



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TEMA: ESTUDIO DE LA AFECTACIÓN DEL PROCESO DE
REPARACIÓN EN UNIONES SOLDADAS DE UN ACERO HSLA
ASTM A572.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

KEVIN ALEXANDER MOREJÓN RUALES
kevin.morejon@epn.edu.ec

Euler Santiago Vásquez Huertas
euler.vasquez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. GALO HOMERO BARRAGÁN CAMPOS. MSc
homero.barragán@epn.edu.ec

Quito, febrero 2022

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Kevin Alexander Morejón Ruales** Y **Euler Santiago Vásquez Huertas**, bajo mi supervisión.



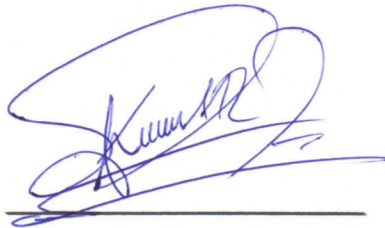
Ing. Homero Barragán. MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

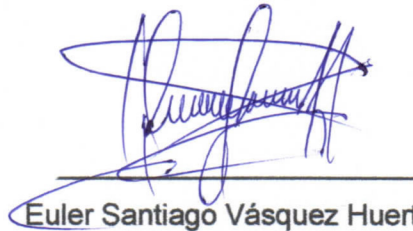
DECLARACIÓN

Nosotros, **Kevin Alexander Morejón Ruales y Euler Santiago Vásquez Huertas**, 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.



Kevin Alexander Morejón Ruales



Euler Santiago Vásquez Huertas

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre Xime, quien incondicionalmente ha estado junto a mí siendo una motivación a cada momento, porque todo lo bueno que ha hecho no se puede resumir ni en un millón de páginas.

A mis abuelitos Hugo y Rosy por cuidar de mí y quererme como a un hijo, soy todo lo que soy gracias a ustedes.

Los amo mucho.

Kevin Morejón

El presente estudio está dedicado a las personas más importantes de mi vida. Mi padre Hernán Vásquez, mi madre Carmita Huertas y mi hermana Yoselin Vásquez quienes con su esfuerzo, dedicación y ejemplo han logrado mi crecimiento profesional y personal.

Los amo infinitamente.

Santiago Vásquez

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a mi familia por creer y confiar en mí, por estar en los momentos grises y también por permitirme vivir los más felices, el mérito de este logro es entero suyo.

A mis primas Gaby y Vane por su incondicional apoyo en muchas noches de desvelo. A mis amigos, la gente de la “Mill200” porque han estado, están y estarán siempre. De manera especial a Jhulián, Andrés, Santiago y Sebastián con quienes tuve el gusto de compartir las mejores anécdotas de estudiante. Porque al igual que a mi familia, a todos ustedes les debo tanto.

Un agradecimiento en especial al Ing. Homero Barragán, quien con mucha dedicación y empeño supo guiarnos de la manera más acertada en este proyecto y en todas sus cátedras.

Kevin Morejón

Quiero agradecer a mi sabio padre que con sus consejos y sermones lograron que yo pueda continuar en el camino del bien. Mi amada madre quien siempre estuvo para apoyarme pese las circunstancias. Mi pequeña hermana por su compañía en las largas noches de desvelo. Sin su ayuda este sueño no habría sido realidad, son el motor de mi vida.

Agradezco al Ing. Homero Barragán por la confianza y la guía para poder realizar este proyecto.

A mis amigos Freddy Castillo, Juan Granja y sobre todo a Kevin Morejón con quienes e compartido muchos momentos, no todos felices, pero siempre encontré en ellos el amigo con quien pude contar.

Mi compañero de tesis Kevin Morejón por su apoyo y comprensión en la realización de este estudio.

A mi novia Gisell Suárez por su amor y apoyo en para la realización del estudio. Gracias infinitas a todos.

Santiago Vásquez

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 Procesos de soldadura.....	3
1.2 Tipos de procesos de soldadura.....	3
Soldadura por arco eléctrico.	3
Soldadura por arco eléctrico y electrodo revestido (SMAW).	4
Soldadura por arco eléctrico y electrodo de núcleo fundente (FCAW).....	4
1.3 Características de la soldadura por el proceso SMAW.....	5
Equipo para el proceso de soldadura SMAW.....	5
Generador de corriente.	5
Porta Electrodo.....	6
Conexión de masa.	6
Electrodo revestido.....	7
1.4 Tipos de revestimientos.	7
Electrodos rútilicos.	7
Electrodos básicos.	7
Electrodos ácidos.	8
Electrodos celulósicos.	8
1.5 Nomenclatura de los electrodos.	8
1.6 Características del proceso FCAW.....	9
Ventajas del proceso FCAW.	9
Limitaciones del proceso FCAW.....	9
1.7 Proceso de reparación de soldaduras.	9
Procedimiento de soldadura para el proceso de reparación.....	9
1.8 Código estructural AWS D1.1.	10
Parámetros de aceptación.	10
1.9 Calor de entrada.....	10
1.10 Aceros Estructurales.	11
Aceros al carbono.	11
Aceros de baja aleación y de alta resistencia.	11
Aceros de baja aleación y alta resistencia con prestaciones anticorrosivas.	11
1.11 Aplicaciones de aceros estructurales.....	13

1.12 Aceros de alta resistencia y baja aleación HSLA.	15
1.13 Clasificación de los aceros HSLA.	15
Aceros reducidos en perlita.	16
Aceros resistentes a la intemperie o aceros corten.	16
Aceros Laminados.	16
Aceros micro aleados.	16
Aceros de ferrita acicular.	16
1.14 Microestructura típica del acero HSLA.	16
1.15 Procesos termo mecánicos en la fabricación de aceros de alta resistencia.	17
Normalizado.	17
Temple.	18
1.16 Consecuencias físicas del proceso de soldadura sobre el material.	19
1.17 Evolución microestructural del material durante el proceso de soldadura.	20
La microestructura en un proceso de soldadura sufre transformaciones durante la etapa de fusión y durante la etapa de enfriamiento del material.	20
Etapa de fusión del material base.	20
Etapa de enfriamiento.	20
1.18 Zona afectada por el calor.	21
1.19 Diagrama de enfriamiento continuo.	22
Ferrita.	22
Ferrita Widmanstätten.	22
Ferrita acicular o de grano fino.	23
Cementita.	23
Perlita.	23
Bainita.	23
Martensita.	23
METODOLOGÍA.	24
2.1 Método de criterios ponderados para la selección del material base.	24
Evaluación y selección del acero estructural.	24
Evaluación del peso específico para cada criterio en las alternativas de aceros estructurales.	25
Evaluación de peso específico del criterio resistencia a la tracción.	26
Evaluación del peso específico del criterio resistencia a la fluencia.	26
Evaluación del peso específico del criterio disponibilidad en el mercado.	26
Evaluación del peso específico del criterio costo.	27
2.2 Cálculo de la tabla de prioridades.	27
2.3 Soldadura de juntas.	28
2.4 Procedimiento de soldadura “A”.	29

2.5	Procedimiento de soldadura “B”	31
2.6	Reparación de las juntas	33
	Desbaste del cordón	33
2.7	Resoldeo del bisel	34
2.8	Ensayos no destructivos	34
2.9	Método de inspección superficial por inspección visual	34
	Procedimiento del ensayo de inspección visual	44
2.10	Método de inspección volumétrico por radiografía industrial	45
	Procedimiento del ensayo de radiografía industrial	46
	Recaldeo del equipo	46
	Selección de indicadores de calidad	46
	Tiempo de exposición	46
	Ubicación de las placas y captura radiográfica	47
2.11	Ensayos destructivos	50
	Obtención de probetas	50
	Procedimiento de extracción de probetas	51
2.12	Ensayo de tracción de sección reducida	52
	Obtención de probetas	52
	Proceso del ensayo	52
2.13	Ensayo de doblado lateral	54
	Obtención de probetas	54
	Proceso del ensayo	54
2.14	Micrografía	56
2.15	Obtención y preparación de probetas	57
	Procedimiento de ensayo	58
2.16	Macrografía	59
	Extracción y preparación de probetas	59
	Procedimiento de ensayo	59
2.17	Ensayo de dureza superficial	60
	Obtención de las probetas	60
	Procedimiento del ensayo	61
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
3.1	Resultados inspección visual	62
3.2	Resultados radiografía Industrial	65
3.2	Resultados tracción	68
3.3	Resultados doblado lateral	72
3.4	Resultados micrografía	80

3.5 Resultados macrografía.....	87
3.6 Resultados dureza superficial.....	89
3.7 Discusión de resultados del ensayo de inspección visual.....	93
3.8 Discusión de resultados del ensayo de radiografía industrial.....	94
3.9 Discusión de resultados del ensayo de tracción.....	94
3.10 Discusión de resultados del ensayo de doblado lateral.....	95
3.11 Discusión de resultados del ensayo de micrografía.....	95
3.12 Discusión de resultados del ensayo de macrografía.....	96
3.13 Discusión de resultados del ensayo de dureza superficial.....	97
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
4.1 Conclusiones.....	98
4.2 Recomendaciones.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
ANEXOS	102
ANEXO I. WPS del procedimiento “A”.....	102
ANEXO II. WPS del procedimiento “B”.....	103
ANEXO III. WPS de reparación del procedimiento “A”.....	104
ANEXO IV. WPS de reparación del procedimiento “B”.....	105
ANEXO V. Indicadores de calidad de imagen (IQI).....	106
ANEXO VII. Cálculo de los tiempos de exposición.....	108
ANEXO VIII. Informe completo emitido por el LAEV del ensayo de tracción.....	110
ANEXO IX. Cálculo del calor de entrada.....	113
ANEXO X. Reporte de inspección por radiografía por el laboratorio de ensayos no destructivos EPN.....	123
ANEXO X. Reporte de inspección por radiografía por el laboratorio de ensayos no destructivos EPN.....	125
ANEXO XI. Velocidad de enfriamiento.....	137
ANEXO XII. Tamaño de grano.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Soldadura por arco eléctrico.....	4
Figura 1.2. Soldadura con por arco eléctrico y electrodo revestido (SMAW)	4
Figura 1.3. Equipo para el proceso de soldadura SMAW.	5
Figura 1.4. Máquinas soldadoras o fuentes de energía.	6
Figura 1.5. Porta Electrodo.	6
Figura 1.6. Partes de un electrodo.....	7
Figura 1.7. Clasificación de electrodos según la AWS.....	8
Figura 1.8. Micrografía de un acero HSLA A36, donde se observan una estructura ferrítica con colonias de pelita fina.....	17
Figura 1.9. Diagrama de fase hierro-carbono, que ilustra el rango de normalización típico para aceros.....	18
Figura 1.10 Efecto de los tiempos y medios de enfriamiento para la transformación estructural de un acero eutectoide.....	18
Figura 1.11 Efecto del calor en una soldadura, sobrepuesto sobre el diagrama de fases hierro carbono.....	20
Figura 1.12.División en subzonas de la región afectada por el calor durante una soldadura.	36
Figura 1.13. Curva CCT para el acero estructural S355.	37
Figura 2.1. Placa base para conformación de probetas soldadas.	28
Figura 2.2. Colocación de pletinas guía para mantener la distancia entre placas.	30
Figura 2.3. Junta soldada bajo el procedimiento “A”	31
Figura 2.4. Junta soldada bajo el procedimiento “B”	32
Figura 2.5. Proceso de soldadura en la empresa IPDEACERO	33
Figura 2.6. Desbaste del cordón en un proceso de reparación.	34
Figura 2.7. Cordón desbastado, con limpieza previa al resoldeo.	34
Figura 2.8. Placa preparada y limpia para el proceso de inspección visual.	44
Figura 2.9. Galga Bridge para la medición de discontinuidades en el cordón.....	44
Figura 2.10 a) Calibración de la distancia y ubicación de la placa. b) ubicación final de la película sensible para el ensayo	48
Figura 2.11. Criterios de aceptación, tamaño de discontinuidades radiografía.....	50
Figura 2.12. Recomendaciones de ubicación para la obtención de muestras por ensayo	51
Figura 2.13 Geometría y dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción de sección reducida.....	52
Figura 2.14 Falla del material.....	53

Figura 2.15 Dimensiones de las probetas para el ensayo de doblado.	54
Figura 2.16. Distancias para el ensayo de doblado guiado con matriz.	55
Figura 2.17 Disposición final de la probeta después del ensayo de doblado	56
Figura 2.18. Máquina Handimet grinder para desbaste fino.	58
Figura 2.19. Probetas post proceso de preparación y pulido.	58
Figura 3.1. Carga máxima registrada vs entrada de calor.	71
Figura 3.2. Resistencia a la tracción vs entrada de calor	71
Figura 3.3. Gráfica de Dureza Vs Distancia para la probeta P1-21-038.....	90
Figura 3.4. Gráfica de dureza vs distancia probeta P2-21-038.....	90
Figura 3.5. Gráfica de Dureza Vs Distancia para la probeta P3-21-038.....	91
Figura 3.6. Gráfica de dureza vs distancia de la probeta P4-21-038.....	92
Figura 3.7. Gráfica de dureza vs distancia probeta P5-21-038.....	92
Figura 3.8. Gráfica de dureza vs distancia de la probeta P6-21-038	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de los aceros estructurales más comercializados.	12
Tabla 1.2. Aplicaciones y elementos de aleación presentes en los principales aceros HSLA.....	13
Tabla 1.3. Propiedades básicas requeridas por un acero HSLA	15
Tabla 1.4. Composición química general de los aceros HSLA	15
Tabla 1.5. Factores incidentes en las propiedades del material con el incremento de temperatura durante el soldeo	34
Tabla 2.1. Alternativas para aceros estructurales y sus propiedades mecánicas.	24
Tabla 2.2. Criterios con mayor relevancia en la selección del material base.	25
Tabla 2.3. Ponderación de importancia para cada criterio.	25
Tabla 2.4. Evaluación de resistencia a la tracción.	26
Tabla 2.5. Evaluación del criterio resistencia a la fluencia.	26
Tabla 2.6. Evaluación del criterio disponibilidad en el mercado.	27
Tabla 2.7. Evaluación del criterio costo para las alternativas de aceros estructurales.	27
Tabla 2.8 Escala de prioridad del método de criterios ponderados.	27
Tabla 2.9. Composición química del acero ASTM A572.....	29
Tabla 2.10. Codificación de las probetas generales de soldadura..	31
Tabla 2.11. Especificaciones técnicas de los electrodos E-6010 Y E- 7018 utilizados en el procedimiento “A”	32
Tabla 2.12. Especificaciones técnicas de la máquina soldadora para el procedimiento “A” ..	44
Tabla 2.13 Especificaciones técnicas del electrodo E-71T-1C.....	45
Tabla 2.14 Especificaciones técnicas de la máquina soldadora para el procedimiento “B”.....	47
Tabla 2.15 Criterios de aceptación para inspección visual según el código de soldadura estructural AWS D1.1.....	48
Tabla 2.16 Especificaciones técnicas de la máquina de rayos X del laboratorio de END.	49
Tabla 2.17 Tiempos de exposición para cada probeta ensayada.....	51
Tabla 2.18 Tiempos de permanencia de películas radiográficas en el proceso de revelado.....	53
Tabla 2.19 Criterios de aceptación del ensayo de radiografía industrial según AWS D1.1.	53
Tabla 2.20. Especificaciones técnicas de la sierra circular utilizada para la obtención de probetas.....	54

Tabla 2.21. Características maquina universal de ensayos.....	55
Tabla 2.22. Criterios de aceptación para el ensayo de tracción de sección reducida, mostrados en el código AWS D1.1.....	55
Tabla 2.23. Código de identificación otorgado a las probetas del ensayo de doblado.....	56
Tabla 2.24. Distancias normalizadas para la matriz de doblado.....	57
Tabla 2.25. Especificaciones técnicas del equipo para el ensayo de doblado.....	57
Tabla 2.26. Criterios de aceptación para el ensayo de doblado lateral.....	59
Tabla 2.27. Especificaciones de las probetas para ensayo de micrografía.....	60
Tabla 2.28. Especificaciones técnicas de la máquina de desbaste grueso.....	60
Tabla 2.29. Especificaciones técnicas del microscopio.....	61
Tabla 2.30. Especificaciones del estereomicroscopio.....	61
Tabla 2.31. Criterios de aceptación ensayo de macrografía.....	61
Tabla 3.1. Inspección visual de las placas soldadas.....	62
Tabla 3.2. Resumen del ensayo de inspección visual.....	65
Tabla 3.3. Películas radiográficas de las probetas ensayadas.....	65
Tabla 3.4. Resultados del ensayo de tracción al material base.....	68
Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción de las probetas soldadas y reparadas.....	69
Tabla 3.6. Características del primer pase placa S-P1-0R.....	70
Tabla 3.7. Valores promedio por placa de carga máxima y resistencia a la tracción registrados en el ensayo de tracción.....	70
Tabla 3.8. Comparación de carga máxima registrada para las probetas del proceso "A".	72
Tabla 3.9. Comparación de carga máxima registrada para las probetas del proceso "B".	72
Tabla 3.10. Comparación de resistencia a la tracción para las probetas del proceso "A".	72
Tabla 3.11. Comparación de resistencia a la tracción para las probetas del proceso "B".	72
Tabla 3.12. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-S-P1-0R.....	73
Tabla 3.13. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-S-P2-1R.....	74
Tabla 3.14. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-S-P3-2R.....	75
Tabla 3.15. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-SF-P4-0R.....	76

Tabla 3.16. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-SF-P5-1R.....	77
Tabla 3.17. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-SF-P6-2R.....	78
Tabla 3.18. Resumen de las discontinuidades detectadas en el ensayo de doblado lateral.	79
Tabla 3.19. Análisis microestructural del material base, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x	80
Tabla 3.20. Análisis microestructural de la probeta P1-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x.....	81
Tabla 3.21. Análisis microestructural de la probeta P2-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x.....	82
Tabla 3.22. Análisis microestructural de la probeta P3-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x.....	83
Tabla 3.23. Análisis microestructural de la probeta P4-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x.....	84
Tabla 3.24. Análisis microestructural de la probeta P5-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x.....	85
Tabla 3.25. Análisis microestructural de la probeta P6-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x.....	86
Tabla 3.26. Valores del tamaño de grano medidos según ASTM E112.....	86
Tabla 3.27. Macrografías de las probetas con el área de la ZAC.....	86
Tabla 3.28. Área de la ZAC de cada probeta.....	88
Tabla 3.29. Mapeo de durezas para la probeta P1-21-038.....	88
Tabla 3.30. Mapeo de durezas para la probeta P2-21-038.....	89
Tabla 3.31. Mapeo de durezas para la probeta P3-21-038.....	90
Tabla 3.32. Mapeo de durezas de la probeta P4-21-038.....	90
Tabla 3.33. Mapeo de dureza probeta P5-21-038.....	91
Tabla 3.34. Mapeo de durezas de la probeta P6-21-038.....	92

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la afectación del proceso de reparación en uniones soldadas de un acero HSLA ASTM A572. Se considera las afectaciones térmicas causadas por la soldadura inicial, el proceso de desbaste y el proceso de soldadura de reparación, con la finalidad de establecer un número máximo de reparaciones en uniones soldadas garantizando la integridad estructural de la junta. Para esto se analizaron los cambios a nivel microestructural y en las propiedades mecánicas de las juntas con múltiples reparaciones.

Para comprobar la veracidad del material adquirido se practicó el ensayo de tracción y se comparó las propiedades mecánicas ensayadas con las proporcionadas por el fabricante del acero. A fin de tener un espectro más amplio de estudio, las juntas soldadas fueron conformadas empleando dos procedimientos de soldadura, uno simple SMAW y un procedimiento combinado SMAW-FCAW. Las soldaduras fueron verificadas bajo ensayos de inspección visual y radiografía industrial antes de conformar las probetas para los ensayos de tracción de sección reducida, y doblado lateral. Los resultados obtenidos de estos ensayos permitieron obtener los parámetros del WPS de soldeo y reparación calificados con los cuales se garantiza la fiabilidad de trabajo y calidad de las juntas regidas bajo el código AWS D1.1.

Los cambios microestructurales del cordón y la zona afectada térmicamente (ZAC) fueron analizados bajo los ensayos de micrografía y dureza, en cuanto a la variación de la ZAC, se practicó macrografías comparando su incremento entre número de reparaciones y procesos.

Palabras clave: Acero HSLA, ensayos de calificación, reparación de juntas, soldadura.

ABSTRACT

The present work has as objective to study the effect of the repair process in welded joints of an HSLA ASTM A572 steel, considering the thermal effects caused by the initial welding, the roughing process and the repair welding process, in order to establish a maximum number of repairs in welded joints, in order to guarantee the structural integrity of the joint. For this, the changes at the microstructural level and in the mechanical properties of the joints with multiple repairs were analyzed.

In order to verify the veracity of the acquired material, the tensile test was carried out to compare the mechanical properties tested with those provided by the steel manufacturer.

In order to have a broader spectrum of study, the welded joints were formed using two welding procedures, a simple SMAW and a combined SMAW-FCAW procedure.

The welds were verified under visual inspection tests and industrial radiography before forming the test specimens to be tested in traction of reduced section and lateral bending, the results of the aforementioned tests allowed to obtain the parameters of the qualified welding and repair WPS, with which the reliability of work and quality of the joints governed under the AWS D1.1 code is guaranteed.

The microstructural changes of the joint and the thermally affected area (HAZ) were analyzed under the micrograph and hardness tests, for the variation of the HAZ, macrographs were performed comparing its percent of increase between the number of repairs and processes.

Keywords: HSLA steel, qualification testing, joint repair, welding.

ESTUDIO DE LA AFECTACIÓN DEL PROCESO DE REPARACIÓN EN UNIONES SOLDADAS DE UN ACERO HSLA ASTM A572.

INTRODUCCIÓN

La soldadura de producción es uno de los principales métodos utilizados para la fabricación de estructuras, una gran parte de los edificios de infraestructura como puentes y estructuras costa afuera son construcciones de acero.

Actualmente el uso de aceros HSLA para el desarrollo de proyectos estructurales va en aumento, puesto que las excelentes prestaciones mecánicas que proporcionan este tipo de aceros disminuyen los costos de producción al acortar el peso de una estructura, reducir el consumo de materiales de aporte y disminuir la laboriosidad del proceso de soldadura [1].

Con el propósito de garantizar la fiabilidad de trabajo en el montaje de estructuras metálicas, los cordones de soldadura deben ser inspeccionados por ensayos no destructivos. Si durante estos ensayos, las juntas presentan discontinuidades no aceptadas bajo normas, dichas juntas deberán ser reparadas [2].

La fabricación y montaje de estructuras de acero rigen sus procedimientos en códigos y normas de referencia, buscando garantizar soldaduras de alta calidad. La normativa API 1104 [3] para soldadura de oleoductos, gasoductos y otras tuberías se limita a una única reparación, ocasionando en ciertos casos pérdidas económicas para las empresas constructoras, pues si los defectos persisten, las juntas deben ser descartadas. En la norma AWS D1.1 [4] para acero estructural no se especifica el número permisible de reparaciones, dejando a criterio del inspector de soldadura, la cantidad de reparaciones que pueden realizarse en una junta soldada.

El proceso de reparación de soldadura consiste en eliminar la sección soldada con presencia de defectos, mediante esmerilado, ranurado o corte, para posteriormente realizar la soldadura de reparación bajo un procedimiento calificado. En ciertas ocasiones, la presencia de defectos persiste y es necesario repetir varias veces la reparación, generando afectaciones en la zona soldada, lo cual tiene como consecuencia la acumulación de los efectos de: la soldadura inicial, el proceso de

desbaste y por último por el proceso de soldadura de reparación, causando continuas afectaciones térmicas al material.

El presente proyecto busca determinar el efecto de las reparaciones sucesivas en juntas, para así establecer un número máximo de reparaciones en uniones soldadas, a fin de garantizar que la afectación generada por el proceso de reparación no ocasiona un riesgo a la integridad estructural de la junta.

Objetivo general

Estudiar la afectación del proceso de reparación en uniones soldadas de un acero HSLA ASTM A572.

Objetivos específicos

Realizar una revisión del estado del arte con respecto a las principales propiedades mecánicas de una junta soldada.

Establecer el número de reparaciones máximas que puede aplicarse a una junta soldada sin que se afecte significativamente a las propiedades mecánicas de la junta y su integridad estructural.

Definir un procedimiento adecuado que garantice la fiabilidad de las uniones soldadas con varias reparaciones sucesivas.

MARCO TEÓRICO

1.1 Procesos de soldadura.

La soldadura se define como un proceso en el que se unen dos o más piezas o partes mediante la fusión localizada y/o presión. En este proceso generalmente están presentes el material base y un elemento o material de aporte, existen características relevantes para obtener excelentes resultados como composición química, tamaño de grano y el espesor de elemento [5].

Los procesos de soldadura requieren de altas temperaturas para poder unir los elementos involucrados, la fuente de calor de cada proceso depende de sus características, por ejemplo soldadura autógena (gas), soldadura de arco (corriente eléctrica) [6].

1.2 Tipos de procesos de soldadura.

La soldadura se realiza desde la antigüedad y al pasar del tiempo esta ha impulsado a la industria. Dentro de los principales tipos de procesos de soldadura se destacan los procesos por arco eléctrico, llamas, puntos, presión y fricción.

Soldadura por arco eléctrico.

El principio operativo de este proceso es la generación de un arco eléctrico entre un electrodo y un elemento base causado por la diferencia de potencial como lo muestra la figura 1.1, obteniendo así energía transferida en forma de calor. La soldadura manual con electrodo revestido es un claro ejemplo, donde el proceso genera una capa de escoria que protege al metal fundido. Esta escoria procede del revestimiento del electrodo y puede eliminarse una vez que se solidifique [7]. Dentro de los tipos de procesos de soldadura más comunes por arco eléctrico se destacan las soldaduras con gas protector, arco sumergido y electrodo revestido.

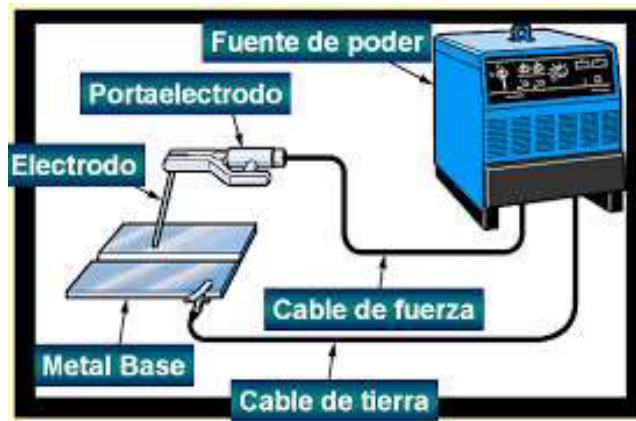


Figura 1.1. Soldadura por arco eléctrico.
(Fuente:[8])

Soldadura por arco eléctrico y electrodo revestido (SMAW).

El proceso SMAW se basa en un arco eléctrico que se genera entre el metal base y el electrodo, mismo que posee un determinado recubrimiento dependiendo de las características necesarias y específicas del procedimiento de soldadura como se muestra en la figura 1.2. Durante este proceso el recubrimiento del electrodo se combustiona generando la atmósfera contra influencia del aire, y además forma la escoria que evita el enfriamiento brusco del metal, sostiene al cordón y protege de la humedad y de otros contaminantes. [9].

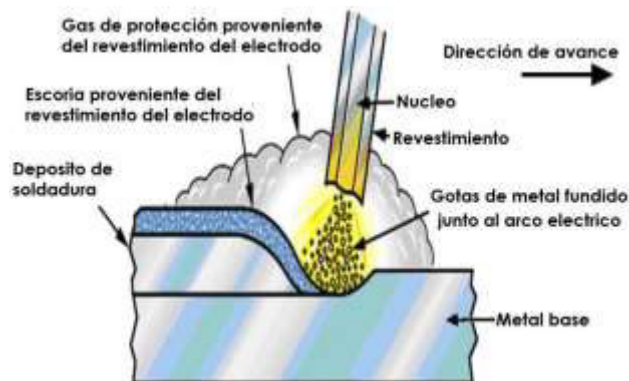


Figura 1.2. Soldadura con por arco eléctrico y electrodo revestido (SMAW).
(Fuente:[10])

Soldadura por arco eléctrico y electrodo de núcleo fundente (FCAW)

El proceso de soldadura FCAW se destaca por su alta eficiencia. Combina el buen desempeño de soldadura con alambre de alimentación continua y las ventajas derivadas del uso de fundente para proteger el cordón de la contaminación y agentes externos. En

este proceso el electrodo consiste en una varilla tubular cubierta de metal con un núcleo de materiales en polvo donde se localiza el fundente.

Uno de los principales aspectos destacables del proceso FCAW es la facilidad de propiciar un enfriamiento controlado del metal de aporte. Para generar una atmósfera protectora durante la soldadura este proceso utiliza gases de protección como el dióxido de carbono, el cual es el gas más utilizado por su bajo costo y su contribución a la buena penetración. [11]

1.3 Características de la soldadura por el proceso SMAW.

Equipo para el proceso de soldadura SMAW.

El equipo de soldadura es relativamente simple como se lo muestra en la figura 1.3, el cual consta de: generador de corriente o máquina soldadora, cables de soldadura, porta electrodo, masa o tierra, electrodo y el material base o pieza de trabajo.

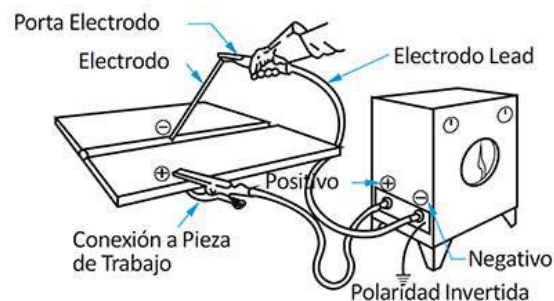


Figura 1.3. Equipo para el proceso de soldadura SMAW.

(Fuente:[12])

Generador de corriente.

El proceso de soldadura SMAW debe poseer una intensidad constante para que la corriente de soldeo no tenga variaciones en la longitud del arco. Para esto se utiliza un generador de corriente o fuente de energía como se muestra en la figura 1.4.

Con la ayuda del equipo se puede soldar con corriente alterna (AC) y con corriente continua (DC). Con corriente AC se necesitan transformadores y con corriente DC se utilizan rectificadores. Para un adecuado proceso de selección de tipo de corriente, se debe conocer el electrodo a utilizar para así establecer el rango de intensidades y el voltaje del arco [13].



Figura 1.4. Maquinas soldadoras o fuentes de energía.
(Fuente:[14])

Porta Electrodo.

Como su nombre lo indica su función es sujetar al electrodo con la finalidad de transmitir la corriente hacia el mismo como se muestra en la figura 1.5. Las pinzas deben estar siempre en perfecto estado para garantizar la eficiencia del proceso, evitando así sobrecalentamientos o un movimiento indeseado del electrodo. El tamaño de la pinza depende del electrodo que se vaya a ocupar en el proceso de soldeo [13].

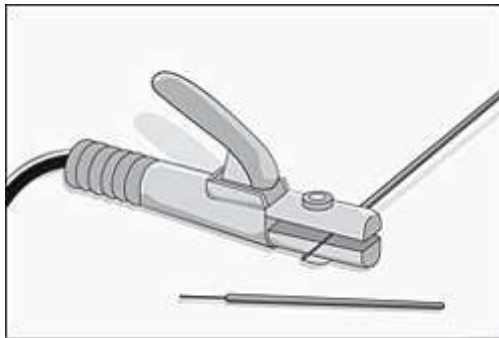


Figura 1.5. Porta Electrodo.
(Fuente:[15])

Conexión de masa.

La conexión a masa es uno de los parámetros más importantes ya que si se coloca incorrectamente el cable puede provocar el sopleo magnético cuando se trabaja con corriente DC. Otro de los inconvenientes es un cable mal sujeto ya que este no proporcionará un contacto eléctrico constante y la conexión se calentará, lo que ocasionaría una interrupción de arco eléctrico [13].

