockwell B to Other Hardness Numbers)” del ASTM A370 “Método estándar y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero” [45] mediante el valor de dureza en escala Rockwell B obtenido del ensayo de dureza superficial a las muestras del material base (ver sección 3.1.1.3). Se usó alambre de 2 mm de diámetro.

La composición química del alambre electrodo y la composición química del metal de soldadura evaluada por el fabricante para el sistema fundente – alambre electrodo se detallan en la Tabla 2.8. Las propiedades mecánicas del sistema fundente – alambre electrodo evaluadas por el fabricante bajo especificaciones AWS se muestran en la Tabla 2.9. La distribución del tamaño de partícula del fundente comercial se indica en la Tabla 2.10.

Tabla 2.8. Composición química del alambre electrodo EM12K y análisis químico del sistema fundente-electrodo.

Elemento	Composición química alambre electrodo		Análisis químico del metal de soldadura (sistema fundente – alambre electrodo)	
	Porcentaje Requerido		Porcentaje Resultados	Porcentaje
	mín.	máx.		
C	0,05	0,15	0,110	0,050
Si	0,1	0,35	0,200	0,430
Mn	0,8	1,25	0,990	1,260
P	-	0,03	0,005	0,014
S	-	0,03	0,009	0,009
Cu	-	0,35	0,110	0,100

(Fuente: Certificado de conformidad sistema fundente – alambre electrodo [49])

Tabla 2.9. Propiedades mecánicas del material depositado usando el sistema F7A2/EM12K-18.

Condición evaluada	Resistencia a la fluencia		Resistencia a la tracción		Porcentaje de elongación	Ensayo de impacto Charpy a (-28.9°C)	
	[Mpa]	[ksi]	[Mpa]	[ksi]		[J]	[ft.lbf]
Como fue soldado (As-welded) <sup>1</sup>	420	61	520	75	32	125	92
Como fue soldado (As-welded) <sup>2</sup>	400	58	490	71	30	137	101

(Fuente: 1 Hoja técnica del fundente [48], 2 certificado de conformidad del sistema fundente – alambre electrodo [49])

Tabla 2.10. Distribución del tamaño de partícula del fundente.

No. malla	Porcentaje	Tamaño estándar según no. malla [µm]
+20	36% máximo	850
-20 +60	57% mínimo	250-850
-60	7% máximo	250

(Fuente: Elaborado con base en el certificado del producto del fundente [47])

### 2.3.2. Preparación de las mezclas de fundente y arena

La relación en peso ( $r$ ) se define en función de la relación de masas de arena y masa de fundente, como se observa en la Ecuación 2.1.

$$r = \frac{m_a}{m_f}$$

Ecuación 2.1

Dónde,  $r$  es la relación en peso,  $m_a$  es la masa de arena y  $m_f$  es la masa de fundente.

Con la finalidad de verificar la variación de propiedades en las juntas soldadas, se establece usar relaciones en peso,  $r$ , con una variación de 0,1 iniciando desde 0. Las relaciones en peso empleadas en el proceso experimental se indican en la Tabla 2.11. Las masas de fundente y arena se pesaron utilizando la balanza de precisión disponible en el LANUM de la EPN, las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 2.12.

Tabla 2.11. Relaciones en peso utilizadas en el proceso experimental.

Relación en peso	Identificación de la junta soldada	Masa de fundente	Masa de arena
r		$m_f$	$m_a$
[1]		[kg]	[kg]
0	0F	3	0
0,1	1C	2,7	0,3
0,2	2A	2,4	0,6
0,3	3D	2,1	0,9

Tabla 2.12. Especificaciones técnicas de la balanza de precisión.

Marca	Adam Equipment
Modelo	PGL-6001
Capacidad	6000 [g]
Apreciación	0,1 [g]

(Fuente: LANUM, EPN)

La mezcla de ambos componentes se efectuó mediante técnica de paleo. La incorporación de arena al fundente se dificulta debido a la diferencia entre el tamaño promedio de partícula de arena (222,3  $\mu\text{m}$  [42]) y el tamaño de partícula de fundente (57% de partículas 850  $\mu\text{m}$  [47]), por lo cual, el procedimiento de mezcla se efectuó de manera continua durante el proceso experimental para homogenizar la mezcla antes de colocarla como protección del cordón.

### 2.3.3. Procedimiento de soldadura

El corte en frío de las placas de acero se ejecutó con una cortadora de disco usando agua para refrigerar el material. Las dimensiones de las placas fueron de 500 x 200 x 15mm. Se utilizó una de junta a tope con preparación de bisel en V. La preparación del bisel se realizó mediante maquinado en cepilladora, el ángulo de bisel fue de 45° y la profundidad del bisel fue de 13 mm. La preparación del bisel responde a la necesidad de un ancho de cordón representativo para efectuar posteriormente el análisis de composición química del metal de soldadura. La soldadura se realizó en posición 1G, con múltiples pases.

Se utilizó una fuente de poder de voltaje constante cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 2.13. La soldadora posee un sistema de alimentación de alambre sólido automático. Se utilizó un carro móvil que se desplaza sobre rieles para generar el recorrido longitudinal a lo largo del cordón, a este se acopló la pistola del sistema de soldadura. La activación de la pistola se realizó manualmente por un soldador. El fundente (o la mezcla arena/fundente) fue alimentado manualmente. Durante el proceso de soldadura se recolectaron muestras de la escoria formada para su posterior análisis. Las variables de

soldadura para cada pase de las juntas 0F, 1C, 2A y 3D se muestran en la Tabla 2.14, Tabla 2.15, Tabla 2.16 y en la Tabla 2.17, respectivamente.

Tabla 2.13. Especificaciones técnicas de la soldadora.

Marca	Lincoln Electric	
Modelo	R3S-400	
Tipo	Rectificadora	
Características eléctricas	Trifásica	
	Voltaje de entrada	220 [V]
	Amperaje de entrada	68 [A]

(Fuente: Operating manual Idealarc R3S-400 DC arc welding power source [50])

Tabla 2.14. Variables del procedimiento de soldadura para la junta 0F.

Pase	Proceso	Metal de aporte		Corriente				Voltaje	Velocidad de soldadura
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperaje	Velocidad de alimentación de alambre			
						[mm]	[A]		
1	GMAW	ER70S-6	1,2	DC+	113	-	-	17,8	11,70
2	SAW	EM12K	2	DC+	240	120	304,8	27	28,15
3	SAW	EM12K	2	DC+	270	140	355,6	26	22,22
4	SAW	EM12K	2	DC+	270	140	355,6	26	26,40
5	SAW	EM12K	2	DC+	270	140	355,6	26	31,31
6	SAW	EM12K	2	DC+	280	140	355,6	25	23,75
7	SAW	EM12K	2	DC+	280	140	355,6	25	21,97

Tabla 2.15. Variables del procedimiento de soldadura para la junta 1C.

Pase	Proceso	Metal de aporte		Corriente				Voltaje	Velocidad de soldadura
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperaje	Velocidad de alimentación de alambre			
						[mm]	[A]		
1	GMAW	ER70S-6	1,2	DC+	104	-	-	17,4	12,31
2	SAW	EM12K	2	DC+	240	110	279,4	27	29,94
3	SAW	EM12K	2	DC+	270	135	342,9	26	28,92
4	SAW	EM12K	2	DC+	270	135	342,9	26	28,34
5	SAW	EM12K	2	DC+	270	135	342,9	26	26,24
6	SAW	EM12K	2	DC+	270	140	355,6	26	30,76
7	SAW	EM12K	2	DC+	270	140	355,6	26	25,34

Tabla 2.16. Variables del procedimiento de soldadura para la junta 2A.

Pase	Proceso	Metal de aporte		Corriente				Voltaje	Velocidad de soldadura
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperaje	Velocidad de alimentación de alambre			
			[mm]			[in/min]	[cm/min]		
1	GMAW	ER70S-6	1,2	DC+	106	-	-	17,4	10,03
2	SAW	EM12K	2	DC+	190	90	228,6	29	27,94
3	SAW	EM12K	2	DC+	250	120	304,8	27	30,39
4	SAW	EM12K	2	DC+	260	130	330,2	27	28,89
5	SAW	EM12K	2	DC+	260	130	330,2	26	25,11
6	SAW	EM12K	2	DC+	260	130	330,2	26	22,04
7	SAW	EM12K	2	DC+	260	130	330,2	26	21,75

Tabla 2.17. Variables del procedimiento de soldadura para la junta 3D.

Pase	Proceso	Metal de aporte		Corriente				Voltaje	Velocidad de soldadura
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperaje	Velocidad de alimentación de alambre			
			[mm]			[in/min]	[cm/min]		
1	GMAW	ER70S-6	1,2	DC+	103	-	-	17,5	9,54
2	SAW	EM12K	2	DC+	180	90	228,6	29	27,46
3	SAW	EM12K	2	DC+	250	120	304,8	27	28,18
4	SAW	EM12K	2	DC+	250	120	304,8	27	24,17
5	SAW	EM12K	2	DC+	260	140	355,6	27	20,90
6	SAW	EM12K	2	DC+	260	140	355,6	26	22,79
7	SAW	EM12K	2	DC+	260	140	355,6	26	20,91

## 2.4. Caracterización de la escoria formada en el proceso de arco sumergido mediante fluorescencia de rayos X (XRF)

Se realizó el análisis elemental químico de las muestras de la escoria formada en el proceso de soldadura de las 4 juntas mediante análisis de fluorescencia de rayos X.

Se recolectaron muestras de escoria de los pases del proceso de soldadura por arco sumergido de las 4 juntas y fueron identificadas como se indica en la Tabla 2.18. Las muestras recolectadas se observan en la Figura 2.3.

Tabla 2.18. Identificación de las muestras de escoria.

Junta soldada	Identificación de la muestra de escoria
0F	0% arena
1C	10% arena
2A	20% arena
3D	30% arena

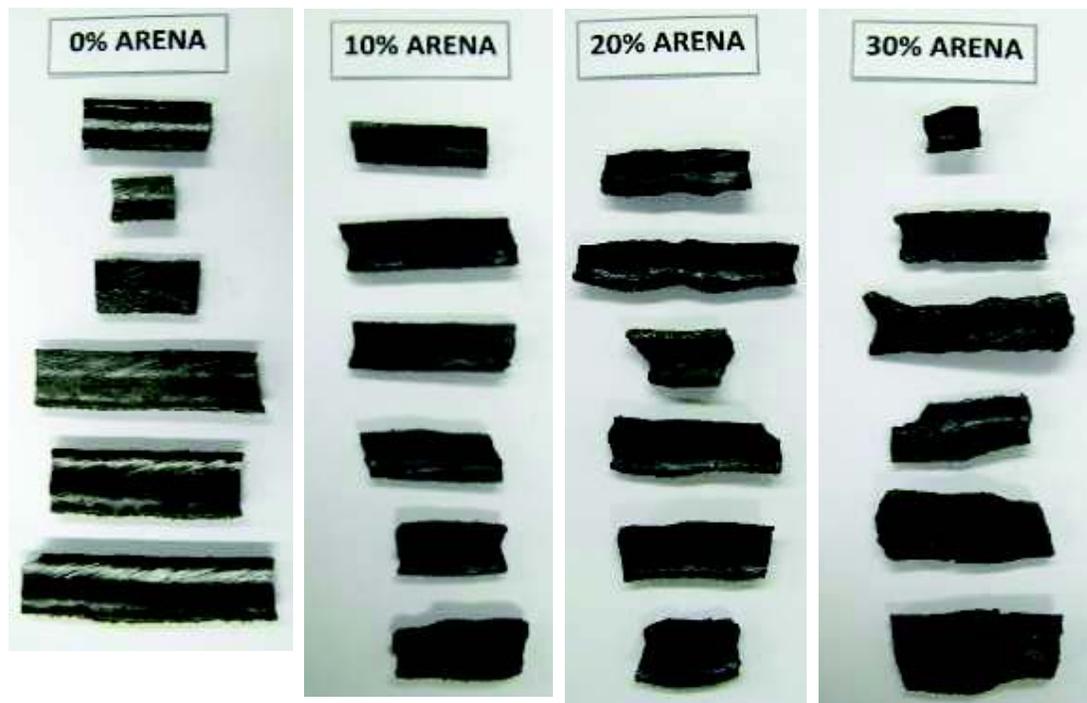


Figura 2.3. Muestras de escoria recolectadas (vista posterior).

Se redujo el tamaño de las muestras de escoria hasta alcanzar un tamaño de partícula menor a  $75 \mu\text{m}$ . Primero se redujo manualmente el tamaño de la escoria y para la molienda secundaria se utilizó el molino de cuchillas con una criba número 200 del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la EPN (ver Figura 2.4 y Figura 2.5). Las muestras de

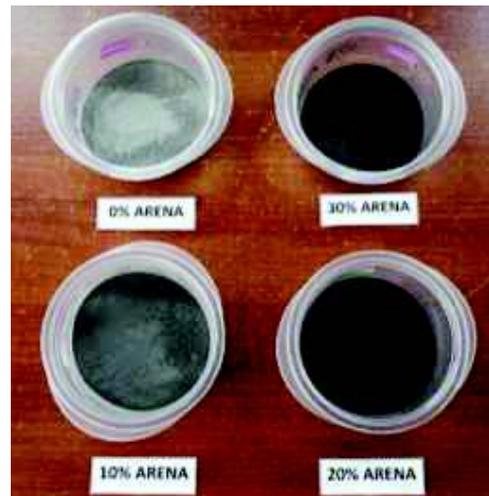
escoria en polvo posteriormente deben ser compactadas para formar una pastilla sólida, la cual se coloca en el espectrómetro.



Figura 2.4. Molino de cuchillas.



(a)



(b)

Figura 2.5. Muestras de escoria con tamaño de partícula reducido: (a) después de la reducción manual, (b) después de la molienda.

El análisis se realizó en el Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la EPN con el espectrómetro S8 Tiger y el software Spectra Plus, el cual evalúa las mediciones de escaneo a través de la identificación de los elementos y el cálculo de las concentraciones de forma automática.

## 2.5. Evaluación de las juntas mediante radiografía industrial

Se realizaron tomas radiográficas a las 4 juntas con el objetivo de identificar discontinuidades en las juntas soldadas. Las tomas se realizaron en el Laboratorio de Ensayos no Destructivos (END) de la EPN.

Antes de realizar las tomas se realiza una evaluación visual del cordón tanto en la cara como en la raíz. Las especificaciones del equipo y las condiciones de trabajo se detallan en la Tabla 2.19 y Tabla 2.20, respectivamente. Se evaluaron los resultados con base en los criterios de aceptación del código de soldadura estructural AWS D1.1 [51].

Tabla 2.19. Especificaciones del equipo de rayos X.

Marca	Baltographe
Modelo	BF 200/10
Capacidad	200 [kV]
	10 [mA]

(Fuente: Laboratorio de END)

Tabla 2.20. Condiciones de trabajo para tomas radiográficas.

Técnica		Simple pared simple imagen	
[kV]		160	
[mA]		6	
Película radiográfica		Tipo II - Structuris D7	
Junta	Toma	Tiempo de exposición	Distancia a la fuente [cm]
0F	1	3 min 2s	31,5
	2	3 min 2s	
	3	3 min 2s	
1C	1	2 min 45 s	31
	2	2 min 45 s	
	3	2 min 45 s	
2A	1	3 min 42 s	31
	2	3 min 34 s	
	3	3 min 42 s	
3D	1	3 min 20s	31,5
	2	3 min 8 s	
	3	3 min 44 s	

(Fuente: Laboratorio de END)

## 2.6. Caracterización de las juntas soldadas

La extracción de las muestras para los ensayos y análisis que se indican a continuación fue realizada utilizando corte en frío con una sierra circular de corte para metales mediante una hoja de sierra de acero templado con dientes de punta de carburo.

### 2.6.1. Caracterización mecánica

A fin de establecer la variación de propiedades mecánicas en las juntas se realizaron ensayos de caracterización mecánica de acuerdo con los requerimientos del código de soldadura estructural AWS D1.1 [51].

El tipo de ensayos y el número de muestras extraídas de cada junta se indican en la Tabla 2.21. La ubicación de extracción de las muestras a lo largo de la junta se realiza de acuerdo con la Figura 2.6. Las muestras se identifican conforme lo señalado en la Tabla 2.22.

Tabla 2.21. Tipo de ensayos mecánicos y número de muestras extraídas.

Tipo de ensayo de caracterización mecánica	Ensayo de tracción en muestras de sección reducida	Ensayo de doblado lateral	Ensayo de Impacto Charpy
Número de muestras extraídas de cada junta	2	4	3

(Fuente: Elaborado con base en requerimientos de AWS D1.1 Structural Welding Code [51])

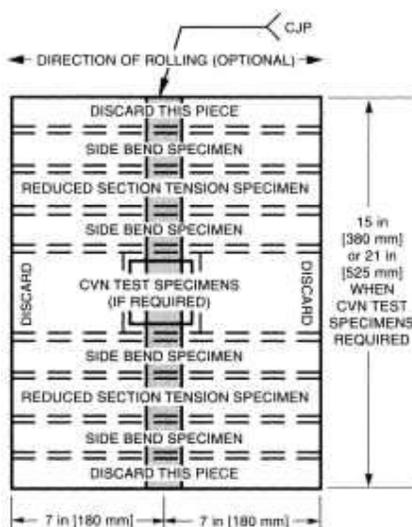


Figura 2.6. Ubicación de extracción de las muestras para ensayos de caracterización mecánica.  
(Fuente: AWS D1.1 Structural Welding Code [51])

Tabla 2.22. Identificación de muestras para ensayos mecánicos.

Junta	Identificación muestras tracción	Identificación muestras doblado	Identificación muestras Charpy
0F	TF1	BF1	CHF1
		BF2	CHF2
	TF2	BF3	CHF3
		BF4	
1C	TC1	BC1	CHC1
		BC2	CHC2
	TC2	BC3	CHC3
		BC4	
2A	TA1	BA1	CHA1
		BA2	CHA2
	TA2	BA3	CHA3
		BA4	
3C	TD1	BD1	CHD1
		BD2	CHD2
	TD2	BD3	CHD3
		BD4	

### 2.6.1.1. Preparación de muestras

Ensayo de tracción: Se retiró el refuerzo y la raíz de todas las muestras extraídas de las juntas. La sección reducida de las muestras se maquinó a las dimensiones especificadas en la Figura 2.7. Se observaron discontinuidades en la sección reducida de las muestras en la zona de la cara de algunas muestras que marcan el cordón de soldadura en la muestra (ver Figura 2.8).

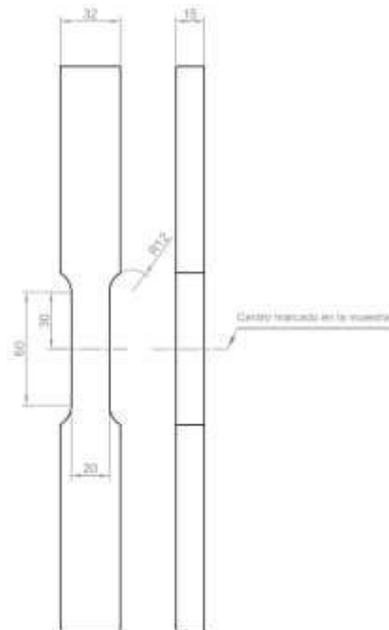


Figura 2.7. Dimensiones en mm de la muestra de sección reducida para ensayo de tracción de las juntas soldadas.