Electrodo revestido.

El electrodo es el elemento principal en este proceso de soldadura el cual se muestra en la figura 1.6. Este elemento se encarga de establecer el arco, proteger el baño de fusión y que cuando se consume produce el aporte del material creando la soldadura [13].

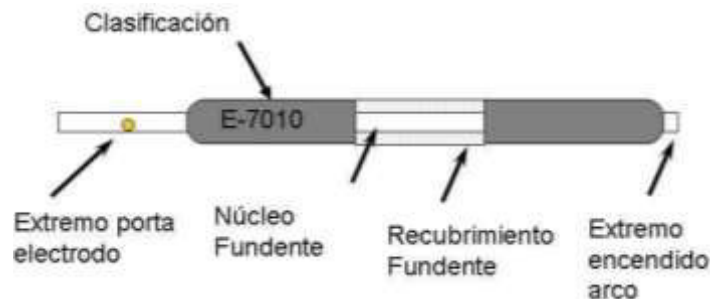


Figura 1.6. Partes de un electrodo.

(Fuente:[16])

Los electrodos tienen varias clasificaciones y cuentan con longitudes y diámetros normalizados, que dependerán de las necesidades y requerimientos del proceso.

1.4 Tipos de revestimientos.

Según el tipo de revestimiento los electrodos se clasifican en rutilicos, básicos, ácidos y celulósos.

Electrodos rutilicos.

Este electrodo está compuesto por un mineral llamado rutilo el cual contiene un 95% de bióxido de titanio, que a su vez es un compuesto muy estable lo que garantiza la estabilidad del arco, una buena fluidez de baño y un efecto estético apreciable. La finalidad del uso de este tipo de electrodo es garantizar la fusión dulce, facilidad de realización y abundante formación de escoria. Comúnmente se usa en espesores pequeños.

Electrodos básicos.

Este tipo de electrodos poseen óxidos de hierro, aleaciones ferrosas y carbonatos de calcio y magnesio que, combinados con fluoruro de calcio, se crea la fluorita. La fluorita es un mineral que facilita la fusión, pero produce ciertos factores como un arco eléctrico muy inestable, el baño es menos fluido, se producen constantes cortos circuitos y el

arco debe mantenerse a una corta distancia por la volatilidad del revestimiento. Todos estos factores inciden en el soldador ya que se necesita buena experiencia para manejarlos. Otra de las características de este tipo de electrodos es que la escoria es dura y difícil de remover.

Electrodos ácidos.

Los electrodos ácidos están compuestos por óxidos de hierro, aleaciones ferrosas de manganeso y silicio. Además, su estabilidad de arco los hace ideales tanto para corriente alterna como continua, utilizando altas velocidades de fusión y alta penetración. La limitación de estos electrodos es que se deben utilizar con metales base con buena soldabilidad, contenidos muy bajos de azufre, fósforo y carbono, de otra manera se puede presentar fisuras en caliente.

Electrodos celulósos.

El revestimiento de estos electrodos está formado por celulosa con aleaciones de magnesio y silicio. Cuando se usa este tipo de electrodo en el proceso de soldeo se generan gran cantidad de gases por el calor. La escoria presente por el electrodo es escasa y se puede limpiar con facilidad, la característica principal de este electro es la gran penetración que se consigue, pero la superficie de la soldadura es muy irregular.

1.5 Nomenclatura de los electrodos.

Los electrodos poseen diferentes tipos de características y propiedades las cuales vienen dictadas en su nomenclatura según la American Welding Society (AWS) como lo muestra la figura 1.7.



Figura 1.7. Clasificación de electrodos según la AWS A5.1.

(Fuente:[17])

1.6 Características del proceso FCAW.

Ventajas del proceso FCAW.

El proceso de soldadura FCAW con protección auxiliar de gas puede ser utilizado cuando se presentan corrientes de aire en las soldaduras de campo. Además, debido a la formación de escoria, se obtiene un cordón con mejores prestaciones buen acabado superficial y menor cantidad de salpicaduras.

El proceso FCAW tiene la capacidad de penetración profunda y un alto rango de deposición de material de aporte, estas características se deben a los altos niveles de corriente que se usan en el proceso. Una ventaja adicional de la soldadura FCAW es la versatilidad de soldeo en todas las posiciones, a diferencia del SAW, que es un proceso limitado ya que necesita un equipo de almacenamiento y recuperación del fundente [18].

Limitaciones del proceso FCAW.

En el proceso de soldadura FCAW autoprotegido, se producen altos niveles de humo, lo que puede obstaculizar la visión del operario y a su vez ser un riesgo para la salud. Además, el cordón de soldadura es cubierto con escoria sólida. La consistencia de la escoria depende de la composición del electrodo, por lo que, algunas cubiertas se desprenden fácilmente y otras se adhieren firmemente, las cuales son removidas con martillo.

1.7 Proceso de reparación de soldaduras.

La reparación de elementos estructurales con la ayuda del proceso de soldadura es uno de los métodos más utilizados en la industria, este método al igual que los demás, debe garantizar su perfecto desempeño. Es así que, si la reparación es inadecuada o simplemente mal realizada, la probabilidad de falla de la estructura aumenta, generando un alto riesgo sobre las vidas humanas.

Este tipo de reparaciones necesitan un proceso ordenado y que esté bajo de normativas aplicables [19].

Procedimiento de soldadura para el proceso de reparación.

Siempre se debe tener en cuenta que es necesario realizar la soldadura con un procedimiento calificado dependiendo de la aplicación. En general, las estructuras son construidas con aceros estructurales de bajo carbono por su buena soldabilidad. Sin

embargo, se pueden encontrar estructuras que utilicen aceros fabricados en el límite superior con medio carbono, por lo que el proceso de soldadura debe tener precauciones para evitar la fragilización de la estructura [19].

Algunas de las recomendaciones para el proceso de reparación son: usar juntas U ya que este tipo de junta facilita el acceso al electrodo y los ángulos que se utilizan aseguran una buena penetración. Además, para evitar el agrietamiento por hidrógeno es necesario utilizar electrodos de bajo hidrógeno, es recomendable usar en los primeros pases electrodos de 3/32" y a continuación aumentar el diámetro del electrodo con múltiples pases con el objetivo de disminuir el aporte de calor entre pases [19].

1.8 Código estructural AWS D1.1.

El código de soldadura AWS D1.1 abarca todas las características y requisitos para el proceso de soldeo para cualquier tipo de estructura soldada hecha con aceros de construcción al carbono y de baja aleación.

Parámetros de aceptación.

El código de soldadura estructural AWS D1.1. contiene los parámetros de aceptación para el proceso de soldadura, la calificación de procedimientos y los aspectos concernientes a soldadura estructural. En el apartado 4.5 de AWS D1.1. se detalla los tipos de ensayos para calificación del procedimiento, los parámetros para inspección y los ensayos destructivos y no destructivos a aplicar, denotando las dimensiones y características permisibles para cada indicación encontrada [4].

1.9 Calor de entrada.

Durante el proceso de soldadura se genera una entrada de calor que varía las propiedades mecánicas y químicas de las uniones soldadas. Esto depende de ciertos parámetros como el voltaje, amperaje, eficiencia térmica (depende del proceso) y velocidad de avance.

Una entrada de calor alta en una unión soldada representa una tasa de enfriamiento lenta, lo que ocasiona tamaños de grano más gruesos y a su vez una entrada de calor baja representa una tasa de enfriamiento rápida, resultado en tamaños de granos más finos [20].

1.10 Aceros Estructurales.

El acero estructural es una solución sólida intersticial de hierro carbono y elementos de aleación, a fin de conseguir un material con características y propiedades mecánicas óptimas para garantizar la fiabilidad estructural de un conjunto.

Generalmente presentan una microestructura ferrítica perlítica, y se especifican en base a los estándares nacionales o industriales apropiados, como ASTM, API, BSI, ISO, con el objetivo de cumplir los requisitos mínimos de composición química y propiedades mecánicas.

Debido a que las propiedades mecánicas de los aceros pueden modificarse utilizando distintos tipos de elementos de aleación, se dispone de una basta variedad de tipos de acero estructural.

Los aceros estructurales pueden diversificarse y catalogarse de la siguiente manera.

Aceros al carbono.

Los aceros al carbono presentan un contenido de aleación limitado a los siguientes porcentajes como valores máximos a 1.7% de carbono, 1.65% de manganeso, 0.60% de silicio y 0.60% de cobre. Dentro de esta categoría, los más utilizados comercialmente son los tipos A36, A53, A500, A501 y A529 [21].

Aceros de baja aleación y de alta resistencia.

Se incluyen aceros con esfuerzos de fluencia comprendidos entre 40 y 70 [KSI], con una resistencia a la corrosión mayor que la ofrecida por los aceros al carbono. Cabe recalcar que el término baja aleación se utiliza en aceros en los que el contenido total de elementos de aleación es menor al 5% de la composición total del acero [21].

La ASTM se encarga de la clasificación de este tipo de aceros, los cuales incluyen elementos de aleación característicos como vanadio, cromo, silicio, cobre y níquel. Los aceros con mayor uso comercial dentro de esta categoría son A572, A618, A913 y A992.

Aceros de baja aleación y alta resistencia con prestaciones anticorrosivas.

Estos aceros presentan una aleación donde se destaca un mínimo porcentaje de cobre, el cual otorga una película relativamente inerte que protege al material, se utiliza en aplicaciones de estructurales con miembros expuestos y difíciles de recubrir como

puentes y torres de transmisión eléctrica. Los aceros comercialmente más utilizados en esta clasificación son: A242, A588 y A847.

En la tabla 1.1 se muestra ejemplos de los principales aceros estructurales con sus respectivos esfuerzos de fluencia y tensión según la clasificación antes mencionada.

Tabla 1.1. Clasificación de los aceros estructurales más comercializados.

Tipo de acero	Designación de la ASTM	Esfuerzo mínimo de fluencia F_y (klb/” ²)	Esfuerzo de tensión F_u (klb/plg ²)	
Al carbono	A36	36	58-80	
	A53 Gr. B	35	60	
	A500	Gr. B	42	58
			46	58
		Gr. C	46	62
			50	62
	A501	Gr. A	36	58
		Gr. B	50	70
	A529	Gr. 50	50	65-100
		Gr. 55	55	70-100
Alta resistencia y baja aleación (HSSLA)	A572	Gr.42	42	60
		Gr.50	50	65
		Gr.55	55	55
		Gr.60	60	60
		Gr.65	65	65
	A618	Gr I & II	50	70
			50	50
		Gr III	50	50
	A913	Gr.50	50	60
		Gr.60	60	75
		Gr.65	65	75
		Gr.70	70	90
	A992		50	65
A242		42	63	

Alta resistencia y baja aleación resistente a la corrosión		46	67
		50	70
	<i>A588</i>	50	70
	<i>A847</i>	50	70

(Fuente:[21])

1.11 Aplicaciones de aceros estructurales.

El acero estructural es por excelencia el metal más idóneo para aplicaciones ligadas con el ámbito ingenieril y arquitectónico, destacando en campos como la construcción, donde está enfocado al diseño y fabricación de naves industriales, edificaciones, puentes etc. En el ámbito de la minería, se tiene que la mayor parte de los componentes de la subestructura minera se encuentran reforzados con acero estructural, así como equipos industriales y brazos de grúa.

En cuanto a la industria del transporte, el acero estructural se destaca debido a sus óptimas propiedades de resistencia a la tracción y tenacidad. Con aceros de grado estructural se pueden obtener carrocerías de vehículos, fuselajes de trenes, barcos, transmisiones, rieles, trenes de aterrizaje de aviones y componentes de motores a reacción entre otros.

Para el campo de la energía, la aplicación de los aceros estructurales en esta industria es muy amplia, aquí se incluye desde líneas de transmisión de petróleo y gas a alta presión, diversas partes de turbinas eólica, hasta torres de transmisión de energía.

En la tabla 1.2 se muestra la especificación ASTM, los elementos de aleación y los principales usos de algunos de los aceros estructurales con mayor demanda ingenieril.

Tabla 1.2. Aplicaciones y elementos de aleación presentes en los principales aceros HSLA.

Aplicaciones del acero HSLA en base a la especificación ASTM		
Especificación ASTM	Elementos de aleación	Características principales y aplicaciones
A242	Cr, Cu, N, Si, Ti, V, Zr	Miembros estructurales y remachados.

A572	Nb, V, N	Estructuras, puentes y edificios remachados.
A588	Nb, V, Cr, Ni, Mo, Cu, Si, Ti, Zr	Estructuras soldadas y remachadas, puentes y construcciones soldadas.
A606	No especificado	Estructurales con propósito de ahorro en peso y mayor durabilidad.
A607	Nb, V, N, Cu	Estructurales con propósito de ahorro en peso y mayor resistencia.
A618	Nb, V, Si, Cu	Estructuras en general, sea soldado o atornillado, puentes y edificios.
A633	Nb, V, Cr, Ni, Mo, Cu, N, Si	Resistencia a temperaturas mayores de -45 [°C] sean soldadas o remachadas.
A656	V, Al, N, Ti, Si	Marcos de camiones, vagones de ferrocarril, y otras aplicaciones donde es necesario el ahorro de peso.
A690	Ni, Cu, Si	Muros de muelles, excavadoras y estructuras que estén en contacto con agua de mar.
A709	V, Nb, N, Cr, Ni, Mo	Puentes.
A714	V, Ni, Cr, Cu, Mo, Nb	Tuberías.
A715	Nb, V, Cr, Mo, N, Si, Ti, Zr, B	Estructurales y otros donde se requiere alta resistencia y ahorro de peso, así como buena soldabilidad.
A808	V, Nb	Sistemas de ferrocarril.
A812	V, Nb	Buques.
A841	V, Nb, Cr, Mo, Ni	Recipientes a presión soldados.
A847	Cu, Cr, Ni, Mo, V, Ti, Nb	Tubería estructural soldable, remachados o atornillados de puentes o edificios.
A860	Nb, Cu, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ti	Tubería de gas o aceite de alta presión.
A871	Cu, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ti	Estructuras tubulares y postes.

(Fuente: [21])

1.12 Aceros de alta resistencia y baja aleación HSLA.

Los aceros micro aleados mantienen características superiores a los aceros al carbono, teniendo como cualidad una buena combinación de soldabilidad, propiedades mecánicas e incluso condiciones superiores en características como resistencia a la corrosión.

Con la finalidad de mantener la soldabilidad en estos aceros, el contenido de carbono se restringe en valores de entre 0.05 y 0.25%, además presenta elementos de aleación que incluyen: Mn, Cu, Ni, Nb, N, V, Cr, Mo, Ti, Ca y Zr.

En cuanto a las propiedades mecánicas, los aceros micro aleados presentan valores de fluencia mayores a 45 [ksi] y rangos de resistencia última superiores a 60 [ksi] con alargamientos totales hasta de 27% [22].

Las tablas 1.3 y 1.4 muestran las propiedades y composición química básicas para un acero HSLA.

Tabla 1.3. Propiedades básicas requeridas por un acero HSLA

Propiedades del acero HSLA sin aplicación de tratamiento térmico					
Acero	Mínimo límite elástico		Resistencia a la tracción mínima		Esfuerzo mínimo de ductilidad
	[Mpa]	[ksi]	[Mpa]	[ksi]	Alargamiento en 50 [mm] o 2 [in]
HSLA	275-450	40-65	415-550	60-80	18-24

(Fuente:[23])

Tabla 1.4. Composición química general de los aceros HSLA

Composición química general de los aceros HSLA				
Acero	%C	%Mn	%Si	Otros.
HSLA	0.05-0.26	1.30 máx	0.15-0.40	0.20 Nb y 0.05V

(Fuente: [22])

1.13 Clasificación de los aceros HSLA.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación pueden ser clasificados de distintas formas. Una de las maneras más acertadas es la que se menciona a continuación [11].

Aceros reducidos en perlita.

Estos aceros carecen o presentan una mínima cantidad de perlita en su microestructura. Como característica adicional, los aceros endurecidos en perlita son reforzados con endurecimiento por precipitación.

Aceros resistentes a la intemperie o aceros corten.

Este tipo de acero de alta resistencia se concibe para brindar elevadas prestaciones en condiciones de intemperie, mejorando su capacidad de resistencia a la corrosión causada por adversos factores ambientales.

Aceros Laminados.

Esta clase de aceros presenta un proceso de laminación en caliente controlado, teniendo como inicio una elevada deformación de la estructura austenítica inicial para así, mediante un enfriamiento controlado, obtener una estructura de ferrita equiaxial muy fina.

Aceros micro aleados.

Presentan elementos de aleación como niobio, vanadio y titanio, en muy baja proporción, añadidos para efectuar papeles de refinamiento de grano o generar endurecimiento del acero por precipitación de estos elementos de aleación.

Aceros de ferrita acicular.

Estos aceros tienen muy bajo o limitado su contenido de carbono. Mediante la realización de tratamientos térmicos, se logra alcanzar una estructura de ferrita acicular fina y con altas características de resistencia.

1.14 Microestructura típica del acero HSLA.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación muestran a manera general una estructura del tipo ferrítica perlítica, esto puede variar según sea el tratamiento térmico aplicado, con un tamaño de grano de ferrita pequeño y fino además de una tendencia de perlita. Las bandas de perlita pueden tomar una forma alargada como resultado del procesamiento del material al momento de la laminación, en la figura 1.8 se muestra la microestructura de un acero ASTM A572 [24].

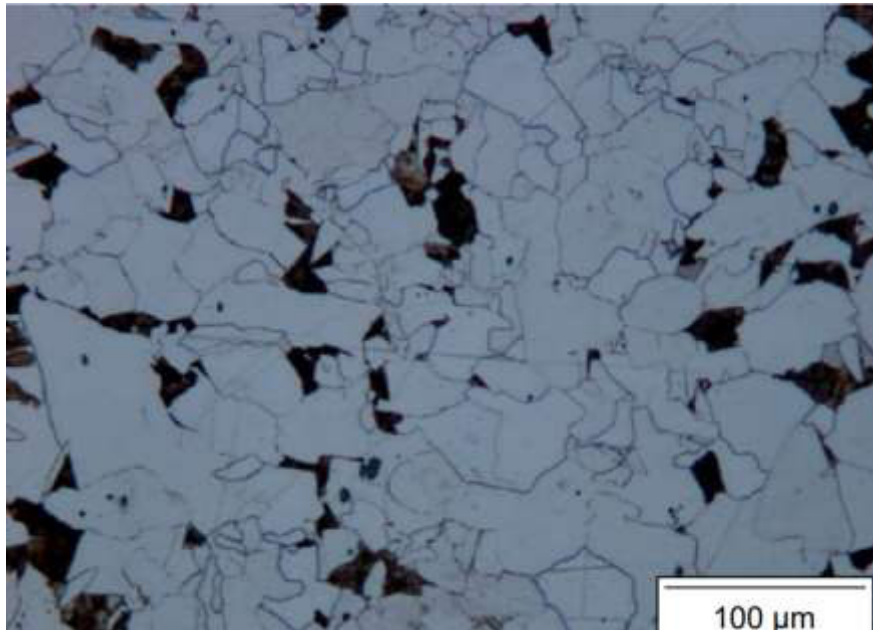


Figura 1.8. Micrografía de un acero ASTM A572, donde se observan una estructura ferrítica con colonias de perlita fina (Fuente:[24])

1.15 Procesos termo mecánicos en la fabricación de aceros de alta resistencia.

Con el objetivo de incrementar la resistencia a la rotura en el material, se realizan diferentes tratamientos y procesos termo mecánicos, que evitan añadir en mayor medida el porcentaje de elementos aleantes, debido a que en ciertos casos la soldabilidad del material se ve afectada con su adicción.

Los mecanismos para conseguir las propiedades mecánicas deseadas y aumentar la tenacidad a la fractura toman como fundamento el refinamiento de grano, a continuación, se detallarán los procesos industriales más comunes para conseguir dicho refinamiento.

Normalizado.

El tratamiento térmico de normalizado consiste en calentar las planchas de acero hasta una temperatura de 30 [°C] más que la temperatura subcrítica A_3 , es decir 900 [°C] aproximadamente, para posterior a esto realizar un enfriamiento a la temperatura ambiente. Se obtiene un tamaño de grano más fino.

En la figura 1.9 se muestran los rangos del tratamiento de normalizado en aceros.

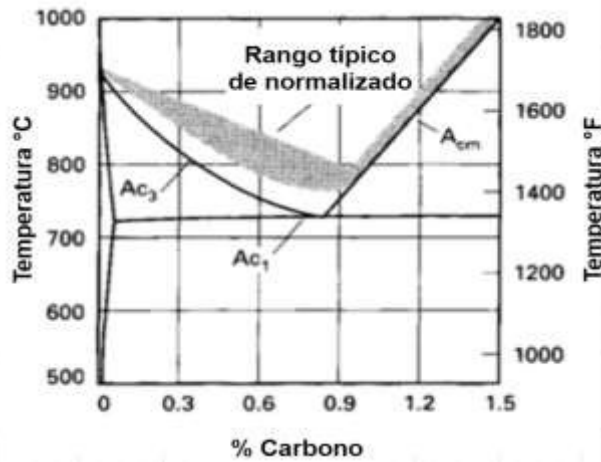


Figura 1.9. Diagrama de fase hierro-carbono, que ilustra el rango de normalización típico para aceros.
(Fuente:[24])

Temple.

El proceso de temple de acero es ampliamente conocido a nivel industrial y consiste en un calentamiento controlado del material hasta una temperatura superior a la del punto crítico A_3 , para después efectuar un enfriamiento rápido, ya sea utilizando medios de enfriamiento como agua, aceite o polímeros.

Con este tratamiento el material adopta una estructura del tipo martensítica, la cual otorga la dureza requerida por el acero. La figura 1.10 muestra el cambio en la microestructura del acero en función de la velocidad y medios de enfriamiento.

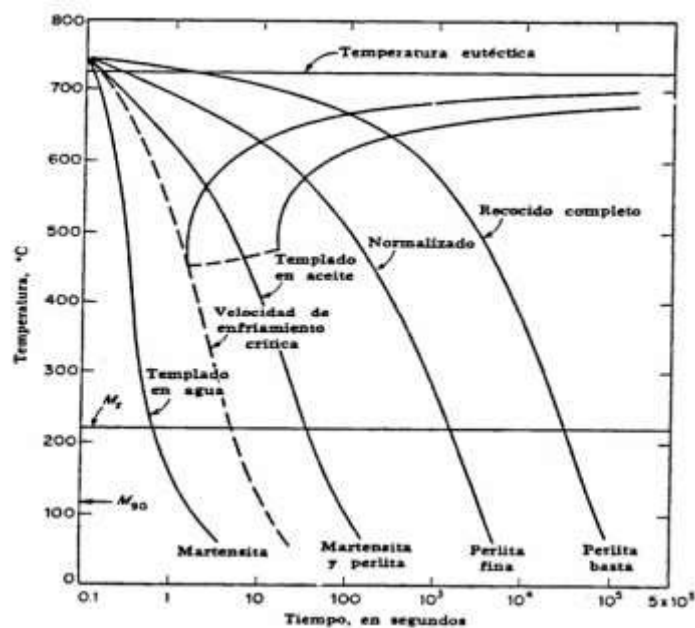


Figura 1.10 Efecto de los tiempos y medios de enfriamiento para la transformación estructural de un acero eutectoide.
(Fuente: [25])

1.16 Consecuencias físicas del proceso de soldadura sobre el material.

El proceso de soldadura conlleva a la aplicación de una fuente de calor o energía de entrada para cumplir con la fusión y posterior unión entre materiales. Dicha energía suministrada aumenta bruscamente la temperatura del material, generando cambios en la estructura además de tensiones residuales y distorsiones al material.

Existen 4 factores principales que afectan las propiedades del material y sobre los cuales incide negativamente el incremento de temperatura durante el proceso de soldadura, la tabla 1.5 muestra detalla dichos factores. [11]

Tabla 1.5. Factores incidentes en las propiedades del material con el incremento de temperatura durante el soldeo

Factores modificadores de las propiedades del material	
Factor 1	La distribución de la temperatura máxima, también denominada "temperatura máxima".
Factor 2	Distribución de calor entre el metal de soldadura y la zona afectada por el calor.
Factor 3	Tasa de enfriamiento en el metal de soldadura y la zona afectada por el calor.
Factor 4	La tasa de solidificación del metal de soldadura.

(Fuente: [27])

La figura 1.11 se ilustra el efecto del calor generado por el proceso de soldadura en el material, el cual muestra el efecto del calor y el enfriamiento en las regiones del cordón de soldadura.

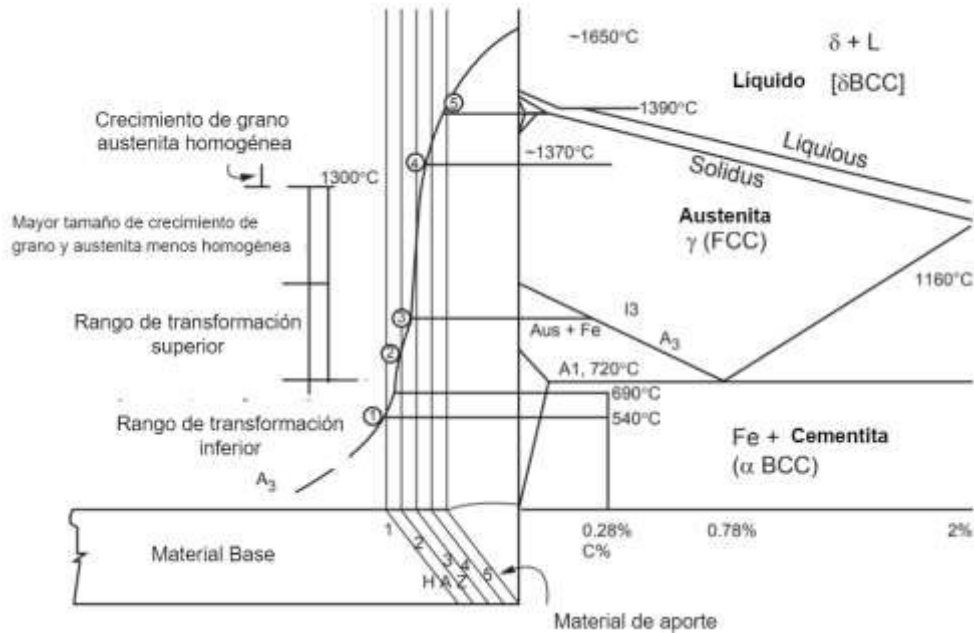


Figura 1.11 Efecto del calor en una soldadura, sobrepuesto sobre el diagrama de fases hierro carbono.
(Fuente:[11])

1.17 Evolución microestructural del material durante el proceso de soldadura.

La microestructura en un proceso de soldadura sufre transformaciones durante la etapa de fusión y durante la etapa de enfriamiento del material.

Etapa de fusión del material base.

Cuando el material sobrepasa los 510 [°C], los granos distorsionados debido a un trabajado en frío previo empiezan a recrystalizar y la zona donde es aplicada la fuente de calor se encuentra en una fase mixta, con presencia de cristales y líquido. En el rango de temperaturas entre 510 [°C] y 725[°C] se tiene en una mezcla de fases de hierro alfa (ferrita) y cristales de hierro gamma (austenita). Al sobrepasar los 850 [°C], los cristales de austenita presentan un crecimiento y se agrupan para formar cristales de mayor tamaño. Cuando el material alcanza los 1490 [°C] se inicia la fusión del metal, el final de esta etapa se da cuando es fundido hasta el último de los cristales en una temperatura de aproximadamente 1520 [°C] [11].

Etapa de enfriamiento.

Durante el enfriamiento se da inicio la aparición de cristales de austenita, del tipo columnar para después ir incrementando el número de cristales multiaxiales. Con una velocidad de enfriamiento demasiado rápida, no se logra una difusión completa de los

átomos de carbono, generando que la austenita se transforme en martensita con una estructura del tipo tetragonal de cuerpo centrado.

1.18 Zona afectada por el calor.

En la mayoría de los procesos de soldadura se requiere la adición de calor para completar la fusión del material base y de ser el caso también del elemento de aporte. Este calor añadido genera un aumento drástico de la temperatura del material que luego del proceso de soldeo es retirado para dar paso a una etapa de enfriamiento, el cual puede compararse a los efectos generados al proceso de temple.

La zona más próxima al cordón experimenta transformaciones microestructurales que le otorgan cualidades mecánicas distintas a las del resto de la junta, esta zona es conocida como “zona afectada por el calor o ZAC”, la cual influye en buena parte al comportamiento de una soldadura.

La ZAC puede dividirse en función de la microestructura generada, esquematizándola en varias subzonas como se muestra en la figura 1.12. La región más próxima al cordón toma el nombre de “ZAC CG” o región de crecimiento de grano que tiene por cualidad una estructura similar a la causada por un proceso de austenización. Es decir, al incrementar el tamaño de grano del material trae como consecuencia una caída en la tenacidad, dejando esta zona propensa a la propagación de fisuras y al agrietamiento [26].

Adyacente a esta zona se encuentra la región de grano fino o zona “ZAC GF”, que marca una tendencia de buenas prestaciones mecánicas. La región de la ZAC más alejada del cordón se denomina “ZAC SC”, con propiedades similares a las obtenidas al realizar un proceso de recocido subcrítico, el cual tiende a ablandar la estructura del acero.

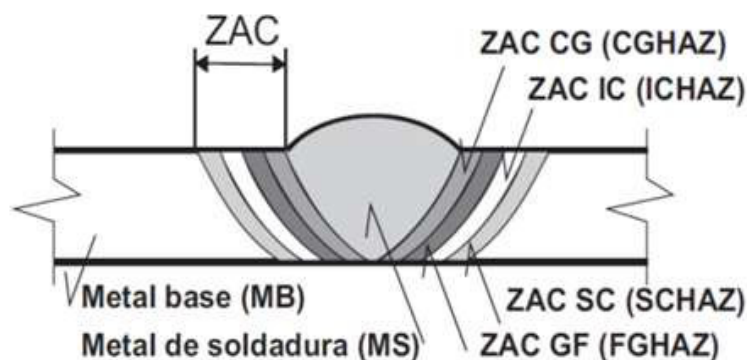


Figura 1.12. División en subzonas de la región afectada por el calor durante una soldadura.
(Fuente:[26])

1.19 Diagrama de enfriamiento continuo.

Las curvas de enfriamiento continuo o diagramas CCT permiten predecir la microestructura que puede alcanzarse en un material que se enfría a una temperatura superior o igual a la temperatura de austenización AC_3 . La formación de microestructuras depende de la velocidad de enfriamiento que se aplique al material y la composición química que presente. La figura 1.13. muestra la curva CCT para el acero estructural S355 bajo normativa europea, el cual es el equivalente del acero ASTM 572 grado 50.

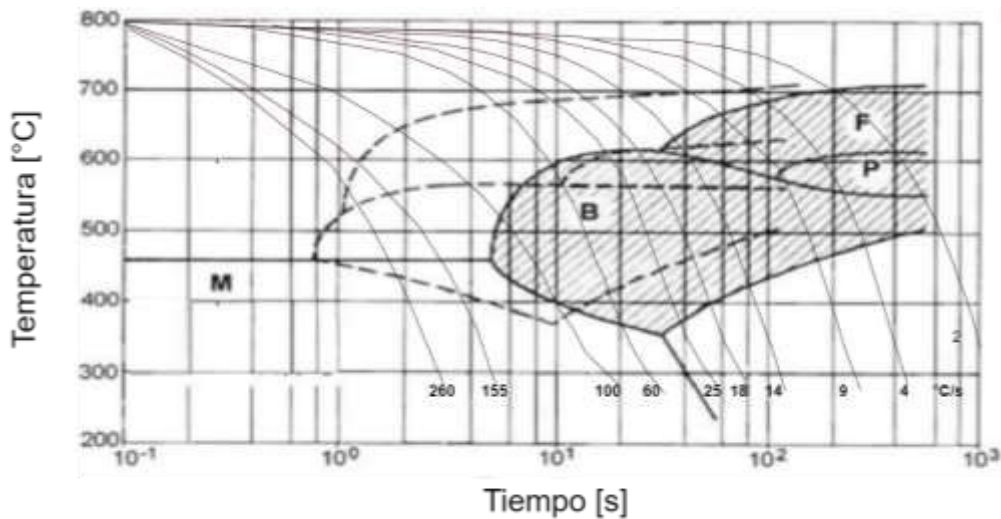


Figura 1.13. Curva CCT para el acero estructural S355.