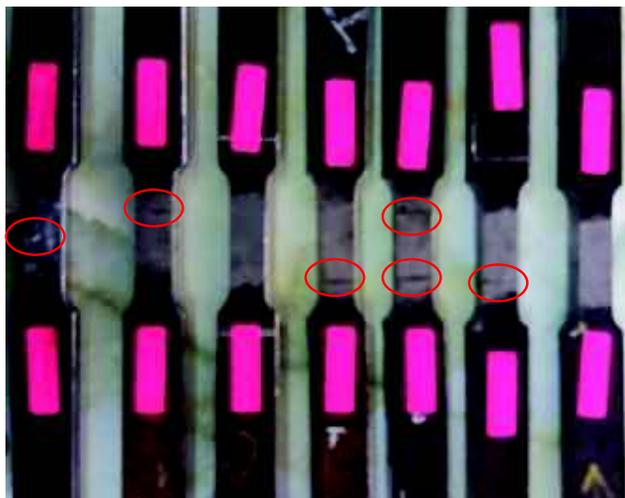


Figura 2.8. Muestras de sección reducida para ensayo de tracción – Discontinuidades en la sección reducida para algunas muestras.

Ensayo de doblado lateral: La profundidad de las muestras fue 10 mm. La superficie lateral de la muestra que posteriormente se iba a inspeccionar se preparó primero mediante disco abrasivo de óxido de zirconio de 40 granos/in<sup>2</sup>, y posteriormente se usó uno de 120 granos/in<sup>2</sup>. Se utilizó nital al 10% para marcar el centro de la superficie lateral de la muestra.

Ensayo de impacto Charpy: Se extrajeron muestras sobredimensionadas de la junta soldada. Las muestras se prepararon como se indica en la sección 2.2.5.1, además para marcar la ubicación de la muesca, en la zona afectada por el calor (ZAC) a 1 mm de la línea de fusión, se atacó la superficie lateral las muestras con nital al 10%.

### **2.6.1.2. Procedimientos**

Ensayo de tracción: Se utilizó el mismo procedimiento definido en la sección 2.2.3.2.

Ensayo de doblado: El ensayo se realizó utilizando un equipo para doblado, prensa hidráulica con émbolo estándar bajo especificación AWS D1.1. La superficie lateral preparada se coloca hacia abajo sobre los apoyos, centrando la sección transversal del cordón de soldadura. El émbolo, ubicado en la parte superior, se desplaza hacia abajo para generar la sollicitación de flexión sobre la muestra. Cuando la muestra se ha deformado se detiene el movimiento del émbolo y se ubica en la posición inicial. Se retira la muestra y se inspecciona la superficie convexa.

Ensayo de impacto Charpy: Se empleó el mismo procedimiento definido en la sección 2.2.5.2.

### **2.6.2. Análisis químico por espectrometría de emisión atómica por chispa (spark-AES) del metal del cordón de soldadura.**

El análisis químico del metal depositado en el cordón de soldadura se realizó extrayendo una muestra transversal del cordón de soldadura de cada junta. Las muestras se identifican como se indica en la Tabla 2.23. El tamaño de la muestra tiene una longitud de 50 mm y el espesor es 10 mm, el ancho de la muestra varía en función de la geometría del cordón. La preparación de la muestra se realizó conforme lo detallado en la sección 2.2.1.1. La preparación de los materiales de referencia y el procedimiento de ensayo se expuso en las secciones 2.2.1.2, y 2.2.1.3, respectivamente. Las mediciones se realizaron sólo en la zona del cordón de soldadura como se muestra en la Figura 2.9.

Tabla 2.23. Identificación de las muestras análisis químico del metal de soldadura.

Junta	Identificación de las muestras
0F	QF
1C	QC
2A	QA
3C	QC



Figura 2.9. Zona de mediciones de análisis químico.

### **Cálculo de la composición química esperada en el metal de soldadura**

Se calculó la composición química del metal de soldadura esperado con el objetivo de determinar la variación en la concentración de los elementos de aleación del metal de soldadura debido al uso del fundente y al uso de la mezcla de fundente y arena.

Se utilizó la Ecuación 1.3 para calcular la dilución en las cuatro juntas. Para esto se usaron las imágenes de la macroestructura obtenidas con el estereomicroscopio (ver sección 2.6.3.1) sobre las que se delineó la preparación de junta y la zona de fusión para establecer las áreas de metal base fundido ( $A_{MB}$ ) y del material aportado ( $A_{MA}$ ). Con la Ecuación 1.4 se determinó la concentración esperada de los elementos aleantes C, Si, Mn, P, S y Cu.

### **2.6.3. Caracterización de la macroestructura y microestructura de las juntas soldadas**

Se extrajo una muestra de las mismas características mencionadas en la sección 2.6.2. La preparación de la muestra se realizó conforme a lo explicado en la sección 2.2.2.1.

#### **2.6.3.1. Análisis de la macroestructura**

Se utilizó un estereomicroscopio para obtener una imagen de la sección transversal de los cordones a mayor aumento que el observado a simple vista. Esto se realizó para identificar mejor las zonas de las macroestructuras reveladas mediante el ataque químico de la superficie de la muestra. Las especificaciones técnicas de este equipo se detallan en la Tabla 2.24. Para obtener las imágenes se colocó la muestra bajo el lente objetivo y se reguló la magnificación utilizando el menor aumento disponible 0,4X. Las imágenes fueron usadas para evaluar la variación en la forma del cordón y determinar el tamaño de la ZAC.

Se midió la altura del refuerzo, el tamaño de la raíz y el área de la ZAC de cada muestra usando el software AutoCAD 2018 con licencia estudiantil.

Tabla 2.24. Especificaciones técnicas del estereomicroscopio.

Marca	OLYMPUS		
Modelo	SXZ7		
Características eléctricas	Voltaje alimentación	110	[V]
Sistema de iluminación	Luz reflejada halógena	30	[W]
Magnificación	Lente objetivo	0.5x	
	Lentes	0.4x, 0.75x, 1x, 1.25x, 2.1x	
Sistema de enfoque	Manual		
Sistema de visualización	Binocular		
Software	OLYMPUS Stream Basic		

(Fuente: [https://www.olympus-ims.com/es/microscope/szx7/#!cms\[tab\]=%2Fmicroscope%2Fszx7%2Fspecifications](https://www.olympus-ims.com/es/microscope/szx7/#!cms[tab]=%2Fmicroscope%2Fszx7%2Fspecifications))

### 2.6.3.2. Análisis microestructural y ensayo de microdureza

Se realiza el análisis metalográfico conforme al procedimiento mostrado en la sección 2.2.2.2. Con el objetivo de caracterizar la microestructura observada en el microscopio metalográfico se realizaron mediciones de microdureza tomando como referencia el método estándar ASTM E384 [52]. Se realizó un barrido de microdureza vertical en el centro del cordón de soldadura realizando 6 mediciones con un espaciamiento entre indentaciones de 3 mm. También se realizó un barrido de microdureza desde el centro del cordón de soldadura hacia la ZAC, realizando 3 mediciones con un espaciamiento entre indentaciones de 5 mm (ver Figura 2.10).

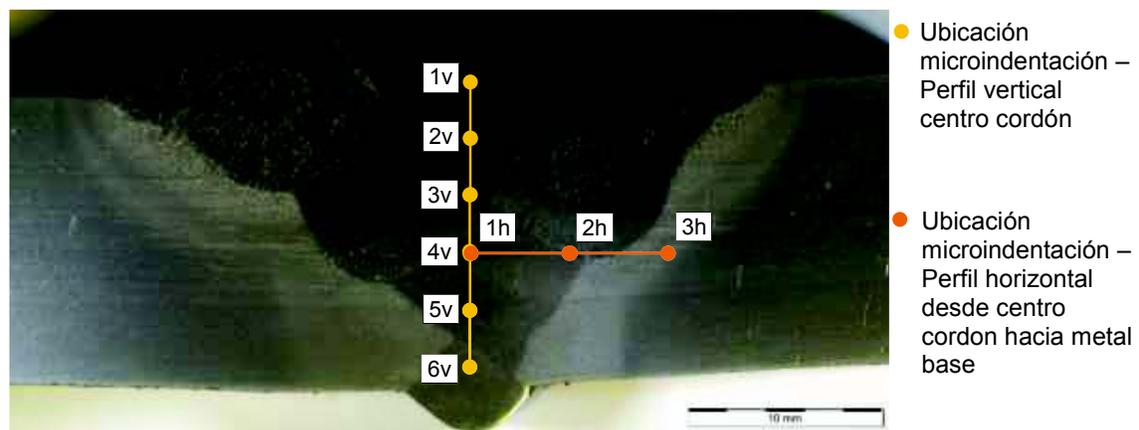


Figura 2.10. Ubicación de las microindentaciones para barrido de microdureza.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al final del proceso experimental de este estudio. Se establecen discusiones sobre los resultados tras un análisis correlacional de las propiedades mecánicas obtenidas y la relación en peso de arena y fundente utilizado. Se analiza la variación de la composición química de las juntas y se determinan posibles relaciones con la caracterización mecánica y microestructural desarrollada. Los resultados fueron obtenidos mediante ensayos de caracterización mecánica de tracción, doblado e impacto, se utilizó análisis de composición química por espectrometría de emisión óptica y fluorescencia de rayos X, y se utilizó microscopía óptica para los análisis de la macro y microestructura de las soldaduras.

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1. Caracterización del metal base

###### 3.1.1.1. Análisis químico por espectrometría de emisión atómica por chispa (spark-AES)

Los resultados promedio de las 3 mediciones realizadas de la composición química del material base se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados de composición química metal base.

Muestra	QMB		
Elemento	Porcentaje	Elemento	Porcentaje
C	0,1300	Al	0,0160
Si	0,1940	Co	0,0048
Mn	1,0710	Nb	0,0061
P	0,0300	Ti	< 0,0020
S	< 0,0030	V	< 0,0030
Cr	0,3540	W	< 0,0200
Mo	< 0,0050	B	0,0015
Ni	0,0120	Sn	< 0,0020
Cu	< 0,0020	Fe	98,1800

### 3.1.1.2. Análisis metalográfico

Visualización meso-estructural: en la Figura 3.1 se observa la distribución de inclusiones en la matriz metálica.

Visualización con ataque químico: en la Figura 3.2 se muestra las micrografías de las cuatro placas de metal base, en las cuales se observa una estructura de granos alineados en la dirección del laminado.

La microestructura está constituida de granos de ferrita y perlita, estructuras generales de las aleaciones ferrosas, el tamaño de grano de las muestras F, C y A son similares, mientras que para la muestra D, el tamaño de grano se observa mayor.

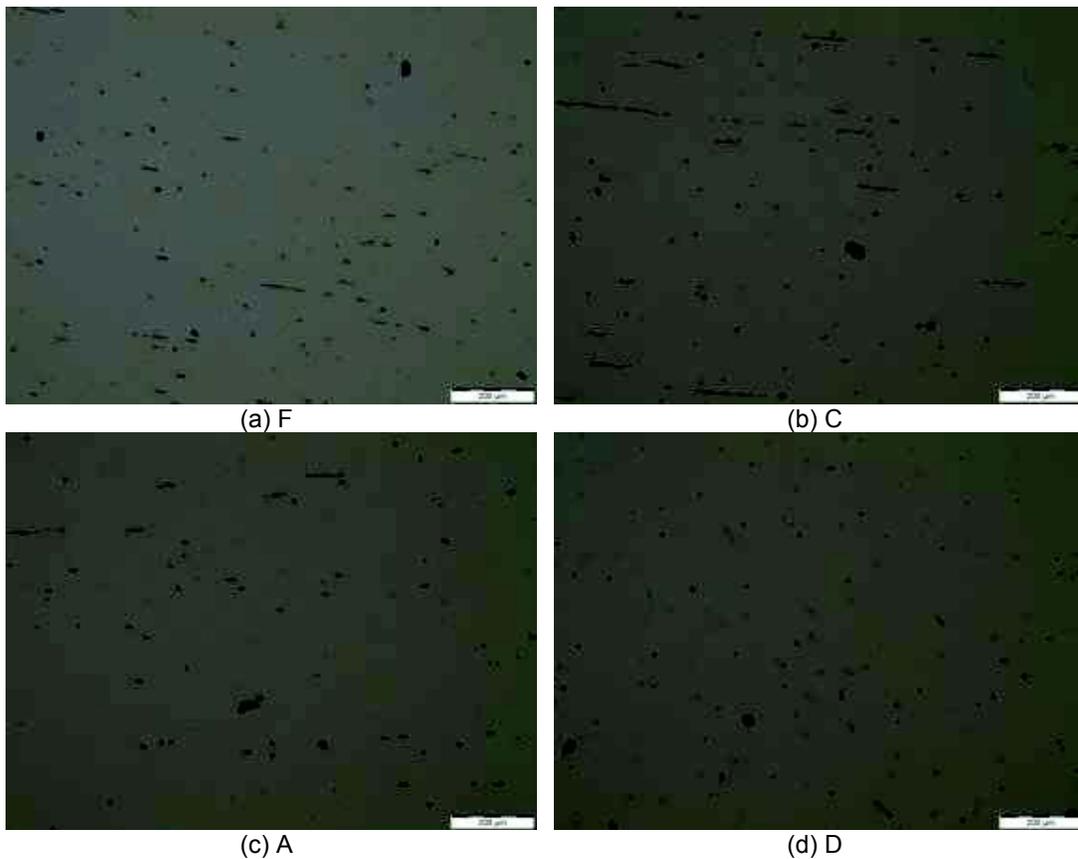


Figura 3.1. Micrografía del material base sin ataque químico de las muestras de las planchas (a) F, (b) C, (c) A y (d) D. 100X.

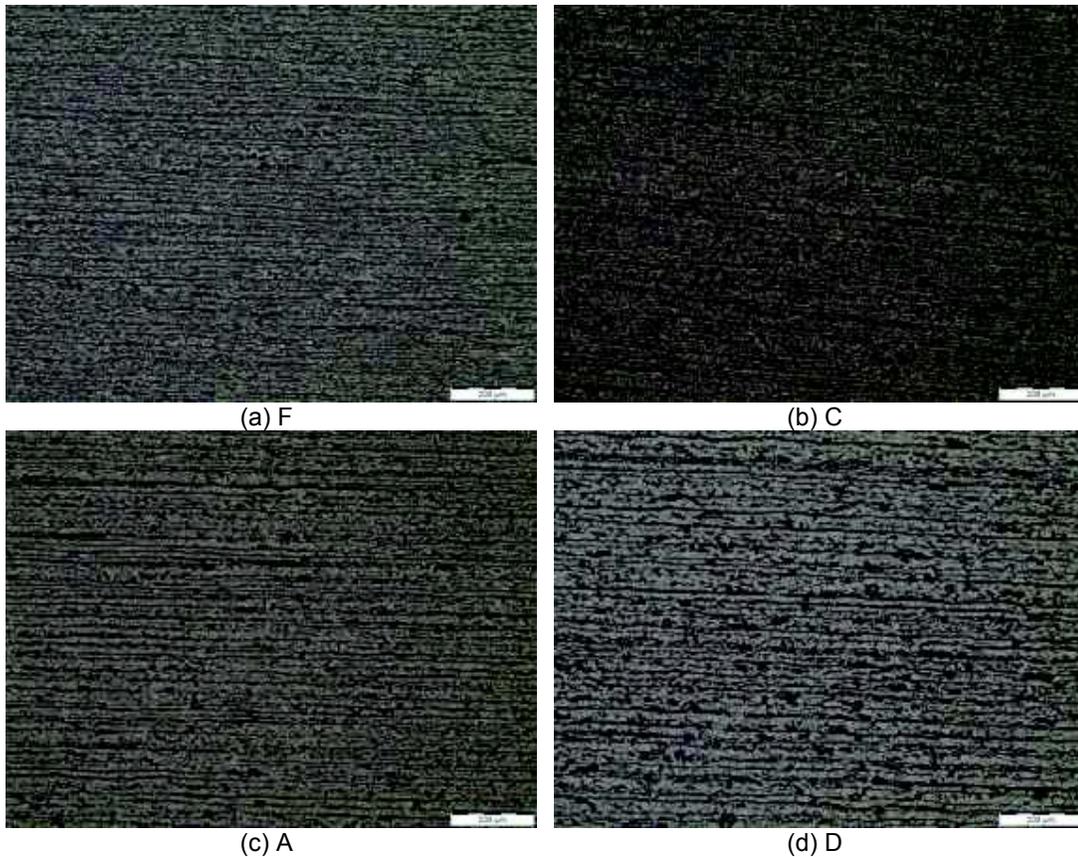


Figura 3.2. Micrografía del material base de las muestras de las planchas (a) F, (b) C, (c) A y (d) D. Ataque químico con nital al 10%, 10 s. 100X.

### 3.1.1.3. Ensayo de dureza superficial

Los resultados del ensayo de dureza Rockwell del material base se muestran en la Tabla 3.2. Con los valores promedio de dureza se utiliza la “Tabla 3” del método estándar ASTM A-370 para obtener un valor referencial aproximado de resistencia a la tracción de 505 [MPa] (73 ksi) [45].

Tabla 3.2. Resultados de la dureza superficial del material base.

Escala	Rockwell B [HRB]			
Medición	Muestra			
	F	C	A	D
1	78	81	82	80
2	81	82	81	80
3	80	81	82	80
4	81	82	81	81
5	81	82	82	82
6	80	81	82	83
7	82	81	80	83
Promedio	80	81	81	81

### 3.1.1.4. Ensayo de tracción

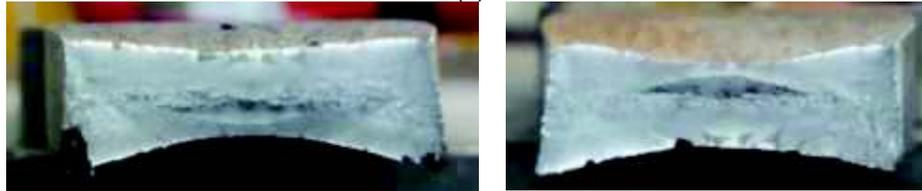
Los resultados del ensayo de tracción del material base, muestra TMB, se recopilan en la Tabla 3.3. La probeta ensayada a tracción y las superficies de fractura se muestran en la Figura 3.3, en la que se observa una falla tipo “copa – cono” característica de una fractura dúctil [53].

Tabla 3.3. Resultados ensayo tracción material base.

Muestra	Área de sección transversal	Carga de fluencia	Carga de rotura	Límite de fluencia	Resistencia a la Tracción	Porcentaje de alargamiento
	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	%
TMB	605,06	291,92	358,83	482,45	593,04	46,9



(a)



(b)

Figura 3.3. Muestra TMB – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura.

### 3.1.1.5. Ensayo de impacto Charpy

Los resultados del ensayo de impacto del material base, muestras CHMB1, CHMB2, CHMB3, se recopilan en la Tabla 3.4. Las superficies de fractura se muestran en la Figura 3.4, Figura 3.5 y Figura 3.6.

Tabla 3.4. Resultados ensayo Charpy material base.

Muestra		CHMB1	CHMB2	CHMB3	PROMEDIO
Temperatura	[°C]	0 ±1	0 ±1	0 ±1	
Energía de Impacto	[J]	320	228	220	256
	[lbf-ft]	236	168	162	189

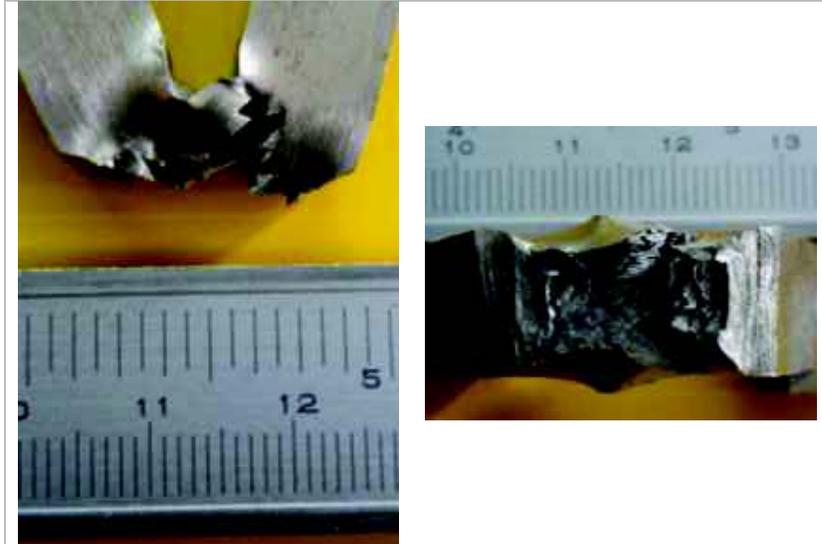


Figura 3.4. Superficie de fractura de la muestra CHMB1.



Figura 3.5. Superficie de fractura de la muestra CHMB2.

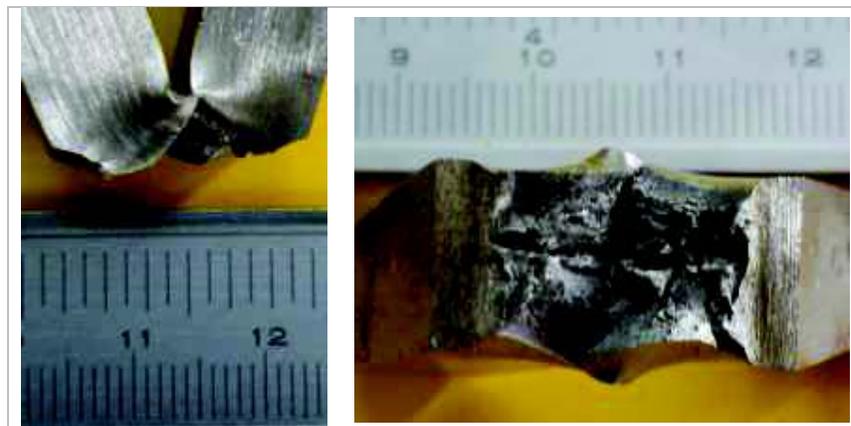


Figura 3.6. Superficie de fractura de la muestra CHMB3.

### 3.1.2. Caracterización de la escoria formada en el proceso de arco sumergido mediante fluorescencia de rayos X (XRF)

Los resultados del análisis elemental de las muestras de escoria se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados análisis elemental de las muestras de escoria.

Muestra	0% arena	10% arena	20% arena	30% arena
Elemento	Contenido			
Al	11,03 %	10,01 %	8,55 %	8,21 %
Mg	10,25 %	9,51 %	7,9 %	7,69 %
Si	9,28 %	8,97 %	7,17 %	7,09 %
Mn	6,98 %	6,97 %	6,07 %	5,82 %
Ca	5,94 %	5,44 %	4,16 %	4,09 %
Fe	2,63 %	5,38 %	14,18 %	15,79 %
Na	1,44 %	1,5 %	1,24 %	1,21 %
Tb	1,19 %	-	-	-
Ti	0,78 %	2,29 %	5,15 %	5,49 %
K	0,41 %	0,4 %	0,3 %	0,29 %
Zr	0,18 %	0,16 %	0,16 %	0,16 %
Ba	0,16 %	0,1 %	0,04 %	-
S	0,1 %	0,05 %	0,03 %	0,03 %
V	-	0,04 %	0,1 %	0,1 %
Cr	0,04 %	0,06 %	0,1 %	0,09 %
Cl	0,03 %	0,02 %	0,02 %	0,02 %
P	-	0,01 %	0,02 %	0,02 %
Zn	97 ppm	80 ppm	0,01 %	0,01 %
Sr	82 ppm	60 ppm	53 ppm	53 ppm
Cu	57 ppm	50 ppm	48 ppm	62 ppm
Ni	19 ppm	77 ppm	77 ppm	56 ppm

### 3.1.3. Evaluación de las juntas mediante radiografía industrial

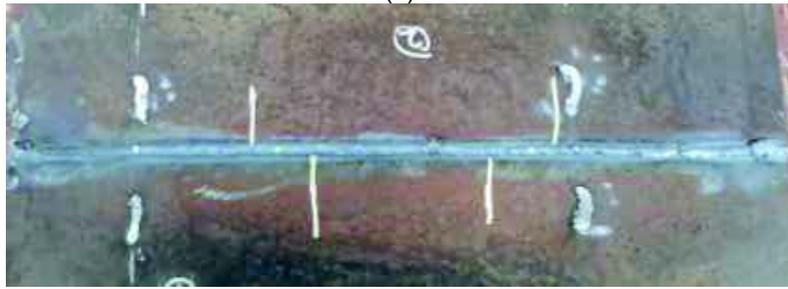
La apariencia visual de las juntas se muestran en la Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.10.

Evaluación visual: La junta 0F (Figura 3.7) no muestra ninguna discontinuidad superficial en el cordón. La junta 1C (Figura 3.8) tiene una porosidad abierta a la superficie en el extremo derecho de la longitud del cordón (zona a descartar), en la raíz muestra exceso de penetración a lo largo de todo el cordón, en particular, al lado izquierdo de la junta. La forma del cordón es irregular. La junta 2A (Figura 3.9) presenta 2 porosidades abiertas a la superficie, en la raíz no se observan discontinuidades. La forma del cordón es más irregular

comparada con la forma del cordón de la junta 1C. La junta 3D (Figura 3.10) presenta varias porosidades abiertas a la superficie a lo largo de todo el cordón, se observan mordeduras en ciertas zonas del cordón, que no sobrepasan 1 mm de profundidad, en la raíz no se observan discontinuidades. La forma del cordón es más irregular, comparada con la forma del cordón de la junta 2A.

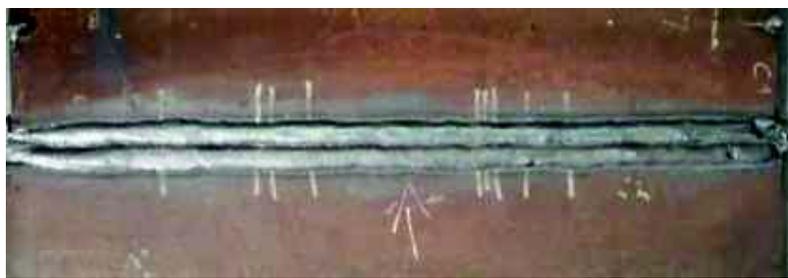


(a)



(b)

Figura 3.7. Apariencia visual del cordón junta 0F, (a) cara, (b) raíz.



(a)



(b)

Figura 3.8. Apariencia visual del cordón junta 1C, (a) cara, (b) raíz.



(a)



(b)

Figura 3.9. Apariencia visual del cordón junta 2A, (a) cara, (b) raíz.



Figura 3.10. Apariencia visual del cordón junta 3D.

Resultados de radiografía: Las discontinuidades encontradas en las juntas se resumen en la Tabla 3.6. Se verifica que sólo la junta 0F no presenta discontinuidades subsuperficiales. La principal discontinuidad presente en los cordones de soldadura obtenidos con una mezcla de fundente – arena son las porosidades cuyos tamaños son representativos.

Tabla 3.6. Discontinuidades detectadas en las juntas.

Junta	Indicaciones	Toma					
		1		2		3	
		Distancia desde el extremo izquierdo	Tamaño	Distancia desde el extremo izquierdo	Tamaño	Distancia desde el extremo izquierdo	Tamaño
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0F	Ninguna	-	-	-	-	-	-
1C	Penetración excesiva	30	10	0	10	0	5
		50	15	35	25	75	90
		75	15	75	15	90	15
		100	20	130	10	-	-
		140	10	-	-	-	-
		170	15	-	-	-	-
	Fusión incompleta	-	-	85	55	-	-

Tabla 3.6. Discontinuidades detectadas en las juntas (continuación).

Junta	Indicaciones	Toma					
		1		2		3	
		Distancia desde el extremo izquierdo	Tamaño	Distancia desde el extremo izquierdo	Tamaño	Distancia desde el extremo izquierdo	Tamaño
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1C	Porosidad aislada	-	-	-	-	80	3
		-	-	-	-	113	3
		-	-	-	-	120	2,5
		-	-	-	-	125	8
2A	Porosidad agrupada	0	180	0	30	0	160
	Porosidad aislada			90	25		
				125	5		
3D	Porosidad agrupada	0	90	0,5	20	0	80
		140	35	100	60	95	35

### 3.1.4. Caracterización de las juntas soldadas

#### 3.1.4.1. Caracterización mecánica

##### Ensayo de tracción

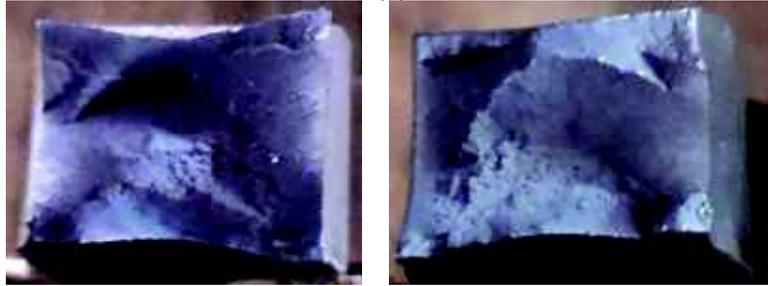
Los resultados del ensayo de tracción de las muestras de las uniones soldadas se muestran en la Tabla 3.7. Las probetas ensayadas a tracción y las superficies de fractura se muestran en la Figura 3.11, Figura 3.12, Figura 3.14, Figura 3.15, Figura 3.16, Figura 3.17 y Figura 3.18.

Tabla 3.7. Resultados ensayo tracción muestras de uniones soldadas.

Muestra	Área de sección transversal	Carga de rotura	Resistencia a la Tracción	Porcentaje de alargamiento	Observaciones
	[mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]	%	
TF1	310,87	158,08	508,5	25,04	Falla en la soldadura
TF2	314,81	160,25	509,04	27,62	Falla en la soldadura
TC1	308,93	149,47	483,84	26,86	Falla en la soldadura
TC2	304,87	148,10	485,78	28,76	Falla en la soldadura
TA1	305,68	120,59	394,5	10,82	Falla en la soldadura
TA2	300,47	112,25	373,58	12,94	Falla en la soldadura
TD1	305,25	134,35	440,13	17,16	Falla en la soldadura
TD2	302,84	130,43	430,69	12,9	Falla en la soldadura



(a)

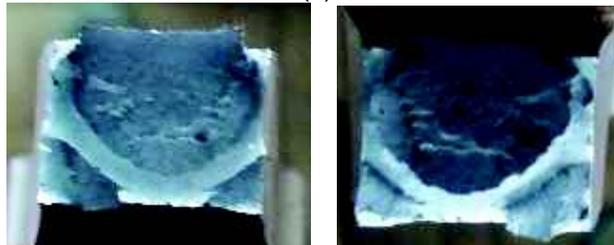


(b)

Figura 3.11. Muestra TF1 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura.



(a)



(b)

Figura 3.12. Muestra TF2 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura.



Figura 3.13. Muestras TC1 - (a) zona de falla.



(a)



(b)

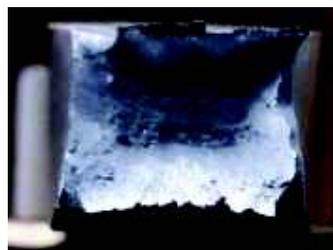
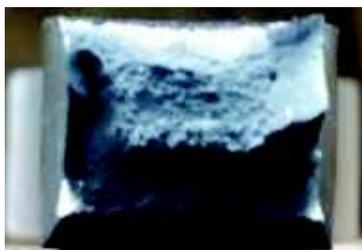
Figura 3.14. Muestra TC2 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura.



Figura 3.15. Muestras TA1 - zona de falla.



(a)

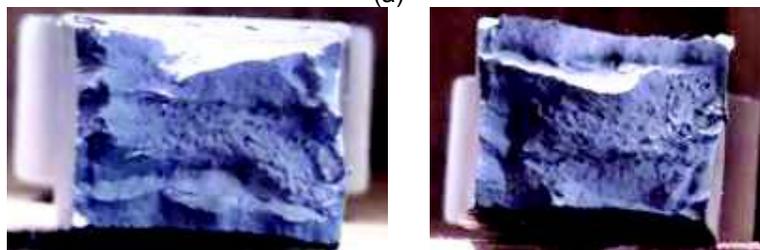


(b)

Figura 3.16. Muestras TA2 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura.



(a)

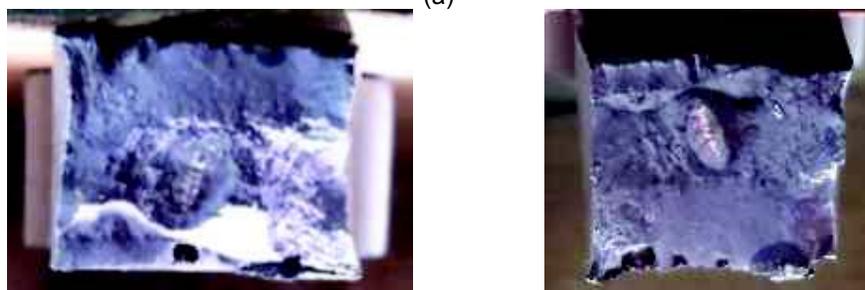


(b)

Figura 3.17. Muestra TD1 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura.



(a)



(b)

Figura 3.18. Muestra TD2 – (a) zona de falla, (b) superficies de fractura.

### Ensayo de doblado lateral

Los resultados del ensayo de doblado lateral de las uniones soldadas se organizan en la Tabla 3.8, Tabla 3.9, Tabla 3.10 y en la Tabla 3.11.

Las muestras BA2 (junta 2A), BD3 y BD4 (junta 3D) se rompen en el centro del cordón, las superficies de fractura de estas muestras se observan en la Figura 3.19.

Tabla 3.8 Resultados ensayo de doblado lateral junta 0F.

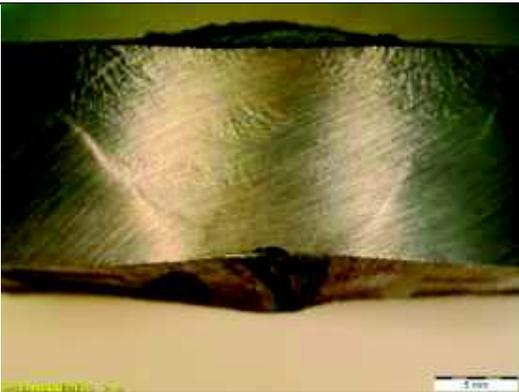
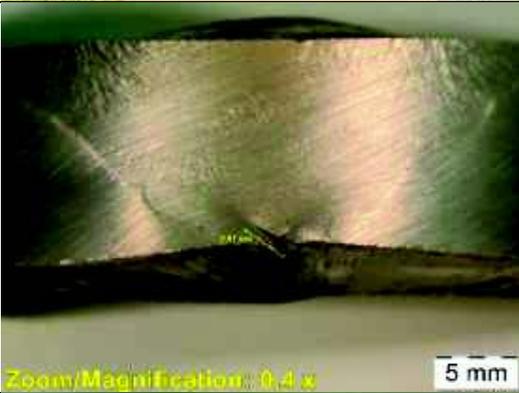
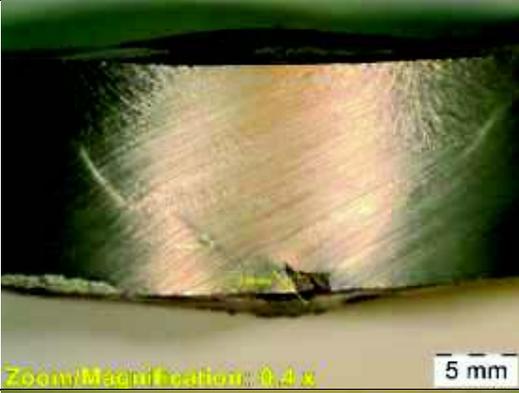
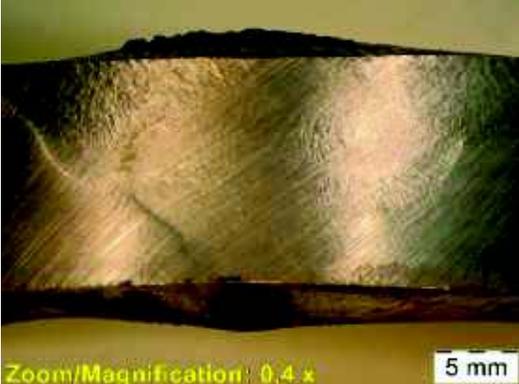
Muestra	Zona de inspección	Indicaciones
BF1		Ninguna
BF2		Fisura en raíz 2,81 mm
BF3		Fisura en raíz 2,66 mm
BF4		Ninguna

Tabla 3.9. Resultados ensayo de doblado lateral junta 1C.