Fuente: [27]

Las microestructuras más comunes alcanzadas en aceros estructurales sometidas a tratamientos térmicos se describen a continuación.

Ferrita.

La ferrita se cataloga como un precipitado de austenita obtenida bajo ciertos criterios de enfriamiento, presenta una solubilidad del carbono muy reducida menor al 0.02%.

Ferrita Widmanstatten.

La estructura Widmanstatten tiene como característica geométrica una forma más alargada y delgada que los granos de ferrita, resultante de la formación de una nueva fase en la dirección de ciertos planos cristalográficos.

Ferrita acicular o de grano fino.

Esta microestructura es un tipo de ferrita no equiaxial de configuración irregular, no uniforme con varios tamaños de grano orientados de forma aleatoria y sin límite de grano austenítico previo.

Cementita.

La cementita o carburo de hierro es un compuesto inter metálico, con características de elevada dureza y alta fragilidad. La cementita comienza a nuclearse en los límites de grano de la austenita previa.

Perlita.

La perlita está constituida por el crecimiento cooperativo de las faces ferrita y cementita en colonias, separadas entre sí por un espacio interlaminar, la longitud de este espacio define si la perlita se cataloga como gruesa o fina.

Bainita.

Es un compuesto metaestable conformado por cementita y ferrita, cuya formación parte de la austenita con una curva de enfriamiento intermedia entre la perlita y la martensita. La estructura bainítica adquiere la forma de plumas cuando la transformación se inicia desde altas temperaturas y toma la forma acicular cuando se produce en bajas temperaturas de transformación.

Martensita.

La estructura martensítica se consigue a partir del enfriamiento de la austenita, bajo medios de enfriamiento muy rápidos. Se puede formar en aleaciones en las que los átomos de soluto ocupan sitios intersticiales, que produce una elevada dureza y características muy frágiles.

METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detalla los aspectos sobre los cuales se desarrolló la parte experimental del proyecto, además de los equipos, procesos y métodos utilizados para la selección del material base y la obtención de probetas en los distintos ensayos realizados.

2.1 Método de criterios ponderados para la selección del material base.

Se utilizó el método de criterios ponderados para definir y escoger el material que más convenga a este análisis, enfocado en aptitud de servicio y disponibilidad de uso en el mercado ecuatoriano. A continuación, se presenta el desarrollo de este método.

Evaluación y selección del acero estructural.

Para seleccionar el material se utilizó el método de criterios ponderados. Este método permite realizar un análisis cuantitativo, comparando entre si las diferentes alternativas.

En la Tabla 2.1. se presentan las opciones más favorables en aceros estructurales para la realización del proyecto.

Tabla 2.1. Alternativas para aceros estructurales y sus propiedades mecánicas.

Tipo de Acero	Resistencia a la Fluencia		Resistencia a la tracción		Elongación mínima
	[ksi]	[Mpa]	[ksi]	[Mpa]	En [50mm]
1.- ASTM A-36	36	250	65	450	30
2.- ASTM A-500, Grado A	40	270	45	310	25
3.- ASTM A 572, Grado 50	50	345	65	450	21
4.- ASTM A715, Grado 50	50	345	60	415	22
5.- ASTM A792, Grado 40	40	270	55	380	16

(Fuente: Propia)

Los criterios con mayor relevancia en la selección del material base son mencionados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Criterios con mayor relevancia en la selección del material base.

Criterios	Descripción
Resistencia a la tracción	Esta propiedad determina la máxima fuerza a soportar antes de producir la rotura del material.
Resistencia a la fluencia	Es el máximo valor de carga en el que se da inicio a la fluencia o deformación plástica del material.
Disponibilidad en el mercado	Es imprescindible que el material tenga un fácil acceso y sea comercializado dentro del mercado ecuatoriano, sin necesidad de importaciones especiales.
Costo	En ingeniería es de vital importancia considerar el costo total de una estructura, siendo dependiente principal los materiales que conforman dicha estructura.

(Fuente: Propia)

Evaluación del peso específico para cada criterio en las alternativas de aceros estructurales.

La tabla 2.3. determina la ponderación o peso específico entre las alternativas, permitiendo establecer un orden de importancia para los criterios seleccionados.

Tabla 2.3. Ponderación de importancia para cada criterio.

Criterio	Resistencia a la tracción	Resistencia a la fluencia	Disponibilidad en el mercado ecuatoriano	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Resistencia a la tracción		0.5	1	1	4.5	0.38
Resistencia a la fluencia	0.5		1	1	4.5	0.38
Disponibilidad en el mercado ecuatoriano	0	0		1	2	0.17
Costo	0	0	0		1	0.08
				Suma	12	

(Fuente: Propia)

La tabla 2.3 indica que la resistencia a la tracción y la resistencia a la fluencia son los parámetros más relevantes en la selección del material base. Se detalla en orden de importancia los criterios de evaluación, referenciados a su escala de ponderación.

Resistencia a la tracción = Resistencia a la fluencia > Disponibilidad en el mercado > Costo

Evaluación de peso específico del criterio resistencia a la tracción.

En la tabla 2.4 se muestra la evaluación del criterio resistencia a la tracción.

Tabla 2.4. Evaluación de resistencia a la tracción.

Resistencia a la tracción	ASTM A36	ASTM A500	ASTM A572	ASTM A715	ASTM A792	$\Sigma+1$	Ponderación
ASTM A 36		1	0	0.5	1	3.5	0.27
ASTM A 500, Gr 50	0		0	0	0	1	0.08
ASTM A 572, Gr 50	1	1		1	1	5	0.38
ASTM A 715, Gr 50	0.5	1	0		1	2.5	0.19
ASTM A 792, Gr 40	0	1	0	0		2	0.15
					Suma	14	

(Fuente: Propia)

Evaluación del peso específico del criterio resistencia a la fluencia.

En la tabla 2.5 se muestra la evaluación del criterio resistencia a la fluencia.

Tabla 2.5. Evaluación del criterio resistencia a la fluencia.

Resistencia a la fluencia	ASTM A36	ASTM A500	ASTM A572	ASTM A715	ASTM A792	$\Sigma+1$	Ponderación
ASTM A 36		0	0	0	0	1	0.08
ASTM A 500, Gr 50	1		0	0	0.5	2.5	0.19
ASTM A 572, Gr 50	1	1		0.5	1	4.5	0.35
ASTM A 715, Gr 50	1	1	0.5		1	4.5	0.35
ASTM A 792, Gr 40	1	0.5	0	0		2.5	0.19
					suma	15	

(Fuente: Propia)

Evaluación del peso específico del criterio disponibilidad en el mercado

En la tabla 2.6. se muestra la evaluación del criterio disponibilidad en el mercado.

Tabla 2.6. Evaluación del criterio disponibilidad en el mercado.

Disponibilidad en el mercado	ASTM A36	ASTM A500	ASTM A572	ASTM A715	ASTM A792	$\Sigma+1$	Ponderación
ASTM A 36		1	0.5	0.5	1	4	0.31
ASTM A 500, Gr 50	0		0	0	0.5	1.5	0.12
ASTM A 572, Gr 50	0.5	1		0.5	1	4	0.31
ASTM A 715, Gr 50	0.5	1	0.5		1	4	0.31
ASTM A 792, Gr 40	0	0.5	0	0		1.5	0.12
					suma	15	

(Fuente: Propia)

Evaluación del peso específico del criterio costo.

En la tabla 2.7. se muestra la evaluación del criterio costo.

Tabla 2.7. Evaluación del criterio costo para las alternativas de aceros estructurales.

Costo	ASTM A36	ASTM A500	ASTM A572	ASTM A715	ASTM A792	$\Sigma+1$	Ponderación
ASTM A 36		1	0.5	1	1	4.5	0.4
ASTM A500 Gr 50	0		0	0	0	1	0.09
ASTM A572 Gr 50	0.5	1		1	1	4.5	0.4
ASTM A715 Gr 50	0	0	0		0	1	0.09
ASTM A792 Gr 40	0	0	0	0		1	0.09
					Suma	11	

(Fuente: Propia)

2.2 Cálculo de la tabla de prioridades.

Una vez obtenidos los datos de ponderación para cada alternativa de solución, se estructura la tabla 2.8 de prioridades, multiplicando el peso específico de cada criterio con el valor ponderado de importancia de la tabla 2.3.

Tabla 2.8 Escala de prioridad del método de criterios ponderados.

Alternativas	Resistencia a la tracción	Resistencia a la fluencia	Disponibilidad en el mercado ecuatoriano	Costo	Σ	Prioridad
ASTM A36	(0.27) (0.38)	(0.08)(0.38)	(0.31)(0.17)	(0.4) (0.08)	0.22	3
ASTM 500	(0.08) (0.38)	(0.19)(0.38)	(0.12) (0.17)	(0.09)(0.08)	0.13	5
ASTM 572	(0.38) (0.38)	(0.35)(0.38)	(0.31)(0.17)	(0.4)(0.08)	0.36	1
ASTM 715	(0.19) (0.38)	(0.35)(0.38)	(0.31) (0.17)	(0.09)(0.08)	0.26	2
ASTM 792	(0.15) (0.38)	(0.19)(0.38)	(0.12) (0.17)	(0.09)(0.08)	0.16	4

(Fuente: Propia)

La tabla 2.8. de prioridades muestra que la alternativa 3 “Acero ASTM A-572” es la mejor opción con respecto a los parámetros planteados. En consecuencia, se elige al Acero

ASTM A-572 grado 50 como material base de las juntas soldadas. La tabla 2.9 muestra la composición química de dicho acero.

Tabla 2.9. Composición química del acero ASTM A572.

Composición química general de los aceros HSLA					
Acero	%C máx.	%Mn máx.	%P máx.	%S máx.	Otros. %máx.
ASTM A572 grado 50	0.23	1.30	0.40	0.05	%Si 0.4 %Nb 0.05 %V 0.15

(Fuente:[28])

2.3 Soldadura de juntas.

El proceso de obtención de juntas soldadas se dio inicio con la preparación de las placas base a soldar, el tamaño de estas placas se muestra en la figura 2.1. Las dimensiones fueron tomadas usando como guía las directrices proporcionadas por la norma AWS D1.1 en función del número de probetas a obtenerse, las ubicaciones de dichas probetas y las distancias a las cuales deberán ser tomadas.

Las placas fueron cortadas mediante sierra circular para no generar algún tipo de afectación térmica que distorsione los resultados del presente análisis.



Figura 2.1. Placa base para conformación de probetas soldadas.
(Fuente: Propia)

Se utilizaron 12 placas de acero ASTM A-572 con las dimensiones antes mostradas. Debido al considerable espesor de las placas base, se preparó un bisel en V con refuerzo, a fin de garantizar una adecuada conformación del cordón de soldadura.

Para el desarrollo de la parte experimental se realizó un procedimiento de soldadura con proceso el SMAW (procedimiento “A”) y un procedimiento de soldadura combinado compuesto por los procesos SMAW – FCAW (procedimiento “B”).

El enfoque del presente estudio precisó que se realicen varias reparaciones en las juntas, debido a esto, se dispuso la conformación y codificación de las placas según sea el tipo de procedimiento y el número de reparaciones realizadas. Esto se detalla en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Codificación de las probetas generales de soldadura.

Procedimiento	Código	Proceso	Reparaciones
Procedimiento “A”	S-P1-0R	SMAW	Sin reparaciones
	S-P2.1R	SMAW	Una reparación
	S-P3-2R	SMAW	Dos reparaciones
Procedimiento “B”	SF-P1-0R	SMAW-FCAW	Sin reparaciones
	SF-P2.1R	SMAW-FCAW	Una reparación
	SF-P3-2R	SMAW-FCAW	Dos reparaciones

(Fuente: Propia)

2.4 Procedimiento de soldadura “A”.

El procedimiento “A” utilizó 6 placas para la conformación de 3 probetas generales de soldadura con junta a tope y bisel en V. Se usó el proceso SMAW en la posición 1G, tomando como variable el número de reparaciones por placa.

Como primer aspecto, se procedió a limpiar la superficie de las placas y el bisel con herramientas fuertes para evitar discontinuidades durante el proceso. A fin mantener un espesor constante en las juntas, se soldó pletinas a las placas como se indica en la figura 2.2.



Figura 2.2. Colocación de pletinas guía para mantener la distancia entre placas.
(Fuente: Propia)

En la soldadura se dispuso un avance oscilatorio de izquierda a derecha, donde se utilizó electrodos E-6010 de diámetro 3.2 [mm] y revestimiento celulósico en el pase de raíz y los pases en caliente. Para el resto de los pases del bisel se usaron electrodos E-7018 de diámetro 4 [mm] con revestimiento básico, bajo una configuración de corriente continua con polaridad positiva DC+. Las especificaciones referentes a propiedades mecánicas de los electrodos E-6010 y E-7018 utilizados en este procedimiento se mencionan en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Especificaciones técnicas de los electrodos E-6010 Y E- 7018 utilizados en el procedimiento “A”

Tipo de electrodo	Tipo de revestimiento	Límite elástico		Resistencia a la tracción		Alargamiento en 50 [mm]
		[Mpa]	[ksi]	[Mpa]	[ksi]	[%]
E-6010	Celulósico	414	60	500	72.5	26
E-7018	Básico o de bajo hidrógeno	475	69	572	83	31

(Fuente:[29])


Con el objetivo de evitar discontinuidades en la junta, se controló rigurosamente que se cumpla con lo especificado en el WPS dispuesto como ANEXO I, en aspectos como voltajes de operación, velocidad de avance y sobre todo la limpieza entre pases. El resultado del proceso se lo puede evidenciar en la figura 2.3.



Figura 2.3. Junta soldada bajo el procedimiento “A”.
(Fuente: Propia)

El equipo que se empleó para la soldadura del proceso “A” consistió en una máquina soldadora Invertec V350 PRO para múltiples procesos, las especificaciones de este equipo se detallan en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Especificaciones técnicas de la máquina soldadora para el procedimiento “A”.

Especificaciones técnicas		Imagen del equipo
Marca del Equipo:	Lincoln Electric	
Modelo:	Invertec V350 PRO	
Características Eléctricas		
Voltaje de entrada:	220 [V]	
Salida nominal:	350A /34V/60% Ciclo de Trabajo	
Frecuencia:	50 y 60 Hz	

(Fuente: Propia)

2.5 Procedimiento de soldadura “B”.

El procedimiento “B” utilizó las 6 placas restantes para la conformación de 3 probetas generales de soldadura con junta a tope y bisel en V, utilizando el proceso combinado SMAW- FCAW. Para los pases de raíz y en caliente se usó el proceso SMAW con electrodo de penetración E-6010, el resto de los pases del bisel fueron soldados con el proceso FCAW con electrodo tubular E-71T-1C, utilizando 100% CO₂ como gas de protección. De igual manera se estableció como variable el número de reparaciones en cada placa. Las especificaciones referentes a propiedades mecánicas del electrodo tubular E-71T-1C utilizado en este procedimiento se mencionan en la tabla 2.13.

Tabla 2.13. Especificaciones técnicas del electrodo E-71T-1C.

Tipo de electrodo	Tipo de fundente	Tipo de gas de protección utilizado	Límite elástico		Resistencia a la tracción		Alargamiento en 50 [mm]
			[Mpa]	[ksi]	[Mpa]	[ksi]	[%]
E-71T-1C	Básico o de bajo hidrógeno	100% CO2	493	71	574	83	26

(Fuente:[30])

Se tomó las mismas consideraciones y aspectos mencionados en el procedimiento “A”, tales como control de la limpieza entre pases y variables establecidas en el WPS, el cual se muestra como ANEXO II. El resultado del procedimiento de soldadura “B” se puede evidenciar en la figura 2.4.



Figura 2.4. Junta soldada bajo el procedimiento “B”.
(Fuente: Propia)

El equipo utilizado para la soldadura del proceso “B” consistió en una máquina soldadora Invertec LN-25 PRO para múltiples procesos, las especificaciones de este equipo se detallan en la tabla 2.14.

Tabla 2.14. Especificaciones técnicas de la máquina soldadora para el procedimiento “B”.

Especificaciones técnicas		Imagen del equipo
Marca del Equipo:	Lincoln Electric	
Modelo:	Invertec LN-24 PRO	
Características Eléctricas		
Voltaje de entrada:	220 [V]	
Rango de diámetro de alambre	0.8 – 2 [mm]	
Frecuencia:	50 y 60 Hz	

(Fuente: Propia)

Cabe indicar que las soldaduras del procedimiento “A” y “B” fueron realizadas en la empresa “IPDEACERO Ideas y Productos de Acero Cía. Ltda.”, misma que cuenta con

soldadores calificados para realizar el proceso garantizando su calidad. La figura 2.5. muestra el proceso de soldadura realizado en la empresa "IPDEACERO".



Figura 2.5. Proceso de soldadura en la empresa IPDEACERO.
(Fuente: Propia)

2.6 Reparación de las juntas.

Se realizó procesos de reparación en las juntas variando en cada caso el número de reparaciones por placa. Dichas reparaciones consisten en el desbaste y resoldeo de la junta.

Desbaste del cordón.

Mediante el uso de una amoladora con disco de corte, se procedió a separar el cordón de soldadura del material base. La herramienta debe incidir de forma inclinada sobre el cordón hasta dejar únicamente el pase de raíz.

Dicho corte fue realizado en ambos lados del bisel, manteniendo la inclinación de la herramienta y avanzando lentamente por el filo del bisel como se muestra en la figura 2.6. Es preciso indicar que debe eliminarse todo el cordón y realizar una limpieza exhaustiva antes de volver a realizar el proceso de soldeo, como se evidencia en la figura 2.7.



Figura 2.6. Desbaste del cordón en un proceso de reparación.
(Fuente: Propia)



Figura 2.7. Cordón desbastado, con limpieza previa al resoldeo.
(Fuente: Propia)

2.7 Resoldeo del bisel.

El proceso de resoldeo consistió en rellenar el cordón previamente desbastado y limpio, bajo los mismos parámetros marcados en el WPS de reparación mostrado en el ANEXO III, y ANEXO IV hasta volver a completar el bisel. Cabe notar que cada proceso de reparación incrementa la abertura del bisel y por ende se depositó más material de aporte, teniendo como consecuencia una zona afectada por el calor más grande.

2.8 Ensayos no destructivos.

Los ensayos no destructivos en soldadura permiten determinar la calidad con la que fue conformada una junta, comparando las indicaciones que puedan existir con los parámetros límites expuestos en la norma que rige el proceso.

Para la realización de este proyecto se practicaron ensayos de inspección visual y radiografía industrial, los cuales son métodos de inspección superficial y volumétrico respectivamente.

2.9 Método de inspección superficial por inspección visual.

El ensayo de inspección visual está enfocado a verificar y comparar las indicaciones superficiales observadas por la agudeza visual del inspector de soldadura.

Procedimiento del ensayo de inspección visual.

Se inició el ensayo con la limpieza del cordón y raíz de la junta como se muestra en la figura 2.8 utilizando thinner para remover partículas que dificulten observar discontinuidades en la soldadura. Para la medición de profundidades y relieves se utilizó el calibrador o galga Bridge Cam, mostrado en la figura 2.9.



Figura 2.8 Placa preparada y limpia para el proceso de inspección visual.
(Fuente: Propia)



Figura 2.9 Galga Bridge para la medición de discontinuidades en el cordón.
(Fuente: Propia)

Las indicaciones visibles se dimensionaron y compararon con los criterios de aceptación del ensayo que se muestran en el código AWS D1.1 detallados en la tabla 2.15.

Tabla 2.15. Criterios de aceptación para inspección visual según el código de soldadura estructural AWS D1.1.

N°	Criterio
1	La soldadura debe estar libre de grietas.
2	Todos los cráteres deben estar llenos completamente en la sección transversal de la soldadura.
3	La cara de la soldadura debe estar llena hasta el borde de la superficie del metal base y la soldadura se debe fundir lentamente con el metal base. El socavado no debe exceder de 1/32" (1 mm). El refuerzo de la soldadura no deberá exceder de 1/8" (3mm).
4	La raíz de la soldadura debe ser inspeccionada y no debe tener evidencia de grietas, fusión incompleta o penetración inadecuada de la junta. Se permite una raíz de superficie cóncava dentro de los límites descritos presentados abajo, de tal manera que el espesor total de la soldadura sea igual o mayor que el del metal base.

5	La máxima concavidad de la superficie de la raíz debe ser de 1/16" (1.6mm) y el máximo sobre espesor debe ser 1/8" (3mm). Para uniones tubulares en T, Y y K el sobre espesor de la raíz, se considera adecuado y no deberá ser causa de rechazo.
---	---


(Fuente: [4])

2.10 Método de inspección volumétrico por radiografía industrial.

El método de radiografía industrial permite detectar indicaciones volumétricas presentes en las juntas, a través de la aplicación de radiación de onda corta y su registro permanente en una película sensible.

La toma de muestras radiográficas y el revelado de dichas películas se realizó en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos (END) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), para lo cual se utilizó el equipo de rayos X Baltographe 200, cuyas características operativas se muestran en la tabla 2.16. Se comparó las indicaciones encontradas con los criterios de aceptación mostrados del código de soldadura estructural AWS D1.1.

Tabla 2.16. Especificaciones técnicas de la máquina de rayos X del laboratorio de END.

Especificaciones técnicas		Imagen del equipo
Marca	Balteau	
Modelo:	Baltographe 200	
Potencia:	600 [Kw]	
Voltaje Máximo:	200 [kv]	
Amperaje Máximo	10 [mA]	
Flujo de enfriamiento	0.57 [lt/min]	

(Fuente: Propia)

Procedimiento del ensayo de radiografía industrial.

Recaldeo del equipo.

Para la realización del ensayo de radiografía industrial, se inició con la puesta a punto o recaldeo de la máquina de rayos X, con el objetivo de establecer las condiciones de trabajo adecuadas para garantizar el correcto desempeño de la maquina durante el ensayo. El tiempo recaldeo se dispuso en función del tiempo de parada o periodo durante el cual el equipo estuvo sin uso. Para esto se tiene una gráfica realizada por el fabricante donde se puede determinar dicho tiempo.

Se calibra el equipo en 100 [Kv] hasta su capacidad máxima de 160 [Kv] en pasos de 10 [Kv] con un amperaje de 5 [mA].

Selección de indicadores de calidad.

Se seleccionó el set "B" con identidad del alambre número 7, para los indicadores de calidad de imagen dispuestos en el código ASME sección 5 [30], en función del espesor del material a ser radiografiado. La visibilidad de estos indicadores en las películas radiográficas otorga el grado de fiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos. En el ANEXO V se muestra a detalle el proceso de selección de dichos indicadores.

Tiempo de exposición.

Cada placa soldada fue radiografiada con un específico tiempo de exposición, el cual se calcula tomando en consideración varios parámetros. El cálculo de los tiempos de exposición se detalla en el ANEXO VI.

En la tabla 2.17 se detalla la codificación otorgada a cada placa, la descripción del proceso con el número de reparaciones practicadas y los tiempos de exposición por placa que fueron utilizados en cada caso.

Tabla 2.17. Tiempos de exposición para cada probeta ensayada.

Código del laboratorio de END	Proceso	Número de reparaciones	Espesor total promedio de la junta [mm]	Tiempo de exposición radiográfica a 160 [Kv]
2021-R-02.RX-02.P1	SMAW	Sin reparaciones	18.9	2 min 15 seg.
2021-R-02.RX-02.P2	SMAW	Una reparación	20.11	2 min 35 seg.
2021-R-02.RX-02.P3	SMAW	Dos reparaciones	20.9	3 min 30 seg.
2021-R-02.RX-02.P4	Combinado SMAW-FCAW	Sin reparaciones	17.45	1 min 40 seg.
2021-R-02.RX-02.P5	Combinado SMAW-FCAW	Una reparación	18.78	2 min 5 seg.
2021-R-02.RX-02.P6	Combinado SMAW-FCAW	Dos reparaciones	16.75	1 min 25 seg.

(Fuente: Propia)

Ubicación de las placas y captura radiográfica.

Debido a la extensa dimensión de cada cordón de soldadura, fue necesario cortar dos películas radiográficas de 25 [cm] cada una, para cubrir dicha dimensión. Las películas fueron colocadas y sujetas al cordón, junto con los indicadores de calidad anteriormente seleccionados. Se procedió a etiquetar con letras de plomo cada una de las películas con el código descrito en la tabla 2.18, a fin de generar registros permanentes de cada probeta.

Para el proceso de captura radiográfica, se ubicó a la placa haciendo coincidir el centro de la película con la herramienta móvil del equipo, como se muestra en la figura 2.10. Es importante localizar de manera adecuada a la placa con respecto al equipo, pues si esta ubicación es correcta, la captación de indicaciones sobre la película sensible será más provechosa.

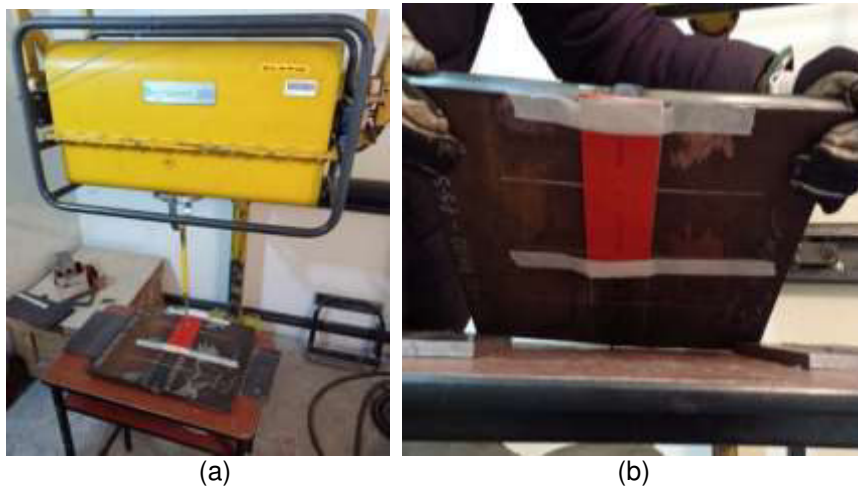


Figura 2.10 a) Calibración de la distancia y ubicación de la placa. b) ubicación final de la película sensible para el ensayo
(Fuente: Propia)

Una vez ubicada la placa, se procedió a cerrar el bunker de seguridad para dar inicio con el ensayo, estableciendo en los mandos de control los valores de [kV] y tiempos de operación antes mencionados en la tabla 2.17.

Revelado de películas radiográficas.

El revelado de las tomas radiográficas se llevó a cabo en el laboratorio de END de la Escuela Politécnica Nacional. Para esto, se siguió de manera rigurosa los tiempos de permanencia de las películas en cada etapa del proceso. Los tiempos del proceso de revelado son detallados en la tabla 2.18.

Tabla 2.18. Tiempos de permanencia de películas radiográficas en el proceso de revelado.

Etapas del proceso de revelado.	Tiempo de permanencia [min].	Composición del baño de revelado.
Revelado	3	Solución alcalina
Baño de parada	1	Agua
Fijador	6	Solución acida
Baño de parada	1	Agua
Secado	20	--

(Fuente: Propia)

Las indicaciones que se pudieron encontrar después del revelado fueron medidas y comparadas con los criterios de aceptación propuestos en el código AWS D1.1. Dichos criterios de aceptación se muestran en la tabla 2.19.

Tabla 2.19. Criterios de aceptación del ensayo de radiografía industrial según la AWS D1.1.

N°	Criterios de aceptación.
1	Las discontinuidades alargadas que excedan el tamaño máximo de la Figura 2.11
2	Las discontinuidades con una separación menor que el espacio mínimo permitido de la Figura 2.11.
3	Las discontinuidades redondeadas superiores a un tamaño máximo de $E/3$, no deben exceder de $1/4$ " [6 mm]. Sin embargo, cuando E es superior a 2" [50 mm], la indicación redondeada máxima puede ser de $3/8$ " [10 mm]. La separación mínima de las discontinuidades redondeadas que sean mayores o iguales a $3/32$ " [2,5 mm] hasta una discontinuidad alargada o redondeada aceptable o hasta un borde o extremo de una soldadura intersecante deberá ser tres veces mayor que la dimensión de mayor longitud de las discontinuidades más grandes que estén siendo consideradas.
4	En la intersección de una soldadura con otra soldadura o con un borde libre (es decir, un borde más allá del cual no existe extensión de material) las discontinuidades aceptables deben cumplir con las limitaciones de la Figura 2.11.
5	Las discontinuidades aisladas tales como un grupo de indicaciones redondeadas, cuando la suma de sus dimensiones mayores supere el tamaño máximo de discontinuidad permitido en la Figura 2.11. La separación mínima hasta otra discontinuidad agrupada, alargada o redondeada o hasta un borde o extremo de una soldadura intersecante deberá ser tres veces mayor que la dimensión de mayor longitud de las discontinuidades que estén siendo consideradas.
6	La suma de las discontinuidades individuales, cada una con una dimensión mayor de menos de $3/32$ " [2,5 mm] no debe exceder de $2E/3$ o $3/8$ " [10 mm], la que sea menor, en cualquier tramo lineal de 1" [25 mm] de soldadura. Este requisito es independiente de (1), (2) y (3), citados anteriormente.
	Discontinuidades en línea, en las que la suma de las dimensiones más grandes sea mayor que E en cualquier tramo de 6E de longitud. Cuando la longitud de la soldadura examinada sea inferior a 6E, la suma admisible de las dimensiones más grandes debe ser proporcionalmente inferior.

(Fuente: [4])

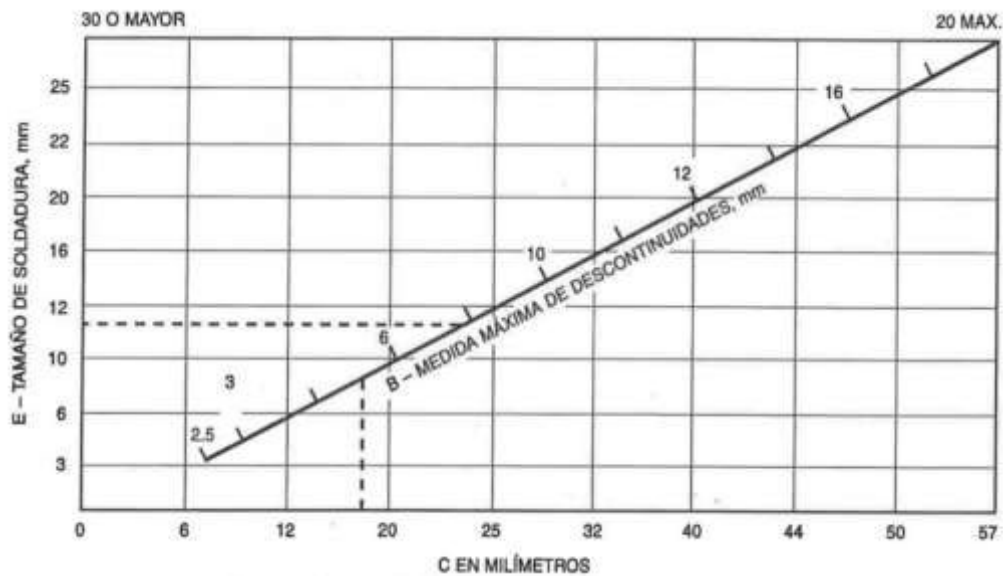


Figura 2.11. Criterios de aceptación, tamaño de discontinuidades radiografía. (Fuente:[4])

2.11 Ensayos destructivos.


La aplicación de ensayos destructivos permite evaluar el comportamiento del material bajo ciertas situaciones de carga. Con estos ensayos se puede evidenciar defectos formados durante el proceso de conformación de la junta, que influyen en el desempeño o fiabilidad de trabajo de la soldadura. Los ensayos destructivos que fueron aplicados para el desarrollo de este proyecto son doblado lateral y tracción de sección reducida.