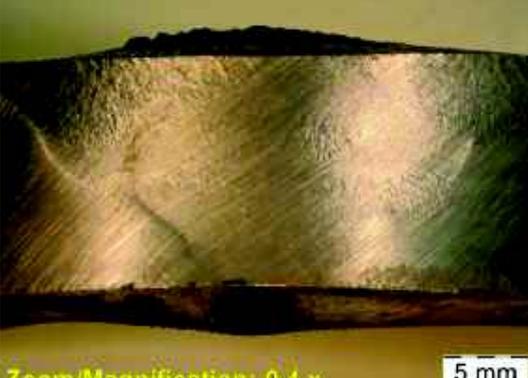
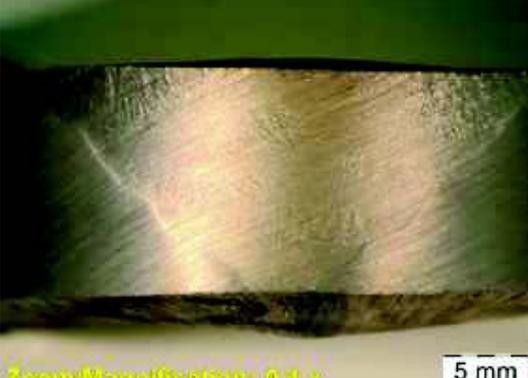
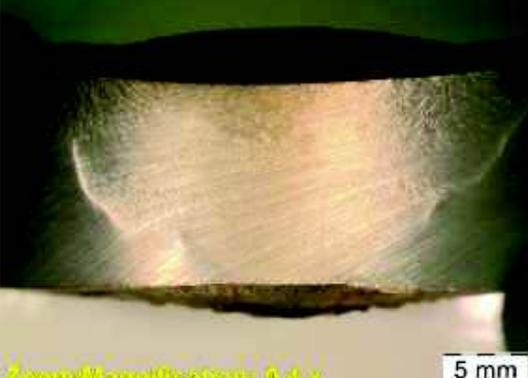
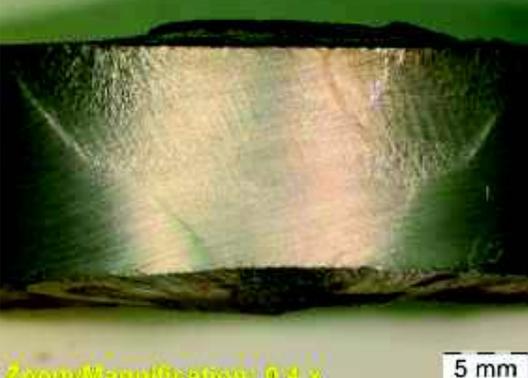
Muestra	Zona de inspección	Indicaciones
BC1	 <p data-bbox="399 642 724 674">Zoom/Magnification: 0.4 x</p> <p data-bbox="837 642 919 674">5 mm</p>	Ninguna
BC2	 <p data-bbox="399 1041 724 1073">Zoom/Magnification: 0.4 x</p> <p data-bbox="837 1041 919 1073">5 mm</p>	Ninguna
BC3	 <p data-bbox="399 1440 724 1472">Zoom/Magnification: 0.4 x</p> <p data-bbox="837 1440 919 1472">5 mm</p>	Ninguna
BC4	 <p data-bbox="399 1839 724 1871">Zoom/Magnification: 0.4 x</p> <p data-bbox="837 1839 919 1871">5 mm</p>	Ninguna

Tabla 3.10. Resultados ensayo de doblado lateral junta 2A.

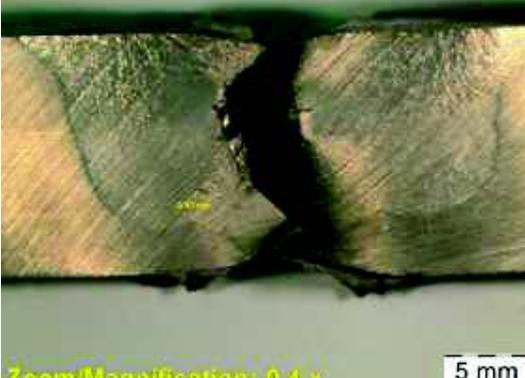
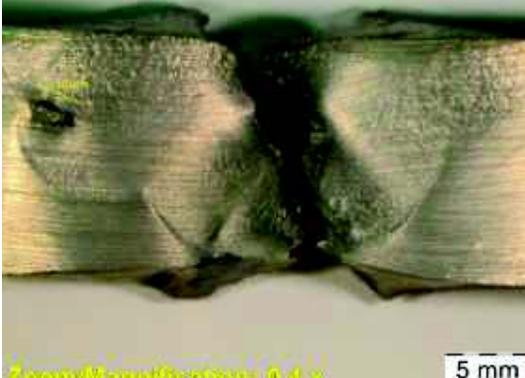
Muestra	Zona de inspección	Indicaciones
BA1		<p>Fisuras en porosidades De izquierda a derecha: 7,40 mm 2,97 mm 8,71 mm 3,62 mm</p>
BA2		<p>Muestra fracturada</p>
BA3		<p>Fisuras De izquierda a derecha: 4,31 mm 3,64 mm</p>
BA4		<p>Fisura 8,05 mm</p>

Tabla 3.11. Resultados ensayo de doblado lateral junta 3D.

Muestra	Zona de inspección	Indicaciones
BD1		Muestra fracturada
BD2		Ninguna
BD3		Muestra fracturada
BD4		Muestra Fracturada

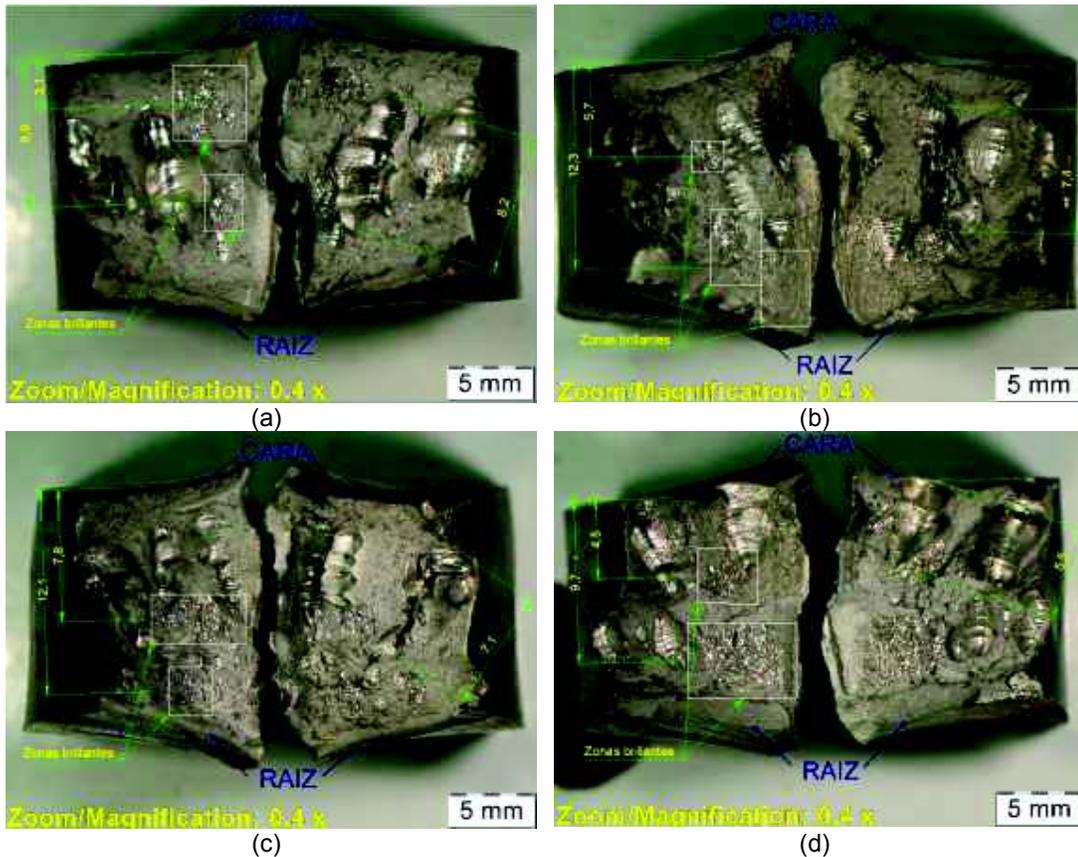


Figura 3.19. Superficies de fractura, (a) muestra BA2, (b) muestra BD1, (c) muestra BD3, (d) muestra BD4.

### Ensayo de impacto Charpy

Los resultados del ensayo de impacto de las muestras de las uniones soldadas, con muesca a 1 mm de la línea de fusión se muestran en la Tabla 3.12. En la Figura 3.20, Figura 3.21, Figura 3.22 y Figura 3.23 se observan las superficies de fractura de las muestras sometidas al ensayo de impacto.

Tabla 3.12. Resultados ensayo impacto muestras de uniones soldadas.

Muestra	Temperatura		Energía de Impacto		Muestra	Temperatura		Energía de Impacto	
	[°C]		[lbf-ft]	[J]		[°C]		[lbf-ft]	[J]
CHF1	0 ±1		154	209	CHC1	0 ±1		142	193
CHF2	0 ±1		154	209	CHC2	0 ±1		164	222
CHF3	0 ±1		152	206	CHC3	0 ±1		142	193
Promedio			153	208	Promedio			149	203
CHA1	0 ±1		174	236	CHD1	0 ±1		220	298
CHA2	0 ±1		256	347	CHD2	0 ±1		140	190
CHA3	0 ±1		248	336	CHD3	0 ±1		124	168
Promedio			226	306	Promedio			161	219

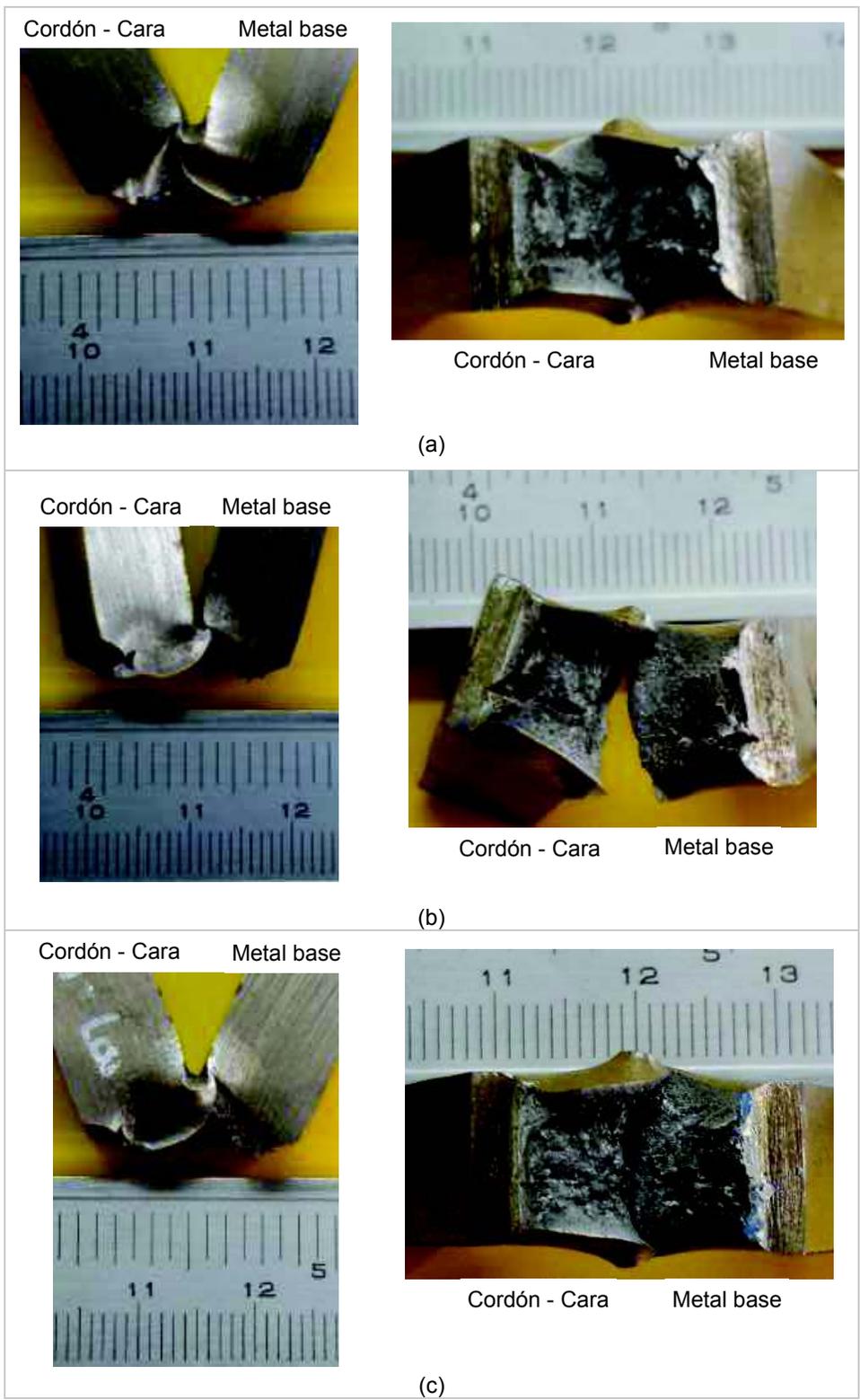


Figura 3.20. Superficies de fractura, (a) muestra CHF1, (b) muestra CHF2, (c) muestra CHF3.

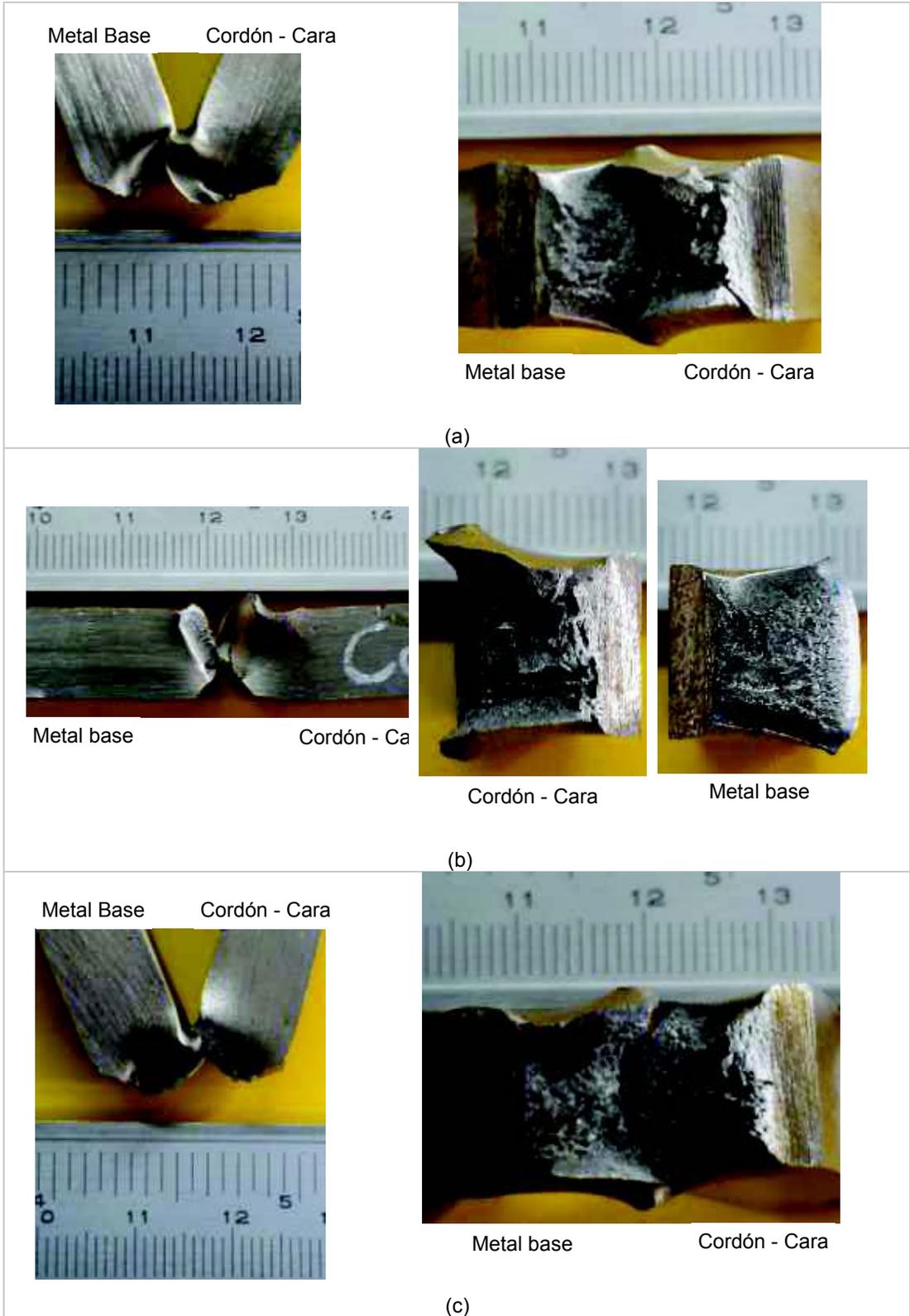


Figura 3.21. Superficies de fractura, (a) muestra CHC1, (b) muestra CHC2, (c) muestra CHC3.

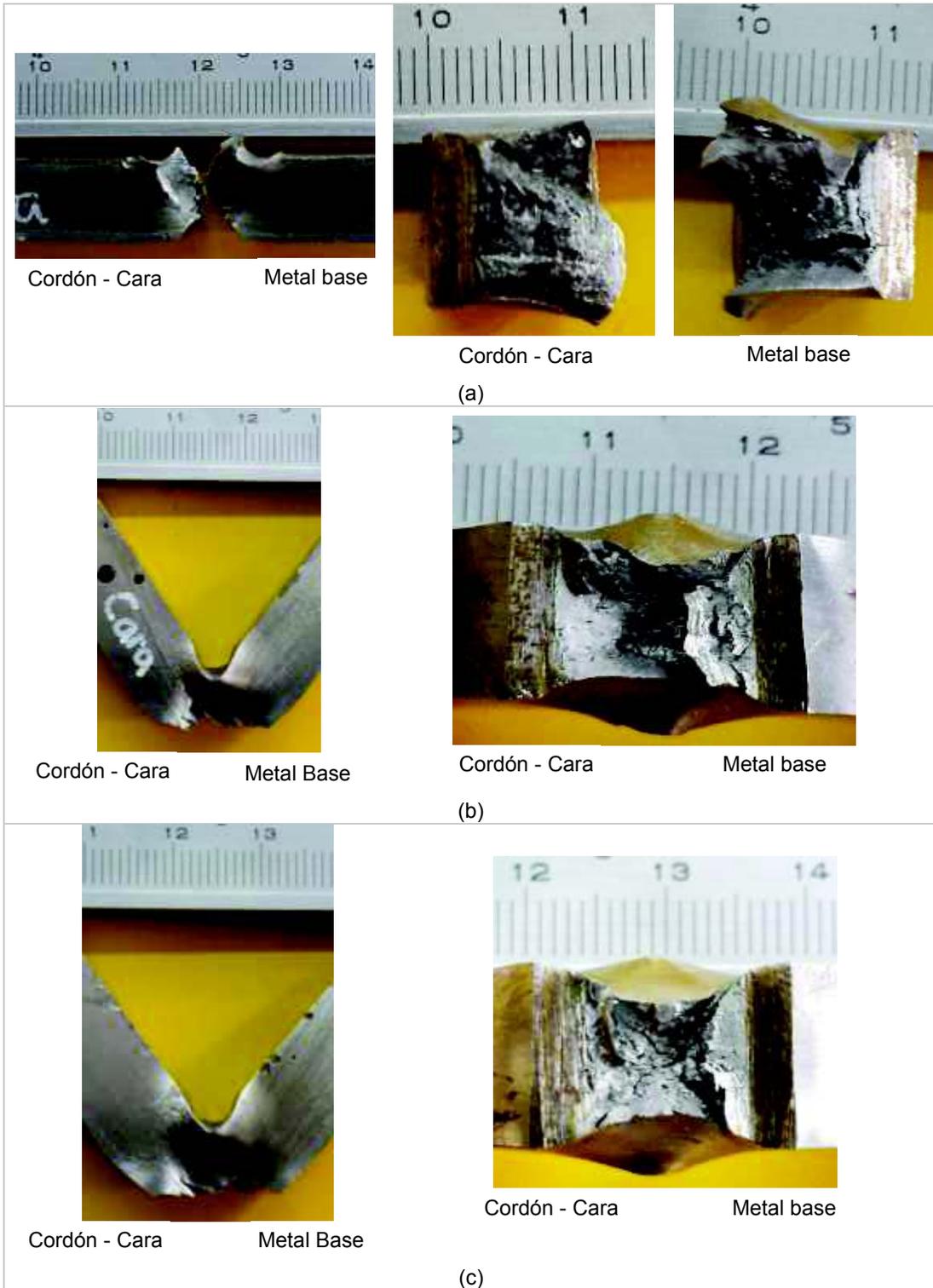


Figura 3.22. Superficies de fractura, (a) muestra CHA1, (b) muestra CHA2, (c) muestra CHA3.