Para complementar el análisis y obtener un espectro más amplio de resultados, en el presente estudio se realizaron adicionalmente ensayos de metalografía, macrografía y dureza superficial, para los cordones de soldadura, zona afectada por el calor y material base de la junta soldada.

Obtención de probetas.

Las probetas se obtuvieron por corte con sierra circular Milwaukee 6370-21, esta sierra puede efectuar cortes con un mínimo aporte de calor al material, evitando posibles afectaciones térmicas que comprometan los resultados de los ensayos. En la tabla 2.20 se muestran las especificaciones técnicas de la sierra que fue utilizada.

Tabla 2.20. Especificaciones técnicas de la sierra circular utilizada para la obtención de probetas.

Especificaciones		Imagen
Marca	Milwaukee	
Modelo	6370 – 21	
Revoluciones por minuto	3700 RPM	
Voltaje	120 [V]	
Amperaje	15 [A]	
Frecuencia	60 [Hz]	
Disco de corte	8 [".]	
Potencia	1800 [W]	

(Fuente: Propia)

Siguiendo lo estipulado en el código AWS D1.1, se establecieron las dimensiones, número de probetas por ensayo y ubicaciones de cada probeta dentro de las placas. En la figura 2.12 se muestra un esquema de ubicación de las probetas para cada ensayo.



Figura 2.12. Recomendaciones de ubicación para la obtención de muestras por ensayo.
(Fuente: [4])

Procedimiento de extracción de probetas.

Para la extracción de las probetas, se procedió retirando el material de la sobre monta y la raíz, dejando una junta soldada uniforme y sin relieves. Después se procedió a cortar

rectángulos sobredimensionados en las ubicaciones de cada muestra dependiendo del tipo de ensayo, según lo dispuesto en el código AWS D1.1 y mostrado en la figura 2.12. Para obtener la geometría final de las probetas, se maquinó hasta las dimensiones necesarias en el Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la EPN.

2.12 Ensayo de tracción de sección reducida.

El ensayo de tracción consiste en la aplicación de cargas crecientes de igual dirección y sentido contrario, que producen tracción y deformación hasta la fractura del material. Este ensayo fue aplicado a un total de 13 probetas, entre material base y juntas soldadas, esto para verificar que el material utilizado corresponde al acero ASTM A-572, y a su vez, comparar el esfuerzo último a la tracción entre las probetas soldadas y reparadas. El ensayo se realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la EPN.

Obtención de probetas

La probeta para el ensayo de tracción se preparó con la geometría y dimensiones propuestas en el código AWS D1.1, para lo cual se maquinó la forma de la sección reducida y los radios geométricos en el laboratorio de máquinas y herramientas (LMH) de la EPN. La figura 2.13 esquematiza las dimensiones de dichas probetas.

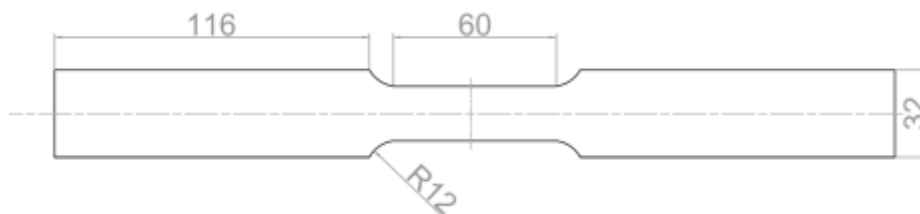


Figura 2.13 Geometría y dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción de sección reducida.

(Fuente: Propia)

Proceso del ensayo.

Se procedió a regular las condiciones de operación de la máquina universal de ensayos que se dispone en el LAEV de la EPN. Las especificaciones técnicas de la máquina universal se detallan en la tabla 2.21.

Utilizando un granete de marcación, se señaló dos puntos dentro de la sección reducida para determinar la elongación del material post ensayo. Seguido a esto, se sujetó dichas probetas a la mordaza de la meza fija y móvil de la máquina universal, posteriormente

se inició con la aplicación de carga axial de tracción. El ensayo terminó con la fractura del material como se muestra en la figura 2.14



Figura 2.14 Falla del material.
(Fuente: Propia)

Una vez ocurrido el fallo, las probetas son retiradas de las mordazas para medir la elongación final que se generó en el material.

Tabla 2.21. Características maquina universal de ensayos.

Características		Imagen
Marca:	Tinius Olsen	
Modelo:	Super L	
Capacidad:	50 toneladas	
Velocidad de desplazamiento:	2 mm/s	

(Fuente: Propia)

En el ANEXO VII se adjunta el informe “LAEV – M21.062.” emitido por el LAEV, donde consta los valores de carga máxima registrada y resistencia a la tracción de cada probeta. La tabla 2.22. muestra los criterios de aceptación para la evaluación de este ensayo, tomados del código AWS D1.1.

Tabla 2.22.9 Criterios de aceptación para el ensayo de tracción de sección reducida, mostrados en el código AWS D1.1.

N°	Criterios de aceptación.
1	La resistencia a la tracción obtenida en las juntas soldadas no debe ser menor al mínimo valor especificado de tracción del metal base.

(Fuente: [4])

2.13 Ensayo de doblado lateral.

El ensayo de doblado lateral consiste en la aplicación de una fuerza transversal progresiva sobre una probeta soportada entre apoyos, que se distancian con una separación normalizada. El ensayo permite observar la ductilidad y rigidez de la junta soldada.

Se extrajeron 4 probetas de cada placa soldada, teniendo un total de 24 probetas sometidas a este ensayo, mismo que se practicó en el Laboratorio de Soldadura de la EPN.

Obtención de probetas

Las probetas fueron preparadas en el laboratorio de máquinas herramientas de la EPN, siguiendo las recomendaciones de ubicación, geometría y dimensiones estipuladas en el código AWS D1.1. La tabla 2.23 detalla el código otorgado a cada probeta de ensayo y la figura 2.15 muestra las dimensiones de las probetas ensayadas.

Tabla 2.23. Código de identificación otorgado a las probetas del ensayo de doblado.

Procedimiento de soldadura	Número de reparaciones	Código de las probetas
Procedimiento "A" SMAW	0R	ED-S-P1-0R
	1R	ED-S-P2-1R
	2R	ED-S-P3-2R
Procedimiento "B" SMAW- FCAW	0R	ED-SF-P1-0R
	1R	ED-SF-P2-1R
	2R	ED-SF-P3-2R

(Fuente: Propia)



Figura 2.15 Dimensiones de las probetas para el ensayo de doblado.
(Fuente: Propia)

Proceso del ensayo.

Como primer aspecto se seleccionó las dimensiones del JIG de doblado, las cuales se encuentran tabuladas en función de la resistencia del material base en el código AWS

D1.1. Se colocó las probetas con disposición lateral, es decir, la cara del cordón y la raíz se ubican de tal manera que no se asienten sobre la matriz de la máquina.

La figura 2.16 y la tabla 2.24 muestran las distancias normalizadas con las cuales se preparó la máquina para el ensayo, en la tabla 2.25 se encuentran las especificaciones del equipo.

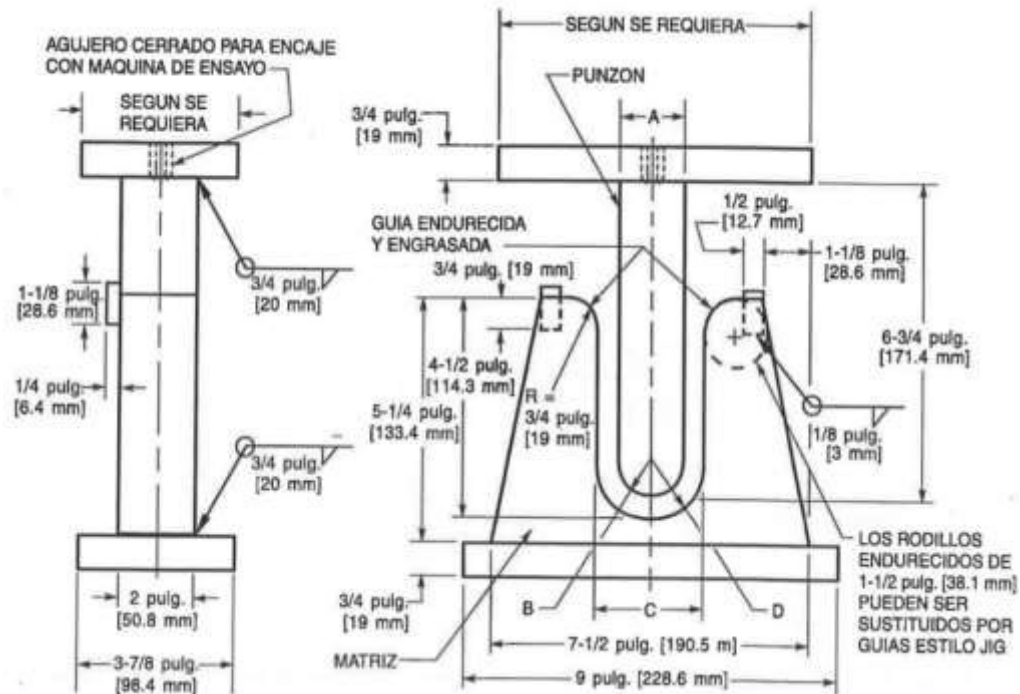


Figura 2.16. Distancias para el ensayo de doblado guiado con matriz. (Fuente:[4])

Tabla 2.24. Distancias normalizadas para la matriz de doblado.

Resistencia a la fluencia del metal base	A [mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
50 [ksi] y menor	38.1	19	60.3	30.2

(Fuente: Propia)

Tabla 2.25. Especificaciones técnicas del equipo para el ensayo de doblado.

Especificaciones técnicas		Imagen
Marca:	-	
Modelo:	-	
Potencia del motor:	2HP	
Aplicación de la carga:	Mediante sistema hidráulico	
Voltaje:	220 [V]	
Frecuencia:	60[Hz]	

(Fuente: Propia)

Se dio inicio al ensayo con el desplazamiento del émbolo sobre la probeta, provocando deformación por flexión. La figura 2.17 muestra la disposición final de la probeta, luego de ser aplicada la fuerza de flexión para el doblado.



Figura 2.17 Disposición final de la probeta después del ensayo de doblado
(Fuente: Propia)

Una vez finalizado el doblado, se retiró la carga aplicada por el émbolo para extraer la probeta y analizarla bajo los criterios de aceptación de ensayo expuestos en la tabla 2.26.

Tabla 2.26. Criterios de aceptación para el ensayo de doblado lateral.

N°	Criterios de aceptación.
1	1/8" (3mm) medida en cualquier dirección sobre la superficie
2	3/8" (10mm). La suma de las mayores dimensiones de todas las discontinuidades que excedan en 1/32" (1mm), pero menores ó igual a 1/8" (3mm)
3	1/4" (6mm) la máxima dimensión de la grieta en el borde, excepto cuando dicha grieta sea el resultado de una visible inclusión de escoria u otros tipos de discontinuidades por fusión, entonces solo se permite 1/8" (3mm) como máximo.

(Fuente: [4])

2.14 Micrografía.

El ensayo de micrografía consiste en el análisis de una probeta previamente pulida y atacada químicamente, mediante la amplificación de la superficie utilizando un microscopio. El objetivo del ensayo consiste en revelar y caracterizar la estructura del material, sus constituyentes y las fases dispuestas que puedan encontrarse. La microestructura está relacionada con las propiedades mecánicas y físicas del material.

2.15 Obtención y preparación de probetas.

Las probetas fueron obtenidas mediante corte por chorro de agua en la empresa SERVICOR para evitar posibles afectaciones térmicas en el material. Las dimensiones de dichas probetas se detallan en la tabla 2.27.

Tabla 2.27. Especificaciones de las probetas para ensayo de micrografía.

Proceso de soldadura	Procedimiento	Identificación de la probeta	Dimensiones [mm]	Esquema gráfico de la probeta
Material base	-	Base - 21-038	60x20x15	
SMAW	Procedimiento A	P1-21-038	60x20x15	
	Procedimiento A	P2-21-038	60x20x15	
	Procedimiento A	P3-21-038	70x20x15	
Combinado SMAW - FCAW	Procedimiento B	P4-21-038	60x20x15	
	Procedimiento B	P5-21-038	60x20x15	
	Procedimiento B	P6-21-038	70x20x15	

(Fuente: Propia)

La preparación de las probetas se inició con el desbaste grueso de la superficie, para esto se utilizó la máquina desbastadora Bueheler y lijas de lona para metales con granulometría número 100. Las especificaciones técnicas de la máquina se muestran en la tabla 2.28.

Tabla 2.28. Especificaciones técnicas de la máquina de desbaste grueso.

Especificaciones		Imagen
Marca:	Bueheler	
Modelo:	121-OM-84	
Potencia del equipo:	1 HP	
Voltaje:	220 [V]	
Frecuencia:	60 [Hz]	

(Fuente: Propia)

En el desbaste fino, se utilizó lijas de agua con granulometría de 240, 320, 400, 600 y 1200 secuencialmente, se realizó un proceso de pulido manual en la maquina Handimet Grinder que se muestra en la figura 2.18.



Figura 2.18. Máquina Handimet grinder para desbaste fino.
(Fuente: Propia)

Para finalizar con la preparación de las probetas, se pulió la superficie de cada una de ellas en la máquina de pulido manual, sin material abrasivo y con paño humedecido mediante alúmina en suspensión en agua, hasta obtener una superficie totalmente lisa y brillante, el resultado final de la etapa de pulido se muestra en la figura 2.19.



Figura 2.19. Probetas post proceso de preparación y pulido.
(Fuente: Propia)

Procedimiento de ensayo


Para este ensayo se realizaron dos procedimientos, uno sin ataque químico y otro con ataque químico al material.

En el primer caso no se atacó químicamente, esto debido a que se buscó observar inclusiones presentes en cada probeta, a fin de verificar como influye el proceso y el número de reparaciones en la inclusión de escoria. Seguido a esto, se colocó la probeta bajo el lente del microscopio cuyas características se mencionan en la tabla 2.29 enfocando una zona de análisis como material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y material de aporte (MA). Una vez seleccionada la zona, se escogió el tipo de aumento para cada caso, este ensayo se realizó utilizando lentes de 100x y 500x para digitalizar las fotografías.

El proceso antes descrito se repitió para las probetas con ataque químico, utilizando Nital al 10% durante 10 segundos. El ensayo de micrografía fue realizado en Laboratorio

de Metalografía Desgaste y Falla de la FIM en la EPN, para un total de 7 probetas que se detallaron en la tabla 2.27.

Tabla 2.29. Especificaciones técnicas del microscopio.

Especificaciones		Imagen
Marca:	Olympus	
Modelo:	GX41F	
Visualización:	Binocular	
Rango de magnificación:	5X, 10X, 20X, 50X, 100X, 500X	
Software:	Stream Essentials	

(Fuente: Propia)

2.16 Macrografía.

Es un ensayo enfocado a verificar las indicaciones superficiales presentes en una pieza, previamente preparada, pulida y atacada químicamente. El análisis requiere el uso de un estereoscopio que proporcione un aumento visual para detectar las características de la pieza.

Extracción y preparación de probetas


El proceso de extracción y preparación de probetas es el mismo utilizado para el ensayo de micrografía, detallado en la sección 2.16

Procedimiento de ensayo

Para este ensayo se utilizaron las mismas probetas del ensayo de micrografía. Cada una de las probetas fue colocada en el estereoscopio con magnificaciones de 0,63X; 2X y 2,8X, las características de este equipo se detallan en la tabla 2.30.

Una vez colocada la probeta, se procedió a capturar las imágenes de las zonas de interés para así poder analizar las indicaciones encontradas.

Tabla 2.30. Especificaciones del estereomicroscopio

Descripción		Imagen
Marca:	OLYMPUS	
Modelo:	SZX7	
Voltaje:	110	
Magnificación posible:	0.4x a 2.8x	

(Fuente: Propia)

Para el análisis de las probetas se utilizó los criterios de aceptación propuestos en el código AWS D1.1 detallados en la tabla 2.31.

Tabla 2.31. Criterios de aceptación ensayo de macrografía.

N°	Criterios de aceptación
1	No presentar grietas.
2	Fusión continua entre cordones adyacentes de metal de soldadura y entre metal base y metal de soldadura.

(Fuente: [4])


2.17 Ensayo de dureza superficial.

El ensayo de dureza se realiza para poder determinar la resistencia superficial que posee un material frente deformación plástica, generada por la acción de esfuerzos externos. El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia que presenta dicho material a una determinada carga de indentación.

Obtención de las probetas

Para el ensayo de dureza se utilizó las mismas probetas de los ensayos de macro y micrografía, codificándolas de la misma manera. Este ensayo se realizó en el laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla de la FIM en la EPN. El equipo utilizado fue el durómetro Hardrocker perteneciente al laboratorio, cuyas características técnicas se detallan en la tabla 2.32.

Tabla 2.32. Especificaciones del durómetro

Especificaciones técnicas		Imagen del equipo
Marca:	Hardroker	
Indentador:	Esférico de carburo de tungsteno de diámetro 1/16 "adas.	
Carga disponible:	60, 100, 150 [kgf]	
Sistema de medición:	Indicador analógico	

(Fuente: Propia)




Procedimiento del ensayo.





Para realizar el ensayo de dureza se inició marcando las distancias de indentación en cada una de las probetas, con mediciones en la parte superior, media e inferior de las mismas. A continuación, se colocó cada probeta en el durómetro haciendo contacto con el indentador, aplicando una precarga de 10 [kgf] y luego una carga de indentación de 100 [kgf]. Finalmente, se retiró la carga verificando en el marcador analógico el valor de la dureza en escala Rockwell B.





RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados inspección visual.

Tabla 3.1. Inspección visual de las placas soldadas.

Código	Cordón de soldadura	Raíz
S-P1-0R		
	Se evidencia la presencia de porosidades cuya dimensión máxima no sobrepasa los 0.9 [mm], junto con salpicaduras menores a 2 [mm] de longitud. El cordón no presenta otras discontinuidades.	La raíz de la junta presenta una adecuada penetración, y en su longitud no se evidencian discontinuidades.
Código	Cordón de soldadura	Raíz
S-P2-1R		
	El cordón presenta como única discontinuidad una salpicadura de 0.95 [mm] de longitud.	La raíz de la junta presenta una adecuada penetración, y en su longitud no se evidencian discontinuidades.

Código	Cordón de soldadura	Raíz
S-P3-2R		
	<p>El cordón presenta como única discontinuidad, una salpicadura de 1 [mm] de longitud.</p>	<p>La raíz de la junta presenta una adecuada penetración, y en su longitud no se evidencian discontinuidades.</p>
Código	Cordón de soldadura	Raíz
SF-P4-0R		
	<p>Se evidencia la presencia de porosidades cuya dimensión máxima no sobrepasa los 0.8 [mm]. El cordón no presenta otras indicaciones.</p>	<p>La raíz de la junta presenta una adecuada penetración, y en su longitud no se evidencian discontinuidades.</p>

Código	Cordón de soldadura	Raíz
SF-P5-1R		
	El cordón presenta una apariencia libre de discontinuidades en toda su longitud soldada.	La raíz de la junta presenta una adecuada penetración, y en su longitud no se evidencian discontinuidades.
Código	Cordón de soldadura	Raíz
SF-P6-2R		
	El cordón presenta una apariencia libre de discontinuidades en toda su longitud soldada.	La raíz de la junta presenta una adecuada penetración, y en su longitud no se evidencian discontinuidades.

(Fuente: Propia,

Se presenta la tabla 3.2 a manera de resumen, donde se menciona las indicaciones encontradas durante la aplicación del ensayo de inspección visual. La junta es declarada apta si cumple los criterios expuestos en la norma AWS D1.1, mencionados en la sección 2.9.

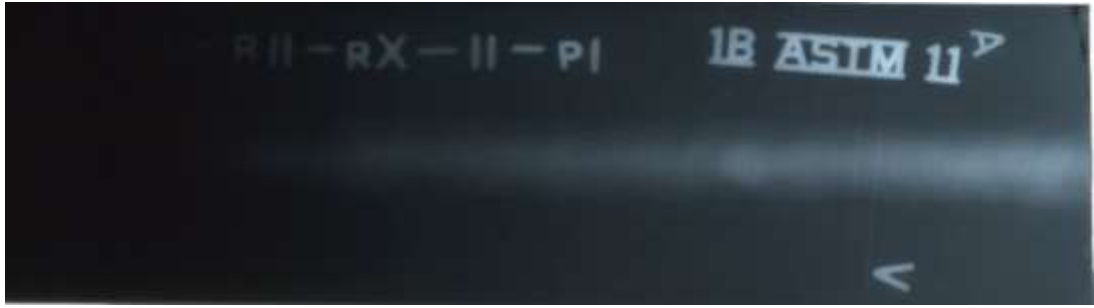
Tabla 3.2. Resumen del ensayo de inspección visual.

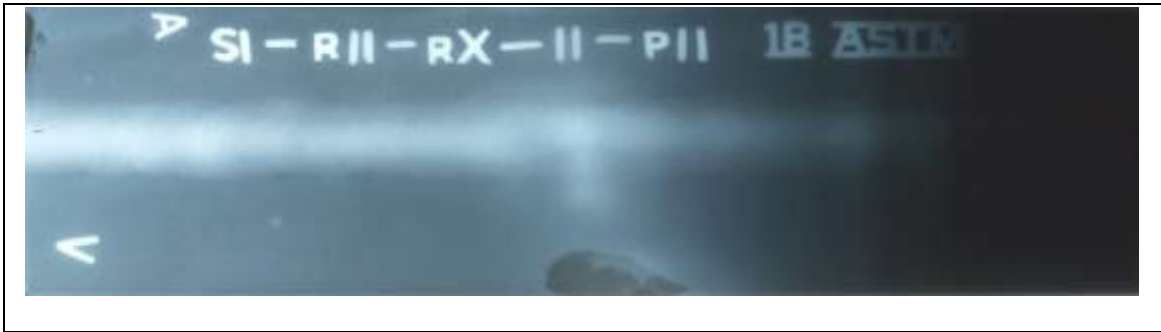
Código general de la junta	Discontinuidad es detectadas	Dimensión	Calificación de la junta según AWS D1.1.
S-P1-0R	Poros superficial	0.9 [mm]	Aceptada
	Salpicadura	1.4 [mm]	Aceptada
S-P2-1R	Salpicadura	0.95 [mm]	Aceptada
S-P3-2R	Salpicadura	1 [mm]	Aceptada
SF-P4-0R	Poros superficial	<0.8 [mm]	Aceptada
SF-P5-1R	-	-	Aceptada
SF-P6-2R	-	-	Aceptada

3.2. Resultados radiografía Industrial.

Las láminas radiográficas de cada una de las probetas se muestran en la tabla 3.3. Como se explicó en la sección 2.10 la dimensión del cordón de soldadura requiere el uso de dos películas radiográficas para documentar el ensayo, es por esto que se ha dividido en sección “AV”, para el primer tramo del cordón y sección “VA” para el segundo tramo.

Tabla 3.3. Películas radiográficas de las probetas ensayadas.

Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P1-AV
Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento A, sin aplicar reparaciones, sección AV.
	
Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P1-AV
Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento A, sin aplicar reparaciones, sección VA.



Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P2-AV
-----------------------------	------------------------------

Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento A, con una reparación, sección AV.
---------------------------------	---



Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P2-VA
-----------------------------	------------------------------

Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento A, con una reparación, sección VA.
---------------------------------	---



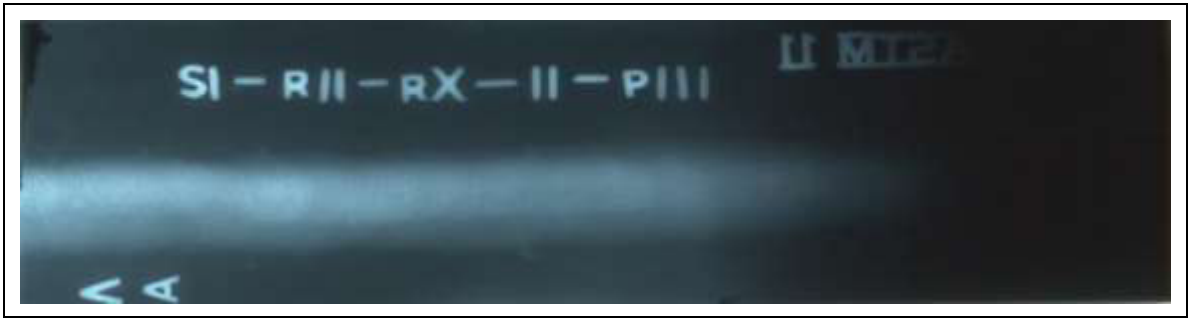
Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P3-AV
-----------------------------	------------------------------

Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento A, con dos reparaciones, sección AV.
---------------------------------	---



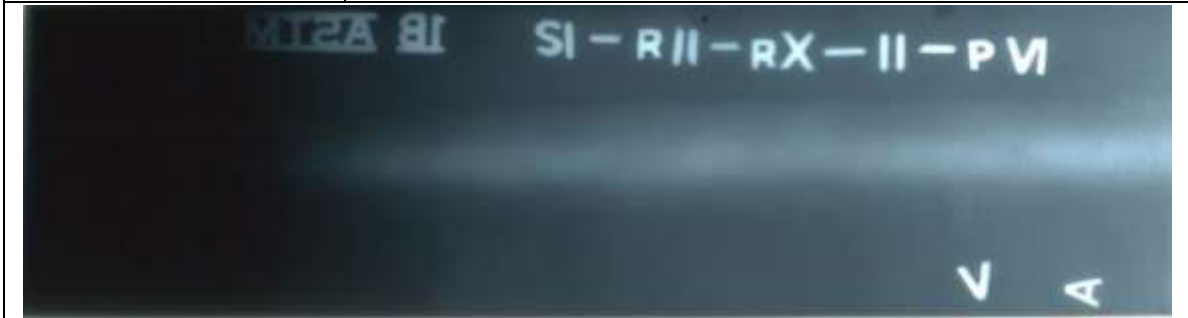
Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P3-VA
-----------------------------	------------------------------

Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento A, con dos reparaciones, sección VA.
---------------------------------	---



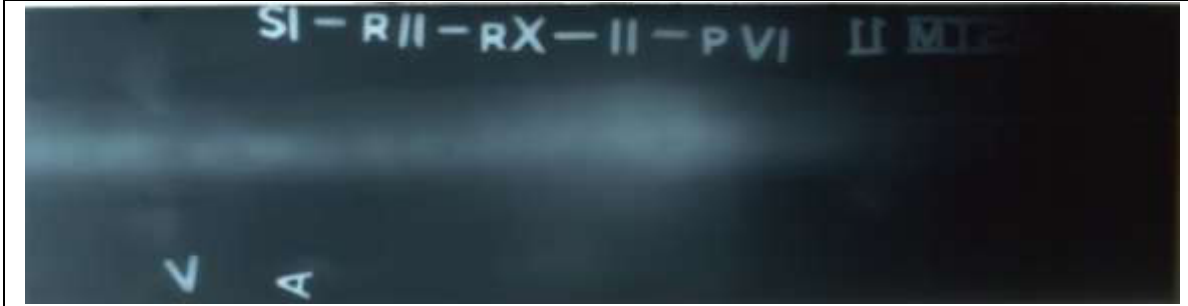
Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P4-AV
-----------------------------	------------------------------

Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento B, sin aplicar reparaciones, sección AV.
---------------------------------	---



Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P4-VA
-----------------------------	------------------------------

Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento B, sin aplicar reparaciones, sección VA.
---------------------------------	---



Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P5-AV
-----------------------------	------------------------------

Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento B, con una reparación, sección AV.
---------------------------------	---



Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P5-VA
-----------------------------	------------------------------

Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento B, con una reparación, sección VA.
---------------------------------	---



Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P6-AV
Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento B, con dos reparaciones, sección AV.
Código de la probeta	2021-R-02-RX-02-P6-VA
Descripción de la junta.	Cordón soldado bajo el procedimiento B, con dos reparaciones, sección VA.

(Fuente: Propia)

3.2 Resultados tracción.

En la tabla 3.4 se muestran los resultados del ensayo de tracción al material base, donde se obtuvo valores de carga máxima aplicada, resistencia a la tracción y porcentaje de elongación. Los valores obtenidos del material base servirán para comparar y discutir los resultados de tracción de las probetas restantes, mismas que presentan procesos de soldeo y reparación.

Tabla 3.4. Resultados del ensayo de tracción al material base.

Código de Identificación	Ancho promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 [mm]
	[mm]	[mm]	[lbf]	[N]	[ksi]	[MPa]	
M21.062.13	20,08	15,18	30 953	137 686	65,5	452,5	45,0

(Fuente: Propia)

En la tabla 3.5 se detallan los resultados del ensayo de tracción aplicado a las probetas soldadas.

Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción de las probetas soldadas y reparadas.

Código de Identificación	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	[mm]	[mm]	[lbf]	[N]	[ksi]	[MPa]	
M21.062.01	20.12	14.6	31241	138 965	68.6	473.1	FMB
M21.062.02	20.19	14.66	31387	139 618	68.4	471.7	FMB
M21.062.03	20.15	14.97	32304	143 694	69.1	476.4	FMB
M21.062.04	20.25	14.59	31204	138 801	68.1	469.8	FMB
M21.062.05	19.94	14.59	30981	137 811	68.7	473.7	FMB
M21.062.06	19.86	14.68	30817	137 083	68.2	470.2	FMB
M21.062.07	19.9	14.91	31355	139 476	68.2	470.1	FMB
M21.062.08	20.03	14.63	31176	138 677	68.6	473.2	FMB
M21.062.09	20	14.68	32235	143 387	70.8	488.4	FMB
M21.062.10	19.95	14.87	32006	142 371	69.6	479.9	FMB
M21.062.11	19.99	14.82	31700	141 008	69	476	FMB
M21.062.12	19.99	14.53	31395	139 653	69.7	480.8	FMB

(Fuente: Propia)

En el ANEXO VIII se presenta el informe completo emitido por el LAEV donde se mencionan las condiciones a las cuales se practicó el ensayo.

Para una mejor interpretación de resultados se promedió los valores de carga máxima y resistencia a la tracción de las dos probetas de cada placa soldada, es así que, se usa una codificación general para los resultados, dichos valores promedio se encuentran tabulados en la tabla 3.7

El calor de entrada es uno de los parámetros de mayor importancia para determinar las propiedades de las probetas, es así que se presenta un ejemplo de cálculo del calor de entrada del primer pase de la placa S-P1-0R, el cálculo completo para el calor de entrada se detalla en el ANEXO IX

$$Q = \frac{V \cdot A \cdot T}{s} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Q = Calor de entrada

V = Voltaje [v]

A = Amperaje [a]

T = Eficiencia térmica de cada proceso

s = Velocidad de avance [mm/s]

En la tabla 3.6 se muestran las características del primer pase de la placa S-P1-0R.

Tabla 3.6. Características del primer pase placa S-P1-0R.

Voltaje [V]	Amperaje [A]	Velocidad de avance [mm/s]	Tiempo de pase de soldadura [min]
60	80	2,82	2,07

(Fuente: Propia)

Reemplazando los valores en la Ec 1 se obtiene.

$$Q = \frac{60 * 80 * 0,8}{2,82} \equiv 1,36 \left[\frac{kJ}{mm} \right]$$

Tabla 3.7. Valores promedio por placa de carga máxima y resistencia a la tracción registrados en el ensayo de tracción.

Código de la placa soldada	Calor de entrada [KJ/mm]	Valor promedio de carga máxima [kN]	Valor promedio de resistencia a la tracción [Mpa]	% de Elongación
Material base	0	137.686	452.5	45
S-P1-0R	2,6	139.2915	472.4	29
S-P2-1R	2.53	141.2475	473.1	27
S-P3-2R	2.69	137.447	471.95	30
SF-P4-0R	2,00	139.0765	471.65	33
SF-P5-1R	1,92	142.879	484.15	34
SF-P6-2R	2,19	140.3305	478.4	33

(Fuente: Propia)

En la figura 3.1 se presenta las gráficas de carga máxima registrada vs entrada de calor y en la figura 3.2 se muestra la gráfica de resistencia a la tracción Vs entrada de calor para los valores de ensayo tabulados en la tabla 3.7

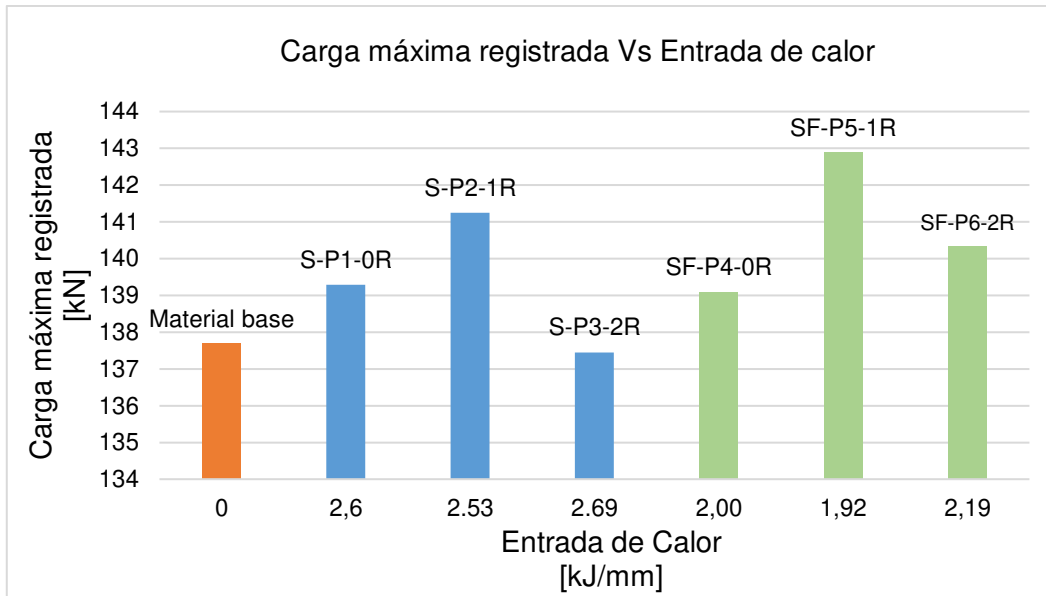


Figura 3.1. Carga máxima registrada vs entrada de calor.
(Fuente: Propia)

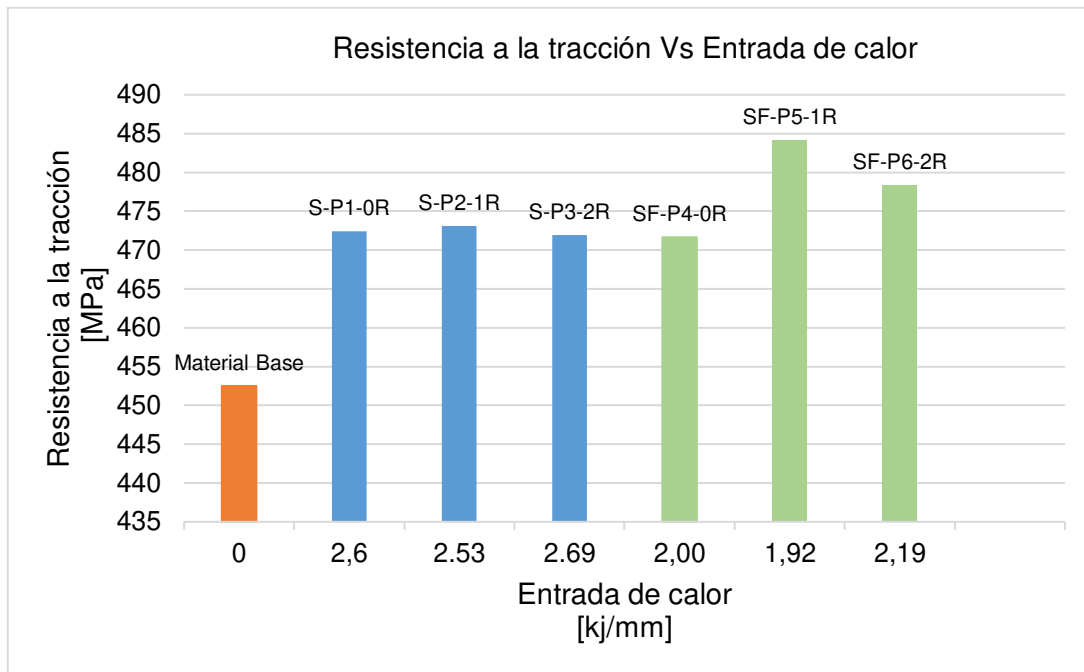


Figura 3.2. Resistencia a la tracción vs entrada de calor
(Fuente: Propia)

La tablas 3.8 y 3.9 muestran los porcentajes de variación de los valores de carga máxima entre las probetas ensayas y el material base.

Tabla 3.8. Comparación de carga máxima registrada para las probetas del proceso “A”.

Carga máxima registrada	S-P1-0R	S-P2-1R	S-P3-2R
Material Base	↑ 1.17 %	↑ 2.59 %	↓ 0.17 %

(Fuente: Propia)

Tabla 3.9. Comparación de carga máxima registrada para las probetas del proceso “B”.

Carga máxima registrada	SF-P4-0R	SF-P5-1R	SF-P6-2R
Material Base	↑ 1 %	↑ 3.77 %	↑ 1.92%

(Fuente: Propia)

↑ denota un incremento

↓ denota una disminución

(Nota: La tabla es una comparación de filas con respecto a columnas.)

Las tablas 3.10 y 3.11 muestran los porcentajes de variación de los valores de resistencia a la tracción entre las probetas ensayas y el material base.

Tabla 3.10. Comparación de resistencia a la tracción para las probetas del proceso “A”.

Resistencia a la tracción	S-P1-0R	S-P2-1R	S-P3-2R
Material Base	↑ 4.39 %	↑ 4.55 %	↑ 4.29 %

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Comparación de resistencia a la tracción para las probetas del proceso “B”.

Resistencia a la tracción	SF-P4-0R	SF-P5-1R	SF-P6-2R
Material Base	↑ 4.23. %	↑ 7 %	↑ 5.72%

(Fuente: Propia)

↑ denota un incremento

↓ denota una disminución





(Nota: La tabla debe leerse como una comparación de filas con respecto a columnas.)

3.3 Resultados doblado lateral

Las tablas 3.12 a la 3.17 muestran los resultados de los ensayos de doblado lateral aplicado a las probetas mencionadas en la sección 2.13 donde se detalla las indicaciones encontradas. Las dimensiones de dichas indicaciones permiten catalogar

como aptas o no las probetas de ensayo, según lo expuesto en AWS D1.1. detallado en la sección 2.13.

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-S-P1-0R.

Código	ED-S-P1-0R-1	Indicaciones.
		Presenta una discontinuidad superficial de 0.96 [mm]
Código	ED-S-P1-0R-2	Indicaciones.
		Presenta una discontinuidad superficial de 1.15 [mm]
Código	ED-S-P1-0R-3	Indicaciones.
		No presenta discontinuidades
Código	ED-S-P1-0R-4	Indicaciones.
		No presenta discontinuidades

(Fuente: Propia)

Tabla 3.13. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-S-P2-1R.

Código	ED-S-P2-1R-1	Indicaciones.
		<p>La probeta no presenta discontinuidades.</p>
		<p>La probeta presenta una discontinuidad de 0,86 [mm]</p>
		<p>La probeta no presenta discontinuidades.</p>
		<p>La probeta no presenta discontinuidades.</p>

(Fuente: Propia).

Tabla 3.14. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-S-P3-2R.

Código	ED-S-P3-2R-1	Indicaciones.
		<p>La probeta no presenta discontinuidades.</p>
	ED-S-P3-2R-2	<p>La probeta presenta una discontinuidad de 0,84 [mm]</p>
	ED-S-P3-2R-3	<p>La probeta no presenta discontinuidades.</p>
	ED-S-P3-2R-4	<p>La probeta no presenta discontinuidades.</p>





(Fuente: Propia)

Tabla 3.15. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-SF-P4-0R.

Código	ED-SF-P4-0R-1	Indicaciones.
		La probeta presenta una discontinuidad de 1 [mm]
Código	ED-SF-P4-0R-2	Indicaciones.
		La probeta no presenta discontinuidades.
Código	ED-SF-P4-0R-3	Indicaciones.
		La probeta no presenta discontinuidades.
Código	ED-SF-P4-0R-4	Indicaciones.
		La probeta no presenta discontinuidades.





(Fuente: Propia)

Tabla 3.16. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-SF-P5-1R

Código	ED-SF-P5-1R-1	Indicaciones.
	<p data-bbox="815 472 1331 539">Presenta una discontinuidad superficial de 2.1 [mm]</p>	
Código	ED-SF-P5-1R-2	Indicaciones.
	<p data-bbox="874 880 1267 913">No presenta discontinuidades</p>	
Código	ED-SF-P5-1R-3	Indicaciones.
	<p data-bbox="874 1245 1267 1279">No presenta discontinuidades</p>	
Código	ED-SF-P5-1R-4	Indicaciones.
	<p data-bbox="874 1619 1267 1653">No presenta discontinuidades</p>	

(Fuente: Propia)

Tabla 3.17. Resultados del ensayo de doblado practicados al grupo de probetas ED-SF-P6-2R.

Código	ED-SF-P6-2R-1	Indicaciones.
	<p>No presenta discontinuidades</p>	
Código	ED-SF-P6-2R-2	Indicaciones.
	<p>No presenta discontinuidades</p>	
Código	ED-SF-P6-2R-3	Indicaciones.
	<p>No presenta discontinuidades</p>	
Código	ED-SF-P6-2R-4	Indicaciones.
	<p>Presenta una discontinuidad superficial de 0.7 [mm]</p>	

(Fuente: Propia)

En la tabla 3.18 se muestra un resumen de las discontinuidades detectadas en el ensayo de doblado lateral, las probetas son aceptadas o rechazadas según los criterios expuestos por el código AWS D1.1 detallados en la sección 2.14.

Tabla 3.18. Resumen de las discontinuidades detectadas en el ensayo de doblado lateral.

Código de la probeta		Discontinuidades detectadas	Dimensión [mm]	Calificación de la junta según AWS D1.1.
Junta soldada	Código de la Probeta			
S-P1-0R	ED-S-P1-0R-1	Fisura en el cordón	0.96	Aceptada
	ED-S-P1-0R-2	Fisura en el cordón	1.15	Aceptada
	ED-S-P1-0R-3	-	-	Aceptada
	ED-S-P1-0R-4	-	-	Aceptada
S-P2-1R	ED-S-P2-1R-1	-	-	Aceptada
	ED-S-P2-1R-2	Fisura en el cordón	0.86	Aceptada
	ED-S-P2-1R-3	-	-	Aceptada
	ED-S-P2-1R-4	-	-	Aceptada
S-P3-2R	ED-S-P3-2R-2	-	-	Aceptada
	ED-S-P3-2R-3	Fisura en el cordón	0.86	Aceptada
	ED-S-P3-2R-4	-	-	Aceptada
	ED-S-P3-2R-5	-	-	Aceptada
SF-P4-0R	ED-SF-P4-0R-1	Fisura en el cordón	1	Aceptada
	ED-SF-P4-0R-2	-	-	Aceptada
	ED-SF-P4-0R-3	-	-	Aceptada
	ED-SF-P4-0R-4	-	-	Aceptada
SF-P5-1R	ED-SF-P5-1R-1	Fisura en el cordón	2.1	Aceptada
	ED-SF-P5-1R-2	-	-	Aceptada
	ED-SF-P5-1R-3	-	-	Aceptada
	ED-SF-P5-1R-4	-	-	Aceptada
SF-P6-2R	ED-SF-P6-1R-1	-	-	Aceptada
	ED-SF-P6-1R-2	-	-	Aceptada
	ED-SF-P6-1R-3	-	-	Aceptada
	ED-SF-P6-1R-4	Fisura en el cordón	0.7	Aceptada

(Fuente: Propia)

3.4 Resultados micrografía

En las tablas 3.19 a la 3.25 se muestran los resultados de los análisis de micrografía aplicados a las probetas detalladas en la sección 2.14, dicho análisis se enfoca en las zonas de interés como la ZAC y el MA para cada una de las 6 probetas detalladas. En cuanto al material base, se observó una microestructura frecuente en todos los casos, razón por la cual su análisis es presentado solo una vez.

Para simplificar los resultados se tiene

α_s Bainita superior.

α_i Bainita inferior.

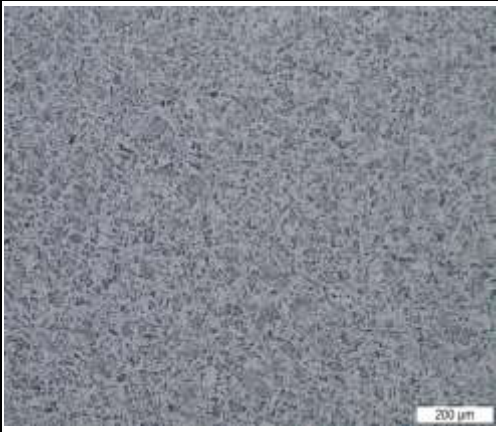
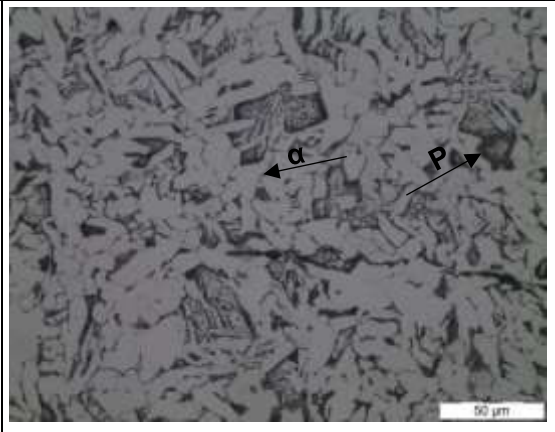
α_{Ac} Ferrita acicular

α Ferrita

α_w Ferrita widmanstatten

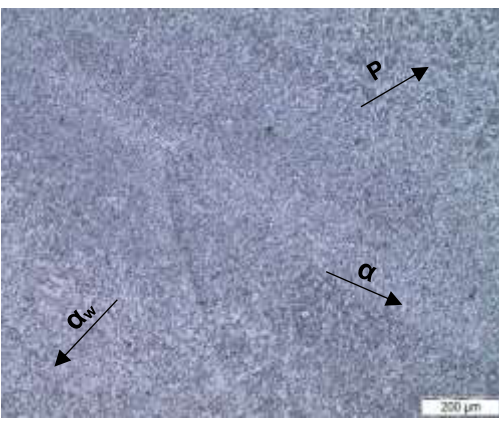
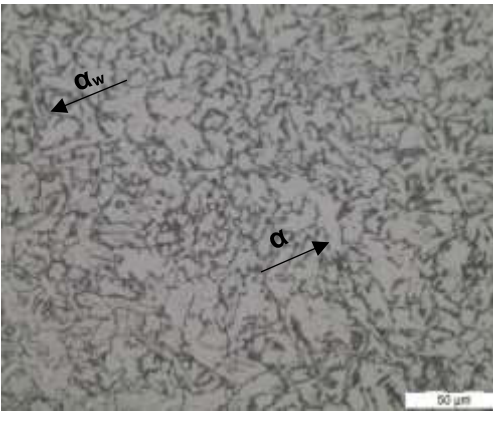
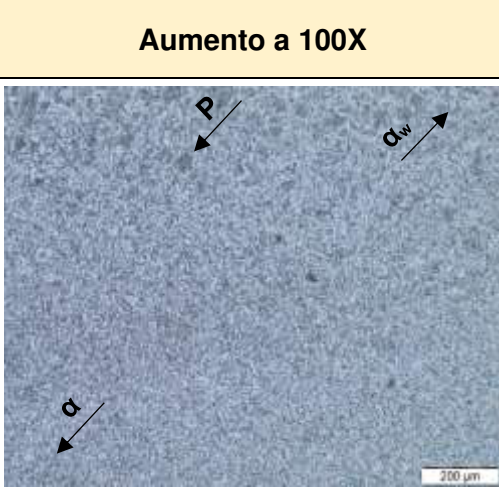
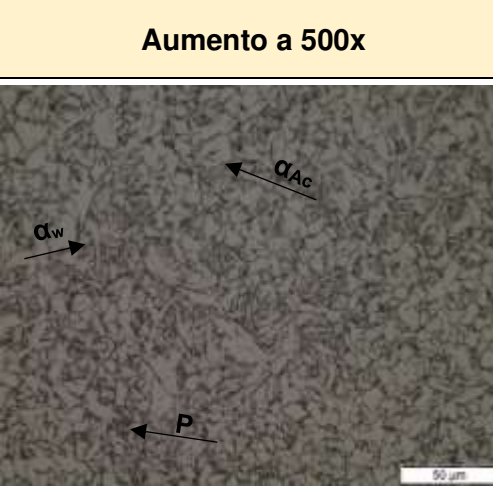
P Perlita

Tabla 3.19. Análisis microestructural del material base, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x

Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
Material Base		
	<p>El material base mantuvo una microestructura compuesta por granos de ferrita y colonias de perlita.</p>	<p>Con un mayor aumento óptico se pudo apreciar pequeñas colonias de perlita fina y granos de ferrita.</p>

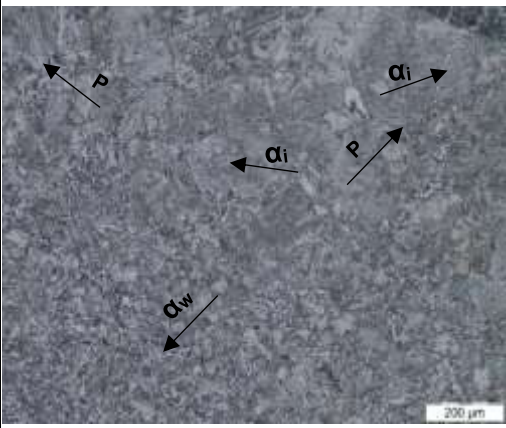
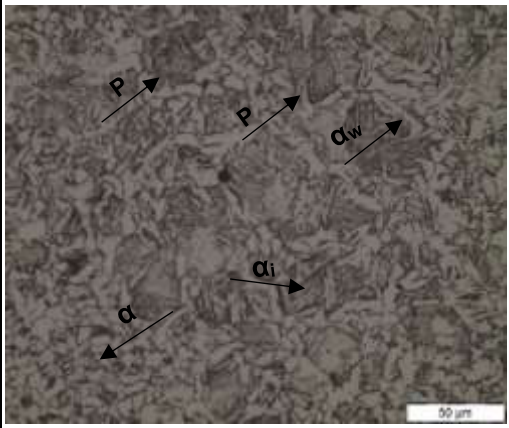
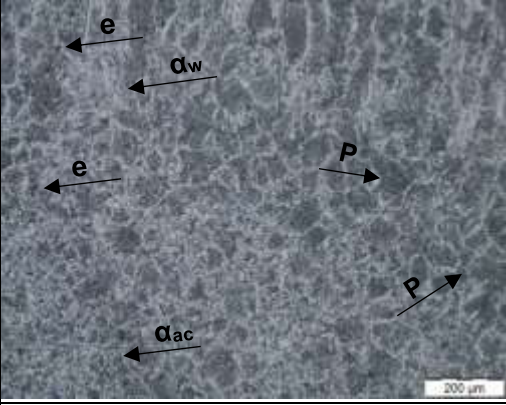
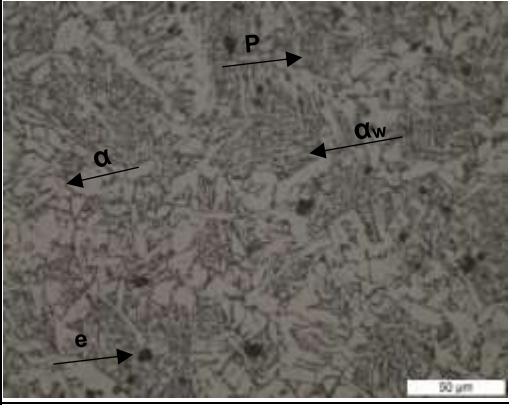
(Fuente: Propia)

Tabla 3.20. Análisis microestructural de la probeta P1-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x

Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
P1-21-038 Zona afectada por el calor	 <p data-bbox="395 801 896 1048">Se observan distintos tamaños de grano que corresponden a las zonas afectadas térmicamente, se apreció microestructuras del tipo ferrita widmanstatten y granos de ferrita.</p>	 <p data-bbox="906 801 1401 1048">En la zona afectada por el calor se observa una estructura compuesta por una estructura predominante de ferrita y colonias de perlita en los bordes de grano.</p>
P1-21-038 material de aporte	 <p data-bbox="395 1563 896 1794">La zona que comprende el material de aporte mostró una microestructura del tipo ferrítica con presencia de algunas colonias de perlita y poca presencia de ferrita widmanstatten.</p>	 <p data-bbox="906 1563 1401 1794">Con un mayor aumento óptico en el microscopio se observó ferrita widmanstatten y ferrita acicular en el cordón de soldadura.</p>

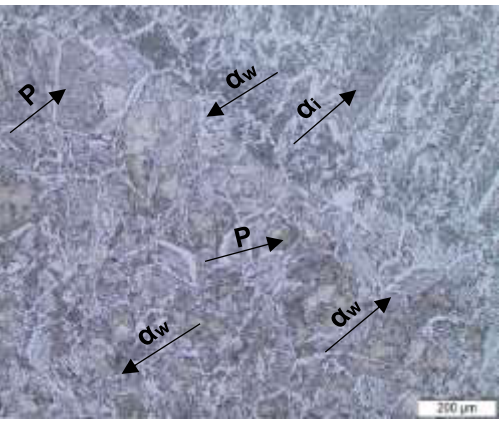
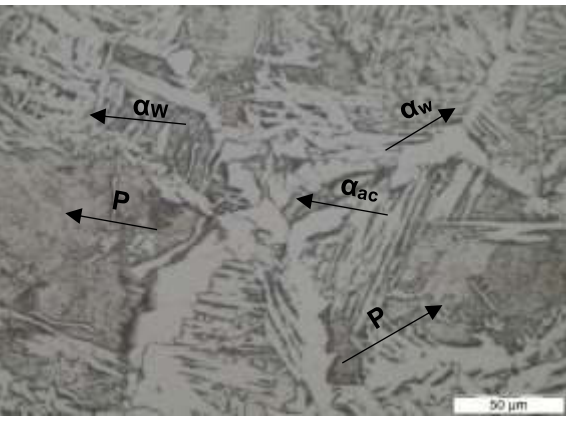
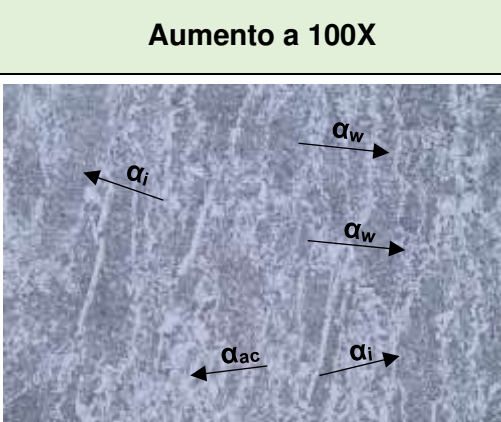
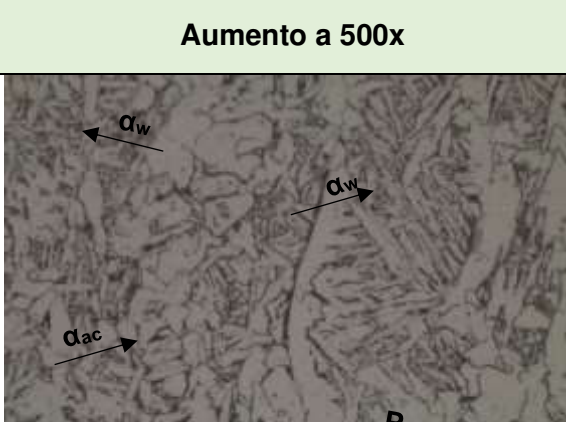
(Fuente: Propia)

Tabla 3.21. Análisis microestructural de la probeta P2-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x

Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
P2-21-038 Zona afectada por el calor	 <p>Se observó microestructuras como colonias de perlita, ferrita widmanstatten y estructuras de bainita inferior.</p>	 <p>A un aumento óptico mayor, la probeta presentó una microestructura de granos de ferrita, ciertas colonias de perlita y granos de ferrita widmanstatten y bainita inferior</p>
Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
P2-21-038 Material de aporte	 <p>Se divisó granos de ferrita acicular, ferrita widmanstatten, algunas colonias de perlita y la presencia de inclusiones de escoria en la zona correspondiente al cordón de soldadura.</p>	 <p>Se pudo observar una microestructura de ferrítica acicular y ferrita widmanstatten rodeada en los bordes de grano por perlita. Además de inclusiones referentes al proceso de soldadura.</p>

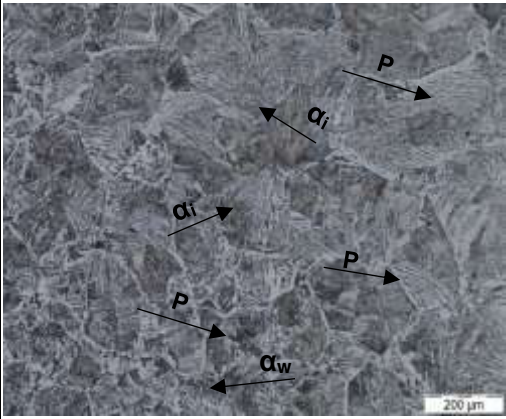
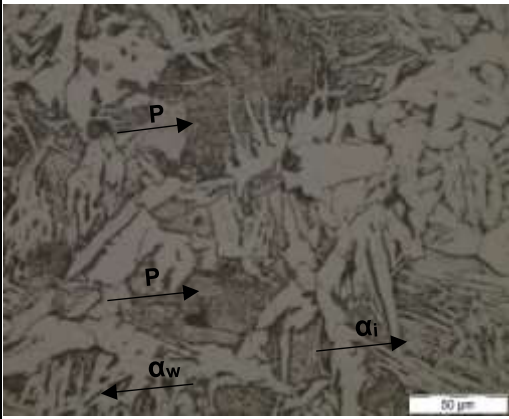
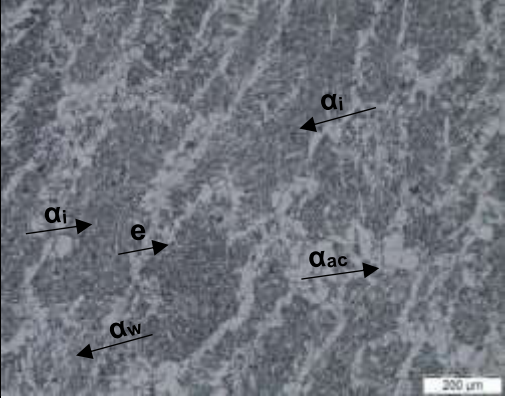
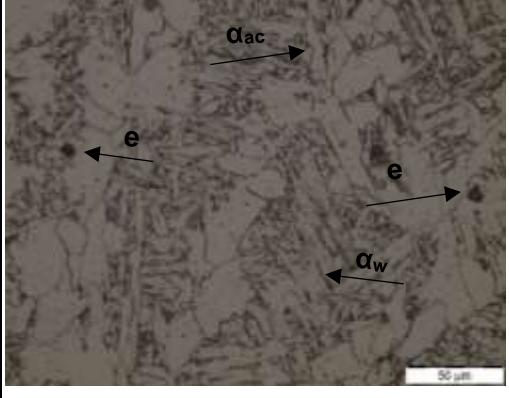
(Fuente: Propia)

Tabla 3.22. Análisis microestructural de la probeta P3-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x

Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
<p>P3-21-038</p> <p>Zona afectada por el calor</p>	 <p>Se pudo observar colonias de perlita además de ferrita widmanstatten y estructuras de tipo bainita inferior.</p>	 <p>Se pudo distinguir ferrita widmanstatten rodeada por colonias de perlita, además de la presencia de ferrita acicular con granos de diferentes tamaños orientados caóticamente.</p>
<p>P3-21-038</p> <p>Material de aporte</p>	 <p>Se pudo apreciar microestructuras de ferrita widmanstatten y granos de ferrita acicular, además de bainita inferior.</p>	 <p>La microestructura mostró ferrita widmanstatten rodeada de perlita en los bordes de grano, también se pudo notar la presencia de ferrita acicular.</p>

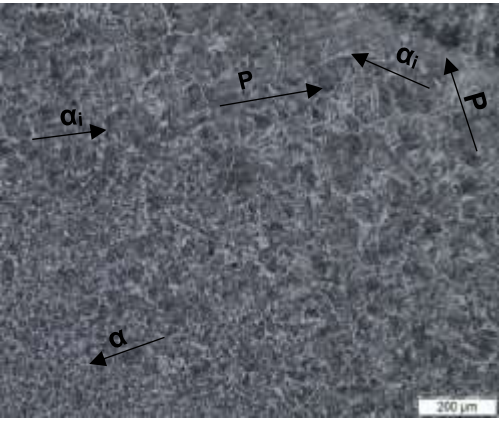
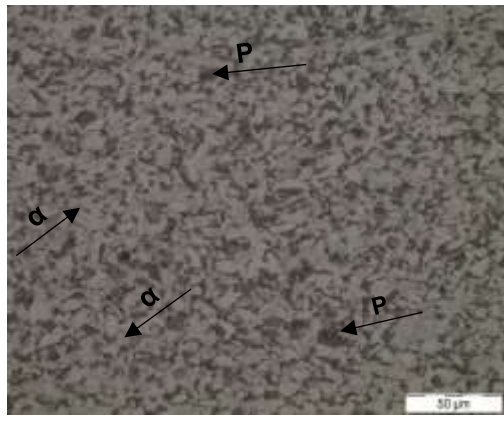
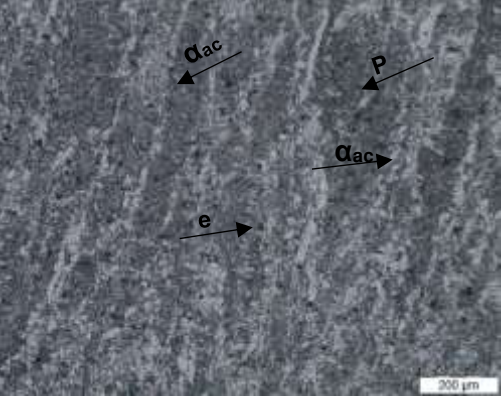
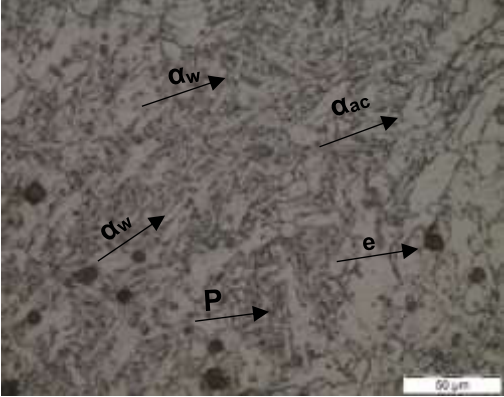
(Fuente: Propia)

Tabla 3.23. Análisis microestructural de la probeta P4-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x

Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
P4-21-038 Zona afectada por el calor		
	La micrografía mostró una estructura conformada por bainita inferior, ferrita widmanstatten, además de colonias de perlita.	Se puede apreciar colonias de perlita fina, ferrita widmanstatten y estructuras formadas por bainita.
Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
P4-21-038 Material de aporte		
	Presentó una estructura bainítica junto con granos de ferrita acicular, ferrita widmanstatten y pocas inclusiones del proceso de soldadura.	Se pudo apreciar una microestructura formada por ferrita widmanstatten y ferrita acicular rodeadas por colonias de perlita fina además de ciertas inclusiones.