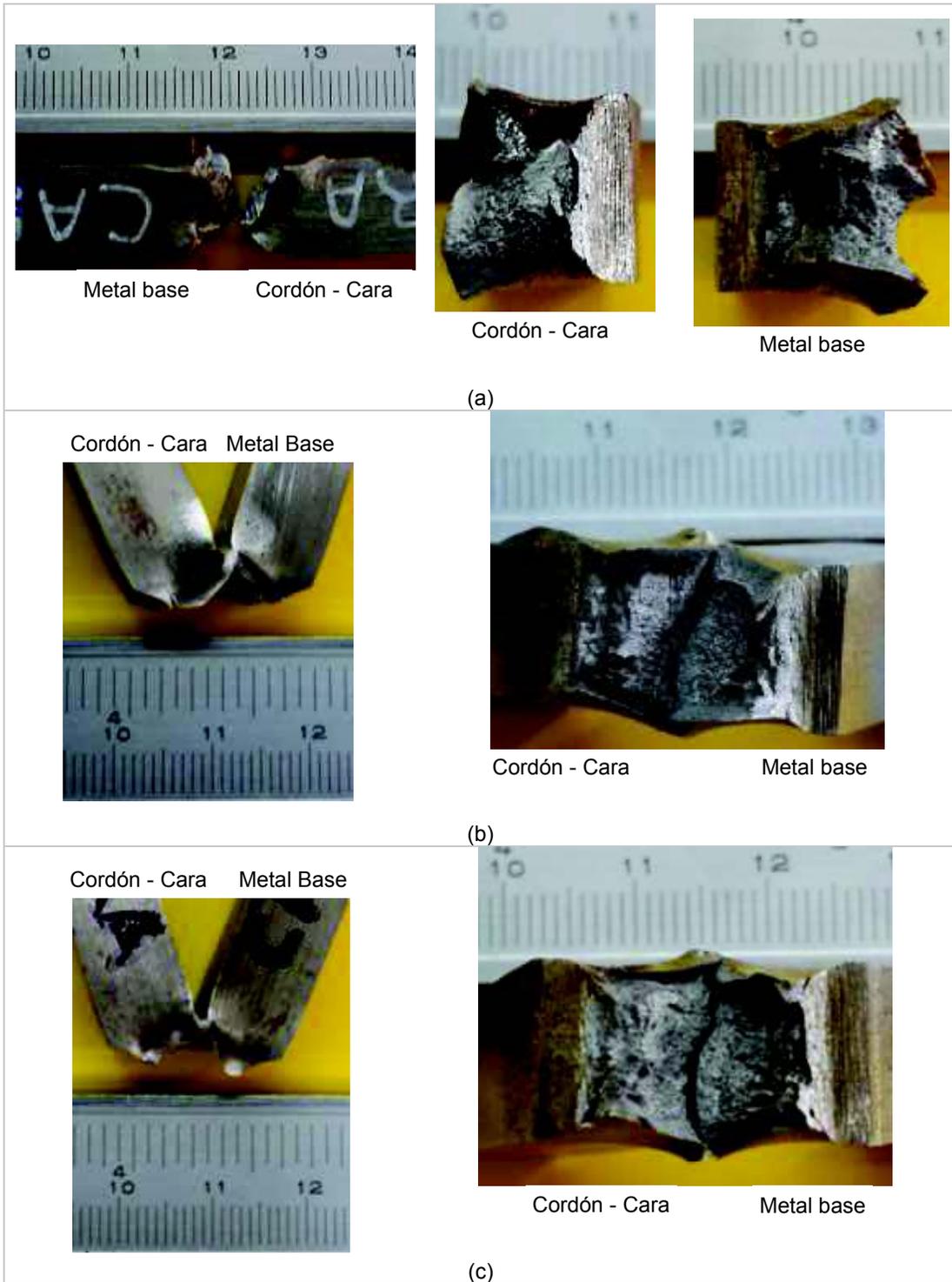


Figura 3.23. Superficies de fractura, (a) muestra CHD1, (b) muestra CHD2, (c) muestra CHD3.

### 3.1.4.2. Análisis químico por espectrometría de emisión atómica por chispa (spark-AES) del metal de soldadura

Los resultados promedio de las 3 mediciones realizadas a cada muestra del análisis de composición química del metal del cordón de soldadura se muestran en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Resultados de composición química metal de soldadura.

Muestra	QF	QC	QA	QD
Elemento	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
C	0,0640	0,063	0,058	0,059
Si	0,4110	0,077	0,075	0,083
Mn	1,1850	0,362	0,367	0,407
P	0,0160	0,024	0,025	0,021
S	< 0,0030	< 0,0030	< 0,0030	< 0,0030
Cr	0,1000	0,062	0,058	0,062
Mo	< 0,0050	< 0,0050	< 0,005	< 0,0050
Ni	0,0270	0,018	0,026	0,022
Cu	0,0410	0,040	0,043	0,014
Al	0,0094	0,0022	0,0022	< 0,0020
Co	0,0100	0,011	0,011	0,010
Nb	< 0,0050	< 0,005	< 0,0050	< 0,0050
Ti	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020
V	< 0,0030	< 0,0030	< 0,0030	< 0,0030
W	< 0,0200	< 0,020	< 0,020	< 0,020
B	< 0,0010	< 0,001	< 0,0010	< 0,0010
Sn	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020	< 0,0020
Fe	98,1300	99,34	99,34	99,32

### Cálculo de la composición química esperada en el metal de soldadura

Los resultados del cálculo de la concentración esperada de los elementos de aleación del metal de soldadura se presentan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Concentración esperada de los elementos de aleación.

Junta	0F	1C	2A	3D
Elemento	Concentración esperada %			
C	0,1109	0,1126	0,1135	0,1143
Si	0,1997	0,1992	0,1990	0,1987
Mn	0,9938	1,0005	1,0040	1,0073
P	0,0062	0,0084	0,0095	0,0106
S	0,0087	0,0082	0,0080	0,0077
Cu	0,1049	0,0961	0,0913	0,0869

### 3.1.4.3. Caracterización de la macroestructura y análisis microestructural

#### Análisis de la macroestructura

Las imágenes de la macroestructura de las juntas se muestran en la Figura 3.24, Figura 3.25, Figura 3.26, y Figura 3.27. Se muestra el tamaño del refuerzo y de la raíz en milímetros, se reconoce la ZAC en el metal base (zona bordeada con líneas blancas) y se especifica el área en milímetros cuadrados. Estas mediciones se resumen en la Tabla 3.15.

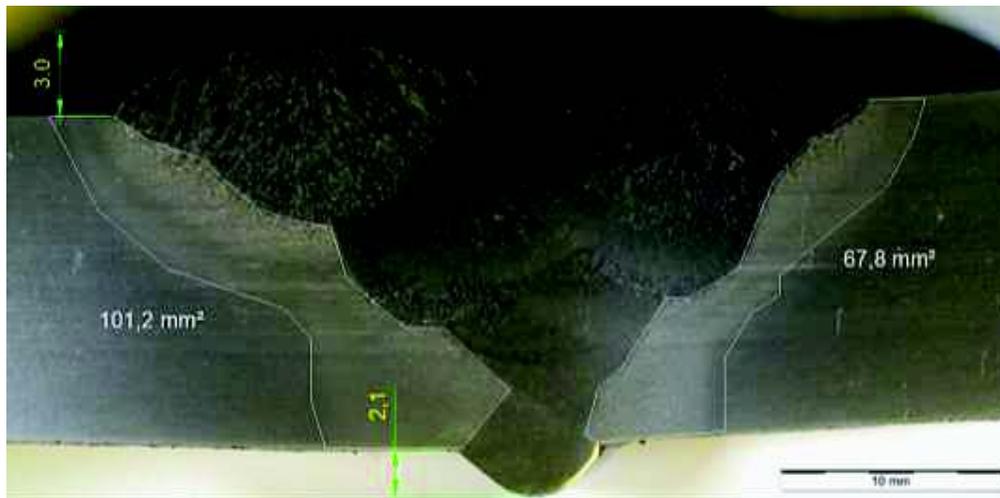


Figura 3.24. Macroestructura de la junta 0F.

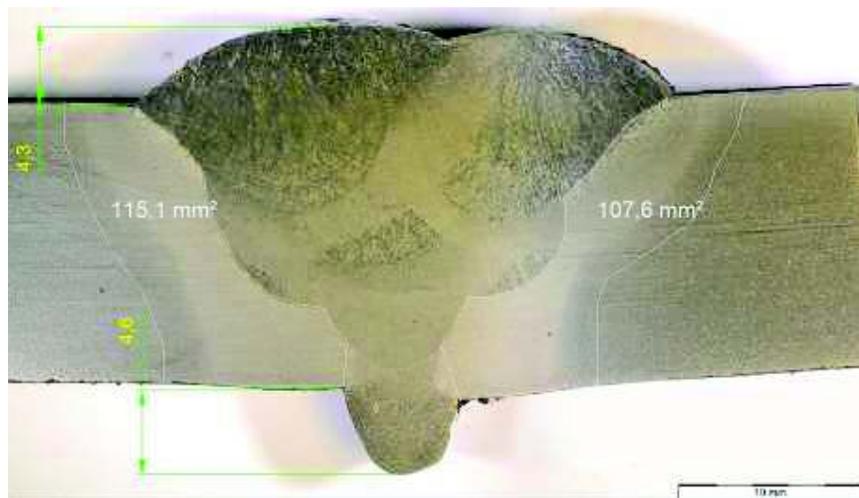


Figura 3.25. Macroestructura de la junta 1C.

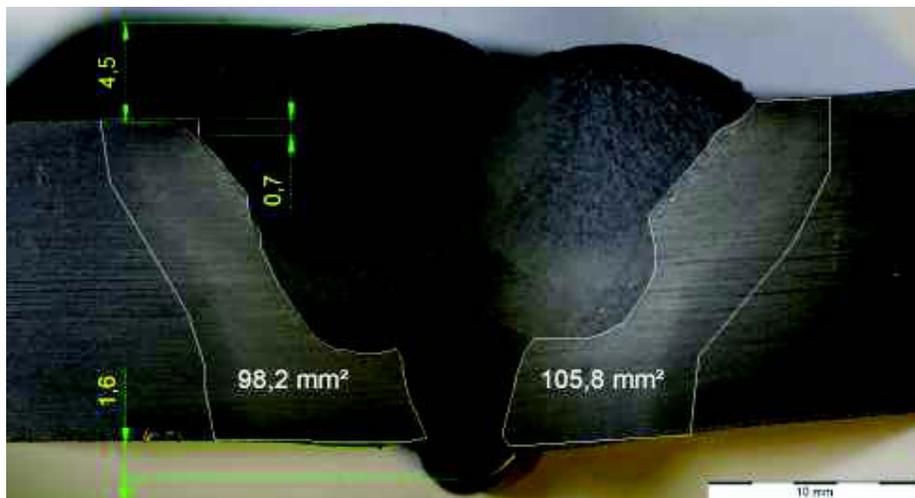


Figura 3.26. Macroestructura de la junta 2A.

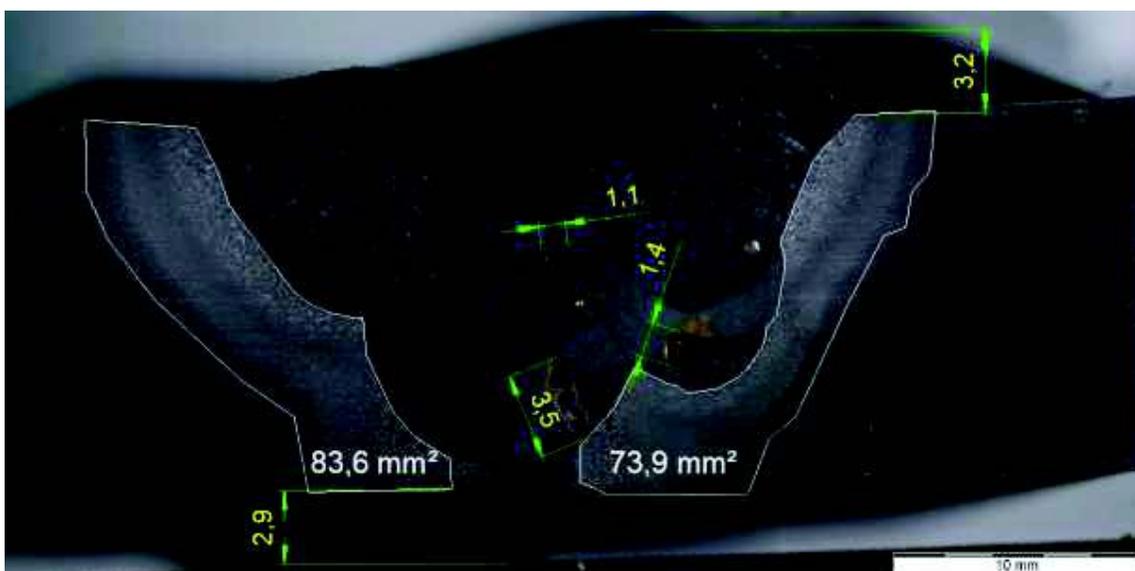


Figura 3.27. Macroestructura de la junta 3D.

Tabla 3.15. Resumen de medición en de la macroestructura.

Junta	Mediciones			
	Refuerzo [mm]	Raíz [mm]	Discontinuidades [mm]	Área total de la ZAC [mm <sup>2</sup> ]
0F	3	2,1	-	169,0
1C	4,3	4,6	-	222,7
2A	4,5	1,6	Mordedura 0,7	204,0
3C	3,2	2,9	Porosidad 3,5 Falta de fusión entre pases 1,1	157,5

## **Análisis microestructural y mediciones de microdureza**

### **Análisis microestructural**

Al realizar el análisis microestructural de las muestras se identificó que todas las juntas muestran cuatro zonas características: (1) la zona de crecimiento columnar de los pases superiores e intermedios (centro y laterales), (2) zona de recrystalización entre pases y pases inferiores, (3) zona afectada por el calor y (4) metal base (ver Figura 3.28).

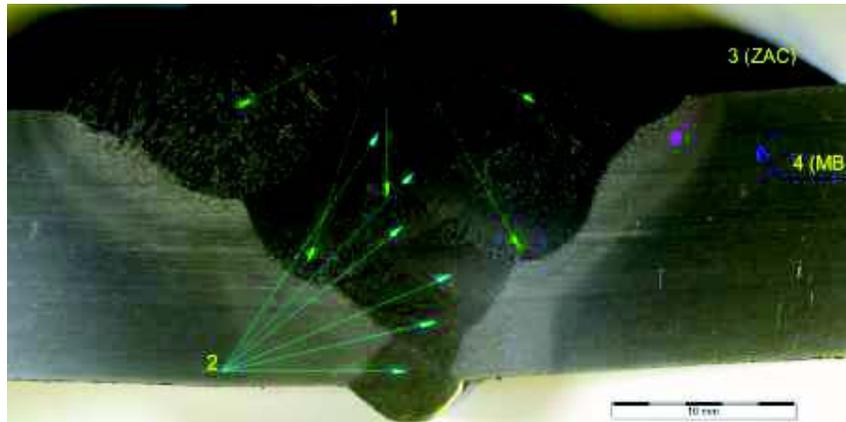


Figura 3.28. Zonas del cordón de soldadura con microestructuras características, (1) pases superiores e intermedios, (2) zona entre pases y pases inferiores, (3) zona afectada por el calor, (4) metal base.

### **Zona 1. Crecimiento columnar de los pases superiores e intermedios**

La Figura 3.29 muestra las micrografías de uno de los pases superiores del cordón de la junta 0F. En la micrografía (a) se observa formaciones de ferrita pro-eutectoide ( $\alpha$ ) ubicada en los bordes de grano de la austenita previamente formada. En lo que fueron los granos de austenita, se distinguen cristales gruesos y alargados de ferrita Widmanstätten ( $\alpha_w$ ) en forma de láminas que nuclean a partir de la ferrita pro-eutectoide, en una matriz de ferrita acicular ( $\alpha_a$ ). Se observa el crecimiento de grano columnar típico del metal de soldadura. La micrografía (b), de la misma zona a mayor aumento, muestra la microestructura de la ferrita acicular ( $\alpha_a$ ) con zonas oscuras que corresponderían a formaciones de perlita (P) [21], [24]. En la micrografía (b) no se observan los bordes de grano de la austenita previamente formada debido al ataque químico realizado inicialmente sólo con nital al 2%, los bordes de grano de la austenita previamente formada se revelan con el uso del reactivo vilella [54].

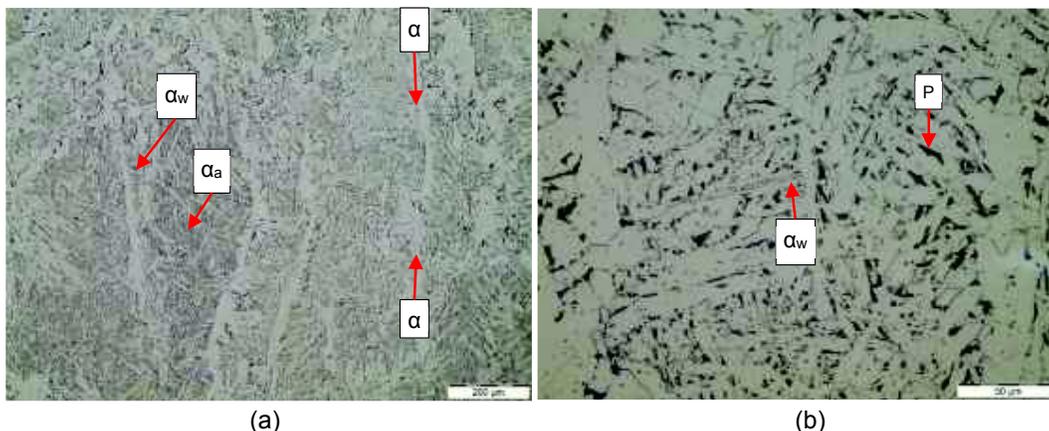


Figura 3.29. Junta 0F, zona 1, pases superiores e intermedios, (a) nital 2% 40 s y vilella 8 s,  $\alpha$  ferrita pro-eutectoide,  $\alpha_w$  ferrita Widmanstättén, 100X (b) nital 2% 40 s,  $\alpha_w$  lámina de ferrita Widmanstättén, P regiones de perlita, 50X.