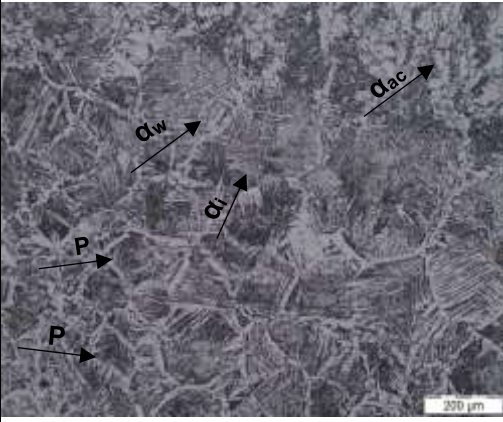
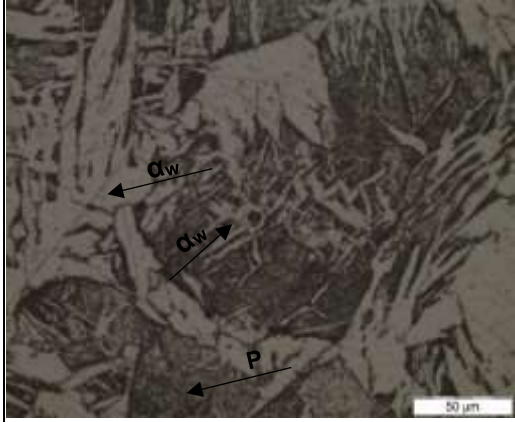
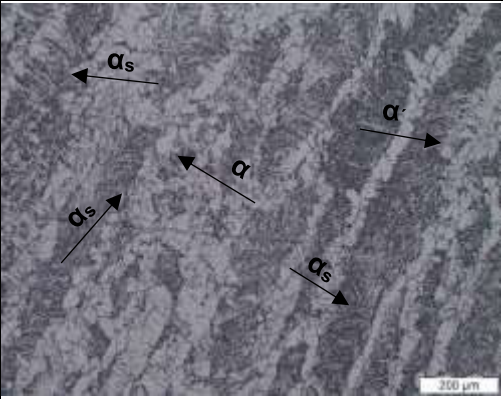
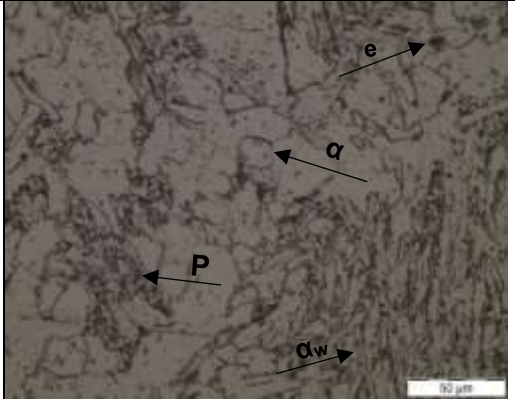
(Fuente: Propia)

Tabla 3.24. Análisis microestructural de la probeta P5-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x

Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
<p>P5-21-038 Zona Afectada por el calor</p>		
	<p>Se pudo apreciar granos de ferrita rodeada por perlita en los bordes de grano, también se hacen evidentes estructuras bainíticas.</p>	<p>Puede apreciarse de igual manera las estructuras ferrítico-perlíticas antes mencionadas.</p>
Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
<p>P5-21-03 Material de aporte</p>		
	<p>Existió una gran tendencia de inclusiones referentes al proceso de soldadura, la microestructura está formada principalmente por ferrita acicular y perlita fina</p>	<p>La microestructura consistió en ferrita widmanstatten rodeada por perlita fina en los bordes de grano, es notable la mayor cantidad de inclusiones en comparación de otras micrografías.</p>

(Fuente: Propia)

Tabla 3.25. Análisis microestructural de la probeta P6-21-038, aplicado a un aumento óptico de 100x y 500x

Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
P6-21-038 Zona Afectada por el calor		
	Se apreció varias microestructuras como ferrita widmanstatten y ferrita acicular, colonias de perlita y algunas estructuras bainíticas.	Se pudo notar de mejor manera las microestructuras perlíticas y los granos de ferrita widmanstatten.
Código de la probeta	Aumento a 100X	Aumento a 500x
P6-21-038 Material de aporte		
	La microestructura mostró la presencia de bainita superior, ferrita y perlita fina en los bordes de grano.	Se puede distinguir una microestructura compuesta por ferrita, ferrita widmanstatten y perlita en los bordes de grano. Además de la existencia de inclusiones de escoria referentes a la soldadura.

(Fuente: Propia)

El tamaño de grano de la ZAC en las probetas ensayadas se cuantificó en base al método propuesto en ASTM E112. El ejemplo de cálculo se muestra en el Anexo XII. La tabla 3.26 muestra los valores del tamaño de grano obtenidos en cada probeta.

Tabla 3.26. Valores del tamaño de grano medidos según ASTM E112.





Código	Número de grano según ASTM	Tamaño de grano promedio [μm]
Material Base	10	11,2
S-P1-0R	10	11,2
S-P2-1R	11	7,9
S-P3-2R	10	11,2
SF-P4-0R	10	11,2
SF-P5-1R	10	11,2
SF-P6-2R	8	20


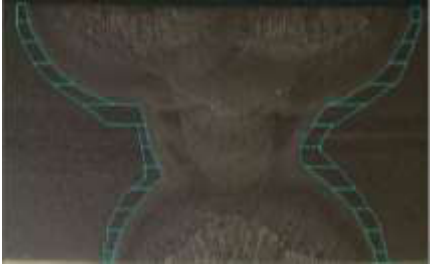






(Fuente: Propia,)

3.5 Resultados macrografía.

En la tabla 3.27. se muestra una ampliación a 0.5X del cordón final de soldadura para cada una de las probetas ensayadas. Dichas macrografías permiten identificar a mayor detalle el material base, las zonas que componen la ZAC y el material de aporte.

Tabla 3.27. Macrografías de las probetas con el área de la ZAC.

S-P1-0R	
	
Magnificación: 0,5x. Macrografía probeta 1	Magnificación: 0,5x. ZAC resaltada de la probeta 1.
S-P2-1R	
	
Magnificación: 0,5x. Micrografía probeta 2.	Magnificación: 0,5x. ZAC resaltada de la probeta 2.

S-P3-2R	
	
Magnificación: 0,5x. Macrografía probeta 3	Magnificación: 0,5x. ZAC resaltada de la probeta 3.
SF-P4-0R	
	
Magnificación: 0,4x. Macrografía probeta 4	Magnificación: 0,4x. ZAC resaltada de la probeta 4.
SF-P5-1R	
	
Magnificación: 0,4x. Macrografía probeta 5	Magnificación: 0,4x. ZAC resaltada de la probeta 5.
SF-P6-2R	
	
Magnificación: 0,5x. Macrografía probeta 6.	Magnificación: 0,5x. ZAC resaltada de la probeta 6.

(Fuente: Propia)

La zona afectada por el calor de cada macrografía fue resaltada mediante el uso del software AutoCAD y los valores del área de cada probeta se muestran detallados en la tabla 3.28.

Tabla 3.28. Área de la ZAC de cada probeta.

Probeta	Área de la ZAC [mm ²]	Porcentaje de variación
P1-21-038	25.48	-
P2-21-038	30.25	↑ 18.72 %
P3-21-038	28.83	↓ 4.69 %
P4-21-038	28.18	-
P5-21-038	36.17	↑ 28.35 %
P6-21-038	53.9	↑ 49.02 %

(Fuente: Propia)

↑ denota un incremento porcentual con respecto al área anterior.

↓ denota una disminución porcentual con respecto al área anterior.

3.6 Resultados dureza superficial.

En las tablas 3.29. a la 3.34 se presentan los datos de dureza obtenidos para las probetas descritas en la sección 2.17 en una escala de dureza Rockwell B. Debido al espesor de las probetas, se consideraron tres zonas como superior “fila 1”, media “fila 2”, inferior “fila 3” para realizar dicho mapeo de durezas.

En el análisis comparativo entre probetas se tomó como referencia a la indentación ubicada en la subzona de la ZAC más alejada del cordón, denomina “ZAC SC” o región de recocido subcrítico, misma que se esquematizó en la figura 1.15

Las gráficas 3.3 a la 3.8 muestran los resultados de dureza Vs distancia de cada zona para las probetas antes mencionadas.

Tabla 3.29. Mapeo de durezas para la probeta P1-21-038.

P1-21-038					
Dureza Fila 1	Distancia [mm]	Dureza Fila 2	Distancia [mm]	Dureza fila 3	Distancia [mm]
76	8.1	75	8.1	75	8
76	13	72	13	77	13.1
77	19.2	73	19.1	77	19
79	24	78	24	77	24
87	30.2	80	30	81	30
90	36	86	36.1	87	36.1

(Fuente: Propia)

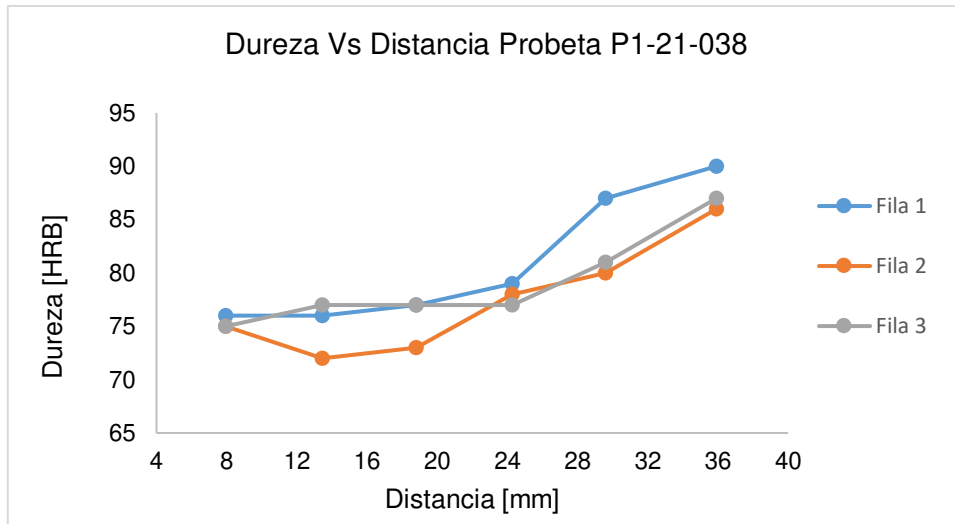


Figura 3.3. Gráfica de Dureza Vs Distancia para la probeta P1-21-038.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.30. Mapeo de durezas para la probeta P2-21-038.

P2-21-038					
Dureza fila 1	Distancia [mm]	Dureza fila 2	Distancia [mm]	Dureza fila 3	Distancia [mm]
78	6.5	75	6.3	78	7
81	12,5	77	13.3	82	13.8
82	18.8	79	19.9	79	19.7
91	25.2	89	25.5	82	25.7
87	31.2	88	31.9	88	32.2

(Fuente: Propia)

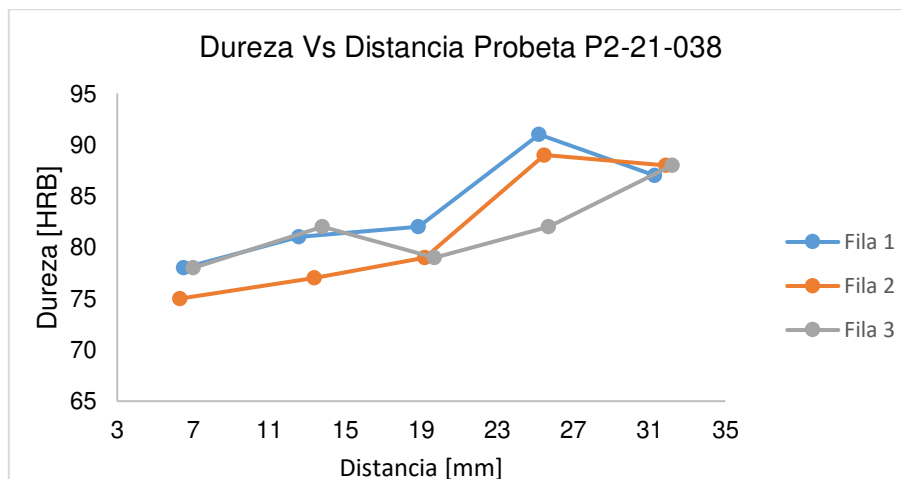


Figura 3.4. Gráfica de dureza vs distancia probeta P2-21-038.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.31. Mapeo de durezas para la probeta P3-21-038.

P3-21-038					
Dureza Fila 1	Distancia [mm]	Dureza Fila 2	Distancia [mm]	Dureza Fila 3	Distancia [mm]
77	16	72	16	78	16
79	21.3	73	21.3	77	21.3
78	26.8	73	26.8	77	26.8
83	32.2	74	32.2	75	32.2
86	38	75	38	79	38
85	43.4	85	43.4	84	43.4

(Fuente: Propia)

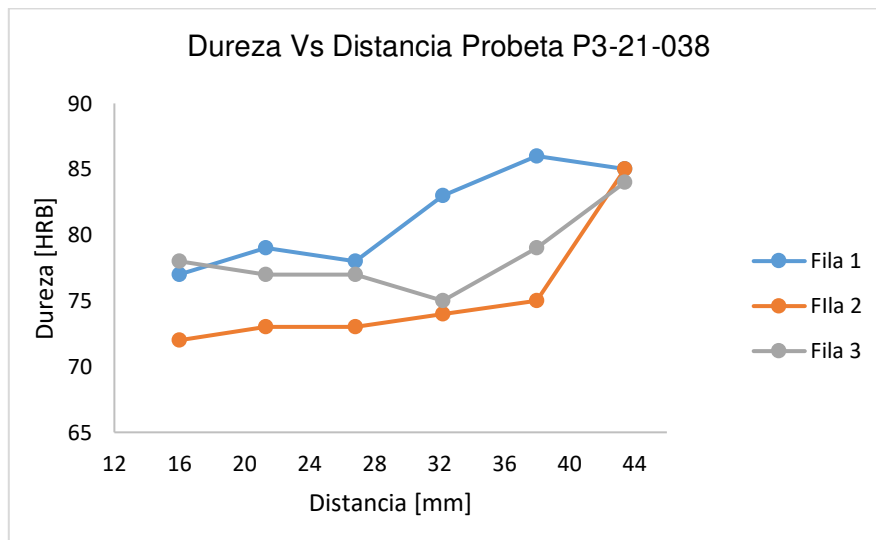


Figura 3.5. Gráfica de Dureza Vs Distancia para la probeta P3-21-038.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.32. Mapeo de durezas de la probeta P4-21-038.

P4-21-038					
Dureza fila 1	Distancia	Dureza fila 2	Distancia	Dureza fila 3	Distancia
76	7.8	76	7	76	6.8
77	14.3	75	13.3	76	13.8
74	20.4	73	20.4	76	20.6
78	26.7	74	26.2	77	26.5
88	33	82	32.5	92	32.5
88	39.1	86	38.8	91	39

(Fuente: Propia)

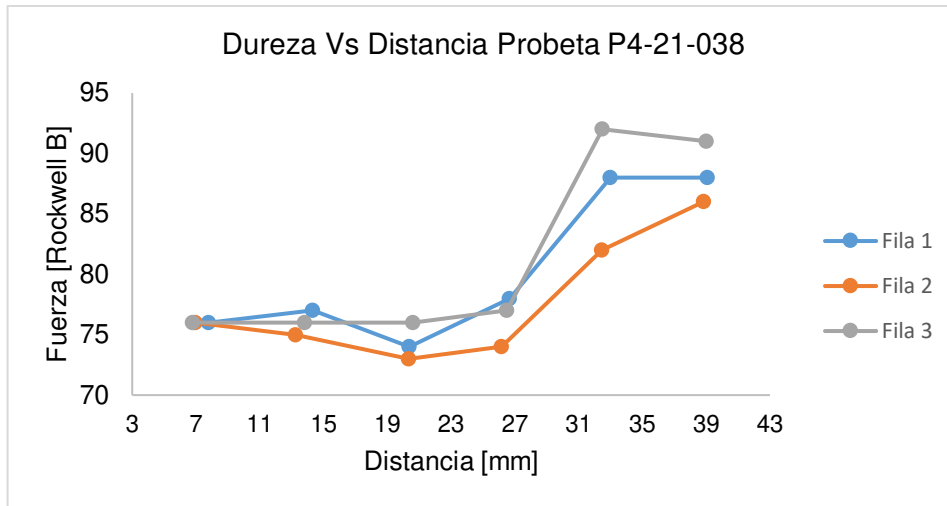


Figura 3.6. Gráfica de dureza vs distancia de la probeta P4-21-038.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.33. Mapeo de dureza probeta P5-21-038.

P5-21-038					
Dureza fila 1	Distancia [mm]	Dureza fila 2	Distancia [mm]	Dureza fila 3	Distancia [mm]
78	6.7	73	6.1	78	6.1
77	12.2	75	11.3	78	12.3
76	17.5	74	17.5	78	18.1
81	22.9	74	22.5	77	23.3
84	28.6	76	28.1	96	28.3
84	33.9	86	33.7	94	34.3

(Fuente: Propia)

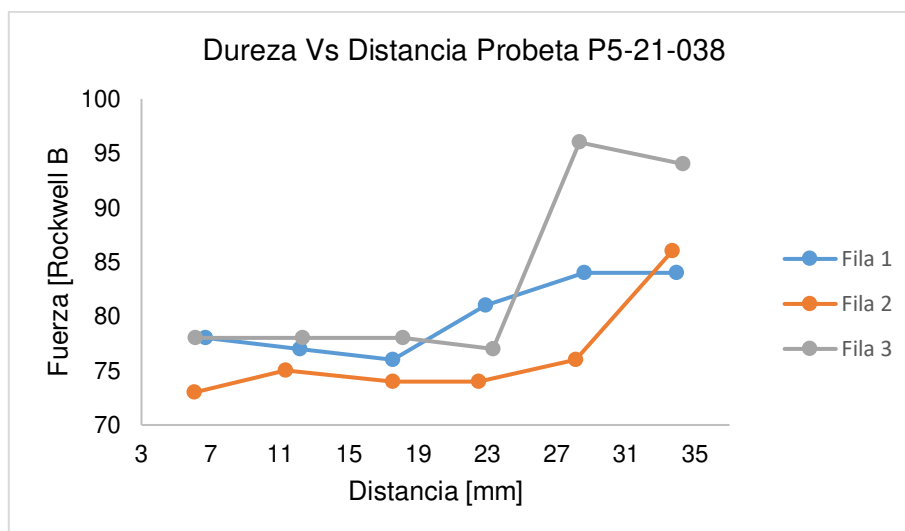


Figura 3.7. Gráfica de dureza vs distancia probeta P5-21-038.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.34. Mapeo de durezas de la probeta P6-21-038.

P6-21-038					
Dureza fila 1	Distancia [mm]	Dureza fila 2	Distancia [mm]	Dureza fila 3	Distancia [mm]
76	5.69	75	6.34	77	6.88
77	11.59	74	12.32	76	12.91
75	17.62	72	18.67	76	19.63
83	24.34	74	24.24	81	25.39
86	30.1	82	31.32	90	31.69
86	36.77	82	38.22	89	37.22

(Fuente: Propia)

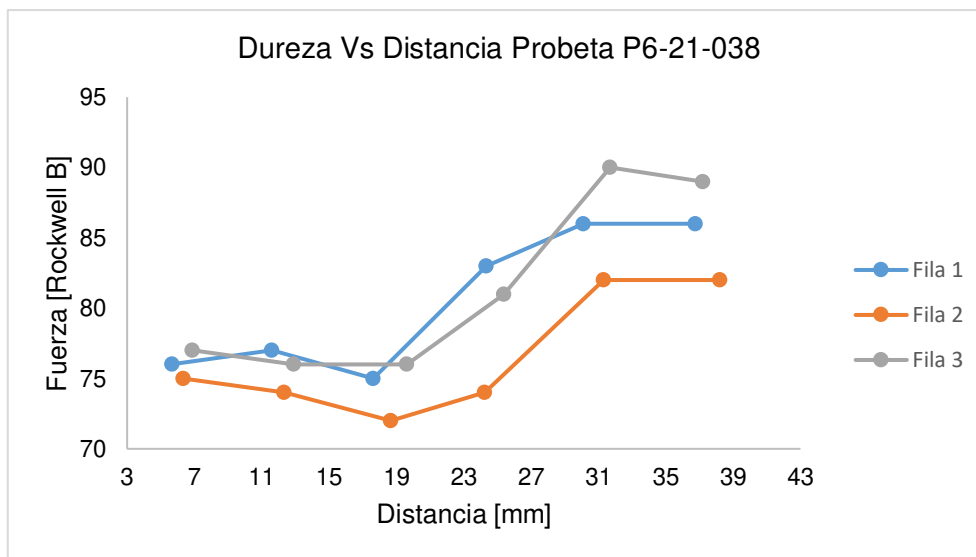


Figura 3.8. Gráfica de dureza vs distancia de la probeta P6-21-038.
(Fuente: Propia)

3.7 Discusión de resultados del ensayo de inspección visual.

En el análisis del ensayo de inspección visual aplicado a las juntas SF-P5-1R y SF-P6-2R no se encontraron mayores indicaciones en el cordón de soldadura. En tanto que para las juntas S-P1-0R, S-P2-1R, S-P3-2R, SF-P4-0R se pudo visualizar ciertas discontinuidades superficiales, detallas en la tabla 3.1.

Debido a sus dimensiones y ubicación dichas discontinuidades no son catalogadas como defectos. Por lo cual se garantiza la integridad de las juntas, calificándolas como aptas bajo los parámetros de inspección establecidos en AWS D1.1 mencionados en la sección 3.1 para el ensayo de inspección visual.

3.8 Discusión de resultados del ensayo de radiografía industrial.

Como se muestra en la tabla 3.3. las láminas radiográficas no presentaron discontinuidades volumétricas que impliquen descartar las juntas.

A manera general, en ambos procedimientos de soldadura se pudo distinguir la presencia de poros menores en zonas descartables del cordón con dimensiones de 1 [mm] y salpicaduras cercanas al cordón con una dimensión máxima de 2 [mm]. Estas dimensiones se encuentran dentro de los límites tolerables de aceptación propuestos en la norma AWS D1.1 mencionadas en la tabla 2.15, lo que indica que todas las placas cumplen con los parámetros de aceptación y son catalogadas como aceptadas. El reporte realizado por el laboratorio de ensayos no destructivos de la EPN se muestra en el ANEXO X.

3.9 Discusión de resultados del ensayo de tracción.

En las figuras 3.1 y figura 3.2 se puede apreciar una tendencia de incremento en las propiedades de las probetas sometidas a una reparación. Es evidente que al soldar por primera vez se incrementa el valor de carga máxima y resistencia a la tracción en comparación con el material base, este comportamiento puede explicarse como efecto a la mejoría de la resistencia en la junta proporcionada por el material de aporte, ya que su resistencia es superior a la otorgada por el material base.

Con el primer proceso de reparación, se tiene un incremento del 2.59 % y 3.77 % para el proceso "A" y "B" respectivamente en términos de la carga máxima soportada en comparación al material base. Esto se debe a que se produjo un leve refinamiento de grano en la ZAC causado por el nuevo cordón de soldadura, el cual proporciona un aporte de calor sobre la anterior zona afectada térmicamente, deduciendo que la eliminación parcial de la anterior ZAC y el nuevo aporte de calor generan una disminución de las tensiones residuales en la junta.

Para las probetas S-P3-2R y SF-P3-2R que se sometieron a dos reparaciones se apreció un menor desempeño de propiedades mecánicas, esto puede relacionarse con la acumulación de defectos causados por los previos trabajos de reparación, los cuales pudieron introducir partículas de material debido a una insuficiente limpieza de la herramienta y el bisel.

Es decir, a mayor cantidad de reparaciones, mayor es la tendencia de causar defectos en la junta. Además, dichas probetas estuvieron sometidas a repetidos ciclos de calentamiento y enfriamiento acumulando tensiones internas.

Es preciso notar que la probeta S-P3-2R no cumple que con los requisitos de aceptación presentados la sección 2.13 puesto que su valor de resistencia a la tracción es menor que la del material base.

Se puede notar que el proceso combinado SMAW-FCAW tuvo mejores resultados en cuanto a propiedades mecánicas que el proceso simple SMAW, puesto que la entrada de calor para cada una de las placas fue menor en dicho procedimiento.

3.10 Discusión de resultados del ensayo de doblado lateral.

El análisis del ensayo de doblado lateral no mostró discontinuidades superficiales que puedan descartar las juntas. La probeta ED-SF-P5-1R- sobre la cual se aplicó una reparación al cordón presentó la discontinuidad más pronunciada con 2.1 [mm] de longitud, pese a esto, la probeta se encuentra aún dentro de los límites aceptables por el código AWS D1.1.

La menor concentración de discontinuidades se encuentra en la probeta ED-SF-P6-2R misma que presenta dos procesos de reparación, mientras que la probeta ED-S-P1-0R-1 expuso una mayor cantidad de indicaciones, marcando que no existe una relación o tendencia a la aparición de discontinuidades post ensayo al aumentar el número de reparaciones, estableciendo que los procesos de reparación no tienen relevancia en este ensayo.

3.11 Discusión de resultados del ensayo de micrografía

El ensayo metalográfico aplicado a las probetas descritas en la tabla 2.27, reveló las microestructuras presentes en las diferentes zonas de interés: MB, ZAC, MA.

Para el material base se observó que las juntas mantuvieron en una microestructura compuesta por granos de ferrita y de perlita. A un mayor aumento óptico se pudo apreciar colonias de perlita rodeando los granos de ferrita.

Las micrografías ensayadas para las probetas del proceso "A", mostraron que en la zona afectada por el calor se tiene una microestructura conformada por ferrita widmanstatten, ferrita acicular, colonias de perlita y bainita superior, esto se contrastó con las micrografías esperadas según la curva CCT del acero S355 para una velocidad de enfriamiento al ambiente estimada de 10 °[C/s] como se muestra en el ANEXO [XI]. Cabe recalcar que el acero S355 es el equivalente europeo del acero normado ASTM A572.

Las probetas P2-21-038 y P3-21-038 del proceso "A", evidenciaron varias zonas bainíticas y perlíticas en la ZAC, lo cual explica la elevada concentración de dureza en la zona afectada por el calor.

Para el procedimiento "B", se pudo notar que las probetas ensayadas mantenían ferrita acicular, ferrita widmanstatten y bainita como microestructura predominante. En la probeta P6-21-038 se visualizó zonas de bainita superior y colonias de perlita, misma que incrementan la dureza dentro de la ZAC.

En cuanto al material de aporte, en el procedimiento "A" se registró una microestructura predominante de perlita y ferrita widmanstatten, en la probeta P3-21-038 además de las microestructuras mencionadas se evidenció la presencia de ferrita acicular, se encontró pocas inclusiones de escoria referentes al proceso de soldadura.

Para el procedimiento "B" se pudo notar que la microestructura bainítica inferior estuvo presente en casi todas las probetas dando como cualidad una elevada dureza del cordón, además en la probeta P6-21-038 se pudo distinguir ciertas porciones del cordón con bainita superior. La presencia de inclusiones de escoria fue mayor en el procedimiento "B" en comparación con el procedimiento "A", esto debido a factores propios del proceso de soldadura y material de aporte utilizado.

3.12 Discusión de resultados del ensayo de macrografía.

En la sección 3.5 se observan las macrografías de cada una de las probetas, las cuales muestran el tamaño del cordón y la ZAC. El porcentaje de incremento de la ZAC para la primera reparación alcanzó el 18.72 % mientras que se evidenció una disminución del 4.59 % en la segunda reparación, cuando las juntas fueron soldadas bajo el procedimiento "A".

De la misma manera, para el procedimiento "B", se mantiene la tendencia de incremento en la ZAC y el cordón con valores de hasta el 49.02 % más en el área afectada térmicamente de la junta sometida a dos reparaciones.

El aumento del cordón de soldadura se debe a la necesidad de desbastar el cordón dejando únicamente el pase de raíz, pero a su vez, este proceso elimina parte del material base haciendo que en cada reparación el bisel sea aún más grande.

De igual manera, la zona afectada por el calor de cada cordón crece con el proceso de reparación. Esto se debe a la eliminación de una parte de la zona afectada anterior con el desbaste y la nueva ZAC crece con cada nuevo proceso de soldadura. Esto se evidencia con las áreas mostradas en la tabla 3.28.

3.13 Discusión de resultados del ensayo de dureza superficial.

Las probetas ensayadas presentaron diferentes zonas afectadas térmicamente, dichas zonas están delimitadas por subzonas con distintas microestructuras de diverso tamaño de grano y dureza.

Para cada proceso se mantuvo constante los parámetros de soldadura, exceptuando la entrada de calor, misma que varió en función del número las reparaciones. Este factor influye directamente en la microestructura. El aumento de la entrada de calor da como resultado velocidades de enfriamiento más lentas si otros factores se mantienen constantes.” Teniendo como consecuencia una nucleación más pausada con tendencia a granos más gruesos y por lo tanto con menor dureza” [20].

Es así como, se seleccionan las probetas con mayor entrada de calor, siendo estas P3-21-038 y P6-21-038 para los procesos simple y combinado con valores de dureza de 78 HRB y 72 HRB respectivamente. Para el procedimiento “B” se ratifica que la dureza es menor con un enfriamiento más lento.

Los mayores valores de dureza se encontraron en las probetas P2-21-038 con valores de 80 HRB para una estructura bainítica con presencia de ferrita widmanstatten y P5-21-038 con un valor de dureza de 76 HRB para una microestructura conformada por perlita y bainita inferior, que le otorgan su elevado valor de dureza. Con lo ya expuesto se observó la tendencia antes mencionada de un incremento en la dureza a menores entradas de calor.

En cuanto al tamaño de grano se evidencio que para la primera reparación con el procedimiento A, se generó un leve refinamiento de grano, con tamaño de ASTM 10 a ASTM 11. Además, se notó que al aplicar más de una reparación se genera un leve crecimiento de grano, lo que causó la caída de la dureza en las juntas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se estableció que los cambios en las propiedades mecánicas de las juntas no varían significativamente con dos reparaciones, no obstante, se establece que el número óptimo de reparaciones en un acero estructural HSLA ASTM A 572 se reduce a una reparación, debido a que con cada soldadura las juntas se exponen a repetidos ciclos de calentamiento y enfriamiento, generando acumulación de tensiones residuales y por ende menores prestaciones mecánicas en dichas juntas.

El proceso de reparación tiene como consecuencia el crecimiento del bisel cada vez que se repara un cordón, necesitando más pases de soldadura para completar la junta, esto genera una mayor entrada de calor como se evidencia en las probetas S-P3-2R y SF-P6-2R sometidas a dos reparaciones. El incremento de la entrada de calor disminuye la velocidad de enfriamiento, lo que produjo un crecimiento de grano con menores características mecánicas y una dureza cercana a los 84 HRB en ambos casos.