En la Figura 3.30 se observa las micrografías de uno de los pases superiores del cordón de la junta 1C. En la micrografía (a) se observa granos gruesos de ferrita pro-eutectoide ( $\alpha$ ) y formaciones de ferrita con una fase alineada (FA). Se denota el crecimiento de grano columnar típico del metal de soldadura. La micrografía (b), de la misma zona a mayor aumento, muestra el detalle de la formación granos de ferrita con zonas alargadas más claras (FA), además, se denotan agregados globulares de carburo de ferrita (F-C) dispersos aleatoriamente y formaciones intergranulares de perlita (P). Las micrografías de un cordón superior de las juntas 2A y 3D son similares a la descrita para la junta 1C, se observan en la Figura 3.31 y Figura 3.32.

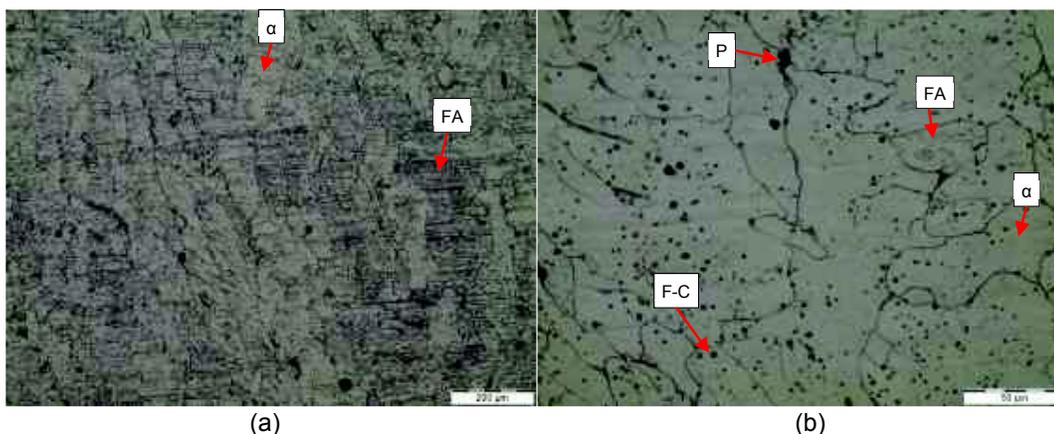


Figura 3.30. Junta 1C, zona 1, nital 2% 40 s y vilella 16 s (a)  $\alpha$  granos gruesos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, 100X (b)  $\alpha$  granos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, F-C agregados de carburo de ferrita, P perlita, 50X.

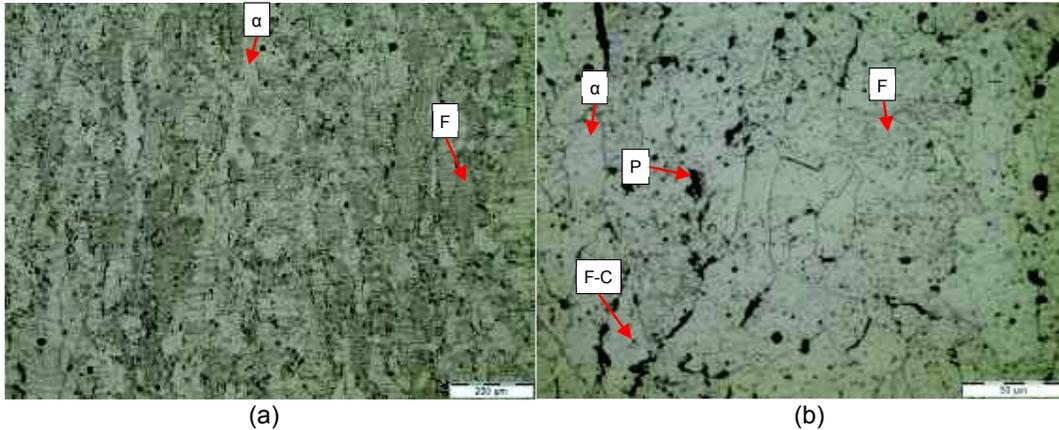


Figura 3.31. Junta 2A, zona 1, nital 2% 40 s y vilella 16 s (a)  $\alpha$  granos gruesos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, 100X (b)  $\alpha$  granos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, F-C agregados de carburo de ferrita, P perlita, 50X.

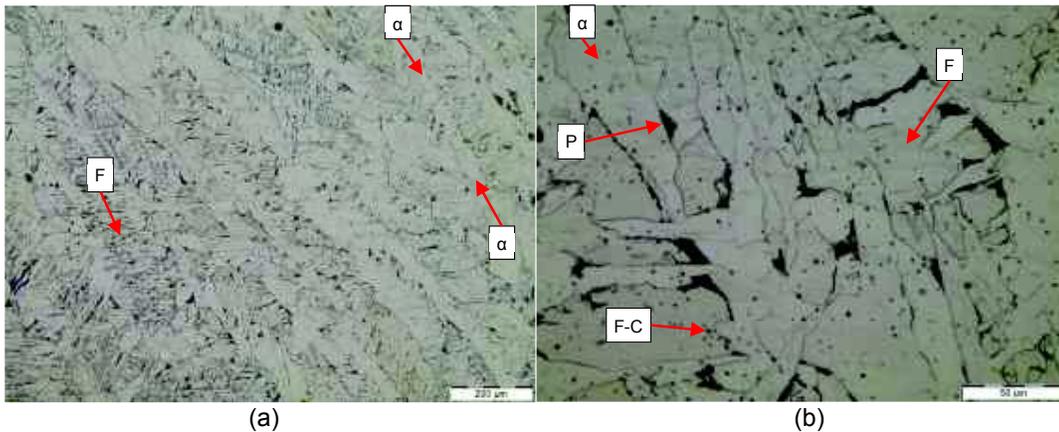


Figura 3.32. Junta 3D, zona 1, nital 2% 40 s y vilella 16 s (a)  $\alpha$  granos gruesos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, 100X (b)  $\alpha$  granos de ferrita pro-eutectoide, FA ferrita con una fase alineada, F-C agregados de carburo de ferrita, P perlita, 50X.

## Zona 2. Zona recristalizada entre pases y pases inferiores

La microestructura de las zonas recalentadas entre pases presenta estructuras de grano fino. En la Figura 3.33 se muestran las micrografías de la junta 0F, en la imagen con mayor aumento (b) se muestra una matriz de granos de ferrita (F) y formaciones intergranulares de perlita (P). La Figura 3.34 indica en la micrografía (b) una estructura de granos de ferrita (F), granos de ferrita con una fase alineada (FA), formaciones de perlita (P) en los bordes de grano y agregados de carburo de ferrita (F-C) dispersos. Las juntas 2A y 3A presentan microestructura similar en la zona 2 (ver Figura 3.35 y Figura 3.36).

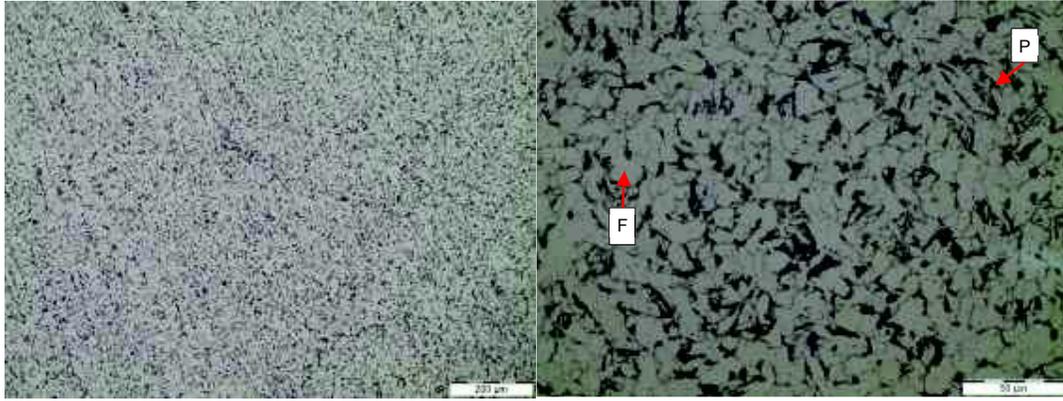


Figura 3.33. Junta 0F, zona 2, (a) estructura de grano fino, 100X, (b) F granos de ferrita, P perlita intergranular, 50X.

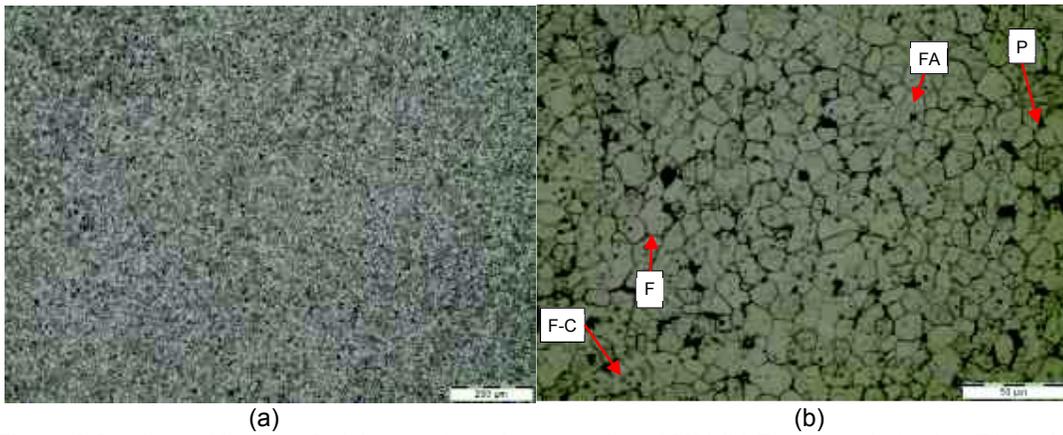


Figura 3.34. Junta 1C, zona 2, (a) estructura de grano fino, 100X (b) F granos de ferrita, FA ferrita con una fase alineada, P perlita, F-C carburos de ferrita, 50X.

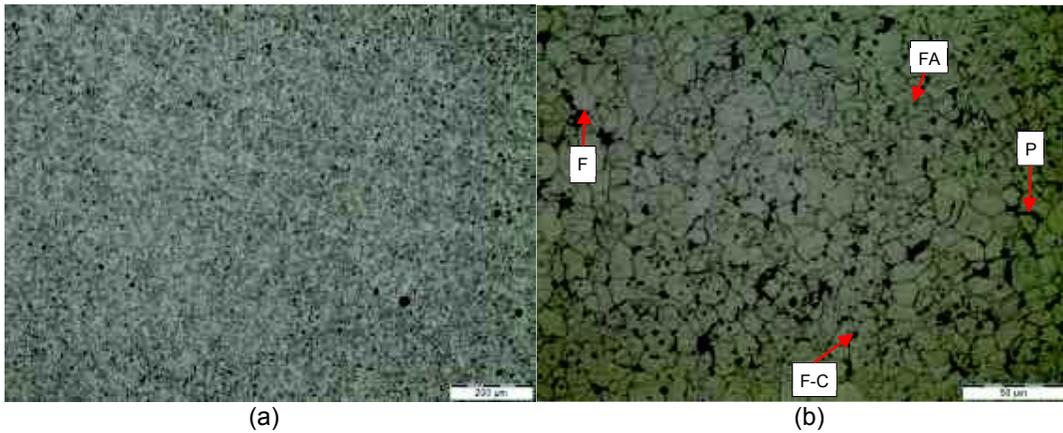


Figura 3.35. Junta 2A, zona 2, (a) estructura de grano fino, 100X (b) F ferrita, P perlita, FA ferrita con una fase alineada, F-C carburos de ferrita, 50X.

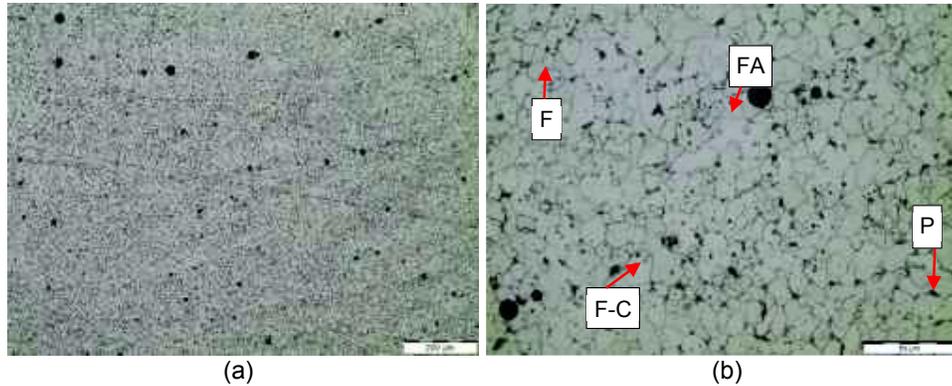


Figura 3.36. Junta 3D, zona 2, (a) estructura de grano fino, 100X (b) F ferrita, P perlita, FA ferrita con una fase alineada, F-C carburos de ferrita, 50X.

### Zona de transición, metal de soldadura – ZAC

En la Figura 3.37 se observa micrografías de la zona de transición entre el metal de soldadura y la ZAC de las cuatro juntas. En todas las imágenes se observa en la ZAC una microestructura de grano grueso. La principal diferencia se observa entre las micrografías (b), (c) y (d) comparadas con la micrografía (a) junta 0F, en la que las microestructuras de estas dos zonas cambian gradualmente, mientras que en las micrografías de las juntas 1C, 2A y 3D el cambio se presenta por una marcada interfase.

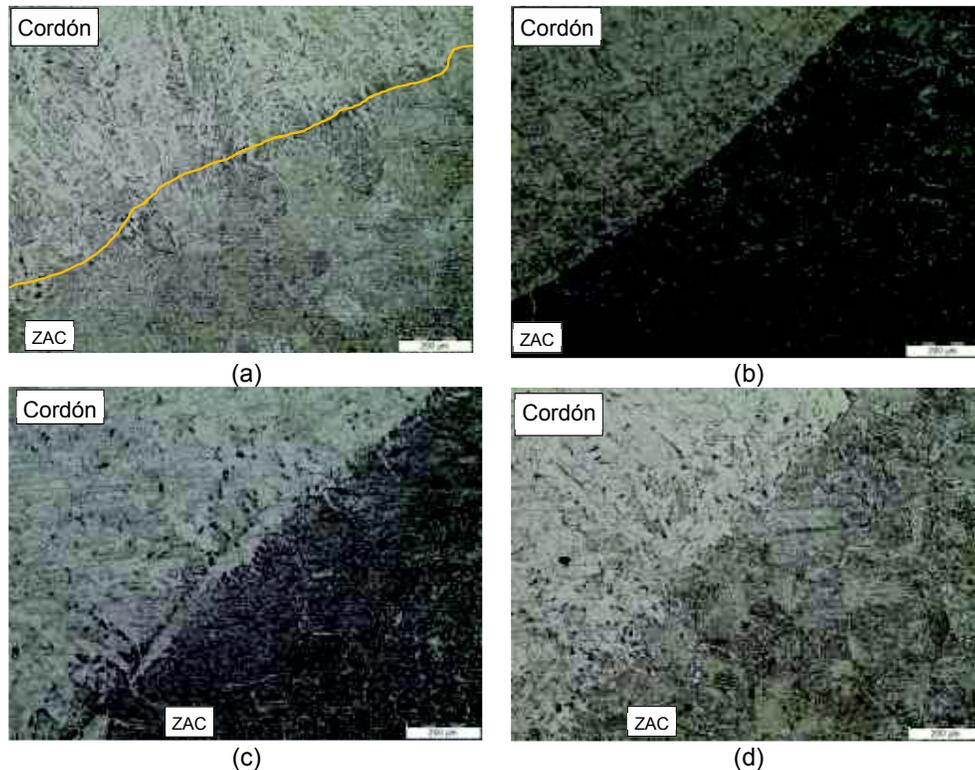


Figura 3.37. Transición metal de soldadura - ZAC, (a) junta 0F, (b) junta 1C, (c) junta 2A, (d) junta 3D, 100X.

### Mediciones de microdureza

Los resultados de los valores de microdureza en escala Knoop para el barrido vertical y horizontal se presentan en la Tabla 3.16. El barrido vertical de dureza se muestra en la Figura 3.38, y el barrido horizontal se presenta en la Figura 3.39.

Tabla 3.16. Resultados del ensayo de microdureza.

Muestra		0F	1C	2A	3D
Barrido vertical	Medición	HK	HK	HK	HK
	1v	152,3	141,9	115,5	154,3
	2v	133,7	144,8	138,4	155,7
	3v	152,3	161,1	144,4	152,5
	4v	147,3	150,3	155,7	160,2
	5v	161,4	164,8	151,2	162,4
Barrido horizontal	1h	147,3	150,3	155,7	160,2
	2h	142,7	141,7	142,5	164,8
	3h	212,2	181,6	142,7	210,4

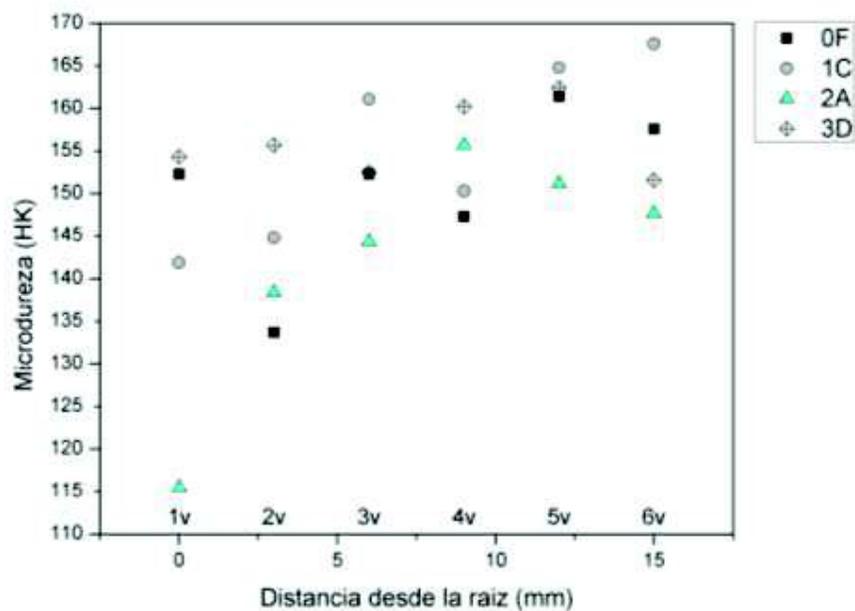


Figura 3.38. Variación de microdureza vertical en el cordón de soldadura.

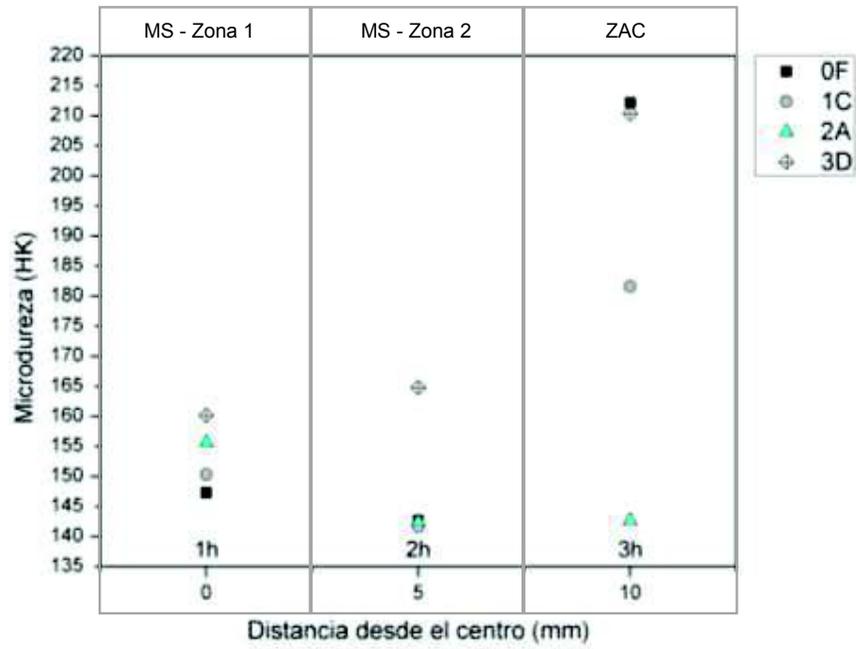


Figura 3.39. Variación de dureza horizontal del cordón de soldadura – ZAC.

## 3.2. Discusión

### 3.2.1. Metal base

Debido a que el material base se adquirió en una empresa donde se fabrican estructuras metálicas se verifica que el material cumple con las especificaciones para acero grado 50 bajo especificación ASTM A572. Se comparan dichas especificaciones con los resultados obtenidos de la caracterización del metal base.

Se identifica que los porcentajes de los elementos de composición química están dentro de los rangos requeridos en el estándar ASTM A572 y A6 [10], [55] (ver Tabla 3.17). Es necesario mencionar que los análisis de espectrometría de emisión óptica por chispa reportan otros elementos que no están especificados en el estándar.

Tabla 3.17. Comparación composición química material base con especificaciones estándar.

Elemento <sup>1</sup>		C	Si	Mn	P	S	Nb <sup>3</sup>	Mn/C
Porcentaje	Resultados muestra QMB	0,1300	0,1940	1,0710	0,0300	<0,003	0,0061	8 <sup>4</sup>
	Estándar <sup>2</sup>	0,23 (máx.)	0,4 (máx.)	0,45 - 1,35	0,030 (máx.)	0,030 (máx.)	0.004-0.06	2 <sup>5</sup>

<sup>1</sup> se reporta sólo los elementos requeridos en el estándar, <sup>2</sup> requerimientos químicos para acero grado 50, <sup>3</sup> se reporta el elemento de aleación de acuerdo con el "Tipo 1" de la "Tabla 3" del estándar ASTM A572, <sup>4</sup> valor calculado con los porcentajes obtenidos en análisis, <sup>5</sup> relación de manganeso a carbono no debe ser inferior a 2.

En relación con las propiedades mecánicas, las mediciones de dureza superficial de las placas presentan un promedio de 81 HRB (ver Tabla 3.2) y conforme a la "Tabla 3" del estándar ASTM A370 [45] la resistencia a la tracción aproximada correspondería a 505 [MPa] (73 ksi), este valor es mayor a la resistencia a la tracción mínima de 450 [MPa] (65 ksi) especificada en el estándar para el grado 50 del acero. Este valor de resistencia a la tracción aproximado es referencial únicamente y debido a la variación en composición y tipo de procesamiento de los aceros es posible que la relación dureza-resistencia presentadas en el estándar ASTM A370 presenten desviaciones [45]. Con los resultados del ensayo de tracción se verifica que las propiedades mecánicas mínimas requeridas en el estándar ASTM A572 están dentro de las especificaciones para el grado 50 del acero (ver

Tabla 3.18).

Tabla 3.18. Comparación requerimientos tracción.

Propiedad mecánica	Límite de fluencia		Resistencia a la Tracción		Porcentaje de alargamiento <sup>1</sup>
	[MPa]	[ksi]	[MPa]	[ksi]	%
Resultados muestra TMB	482,45	69,92	593,04	85,94	46,9
Requerimientos estándar (mín.) <sup>2</sup> [10]	345	50	450	65	21
<sup>1</sup> en 50 mm de longitud calibrada, <sup>2</sup> requerimientos para acero grado 50					

En cuanto a la energía de impacto absorbida en el ensayo Charpy se observa que 2 de las tres muestras tienen un valor similar (CHMB2 228 J y CHMB3 220 J), mientras que la otra muestra tiene un valor mayor (CHMB1 320 J), la energía de impacto promedio se eleva debido a esto. Los tres valores de energía absorbida reportados en el ensayo son superiores a los valores referenciales encontrados en la literatura para este acero a una temperatura de ensayo de 0°C. En la literatura se reportan valores de 46 J (34 ft-lbf) a 0°C para una muestra de acero ASTM A574 grado 50 de sección transversal 10 x 9,5 mm [56], debido a que la muestra no es estándar el valor esperado de energía absorbida para una muestra de 10 x 10 mm sería mayor. Para establecer un parámetro de comparación se utiliza la “Tabla 9” del estándar ASTM A370 que dispone valores de energía esperados para muestras de sección menor y establece el equivalente al esperado para una muestra estándar, de esta manera, para un valor de energía absorbida de 46 J para una muestra de tamaño 10 x 7,5 mm, el valor esperado para una muestra de tamaño estándar corresponde a 61 [J] (45 ft-lbf) [45].

La caracterización de la microestructura del metal base evidencia que, si bien presenta la misma matriz ferrítico-perlítica, el tamaño de grano varía, lo cual influye en las propiedades mecánicas y se verifica mediante los diferentes valores de dureza superficial obtenidos.

### 3.2.2. Continuidad de la unión soldada

La evaluación visual de los cordones de las juntas permite analizar los efectos del uso de arenas ferrosas en el proceso por arco sumergido, la continuidad del cordón se ve afectada conforme se incrementa la masa de arena en la mezcla (ver Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.10). Al observar la escoria formada en el proceso se denota la diferencia en la calidad superficial del cordón (ver Figura 2.3), la escoria de la junta 0F se desprendió fácilmente del cordón, y presentó continuidad, mientras que las juntas que utilizan arenas ferrosas en la mezcla no son continuas, la forma del cordón se vuelve irregular y la presencia de gases atrapados se distinguen en formas de cavidades en la escoria, lo cual se ve reflejado en la junta con la inspección visual donde las juntas 1C, 2A, y 3D presentan

porosidades abiertas a la superficie que no satisfacen los criterios de aceptación de inspección visual del estándar AWS D1.1 [51]. Mediante la inspección visual se verifica, además, que la penetración se ve incrementada al incorporar arena ferrosa.

La radiografía industrial de las 4 juntas verifica la existencia de defectos internos en los cordones al utilizar la mezcla de fundente y arena, las principales discontinuidades reconocidas son porosidades agrupadas y aisladas. Las porosidades en el metal de soldadura se producen por los gases generados durante la descomposición del fundente y arena en la soldadura por arco sumergido y que durante la solidificación permanecen atrapados durante la solidificación [34], [35]. Wei, Q. et al. [34] establecieron que la cantidad de poros en el metal de soldadura aumenta al incrementar la cantidad de oxígeno en la mezcla del gas de protección del cordón. Estudios relacionados a las fuentes de contaminación del metal de soldadura por oxígeno y nitrógeno determinan que existe una relación entre el índice de basicidad y la cantidad de oxígeno disuelto en el metal de soldadura, de manera que al incrementarse el índice de basicidad se incrementa la cantidad de oxígeno disuelto en el metal de soldadura [33], [57]. Con base en lo citado se presume que las porosidades presentadas en el cordón de las juntas 1C, 2A, y 3D se deben a los altos contenidos de óxidos de hierro (óxidos básicos  $Fe_xO_x$ ) que durante la soldadura serían la principal fuente de oxígeno. Además, por sí solas, las arenas ferrosas presentarían un índice de basicidad mayor a 2, por lo que durante el proceso de soldadura se está modificando el índice de basicidad del fundente neutro, lo cual afecta la continuidad de la soldadura como se evidencia en los resultados de este estudio.

En cuanto al incremento en la penetración de las juntas que utilizaron una mezcla de fundente y arena ferrosa, sin necesidad de modificar las variables eléctricas del procedimiento se estima que se esto se produce debido a que a las temperaturas alcanzadas en la soldadura sobrepasan las temperaturas a las que se reducen los minerales de hierro (850 - 1050°C [37]) contenidos en la arena (hematita, magnetita e ilmenita) por lo que el oxígeno se separa y el hierro contenido en la arena se funde. Esto se verifica mediante el análisis químico por espectrometría de emisión atómica por chispa realizado a las cuatro muestras de las juntas soldadas en el que se identifica el incremento de hasta 1,21 % en peso de hierro en el metal de soldadura de las muestras de las juntas 1C, 2A, y 3D que incluyeron arena como parte del fundente. Así también se verifica que los componentes minerales de la arena adicionada se funden durante el proceso de soldadura debido a que hay un incremento de hierro en las muestras de escoria analizadas. El contenido de hierro determinado para la muestra de escoria de la junta 0F pasa de 2,63%

a 15,79% en peso para la muestra de escoria de la junta 3D, es decir el contenido de hierro se incrementa en 13,16% en peso.

### 3.2.3. Caracterización mecánica de las juntas soldadas

Los resultados de los ensayos mecánicos realizados según los requerimientos del estándar AWS D1.1 [51] permiten validar el procedimiento de soldadura utilizado para elaborar la junta 0F, la cual, es utilizada en este estudio como un valor de referencia para determinar la variación de propiedades al incorporar arena ferrosa.

Las propiedades de resistencia última a la tracción de las muestras TF1 y TF2 de la junta 0F (ver Tabla 3.7), cumplen con los requerimientos mínimos definidos en AWS D1.1 [51] para la soldadura de acero ASTM A572 grado 50 (ver Tabla 3.7 y Tabla 3.19).

Tabla 3.19. Requerimientos de especificación según AWS D1.1.

Propiedad mecánica	Rango de resistencia a la Tracción
	[MPa]
Requerimientos estándar para combinación de metal base – metal de aporte ASTM A572 grado 50	450 (mínimo)

Las muestras TF1 y TF2 presentan una superficie de falla tipo “copa – cono” característica de una fractura dúctil (ver Figura 3.11 y Figura 3.12). Las muestras TC1, TC2, presentan una apariencia similar a las de las muestras de la junta 0F (ver Figura 3.13 y Figura 3.14), esto tiene correspondencia al porcentaje de alargamiento similar que presentan estas muestras (ver Tabla 3.7). Las muestras TA1, TA2, TD1 y TD2 presentan la formación parcial de la apariencia “copa – cono” en zonas de la superficie de fractura, pero en general la deformación plástica que se visualiza es menor comparada con la deformación presente en las muestras TF1 y TF2. Para cuantificar esta característica se compara los porcentajes de alargamiento, que es una medida de la ductilidad, y se identifica que el porcentaje promedio se reduce de 26.33% a 13,5% para las muestras de las juntas 2A y 3D. En la superficie de falla de las muestras TD1 y TD2 se observa la presencia de porosidades internas y subsuperficiales en el metal de soldadura (ver Figura 3.17 y Figura 3.18).

Los ensayos de doblado lateral de las muestras BF1, BF2, BF3 y BF4 (ver Tabla 3.8) cumplen también con los criterios de aceptación de la inspección visual de la zona convexa de la muestra ensayada.

En relación con la variación de propiedades mecánicas de las juntas que se obtuvieron al usar mezcla de fundente y arena, se verifica la reducción de propiedades mecánicas

esperada debido a la presencia de discontinuidades detectadas mediante radiografía industrial. Las porosidades son un factor responsable de la reducción en las propiedades mecánicas, la influencia de las porosidades en el metal de soldadura causan reducción en la tenacidad, ductilidad, resistencia a la fluencia y resistencia a la tracción [58]. En general, los resultados de los ensayos mecánicos realizados a las muestras TC1, TC2, TA1, TA2, TD1, TD2 (ver Tabla 3.7) se reducen comparados con las propiedades mecánicas del metal de soldadura identificados en la muestra que utiliza solo fundente comercial. La resistencia mecánica se reduce hasta en un 27% (135,45 MPa) para la muestra TA2 comparada con las propiedades obtenidas en la junta de referencia 0F, es importante señalar que la resistencia a la tracción para las muestras TD1 y TD2 es mayor comparada a la resistencia de las muestras TA1 y TA2, lo que corrobora la influencia de las discontinuidades y su tamaño en la variación de esta propiedad mecánica.

A través del ensayo de doblado lateral, se establece que la junta 1C cumple los requerimientos del estándar AWS D1.1 (ver Tabla 3.9), mientras que las otras 2 juntas 2A y 3D resultan en una o más muestras fracturadas (ver Tabla 3.10 y Tabla 3.11). Al observar la superficie de fractura de estas muestras se constata la presencia de porosidades agrupadas cuyo tamaño crece en el sentido vertical de la sección transversal.

Los resultados del ensayo Charpy de las juntas soldadas (ver Tabla 3.12) se compara con la energía absorbida del metal base (ver Tabla 3.4), se determina que solo la junta 2A tiene un valor promedio superior al valor promedio del material base, la junta 1C tiene un valor menor, pero similar, mientras que la junta 3D, tiene un valor menor. Estos resultados no permiten relacionar el contenido de masa de arena incorporado al fundente con la variación en esta propiedad mecánica del metal base, esta variabilidad de los resultados se debe principalmente a que las muestras para impacto al estar centradas a 1 mm de la ZAC se ven afectadas por las discontinuidades presentes en el lado donde se encuentra el cordón, esto se constata con la visualización de las superficies de fractura y la dirección en la que se propagó. Se denota que las fracturas se propagan hacia el centro del cordón a través de las porosidades presentes en la superficie de fractura. Se observa en las superficies de fractura zonas de delaminación en el centro y zonas brillantes en los alrededores que son características comunes en este tipo de ensayos en el metal de soldadura [59].

#### **3.2.4. Caracterización de la macroestructura**

Se determina mediante el análisis de la macroestructura que la junta 0F cumple con las especificaciones relacionadas al perfil de la sección transversal del cordón de soldadura de acuerdo con requerimientos AWS D1.1. Las otras 3 uniones presentan tamaños de

refuerzo y raíz superiores a 3 mm por lo que el cambio de sección transversal no cumple el requerimiento. En la Figura 3.40 se observa cómo varía el tamaño de la ZAC, refuerzo y raíz para las 4 juntas, no se observa una relación en esta variación.

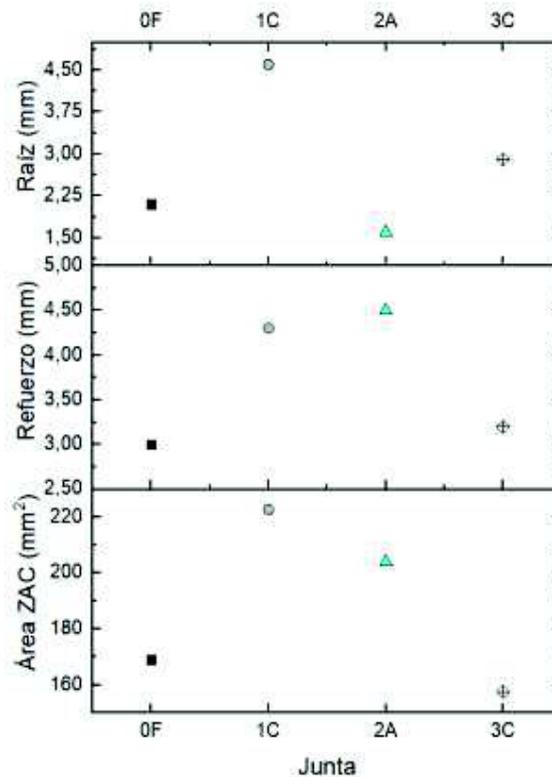


Figura 3.40. Variación de la macroestructura de las juntas soldadas.

### 3.2.5. Análisis de la composición química del metal de soldadura (MS) y análisis microestructural

La Figura 3.41 resume la variación del contenido de los elementos aleantes en el metal de soldadura. Se observa una disminución del contenido de Mn en las juntas que utilizaron como protección la mezcla de arena y fundente (1C, 2A, 3D) comparado con el contenido de Mn en la junta obtenida sólo con fundente (0F). El contenido de Mn en las juntas con mezcla de arena y fundente decrece en 0,806 wt.% (promedio de variación de las tres juntas). Otros estudios revelan que al incrementar el contenido de manganeso se promueve la formación de estructuras como la ferrita acicular en la microestructura clásica de una junta para aceros de alta resistencia y baja aleación [11], [26], esto permite extrapolar la relación que tiene el contenido de Mn en el metal de soldadura con la microestructura desarrollada por las juntas 1C, 2A, 3D, que en lugar de presentar ferrita acicular y ferrita de borde de grano como en la junta 0F, presentan estructuras ferríticas con una fase

alineada y microconstituyentes de perlita y carburos de ferrita en los bordes de grano de la austenita previamente formada. De manera similar se denota la reducción del contenido de Si en las juntas soldadas con arena y fundente, este elemento se reduce en 0,333 wt. % promedio de variación de las tres juntas, el mismo que favorece al igual que el manganeso la formación de ferrita acicular [11].

Se identifica además que el contenido de hierro en el metal de soldadura se incrementa para las juntas 1C, 2A y 3D hasta en un 1.2 wt.% (promedio de variación de las tres juntas) comparado con el contenido de hierro en la junta 0F, lo cual coincidiría con lo mencionado anteriormente en relación al contenido de hierro contenido en la arena ferrosa, la cual al fundirse se incorporaría a la pileta de soldadura y en consecuencia al metal de soldadura. Los demás elementos aleantes presentan variaciones menores a las antes mencionadas.