- Se determinó que todas las juntas cumplen con los ensayos de calificación del procedimiento, por lo cual se seleccionaron las placas S-P2-1R y SF-P5-1R como valor óptimo de reparaciones, debido a que muestran mejores propiedades mecánicas y el calor de entrada a la junta es menor.

Los resultados del ensayo de tracción mostraron que dichas juntas mejoraron la resistencia a la tracción del material base en un 4.55% y 7% respectivamente (ver tablas 3.10 y 3.11). Esto se da como consecuencia del refinamiento de grano producido por la eliminación parcial de la ZAC y el nuevo aporte de calor del cordón de reparación. En cuanto a su microestructura, se evidenció la presencia bainita superior y perlita, que otorgan adecuados valores de dureza en rangos de 90 [HRB] y 84 [HRB] para dichas juntas.

- En el presente trabajo se propuso un máximo de dos reparaciones, al observar que la variación de resultados no es considerable, se puede plantear un futuro proyecto de investigación cuyo enfoque realice más de dos reparaciones, delimitando un rango significativo de variación en las propiedades mecánicas y así establecer el número máximo de reparaciones permitidas.

- Se estableció la Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) para los procedimientos “A” SMAW y procedimiento “B” combinado SMAW-FCAW, (ver ANEXO I y II) para conformar 6 placas generales de soldadura sobre las cuales se aplicaron cero, una y dos reparaciones (ver tabla 2.10). Además, se generó el procedimiento de reparación WPS (ver ANEXO III y IV) mismo que rige los procesos de desbaste y relleno del bisel.

Para garantizar los requisitos de calificación del WPS, se aplicaron ensayos destructivos y no destructivos dispuestos en el código de soldadura estructural AWS D1.1 sección 4 con la finalidad garantizar la fiabilidad del proceso. Todas las juntas ensayadas se catalogaron como aptas según los parámetros expuestos en dicho código.

- Se determinó que el ángulo de inclinación óptimo para el desbaste del cordón durante el proceso de reparación es de 30°, puesto que, con una inclinación diferente de la herramienta de corte, se puede perjudicar el pase de raíz o desbastar una considerable cantidad de material, lo cual incrementa innecesariamente el tamaño del bisel, utilizando más pases de soldadura y material de aporte, causando una entrada de calor mayor que afecta la microestructura de la junta.
- En cuando al ensayo de doblado lateral, no se obtuvo una relación o tendencia que demuestre que los procesos de reparación influyen en la generación de discontinuidades.

4.2 Recomendaciones.

- Antes de realizar el cordón de reparación, se recomienda efectuar una adecuada limpieza del bisel y de la herramienta de corte utilizada, puesto que las partículas ajenas al material pueden impregnarse y generar defectos comprometiendo el desempeño de la junta
- Para futuros trabajos se recomienda realizar más de dos procesos de reparación, con el objetivo de evidenciar una significativa variación de propiedades mecánicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Łomozik, M. y Turyk, E. (2018). Mechanical Properties of Welded Joints in Steel S1100QL after Multiple Repair Welding. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 2018(3), 7–15. <https://doi.org/10.17729/ebis.2018.3/1>.
- [2] O. E. Vega, J. M. Hallen, A. Villagomez, y A. Contreras, «Effect of multiple repairs in girth welds of pipelines on the mechanical properties», *Mater. Charact.*, vol. 59, n.º 10, pp. 1498-1507, oct. 2008, doi: 10.1016/j.matchar.2008.01.011.
- [3] NDT requirements of API 1104. (1998). *NDT & E International*, 31(5), 381. [https://doi.org/10.1016/s0963-8695\(98\)90894-5](https://doi.org/10.1016/s0963-8695(98)90894-5)
- [4] Structural welding code - steel: aws d1.1/d1.1m. Miami: Amer Welding Society, 2015.
- [5] «artc2a1culo-procesos-de-soldadura.pdf». Accedido: 23 de agosto de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://johnguio.files.wordpress.com/2013/11/artc2a1culo-procesos-de-soldadura.pdf>
- [6] N. V. G. Custodio, «IMPACTO DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW) EN LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES Y LA SUSCEPTIBILIDAD A LA CORROSIÓN EN EL ACERO AL CARBONO API 5L X70, EN UNIONES SOLDADAS DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS AMARGOS.», p. 120.
- [7] «Introducción a la soldadura autor Dpto. Instalación y Mantenimiento CIFP Tecnológico Industrial.pdf».
- [8] «Procesos de Manufactura y Materiales». <http://procesosdemanufacturaymateriales.blogspot.com/2014/08/soldadura-por-arco-electrico-proceso-de.html> (accedido 30 de noviembre de 2021).
- [9] C. Flores s.f. "Soldadura al arco eléctrico Smaw". Accedido: ago. 25, 2021. [En línea]. Disponible en: https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin08/URL_08_MEC01.pdf
- [10] A. M. Marín. s.f. "Proceso Smaw" (accedido nov. 30, 2021). [En línea]. Disponible en: http://soldadurayestructuras.com/2184409_Procesos-de-soldadura-y-corte.html [11]
R. Singh, *Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards*. Butterworth-Heinemann, 2020.
- [12] «Jet Arco. s.f. "Soldadura MMA" [En línea]. Disponible en: <https://jet-arco.com/soldadura-mma/> (accedido nov. 30, 2021).
- [13] Lincoln Electric, s.f. "Soldeo manual con electrodos revestidos (Smaw)".pdf.
- [14] Direct Industry. s.f." Soldadora por arco AC225™" [En línea]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/lincoln-electric/product-7970-771179.html> (accedido nov. 30, 2021).
- [15] J. Lorca. (2009, agosto, 28) "Soldadura por arco manual o eléctrico" [En línea]. Disponible en: <http://www.mailxmail.com/curso-soldadura-arco-manual-electrico-fundamentos/arco-electrico-encendido-mantenimiento> (accedido nov. 30, 2021).

- [16] M. Rodríguez, s.f. "Proceso de soldadura Smaw" [En línea]. Disponible en: <https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-smaw.cfm> (accedido nov. 30, 2021).
- [17] "Electrodos revestidos y su clasificación" s.f. [En línea]. Disponible en: <https://doctorwelding.com/electrodos-revestidos-y-su-clasificacion/> (accedido nov. 30, 2021).
- [18] L. F. Gómez, s.f. "Soldadura por arco eléctrico con electrodo continuo de núcleo fundente", p. 4.
- [19] M. A. C. Mendivelso, «Aspectos a considerar en la reparación de grietas en uniones soldadas de estructuras de atracciones mecánicas», p. 5.
- [20] S. Ragu, V. Balasubramanian, -2015 - "Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints.pdf.
- [21] J. C. McCormac, *Diseño de estructuras de acero*. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor, 2015.
- [22] M. Y. Demeri, *Advanced High-Strength Steels: Science, Technology, and Applications*. ASM International, 2013.
- [23] «29-High-Strength-Structural-and-High-Strength-Low-Alloy-Steels.pdf». Accedido: 19 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://asremavad.com/wp-content/uploads/2020/01/29-High-Strength-Structural-and-High-Strength-Low-Alloy-Steels.pdf>
- [24] ASM International. 1990. - ASM handbook.pdf». Accedido: dic. 19, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/5344G_TOC.pdf
- [25] «García y Gómez - Efecto de la variación de temperatura entre pases .pdf». Accedido: dic. 19, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/8452/Documento%20proyecto%20de%20grado%20final.pdf?sequence=1>
- [26] ASME, 1, julio, 2019. "ASME Boiler and Pressure Vessel Code an International Code- Nondestructive Examination.pdf"
- [27] Piekarska et al. - 2017 - Issues in Numerical Modeling of Phase transformati.pdf.
- [28] ASTM. 2008, febrero, 25. " Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel1".pdf
- [29] Indura. 2007, marzo. "Manual de sistemas y materiales de soldadura".pdf
- [30] Indura. s.f. "Indura 71T-1".pdf
- [31] Y, A. Cengel, M, A. Boles. Sexta Edición. Termodinámica. Mc Graw Hill. 2009.

ANEXOS

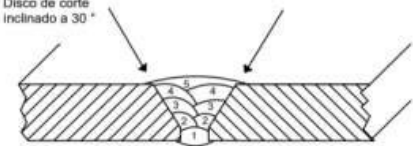
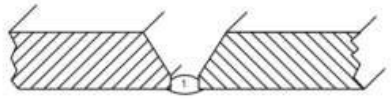
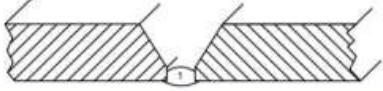

ANEXO I. WPS del procedimiento "A"

Referencia		Número de identificación		T_EPN_MV_001			
AWS D1.1							
WPS N°	1	Identificación del procedimiento		PROCEDIMIENTO "A"			
INFORMACIÓN GENERAL							
Compañía	Escuela Politécnica Nacional						
Revisión	Fecha:	1/6/2021	Por:	Kevin Morejón / Santiago Vásquez			
Autorizado por	Ing. Homero Barragán		Fecha:	1/6/2021			
ESPECIFICACIONES GENERALES							
Aplicación	Soldadura a tope						
Proceso	SMAW						
Material	Acero ASTM A 572 Grado "50"						
Metal de aporte	E 6010/ E 7018		Espesor de la placa	15 [mm]			
Diseño de junta	A Tope		Tipo de Bisel	En "V" con refuerzo			
Posición	1 G						
Dirección de soldadura	De izquierda a derecha						
Técnica	Varios pases						
Limpieza	Herramientas fuertes, grata circular						
Nota: -Verificar la alineación de la junta. - Efectuar limpieza entre pases.							
DETALLE DE LA JUNTA							
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS							
N° de Pase	Material de aporte		Corriente		Tensión	avance [mm/min]	Técnicas de Soldadura
	Clase	Diámetro	Tipo y polaridad	Intensidad [Amperios]	[Voltios]		
(1) Raíz	E - 6010	3.2	DC+	75-90	40-60	170-210	Recto
(2) Caliente	E - 6010	3.2	DC+	75-90	40-60	170-210	Oscilación
(3) Relleno	E - 7018	3.2	DC+	110-130	40-60	130-150	Oscilación
(4) Intermedio	E - 7018	3.2	DC+	110-130	40-60	90-100	Oscilación
(5) Cobertura	E - 7018	3.2	DC+	110-130	40-60	90-100	Oscilación

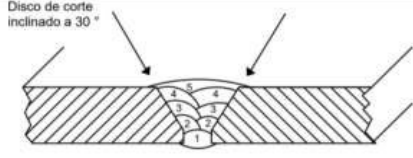
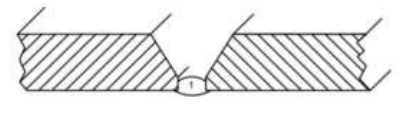
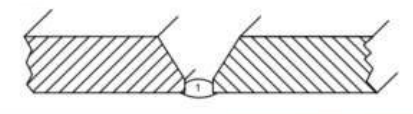
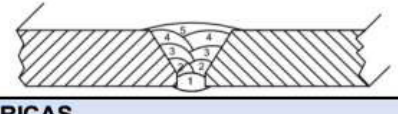
ANEXO II. WPS del procedimiento "B"

Referencia		Número de identificación:		T_EPN_MV_002			
AWS D1.1							
WPS N°	2	Identificación del procedimiento:		PROCEDIMIENTO "B"			
INFORMACIÓN GENERAL							
Compañía	Escuela Politécnica Nacional						
Revisión		Fecha:	1/6/2021	Por:	Kevin Morejón / Santiago Vásquez		
Autorizado por	Ing. Homero Barragán		Fecha:	1/6/2021			
ESPECIFICACIONES GENERALES							
Aplicación			Soldadura a tope				
Proceso			Combinado: SMAW - FCAW				
Material			Acero ASTM A 572 Grado "50"				
Metal de aporte		Proceso SMAW E 6010 Proceso FCAW E-71T-1-C		Espesor de la placa	15 [mm]		
Diseño de junta		A Tope	Tipo de Bisel	En "V" con refuerzo			
Posición			1 G				
Dirección de soldadura			De izquierda a derecha				
Técnica			Varios pases				
Limpieza			Herramientas fuertes.				
Nota: -Verificar la alineación de la junta. - Asegurar la limpieza entre pases.							
DETALLE DE LA JUNTA							
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS							
Proceso SMAW							
N° de Pase	Material de aporte		Corriente		Tensión	Vel. De avance [mm/min]	Técnicas de Soldadura
	Clase	Diámetro	Tipo y polaridad	Intensidad [Amperios]	[Voltios]		
(1) Raíz	E - 6010	3.2	DC+	75-90	40-60	170-210	Recto
Proceso FCAW							
N° de Pase	Material de aporte		Corriente		Tensión	Vel. De avance [mm/min]	Stick out
	Clase	Diámetro	Tipo y polaridad	Intensidad [Amperios]	[Voltios]		
(2) Caliente	E - 71T1-C	1.2	DC+	150-200	40-60	160-170	20-25 [mm]
(3) Relleno	E - 71T1-C	1.2	DC+	150-200	40-60	160-170	20-25 [mm]
(4) Intermedio	E - 71T1-C	1.2	DC+	150-200	40-60	140-150	20-25 [mm]
(5) Cobertura	E - 71T1-C	1.2	DC+	150-200	40-60	120-140	20-25 [mm]

ANEXO III. WPS de reparación del procedimiento "A"

Referencia		Número de identificación:		T_EPN_MV_001R			
AWS D1.1							
WPS N°	3	Identificación del procedimiento:		REPARACIÓN JUNTA PROCEDIMIENTO "A"			
INFORMACIÓN GENERAL							
Compañía	Escuela Politécnica Nacional						
Revisión		Fecha:	1/6/2021	Por:	Kevin Morejón / Santiago Vásquez		
Autorizado por	Ing. Homero Barragán		Fecha:	1/6/2021			
ESPECIFICACIONES GENERALES							
Aplicación			Reparación de junta soladada				
Proceso			SMAW				
Material			Acero ASTM A 572 Grado "50"				
Metal de aporte		E 7018	Espesor de la placa		15 [mm]		
Diseño de junta		A Tope	Tipo de Bisel		En "V" con refuerzo		
Posición			1 G				
Dirección de soldadura			De izquierda a derecha				
Técnica			Varios pases				
Limpieza			Disco de corte, disco de desbaste, herramientas fuertes.				
Descripción del procedimiento de reparación:							
<p>Utilizando un disco de corte, retirar el cordón hasta el pase de raíz, inclinado la herramienta a 30°. Realizar una limpieza total y profunda del bisel y del pase de raíz remanente, mediante disco de desbaste y grata.</p> <p>Rellenar nuevamente el bisel utilizando el material de aporte y las variables eléctricas dispuestas en este WPS.</p>							
DETALLE DE LA REPARACIÓN							
1	 <p>Disco de corte inclinado a 30°</p>		3	 <p>Efectuar una limpieza exhaustiva del bisel y el cordón utilizando disco de desbaste y grata.</p>			
2	 <p>Realizar el desbaste del cordón hasta el pase de raíz</p>		4	 <p>Rellenar nuevamente el bisel con el procedimiento seleccionado siguiendo las variables de soldadura estipulados</p>			
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS							
N° de Pase	Material de aporte		Corriente		Tensión [Voltios]	Vel. De avance [mm/min]	Técnicas de Soldadura
	Clase	Diámetro	Tipo y polaridad	Intensidad [Amperios]			
(2) Caliente	E - 6010	3.2	DC+	75-90	40-60	170-210	Oscilación
(3) Relleno	E - 7018	3.2	DC+	110-130	40-60	130-150	Oscilación
(4) Intermedio	E - 7018	3.2	DC+	110-130	40-60	90-100	Oscilación
(5) Cobertura	E - 7018	3.2	DC+	110-130	40-60	90-100	Oscilación

ANEXO IV. WPS de reparación del procedimiento "B"

Referencia		Número de identificación:		T_EPN_MV_002R			
AWS D1.1							
WPS N°	4	Identificación del procedimiento:		REPARACIÓN JUNTA PROCEDIMIENTO "B"			
INFORMACIÓN GENERAL							
Compañía	Escuela Politécnica Nacional						
Revisión		Fecha:	1/6/2021	Por:	Kevin Morejón / Santiago Vásquez		
Autorizado por	Ing. Homero Barragán		Fecha:	1/6/2021			
ESPECIFICACIONES GENERALES							
Aplicación			Reparación de junta soldada				
Proceso			Combinado: SMAW - FCAW				
Material			Acero ASTM A 572 Grado "50"				
Metal de aporte	Proceso FCAW E-71T-1-C		Espesor de la placa	15 [mm]			
Diseño de junta	A Tope	Tipo de Bisel	En "V" con refuerzo				
Posición			1 G				
Dirección de soldadura			De izquierda a derecha				
Técnica			Varios pases				
Limpieza			Disco de corte, disco de desbaste, herramientas fuertes.				
Descripción del procedimiento de reparación:							
Utilizando un disco de corte, retirar el cordón hasta el pase de raíz, inclinado la herramienta a 30°. Realizar una limpieza total y profunda del bisel y del pase de raíz remanente, mediante disco de desbaste y grata.							
Rellenar nuevamente el bisel utilizando el material de aporte y las variables eléctricas dispuestas en este WPS.							
DETALLE DE LA JUNTA							
(1)	Disco de corte inclinado a 30°		(3)	Efectuar una limpieza exhaustiva del bisel y el cordón utilizando disco de desbaste y grata.			
							
(2)	Realizar el desbaste del cordón hasta el pase de raíz		(4)	Rellenar nuevamente el bisel con el procedimiento seleccionado siguiendo las variables de soldadura estipulados			
							
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS							
Proceso FCAW							
N° de Pase	Material de aporte		Corriente		Tensión [Voltios]	Vel. De avance [mm/min]	Stick out
	Clase	Diámetro	Tipo y polaridad	Intensidad [Amperios]			
(2) Caliente	E - 71T1-C	1.2	DC+	150-200	40-60	160-170	20-25 [mm]
(3) Relleno	E - 71T1-C	1.2	DC+	150-200	40-60	160-170	20-25 [mm]
(4) Intermedio	E - 71T1-C	1.2	DC+	150-200	40-60	140-150	20-25 [mm]
(5) Cobertura	E - 71T1-C	1.2	DC+	150-200	40-60	120-140	20-25 [mm]

ANEXO V. Indicadores de calidad de imagen (IQI)

Los indicadores de calidad de imagen son hilos de alambre correspondientes a un set determinado, que deben ser visibles en la película sensible, con el propósito de definir la calidad de la imagen radiográfica obtenida.

Los IQI fueron seleccionados de acuerdo con el espesor nominal del material base, siguiendo lo indicado en el Código ASME V, con la disposición de ubicación “del lado de la película”, es decir, dichos indicadores se sitúan entre la placa y la película radiográfica.

Datos de la placa base:

Espesor promedio: 15 [mm]

Con el espesor de la placa base se escogió la designación del alambre IQI de la tabla T-276 del Código ASME V.

Tabla V.1 Designación del alambre para los indicadores de calidad de imagen en radiografía industrial.

TABLE T-276
IQI SELECTION

Nominal Single-Wall Material Thickness Range		IQI			
		Source Side		Film Side	
in.	mm	Hole-Type Designation	Wire-Type Essential Wire	Hole-Type Designation	Wire-Type Essential Wire
Up to 0.25, incl.	Up to 6.4, incl.	12	5	10	4
Over 0.25 through 0.375	Over 6.4 through 9.5	15	6	12	5
Over 0.375 through 0.50	Over 9.5 through 12.7	17	7	15	6
Over 0.50 through 0.75	Over 12.7 through 19.0	20	8	17	7
Over 0.75 through 1.00	Over 19.0 through 25.4	25	9	20	8
Over 1.00 through 1.50	Over 25.4 through 38.1	30	10	25	9
Over 1.50 through 2.00	Over 38.1 through 50.8	35	11	30	10
Over 2.00 through 2.50	Over 50.8 through 63.5	40	12	35	11
Over 2.50 through 4.00	Over 63.5 through 101.6	50	13	40	12
Over 4.00 through 6.00	Over 101.6 through 152.4	60	14	50	13
Over 6.00 through 8.00	Over 152.4 through 203.2	80	16	60	14
Over 8.00 through 10.00	Over 203.2 through 254.0	100	17	80	16
Over 10.00 through 12.00	Over 254.0 through 304.8	120	18	100	17
Over 12.00 through 16.00	Over 304.8 through 406.4	160	20	120	18
Over 16.00 through 20.00	Over 406.4 through 508.0	200	21	160	20

Fuente: (Código ASME V).

Una vez encontrada la designación del alambre, se seleccionó el set de indicadores de calidad de la tabla T233.2 del mismo código en la configuración “del lado de la película”,

Tabla V.2. Designación del diámetro e identidad de alambre de indicadores de calidad de imagen en radiografía industrial

TABLE T-233.2
WIRE IQI DESIGNATION, WIRE DIAMETER,
AND WIRE IDENTITY

Set A			Set B		
Wire Diameter, in.	(mm)	Wire Identity	Wire Diameter, in.	(mm)	Wire Identity
0.0032	(0.08)	1	0.010	(0.25)	6
0.004	(0.10)	2	0.013	(0.33)	7
0.005	(0.13)	3	0.016	(0.41)	8
0.0063	(0.16)	4	0.020	(0.51)	9
0.008	(0.20)	5	0.025	(0.64)	10
0.010	(0.25)	6	0.032	(0.81)	11
Set C			Set D		
Wire Diameter, in.	(mm)	Wire Identity	Wire Diameter, in.	(mm)	Wire Identity
0.032	(0.81)	11	0.100	(2.54)	16
0.040	(1.02)	12	0.126	(3.20)	17
0.050	(1.27)	13	0.160	(4.06)	18
0.063	(1.60)	14	0.200	(5.08)	19
0.080	(2.03)	15	0.250	(6.35)	20
0.100	(2.54)	16	0.320	(8.13)	21

Fuente: (Código ASME V).

Teniendo como resultados indicadores IQI Set B con un diámetro de alambre de 0.33 [mm] e identidad de alambre N° “7”.

Después de definir los indicadores de calidad, se utilizó letras de plomo para codificar las probetas de manera permanente, ubicando los indicadores IQI junto con la codificación dentro de la placa de manera que no interfieran con el área de inspección del cordón

ANEXO VII. Cálculo de los tiempos de exposición

Una vez colocada la película y los indicadores de calidad de imagen se calcula el tiempo de exposición al que va a estar sometidas cada una de las placas a ensayar, este tiempo de exposición viene dado por el fabricante del equipo mediante la ecuación VI.1.

$$t_{exp} = t_c * f_p * f_n * f_D * f_v \quad \text{Ec. VII.1}$$

Donde:

T _{exp}	Es el tiempo de exposición a la que va a estar sometida cada una de las placas
t _c	Tiempo de diagrama de exposición
f _p	Factor de la película
f _n	Factor de densidad
f _D	Factor de corrección de distancia
f _v	Factor varios (equivalente a 1)

En la figura VII.1 se puede observar el diagrama para encontrar el tiempo de exposición t_c. Además, se encuentran los diferentes factores que modifican dicho tiempo de exposición.

Se realiza a continuación un ejemplo de cálculo del tiempo de exposición para una de las probetas.

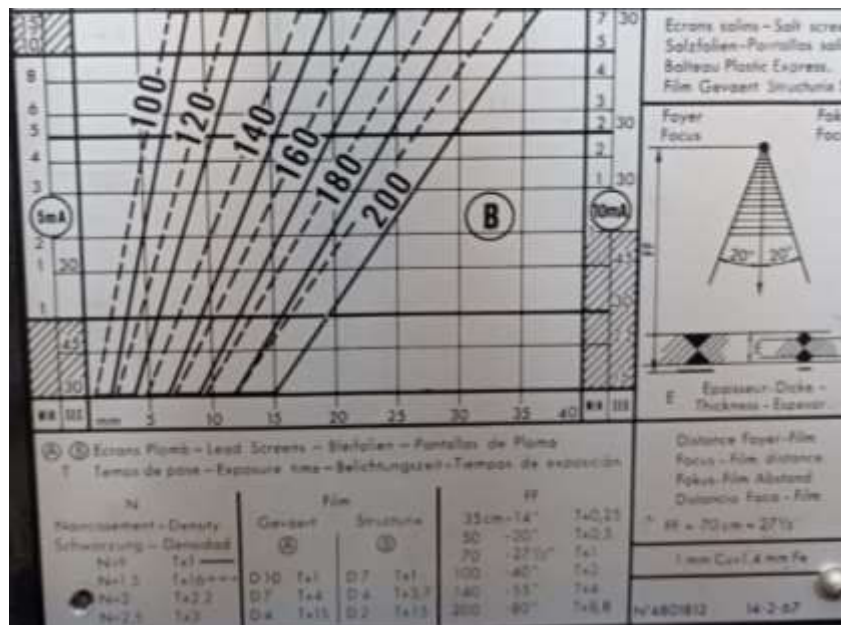


Figura VII.1. Grafica para encontrar el tiempo de exposición y los factores de corrección

Fuente: (Propia)

Para poder utilizar la gráfica de la figura VII.1 es necesario conocer el espesor de la placa con el pase de raíz y sobre monta, esta medición se la realiza con una galga de soldadura. Se toman diferentes medidas y se encuentra su valor promedio, que para este ejemplo de cálculo es de 17,5 [mm] en la placa S-P1-0R.

Con el valor del espesor se traza una perpendicular por el eje hasta intersecar los valores del voltaje, se debe tomar en cuenta que el valor máximo para este equipo es 160 [Kv]. En este ejemplo el valor t_c obtenido es de 3 minutos.

Los factores de corrección se toman como

Factor de película $N=1$

$f_n = 1,$

$f_p = 1$

f_D = Depende de la distancia a la que se encuentre la placa respecto a la fuente, en este caso se tiene una distancia de 50 cm aproximadamente por lo que f_D se asume igual a 0.5. Se reemplazan todos los valores en la ecuación VI.1 para encontrar el tiempo de exposición total.

$$t_{exp} = 3 * 1 * 1 * 0.5 * 1$$

$$t_{exp} = 1.5 \text{ min} = 90 \text{ seg}$$

Para corregir la distancia desde la fuente a la placa se utiliza la ley inversa de los cuadrados como se muestra en la ecuación VI.2.

$$\frac{t_{exp1}}{t_{exp2}} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad \text{Ec. VII.2}$$

Donde:

$T_{exp1, 2}$ Tiempo de exposición. [seg]

$d_{1, 2}$ Distancia de la fuente [cm]

Despejando el tiempo de exposición se tiene

$$t_{exp2} = \frac{(55 \text{ cm})^2 * 90 \text{ seg}}{(50 \text{ cm})^2} = 108.9 \text{ [seg]}$$

ANEXO VIII. Informe completo emitido por el LAEV del ensayo de tracción

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



MECÁNICA

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



F01-PE-LAEV-01 Rev.01

INFORME TÉCNICO

LAEV – M21.062

Quito, 13 de agosto de 2021

Solicitado por:	M.Sc. Homero Barragán
Persona de contacto:	Kevin Morejón, Euler Vásquez
Teléfono:	0996096770
Correo:	kevin.morejon@epn.edu.ec
Fecha de recepción:	03/08/2021; 10/08/2021
Fecha de ejecución:	03/08/2021; 11/08/2021
ORDEN DE TRABAJO N°:	DM-OTI0102-2021

MUESTRAS: Doce (12) probetas de juntas soldadas y una (1) probeta de material base para ensayo de tracción.

GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ESTUDIO DE LA AFECTACIÓN DEL PROCESO DE REPARACIÓN EN UNIONES SOLDADAS DE UN ACERO HSLA ASTM A572

En la tabla VIII.1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla VIII.1. Identificación de las muestras

Id. cliente	Id. LAEV
M1.1 – 1.2	M21.062.01 - M21.062.02
M2.1 M2.2	M21.062.03 - M21.062.04
M3.1 – 3.2	M21.062.05 - M21.062.06
M4.1- M4.2	M21.062.07 - M21.062.08
M5.1- M5.2	M21.062.09 - M21.062.10
M6.1- M6.2	M21.062.11 - M21.062.12
MB 1	M21.062.13

CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $23,6 \pm 2,2$ °C

Humedad relativa: $36,5 \pm 6,8$ %

ENSAYO DE TRACCIÓN EN JUNTAS SOLDADAS

En la tabla VIII.2 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla VIII.2. Ensayo de tracción

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M21.062.01	20,12	14,60	31 241	138 965	68,6	473,1	FMB
M21.062.02	20,19	14,66	31 387	139 618	68,4	471,7	FMB
M21.062.03	20,15	14,97	32 304	143 694	69,1	476,4	FMB
M21.062.04	20,25	14,59	31 204	138 801	68,1	469,8	FMB
M21.062.05	19,94	14,59	30 981	137 811	68,7	473,7	FMB
M21.062.06	19,86	14,68	30 817	137 083	68,2	470,2	FMB
M21.062.07	19,90	14,91	31 355	139 476	68,2	470,1	FMB
M21.062.08	20,03	14,63	31 176	138 677	68,6	473,2	FMB
M21.062.09	20,00	14,68	32 235	143 387	70,8	488,4	FMB
M21.062.10	19,95	14,87	32 006	142 371	69,6	479,9	FMB
M21.062.11	19,99	14,82	31 700	141 008	69,0	476,0	FMB
M21.062.12	19,99	14,53	31 395	139 653	69,7	480,8	FMB

*FMB = Falla en el material base

ENSAYO DE TRACCIÓN MATERIAL BASE


En la tabla VIII. 3 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla VIII. 3. Ensayo de tracción a material base

Id.	Ancho promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M21.062.13	20,08	15,18	30 953	137 686	65,5	452,5	45,0

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV).

Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:	 <p>Firmado electrónicamente por: JONATHAN FERNANDO CASTRO REVELO</p>	<p>WILSON IVAN GUACHAMIN ACERO</p> <p>Firmado digitalmente por WILSON IVAN GUACHAMIN ACERO Fecha: 2021.08.13 07:54:41 -05'00'</p>
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamín
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABRATORIO	JEFE
LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		

ANEXO IX. Cálculo del calor de entrada

Tabla IX.1. Cálculo del calor de entrada para la placa S-P1-0R.

Datos generales				Datos del material Base				
<i>Código de la placa soldada</i>	S-P1-0R			<i>Dimensiones de placa</i>	<i>Largo [mm]</i>	<i>Ancho [mm]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	
<i>Proceso de soldadura</i>	SMAW				350	200	15	
<i>WPS utilizado</i>	T_EPN_MV_001			Datos del material de aporte				
<i>N° de Placa</i>	Placa " S-P1-0R " SMAW, sin reparación			<i>Codificación del electrodo</i>	E6010 / E7018			
Datos del proceso de Soldadura								
<i>N° de Pase</i>	<i>Voltaje [V]</i>	<i>Amperaje [A]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/min]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/s]</i>	<i>Tiempo de pase de soldadura [min]</i>	<i>Tipo de avance</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Head input</i>
1ro	60	85	167	2.78	2.1	Recto	Pase raíz	1.47
2do	60	85	159	2.65	2.2	Oscilación	Pase en caliente	1.54
3ro	60	120	113	1.88	3.1	Oscilación	Pase relleno	3.06
4to	60	120	109	1.82	3.2	Oscilación	Pase intermedio	3.16
5to	60	104	103	1.72	3.4	Oscilación	Pase intermedio	2.91
6to	60	120	100	1.67	3.5	Oscilación	Pase de cobertura	3.46
								2.60

Valor de calor de entrada promedio = $2.60 \left[\frac{kJ}{mm} \right]$

Tabla IX. 2. Cálculo del calor de entrada para la placa S-P2-1R.