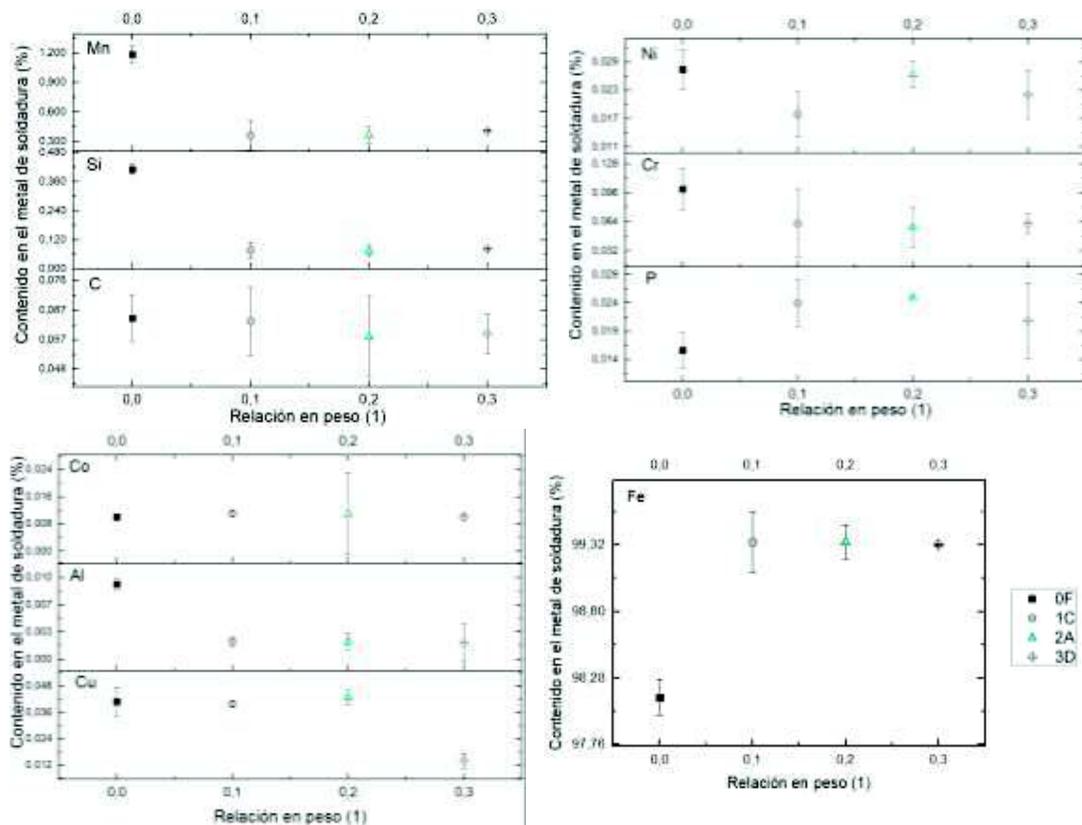


Figura 3.41. Contenido de elementos aleantes en el metal de soldadura.

El análisis metalográfico identificó, mediante la visualización meso-estructural sin ataque químico, la presencia de estructuras esféricas oscuras agrupadas en la zona superior de los pases del cordón de soldadura se presume que estas indicaciones son inclusiones

formadas por la incorporación de arena al fundente ya que únicamente se manifiestan en las juntas 1C, 2A y 3D.

En cuanto a la microestructura del metal de soldadura de las juntas se logra identificar zonas en las que las estructuras de crecimiento columnar de los pases iniciales centrales sufren un proceso de recristalización por el ciclo térmico que recibe debido al recalentamiento [20], la permanencia prolongada a temperaturas superiores a los 300°C durante el procedimiento experimental responde a este cambio microestructural. El barrido de dureza vertical corresponde mayoritariamente a zonas de recristalización, es por esto por lo que la distribución de los valores de microdureza es similar en cada punto para cada junta (ver Figura 3.38). El barrido horizontal de microdureza permite fácilmente visualizar la variación de las propiedades mecánicas en las zonas del metal de soldadura (MS) y la ZAC (ver Figura 3.39). La microdureza del metal de soldadura para la junta 0F en la zona 1 del metal de soldadura es menor comparada con la microdureza de las juntas 1C, 2A y 3D, los cuales se incrementan respectivamente, lo que permite verificar la diferencia de las microestructuras observadas. En general, se observa que la dureza de la muestra 0F se eleva en la ZAC, al igual que en el caso de las muestras 1C, y 3D.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Se determina que el procedimiento de soldadura utilizado para la junta 0F cumple con los requerimientos de calificación dados en la especificación AWS D1.1, por lo cual se toma como referencia los resultados obtenidos de la caracterización de esta junta soldada para establecer un parámetro de comparación de las otras juntas que utilizan una mezcla de fundente y arena ferrosa.
- Se concluye que al incorporar arenas ferrosas hasta una relación en peso igual a 0,3 los principales elementos de aleación que se reducen en el metal de soldadura son el manganeso, con una variación promedio de 0,806 wt.%, y el silicio con una variación promedio de 0,333 wt.%. Esta pérdida del porcentaje en peso de manganeso y silicio en el metal de soldadura impide la formación de ferrita acicular en la microestructura, y en su lugar favorece la producción de estructuras ferríticas con fases internas alineadas y carburos.
- Se identifica que el porcentaje en peso de elementos perjudiciales como el fósforo y el azufre no se ve incrementado en el metal de soldadura (incremento promedio: fósforo 0,0073 wt.%, azufre, no se reporta incremento).
- Se atribuye la formación de porosidades en el metal de soldadura al oxígeno que se descompone de los óxidos de hierro (minerales) contenidos en la arena ferrosa debido a las elevadas temperaturas generadas en los procesos de soldadura por arco eléctrico.
- Se establece que la penetración se ve incrementada al incorporar arenas ferrosas al fundente, sin necesidad de variar las características eléctricas del procedimiento. Este resultado se explica a través del contenido de hierro contenido en la arena ferrosa que se descompone y funde por proceso de reducción durante el proceso de soldadura. Este resultado se traduce en un potencial uso de las arenas de manera controlada con el objetivo de incrementar la tasa de aportación.
- Se establece que el uso de una mezcla fundente – arena con una relación en peso igual a 0,1 presenta un comportamiento a flexión que no se ve afectado mayormente por la presencia de discontinuidades en la soldadura.
- Se concluye que la incorporación de arenas ferrosas sin tratamiento previo genera un decrecimiento de la calidad de la junta soldada, desde la apariencia física del cordón hasta las características microestructurales que se ven modificadas. La variación (reducción) de propiedades mecánicas se ve influenciada y responde a la

presencia de porosidades generadas en el proceso, las cuales afectan la continuidad del cordón y actúan como concentradores de esfuerzos. A pesar de esto, con este estudio no se descarta el potencial uso de arena ferrosa como materia prima para consumibles, sino que se identifica la necesidad de establecer un método (de reducción) previo en el que se descompongan los óxidos de hierro y se utilice un subproducto para la formación de un fundente.

## 4.2. Recomendaciones

- La trazabilidad del material base es importante para la selección del material de aporte y el fundente. En este proyecto se realizó el análisis de composición química y el ensayo de tracción solo a muestras extraídas de la placa “F”, se considera que es necesario verificar las propiedades de todas las placas utilizadas siempre que se dispongan los recursos y esto sea posible con el objetivo de corroborar la homogeneidad de las placas utilizadas, ya que a pesar de que el material base se adquiere bajo un grado de acero dentro de la especificación, no se dispone de la certificación de dicho material.
- Se considera que las propiedades mecánicas podrían ser mejoradas al modificar el ciclo térmico al que es sometida la junta, por ejemplo, mediante una preparación de bisel que permita utilizar un menor número de pases y que elimine la distorsión en la junta debido a la contracción por la solidificación.
- Se considera que para favorecer el control sobre la continuidad del cordón se requiere utilizar un proceso completamente automático, con equipos de arco sumergido estables que permitan regular las variables del proceso para controlar mejor la calidad de la junta soldada obtenida. Es necesario mencionar que el proceso utilizado en el presente estudio no fue completamente automático y que el flujo del fundente (o la mezcla fundente – arena) no fue entregado mediante una tolva.
- Con el objetivo de verificar la presencia de oxígeno disuelto en el metal de soldadura se recomienda utilizar un método para análisis de composición química diferente al de espectrometría por emisión óptica debido a que este método no permite obtener el porcentaje en peso de este elemento.
- Se recomienda realizar trabajos a futuro que evalúen la capacidad de aglomerar arenas ferrosas con otros componentes que permitan controlar la generación de discontinuidades en el cordón ya que, la granulometría y densidad del fundente debería ser modificada para evitar que una mezcla de protección no sea homogénea y por lo tanto las propiedades de la unión varíen a lo largo del cordón.

## Referencias Bibliográficas

- [1] J. Garg and K. Singh, "Slag recycling in submerged arc welding and its effects on the quality of stainless steel claddings," *Mater. Des.*, vol. 108, pp. 689–698, 2016.
- [2] K. Singh and S. Pandey, "Recycling of slag to act as a flux in submerged arc welding," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 53, no. 10, pp. 552–558, 2009.
- [3] K. Weman, "Submerged arc welding," in *Welding Processes Handbook*, 2012, pp. 105–117.
- [4] B. Singh, Z. A. Khan, A. N. Siddiquee, and S. Maheshwari, "Effect of CaF<sub>2</sub>, FeMn and NiO additions on impact strength and hardness in submerged arc welding using developed agglomerated fluxes," *J. Alloys Compd.*, vol. 667, pp. 158–169, 2016.
- [5] A. M. Paniagua-Mercado, V. M. López-Hirata, and M. L. Saucedo Muñoz, "Influence of the chemical composition of flux on the microstructure and tensile properties of submerged-arc welds," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 169, no. 3, pp. 346–351, 2005.
- [6] C. S. C. T. W. Eagar, "Slag Metal Reactions During Submerged Arc Welding of Steel," vol. 15, no. 18, pp. 217–227, 1984.
- [7] J. Roy, R. N. Rai, and S. C. Saha, "Evaluation of microstructure and mechanical properties of P91 steel weldment due to addition of boron trioxide into flux during submerged arc welding," *Weld. World*, vol. 62, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [8] S. V. Naumov, A. M. Ignatova, and M. N. Ignatov, "Submerged Arc Welding Using Slag Base of West Urals Mineral Raw Resources with Low Detrimental Impurities Content," *Procedia Eng.*, vol. 206, pp. 1355–1359, 2017.
- [9] U. Mitra and T. W. Eagar, "Slag Metal Reactions during Submerged Arc Welding of Alloy Steels," *Metall. Trans. A*, vol. 15, no. January 1984, pp. 217–227, 1984.
- [10] ASTM International, "ASTM A572/A572M-15 Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural," vol. 01, pp. 4–7, 2003.
- [11] J. Amanie, "Effect of submerged arc welding parameters on microstructure of SA516 steel weld metal," 2012.
- [12] ASM International, *Metallography and Microstructures Handbook*, vol. 9, 2004.
- [13] K. E. Bianchi *et al.*, "Correlation of fracture toughness with charpy impact energy for low alloy, structural steel welds," pp. 1–11, 2017.

- [14] C. Chen, M.-S. Zhao, T.-C. Fung, S.-P. Chiew, and C.-K. Lee, "Influence of welding on mechanical properties of high strength steel butt joints," *Proceeding Eurosteel 2017*, vol. 14, no. 1, pp. 228–235, 2017.
- [15] B. Singh, Z. A. Khan, A. N. Siddiquee, S. Maheswari, and S. K. Sharma, "Effect of Flux Composition on the Percentage Elongation and Tensile Strength of Welds in Submerged Arc Welding," *Arch. Mech. Eng.*, vol. 63, no. 3, pp. 337–354, 2016.
- [16] C. B. Dallam, S. Liu, and D. L. Olson, "Flux Composition Dependence Of Microstructure and Toughness of Submerged Arc HSLA Weldments," *Weld. J.*, vol. 64(5), no. May, p. 140–s–151–s, 1985.
- [17] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología. Volumen 2. Procesos de manufactura*, Séptima ed. Pearson Educación de México, S.A, 2014.
- [18] C. E. Jackson, "Fluxes and slags," *Weld. Res. Counc. Bull.*, no. 190, 1973.
- [19] S. S. Tuliani, Boniszewski, and N. F. Eaton, "Notch Toughness of Commercial Submerged-Arc Weld Metal," *Weld. Met. Fabr.*, vol. 37, no. 8, pp. 327–339, 1969.
- [20] J. C. Lippold, "Welding Metallurgy Principles," in *Welding Metallurgy and Weldability*, John Wiley & Sons, Inc. 9, 2015, pp. 388–395.
- [21] R. A. Ricks, P. R. Howell, and G. S. Barritte, "The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals," vol. 17, pp. 732–740, 1982.
- [22] D. J. Abson and R. J. Pargeter, "Factors influencing as-deposited strength, microstructure, and toughness of manual metal arc welds suitable for C-Mn steel fabrications," *Int. Mater. Rev.*, vol. 31, no. 1, pp. 141–196, 1986.
- [23] G. Thewlis, "Transformation Kinetics of Ferrous Weld Metal," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 10, pp. 110–125, 1994.
- [24] G. Krauss and S. W. Thompson, "Ferritic Microstructures in Continuously Cooled Low- and Ultralow-carbon Steels," *ISIJ Int.*, vol. 35, no. 8, pp. 937–945, 1995.
- [25] L. Lan, X. Kong, C. Qiu, and D. Zhao, "Influence of microstructural aspects on impact toughness of multi-pass submerged arc welded HSLA steel joints," *Mater. Des.*, vol. 90, pp. 488–498, 2016.
- [26] W. W. Bose-Filho, A. L. M. Carvalho, and M. Strangwood, "Effects of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds," *Mater. Charact.*, vol. 58, no. 1, pp. 29–39, 2007.
- [27] J. N. Dupont, "Dilution in Fusion Welding," in *ASM Handbook, Welding Fundamentals*

*and Processes*, vol. 6A, 2011, pp. 115–121.

- [28] S. D. Bhale and J. Billingham, “Effect of heat input on HAZ toughness in HSLA steels,” *Met. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 363–367, 1983.
- [29] K. E. Dorsch and R. D. Stout, “Some factors affecting the notch toughness of steel weld metal,” *Weld J.*, no. 40, p. 97s–105s, 1961.
- [30] F. B. Pickering, *Physical Metallurgy and the Design of Steels*. London: Applied Science Publishers LTD, 1978.
- [31] D. D. Crockett, J. A. Rhone, R. F. Young, and D. C. Noernberg, “Design Considerations for Submerged Arc Consumables Intended for the Manufacture of Line Pipe,” *Pipeline Technol. - Proc.*, vol. 1, pp. 151–162, 1995.
- [32] P. T. Oldland, C. W. Ramsay, D. K. Matlock, and D. L. Olson, “Significant Features of High-Strength Steel Weld Metal Microstructures,” *Weld. J.*, vol. 58, no. 4, p. 158s–169s, 1989.
- [33] T. Lau, G. C. Weatherly, and A. McLean, “The sources of oxygen and nitrogen contamination in submerged arc welding using CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based fluxes,” *Weld. J.*, no. Dezembro, p. 343s–348s, 1985.
- [34] Q. Wei, Q. Hu, F. Guo, and D. J. Xiong, “A study of weld pore sensitivity of self-shielded, flux cored electrodes,” *Weld. J.*, vol. 81, no. 6, p. 90s–94s, 2002.
- [35] B. G. Renwick and B. M. Patchett, “Operating Characteristics of the Submerged Arc Process.,” *Weld. J. (Miami, Fla)*, vol. 55, no. 3, p. 69s–76s, 1976.
- [36] Banco Central del Ecuador, “Reporte de minería,” 2016.
- [37] M. Chuquimarca and L. Chulde, “Estudio y obtención de metal de hierro a partir de arenas ferruginosas,” Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [38] M. Varela, “Las actividades extractivas en Ecuador,” *Ecuador Debate*, pp. 127–149, Apr. 2010.
- [39] Agencia de regulación y control minero, “Estadística minera. Producción nacional minera reportada,” Quito - Ecuador, 2016.
- [40] R. Quintana-Puchol, L. Perdomo-González, A. Cruz-Crespo, and L. Gómez-Rodríguez, “Las arenas negras de Mejías: nueva fuente para la obtención de consumibles para la soldadura por arco eléctrico,” *Minería Geol.*, vol. 18, no. 2, p. 10, May 2001.

- [41] R. Quintana-Puchol, L. Perdomo-González, and A. Cruz-Crespo, "Ferroaleación compleja obtenida por metodos pirometalurgicos a partir de arenas negras de Cuba," *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 50–61, 2003.
- [42] D. Venegas, "Estudio y caracterización física de arenas ferrosas depositadas sobre sustrato vítreo con aplicaciones industriales," 2018.
- [43] ASTM International, "ASTM E415-17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic." pp. 1–11, 2017.
- [44] ASTM International, "ASTM E18-17 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials," no. mm. pp. 1–38, 2017.
- [45] ASTM International, "ASTM A370-17 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products," vol. i. pp. 1–47, 2017.
- [46] INAMHI, "Anuario Meteorológico Nro 52-2012," 2015.
- [47] The Lincoln Electric Company, "Product certificate LinconInweld 960 flux." 2008.
- [48] The Lincoln Electric Company, "Lincolnweld ® 960 ® Data Sheet," no. 2. pp. 9–10.
- [49] The Lincoln Electric Company, "Certificate of Conformance." 2018.
- [50] The Lincoln Electric Company, "Operating manual Idealarc R3S-400, R3S-600 and R3S-800 DC arc welding power sources." Cleveland, Ohio, p. 28, 1986.
- [51] American Welding Society, "AWS D1.1 Structural Welding Code." 2010.
- [52] ASTM International, "E384-17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials," pp. 1–40, 2017.
- [53] M. A. Maleque and M. S. Salit, "Mechanical Failure of Materials," in *Materials Selection and Design*, Springer, 2013.
- [54] ASTM International, "ASTM E-407 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys," *ASTM International*, vol. 07, no. Reapproved 2015. pp. 1–22, 2016.
- [55] ASTM International, "ASTM A6/A6M-17a Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling," vol. 96, no. C. pp. 1–63, 2004.
- [56] R. I. Stephens, S. G. Lee, and H. W. Lee, "Constant and variable amplitude fatigue behavior and fracture of A572 steel at 25 ° C ( 77 ° F ) and - 45 ° C ( - 50 ° F )," *Int. Journ. Fract.*, vol. 19, pp. 83–98, 1982.
- [57] T. . W. Eagar, "Sources of Weld Metal Oxygen Contamination During Submerged

Arc Welding,” *Weld. J. Res. Suppl.*, vol. 2, no. March, pp. 76–80, 1978.

- [58] E. C. P. Pessoa, A. Q. Bracarense, E. M. Zica, S. Liu, and F. Perez-Guerrero, “Porosity variation along multipass underwater wet welds and its influence on mechanical properties,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 179, no. 1–3, pp. 239–243, 2006.
- [59] C. V Robino, R. J. Dias, R. Varughese, and A. W. Pense, “The Fracture Behavior of A588 Grade A and A572 Grade 50 Weldments,” no. 87, 1987.

## ANEXOS