Datos generales			Datos del material Base					
Código de la placa soldada	S-P2-1R		Dimensiones de placa	Largo [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]		
Proceso de soldadura	SMAW			350	200	15		
WPS utilizado	T_EPN_MV_001		Datos del material de aporte					
N° de Placa	Placa " S-P2-1R " SMAW, una reparación		Codificación del electrodo	E6010 / E7018				
Datos del proceso de Soldadura (conformación del cordón)								
N° de Pase	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Velocidad de avance [mm/min]	Velocidad de avance [mm/s]	Tiempo de pase de soldadura [min]	Tipo de avance	Observaciones	Calor de entrada [$\frac{kJ}{mm}$]
1ro	60	85	171	2.85	2.05	Recto	Pase raíz	1.43
2do	60	90	156	2.59	2.25	Oscilación	Pase en caliente	1.67
3ro	60	115	137	2.29	2.55	Oscilación	Pase relleno	2.41
4to	60	120	109	1.82	3.2	Oscilación	Pase intermedio	3.16
5to	60	120	103	1.72	3.39	Oscilación	Pase intermedio	3.35
6to	60	120	101	1.69	3.45	Oscilación	Pase de cobertura	3.41
								2.57
Datos del proceso de Soldadura (reparación)								
N° de Pase	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Velocidad de avance [mm/min]	Velocidad de avance [mm/s]	Tiempo de pase de soldadura [min]	Tipo de avance	Observaciones	Calor de entrada [$\frac{kJ}{mm}$]
1ro	60	85	159	2.65	2.2	Oscilación	Proceso de re-soldeo	1.54
2do	60	95	146	2.43	2.4	Oscilación	Proceso de re-soldeo	1.88

3ro	60	120	136	2.27	2.57	Oscilación	Proceso de re-soldeo	2.54
4to	60	120	106	1.77	3.3	Oscilación	Proceso de re-soldeo	3.26
5to	60	115	101	1.69	3.45	Oscilación	Proceso de re-soldeo	3.26
								2.50

Valor de calor de entrada promedio = $2.53 \left[\frac{kJ}{mm} \right]$

Tabla IX.3. Cálculo del calor de entrada para la placa S-P3-3R.

Datos generales			Datos del material Base					
Código de la placa soldada	S-P3-2R		Dimensiones de placa	Largo [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]		
Proceso de soldadura	SMAW			350	200	15		
WPS utilizado	T_EPN_MV_001		Datos del material de aporte					
N° de Placa	Placa "3" SMAW, dos reparaciones		Codificación del electrodo	E6010 / E7018				
Datos del proceso de Soldadura (conformación inicial del cordón)								
N° de Pase	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Velocidad de avance [mm/min]	Velocidad de avance [mm/s]	Tiempo de pase de soldadura [min]	Tipo de avance	Observaciones	Calor de entrada $\left[\frac{kJ}{mm}\right]$
1ro	60	85	167	2.78	2.1	Recto	Pase raíz	1.47
2do	60	95	154	2.56	2.28	Oscilación	Pase en caliente	1.78
3ro	60	115	142	2.36	2.47	Oscilación	Pase relleno	2.34
4to	60	125	110	1.83	3.19	Oscilación	Pase intermedio	3.28
5to	60	125	103	1.72	3.4	Oscilación	Pase intermedio	3.50
6to	60	125	98	1.63	3.57	Oscilación	Pase de cobertura	3.67
								2.67
Datos del proceso de Soldadura (primera reparación)								
N° de Pase	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Velocidad de avance [mm/min]	Velocidad de avance [mm/s]	Tiempo de pase de soldadura [min]	Tipo de avance	Observaciones	Calor de entrada $\left[\frac{kJ}{mm}\right]$
1ro	60	85	156	2.59	2.25	Oscilación	Proceso de re-soldeo	1.57
2do	60	95	144	2.40	2.43	Oscilación	Proceso de re-soldeo	1.90
3ro	60	120	140	2.33	2.5	Oscilación	Proceso de re-soldeo	2.47
4to	60	120	111	1.85	3.15	Oscilación	Proceso de re-soldeo	3.11

5to	60	115	100	1.67	3.49	Oscilación	Proceso de re-soldeo	3.30
								2.47
Datos del proceso de Soldadura (segunda reparación)								
<i>N° de Pase</i>	<i>Voltaje [V]</i>	<i>Amperaje [A]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/min]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/s]</i>	<i>Tiempo de pase de soldadura [min]</i>	<i>Tipo de avance</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Calor de entrada [$\frac{kJ}{mm}$]</i>
1ro	60	85	146	2.43	2.4	Oscilación	Proceso de re-soldeo	1.68
2do	60	95	115	1.91	3.05	Oscilación	Proceso de re-soldeo	2.38
3ro	60	120	106	1.77	3.3	Oscilación	Proceso de re-soldeo	3.26
4to	60	120	100	1.67	3.5	Oscilación	Proceso de re-soldeo	3.46
5to	60	115	85	1.42	4.1	Oscilación	Proceso de re-soldeo	3.88
								2.93

Valor de calor de entrada promedio = $2.69 \left[\frac{kJ}{mm} \right]$

Tabla IX.4. Cálculo del calor de entrada para la placa SF-P4-0R.

Datos generales				Datos del material Base				
<i>Código de la placa soldada</i>	SF-P4-0R			<i>Dimensiones de placa</i>	<i>Largo [mm]</i>	<i>Ancho [mm]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	
<i>Proceso de soldadura</i>	Combinado SMAW - FCAW				350	200	15	
<i>WPS utilizado</i>	T_EPN_MV_002			Datos del material de aporte				
<i>N° de Placa</i>	Placa " SMAW" - FCAW " combinada, sin reparación			<i>Codificación del electrodo</i>	E6010 / E71T1 -C			
Datos del proceso de Soldadura								
<i>N° de Pase</i>	<i>Voltaje [V]</i>	<i>Amperaje [A]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/min]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/s]</i>	<i>Tiempo de pase de soldadura [min]</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Calor de entrada $\frac{kJ}{mm}$</i>
1ro	60	90	163	2.71	2.15	0.8	Pase raíz	1.59
2do	60	95	149	2.48	2.35	0.8	Pase en caliente	1.84
3ro	50	150	171	2.85	2.05	0.6	Pase relleno	1.58
4to	50	175	159	2.65	2.2	0.6	Pase intermedio	1.98
5to	50	175	143	2.38	2.45	0.6	Pase intermedio	2.21
6to	50	180	117	1.94	3	0.6	Pase de cobertura	2.78
								2.00

Valor de calor de entrada promedio = $2.00 \left[\frac{kJ}{mm} \right]$

Tabla IX.5. Cálculo del calor de entrada para la placa SF-P5-1R.

Datos generales				Datos del material Base				
<i>Código de la placa soldada</i>	SF-P5-1R			<i>Dimensiones de placa</i>	<i>Largo [mm]</i>	<i>Ancho [mm]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	
<i>Proceso de soldadura</i>	Combinado SMAW - FCAW				350	200	15	
<i>WPS utilizado</i>	T_EPN_MV_002			Datos del material de aporte				
<i>N° de Placa</i>	Placa " SMAW - FCAW " combinada , una reparación			<i>Codificación del electrodo</i>	E6010 / E71T1 -C			
Datos del proceso de Soldadura (conformación del cordón)								
<i>N° de Pase</i>	<i>Voltaje [V]</i>	<i>Amperaje [A]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/min]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/s]</i>	<i>Tiempo de pase de soldadura [min]</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Calor de entrada $\frac{kJ}{mm}$</i>
1ro	60	90	163	2.71	2.15	0.8	Pase raíz	1.59
2do	60	95	155	2.58	2.26	0.8	Pase en caliente	1.77
3ro	50	150	175	2.92	2	0.6	Pase relleno	1.54
4to	50	170	159	2.65	2.2	0.6	Pase intermedio	1.92
5to	50	175	152	2.54	2.3	0.6	Pase intermedio	2.07
6to	50	175	112	1.87	3.12	0.6	Pase de cobertura	2.81
								1.95
Datos del proceso de Soldadura (reparación)								
<i>N° de Pase</i>	<i>Voltaje [V]</i>	<i>Amperaje [A]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/min]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/s]</i>	<i>Tiempo de pase de soldadura [min]</i>	<i>Tipo de avance</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Calor de entrada $\frac{kJ}{mm}$</i>
1ro	60	95	145	2.42	2.55	Oscilación	Proceso de re-soldeo	1.89
2do	50	165	175	2.92	2	Oscilación	Proceso de re-soldeo	1.70

3ro	50	170	163	2.71	2.15	Oscilación	Proceso de re-soldeo	1.88
4to	50	170	155	2.58	2.26	Oscilación	Proceso de re-soldeo	1.98
5to	50	170	152	2.54	2.3	Oscilación	Proceso de re-soldeo	2.01
								1.89

Valor de calor de entrada promedio = $1.92 \left[\frac{kJ}{mm} \right]$

Tabla IX.6. Cálculo del calor de entrada para la placa SF-P6-2R.

Datos generales				Datos del material Base				
<i>Código de la placa soldada</i>	SF-P6-2R			<i>Dimensiones de placa</i>	<i>Largo [mm]</i>	<i>Ancho [mm]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	
<i>Proceso de soldadura</i>	Combinado SMAW - FCAW				350	200		15
<i>WPS utilizado</i>	T_EPN_MV_002			Datos del material de aporte				
<i>N° de Placa</i>	Placa " Smaw - FCAW " combinada , dos reparación			<i>Codificación del electrodo</i>	E6010 / E71T1 -C			
Datos del proceso de Soldadura (conformación del cordón)								
<i>N° de Pase</i>	<i>Voltaje [V]</i>	<i>Amperaje [A]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/min]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/s]</i>	<i>Tiempo de pase de soldadura [min]</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Head input [KJ/mm]</i>
1ro	60	90	159	2.65	2.2	0.8	Pase raíz/ SMAW	1.63
2do	60	100	146	2.43	2.4	0.8	Pase en caliente/ SMAW	1.97
3ro	50	165	167	2.78	2.1	0.6	Pase relleno / FCAW	1.78
4to	50	175	156	2.59	2.25	0.6	Pase intermedio/ FCAW	2.03
5to	50	170	137	2.28	2.56	0.6	Pase intermedio/ FCAW	2.24
6to	50	175	111	1.85	3.15	0.6	Pase de cobertura/ FCAW	2.84
								2.08
Datos del proceso de Soldadura (primera reparación)								
<i>N° de Pase</i>	<i>Voltaje [V]</i>	<i>Amperaje [A]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/min]</i>	<i>Velocidad de avance [mm/s]</i>	<i>Tiempo de pase de soldadura [min]</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Observaciones</i>	<i>Head input [KJ/mm]</i>
1	60	90	145	2.42	3.1	Oscilación	Proceso de resoldeo	1.34
2	50	165	159	2.65	2.2	Oscilación	Proceso de resoldeo	1.87
3	50	175	151	2.51	2.32	Oscilación	Proceso de resoldeo	2.09

4	50	170	141	2.35	2.48	Oscilación	Proceso de resoldeo	2.17
5	50	175	109	1.82	3.2	Oscilación	Proceso de resoldeo	2.88
								2.07

Datos del proceso de Soldadura (segunda reparación)								
N° de Pase	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Velocidad de avance [mm/min]	Velocidad de avance [mm/s]	Tiempo de pase de soldadura [min]	Tipo de avance	Observaciones	Head input [KJ/mm]
1ro	60	95	145	2.42	3.2	Oscilación	Proceso de resoldeo	1.42
2do	50	175	149	2.48	2.35	Oscilación	Proceso de resoldeo	2.12
3ro	50	180	143	2.38	2.45	Oscilación	Proceso de resoldeo	2.27
4to	50	185	109	1.82	3.2	Oscilación	Proceso de resoldeo	3.04
6to	50	185	102	1.71	3.42	Oscilación	Proceso de resoldeo	3.25
								2.42

Valor de Calor de entrada promedio = $2.19 \left[\frac{kJ}{mm} \right]$

ANEXO X. Reporte de inspección por radiografía por el laboratorio de ensayos no destructivos EPN.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
DEPARTAMENTO DE MATERIALES**



REPORTE DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES

DATOS GENERALES	
Clientes: Kevin Morejón, Santiago Vásquez	Reporte N°: LEND-EPN-2021-R-02-RX-02
Fecha de inspección: 2/07/2021	Lugar: Quito-Ecuador
Orden de trabajo: 2021-R-02-RX-02	Quipux/Documento de referencia: EPN-DMT-2021-1133-M
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Descripción: Placa 1 Ancho: 35 mm Espesor: 18,9 mm Longitud: 40 mm Peso: Proceso de obtención: Smaw Número de pases: 5 Electrodo: E-6010 y E-7018 Diámetro: 3,2 y 4 mm Placa 2 Ancho: 35 mm Espesor: 20,11 mm Longitud: 40 mm Peso: Proceso de obtención: Smaw Número de pases: 6 Electrodo: E-6010 y E-7018 Diámetro: 3,2 y 4 mm Placa 3 Ancho: 35 mm Espesor: 20,9 mm Longitud: 40 mm	Identificación: 2021-R-02-RX-02-P1 2021-R-02-RX-02-P2

<p>Peso: Proceso de obtención: Smaw Número de pases: 8 Electrodo: E-6010 y E-7018 Diámetro: 3,2 y 4 mm</p> <p>Placa 4 Ancho: 35 mm Espesor: 17,45 mm Longitud: 40 mm Peso: Proceso de obtención: Smaw y Fcaw Número de pases: 5 Electrodo: E-6010 y E 71T1-C Diámetro: 3,2 y 1,2 mm</p> <p>Placa 5 Ancho: 35 mm Espesor: 18,78 mm Longitud: 40 mm Peso: Proceso de obtención: Smaw y Fcaw Número de pases: 6 Electrodo: E-6010 y E 71T1-C Diámetro: 3,2 y 1,2 mm</p> <p>Placa 6 Ancho: 35 mm Espesor: 18,75 mm Longitud: 40 mm Peso: Proceso de obtención: Smaw y Fcaw Número de pases: 8 Electrodo: E-6010 y E 71T1-C Diámetro: 3,2 y 1,2 mm</p>	<p>2021-R-02-RX-02-P3</p> <p>2021-R-02-RX-02-P4</p> <p>2021-R-02-RX-02-P5</p> <p>2021-R-02-RX-02-P6</p>
<p>Material: Acero Astm A 572 Grado 50</p>	<p>Estado Superficial:</p>

ESQUEMA DE LA PIEZA

2021-R-02-RX-02-P1



2021-R-02-RX-02-P2



2021-R-02-RX-02-P3



2021-R-02-RX-02-P4



2021-R-02-RX-02-P5



2021-R-02-RX-02-P6



EQUIPOS Y MATERIALES

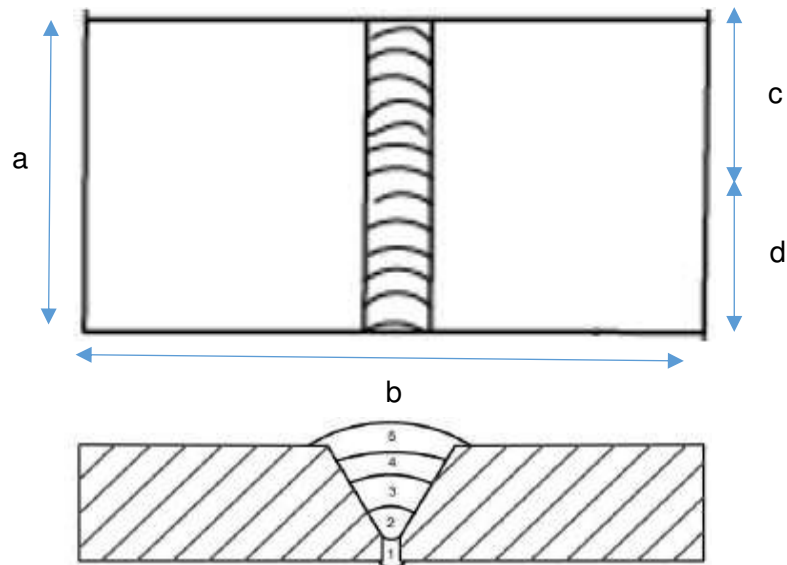
Equipos

Galga de Soldadura	Marca	Bridge Cam
	Modelo	CAM TYPE GAUGE
	Rango	(0 a 25.4) (0 a 1)
	Resolución	1
	Certificado de calibración N°	Por calibrar
Regla Metálica	Marca	Mitutoyo
	Modelo	180603 U
	Rango	0 a 400
	División escala	0.5
	Certificado de calibración N°	Por calibrar
Limpiador / removedor	Marca	Met-L-check
	Tipo	E-59A 1 & 2
	Método	C
	Clase	2

CONDICIONES DE TRABAJO

Procedimiento:

Esquema de identificación



Esquema del método



RESULTADOS

Identificación

2021-R-02-RX-02-P1-AV



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
1	A	Salpicadura	128	36	<2
Identificación	2021-R-02-RX-02-P1-VA				



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha), la discontinuidad que se presenta en el inferior de la película es un defecto propio de la misma que no afecta al cordón.

Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
1	V	Salpicadura	18	38	<2
Identificación	2021-R-02-RX-02-P2-AV				



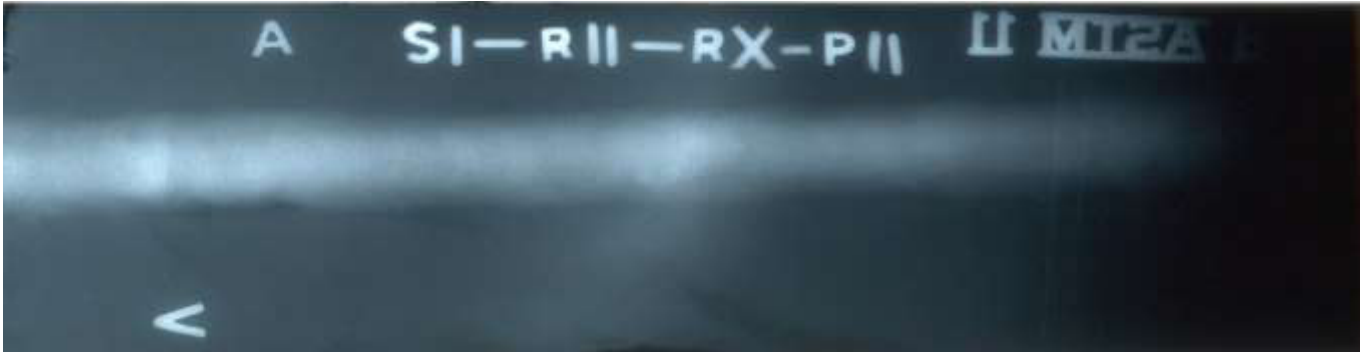
Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	ZONA	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
----------------------	------	------------------------	---------------------	---------------------	----------------

No presenta discontinuidad	A	-	-	-	-
----------------------------	---	---	---	---	---

Identificación	2021-R-02-RX-02-P2-VA				
----------------	-----------------------	--	--	--	--



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
1	V	Salpicadura	120	40	<1

Identificación	2021-R-02-RX-02-P3-AV				
----------------	-----------------------	--	--	--	--

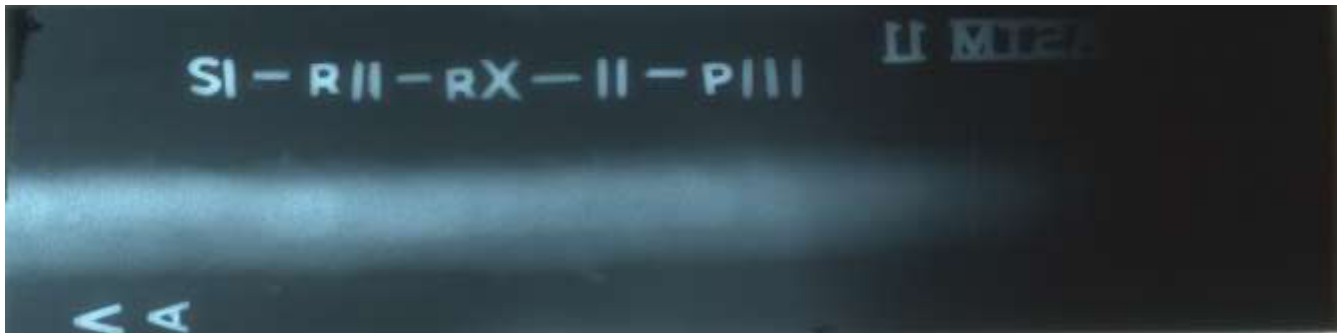


Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
1	A	Salpicadura	35	25	1

Identificación	2021-R-02-RX-02-P3-VA				
----------------	-----------------------	--	--	--	--



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

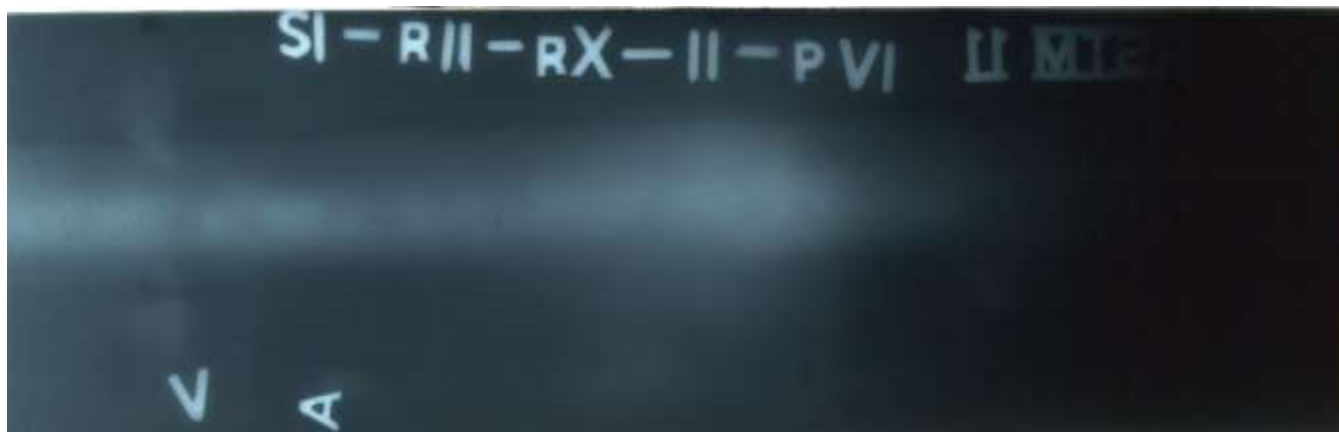
N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
1	V	Salpicadura	193	25	1
Identificación	2021-R-02-RX-02-P4-AV				



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
No presenta discontinuidad	A	-	-	-	-
Identificación	2021-R-02-RX-02-P4-VA				



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

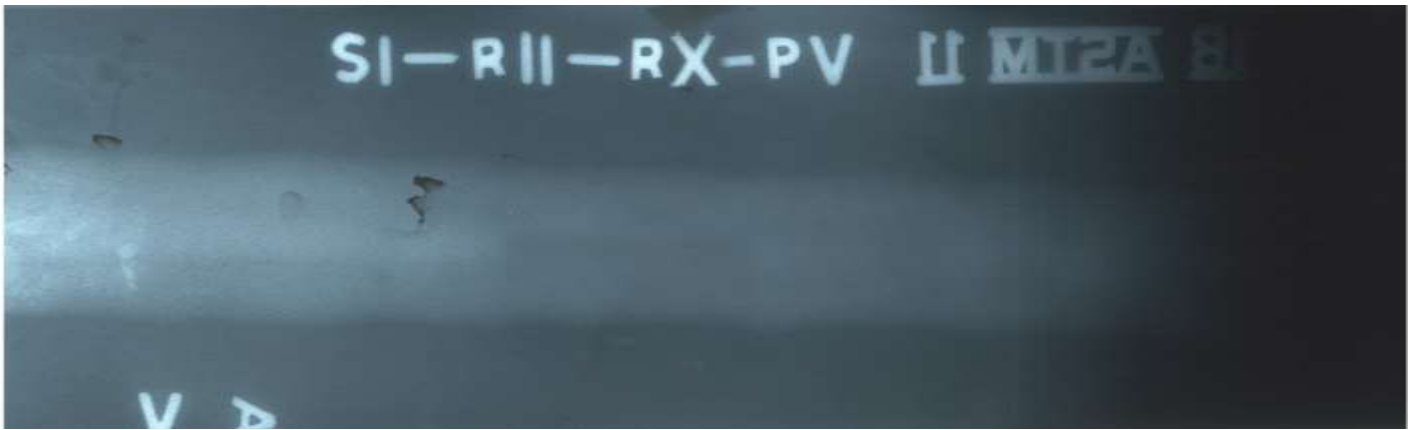
N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
1	V	Poro	80	34	<1
Identificación	2021-R-02-RX-02-P5-AV				



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

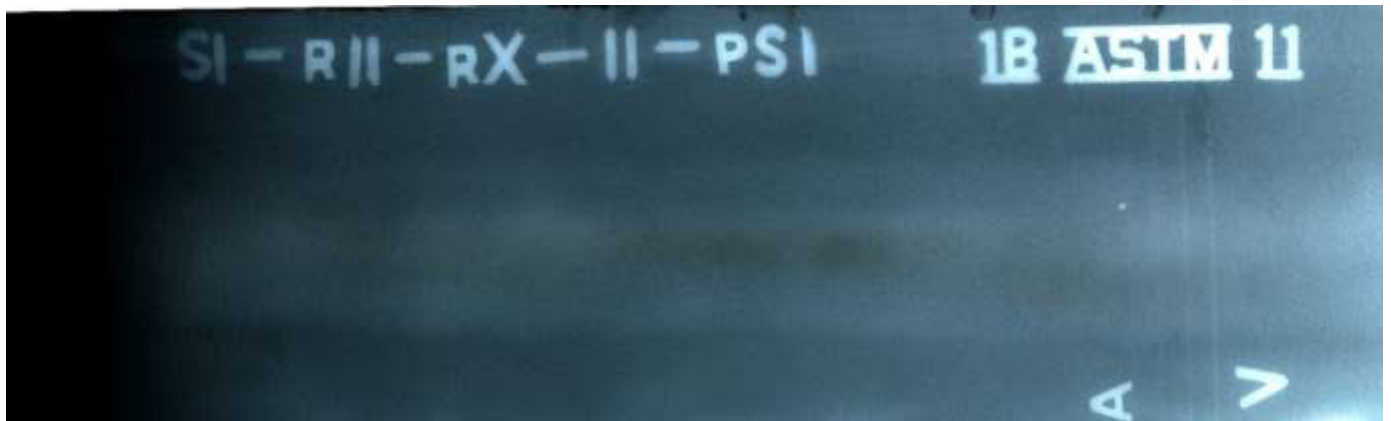
N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
No presenta discontinuidades	A	-	-	-	-
Identificación	2021-R-02-RX-02-P5-VA				



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

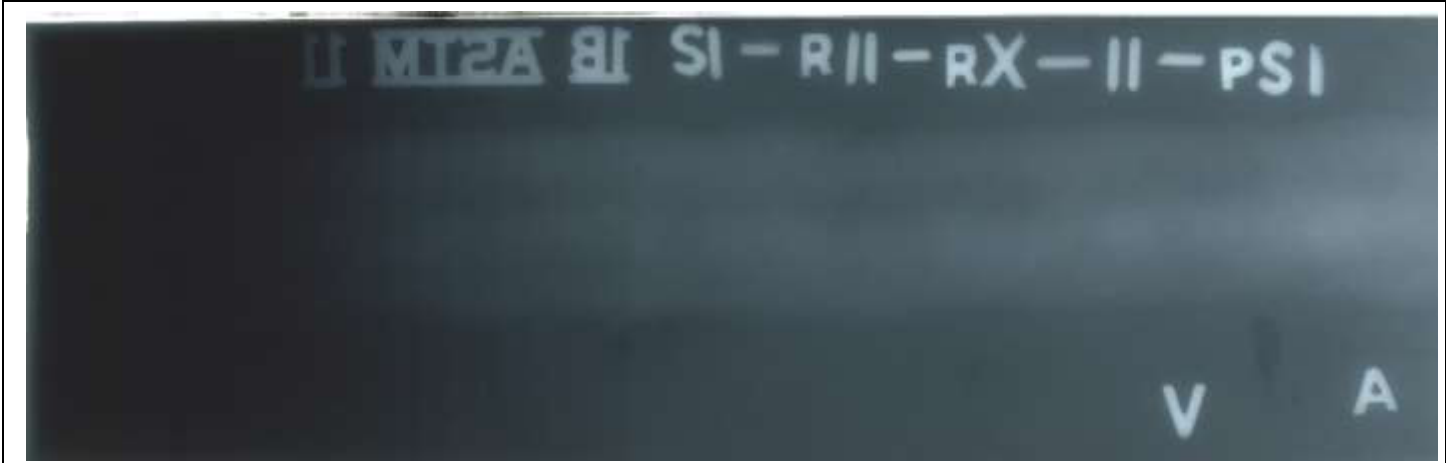
N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
No presenta discontinuidades	V	-	-	-	-
Identificación	2021-R-02-RX-02-P6-AV				



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
No presenta discontinuidades	A	-	-	-	-
Identificación	2021-R-02-RX-02-P6-VA				



Nota: Se presenta para la identificación de las discontinuidades (De izquierda a derecha).

Identificación de Discontinuidades

N° De Discontinuidad	Zona	Tipo De Discontinuidad	Ubicación en X (mm)	Ubicación en Y (mm)	Dimensión (mm)
1	V	Inclusión de escoria	176	35	<1

ANEXO XI. Velocidad de enfriamiento.

Uno de los parámetros importantes para determinar la microestructura que podría obtenerse después de un tratamiento térmico es la velocidad de enfriamiento. En el caso habitual de soldadura este enfriamiento se efectúa al ambiente. En aceros estructurales es una buena estimación proponer la velocidad de enfriamiento en un rango de 10 a 20 [°C/s] [31], pero también existen fórmulas empíricas que permiten establecer con cierto grado de exactitud dicha velocidad de enfriamiento. Es así como con la ayuda de la Ecu XI.1 se calculan las velocidades de enfriamiento para cada una de las probetas ensayadas.

$$S = (2\pi)(k)(Cp)(\rho) \left(\frac{e}{Hn}\right)^2 (Ti - To) \quad \text{Ec. XI.1}$$

Donde:

S	Velocidad de enfriamiento [°C/seg]
K	Conductividad térmica [W/m*K]
Cp	Calor específico [J/Kg*K]
e	Espesor de la probeta [m]
p	Densidad [Kg/m ³]
Hn	Emisividad
Ti	Temperatura final [°C]
Tf	Temperatura inicial [°C]

Se presenta un ejemplo de cálculo de la velocidad de enfriamiento. Además, en la tabla XI.1 se muestran las propiedades del acero ASTM A572 Gr 50.

Tabla XI.1. Propiedades del acero ASTM A572 Gr. 50

Acero ASTM A572		
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	8131	Kg/m ³
Conductividad térmica	41	W/m*K
Calor específico	434	J/Kg*K
Emisividad	0,26	-
Difusividad térmica	11,6x10 ⁻⁶	m ² /s

(Fuente:[31])

$$S = (2\pi) (k) (Cp)(\rho) \left(\frac{e}{Hn}\right)^2 (Ti - To)$$

Reemplazando los datos en la ecuación XI.1.

$$S = (2\pi) \left(41 \frac{W}{m * K}\right) \left(434 \frac{J}{Kg * K}\right) \left(8131 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(\frac{0,015 m}{2,6x10^6}\right)^2 (700 - 19)^\circ C$$

$$S = 9,6 \text{ }^\circ C/Seg.$$

En la tabla XI.2 se presenta las velocidades de enfriamiento de cada una de las probetas.

Tabla XI.2. Velocidades de enfriamiento.

Código de la probeta	Velocidad de enfriamiento [°C/Seg]
S-P1-0R	9,6
S-P2-1R	10
S-P3-2R	8,9
SF-P4-0R	13,48
SF-P5-1R	16,46
SF-P6-2R	15,81

(Fuente: [Propia])

ANEXO XII. Tamaño de grano

Mediante la norma ASTM E112 y la ecuación XII.1 se procede a demostrar un ejemplo de medición de grano.

$$N = \left(\frac{100}{x}\right)^2 * 2^{n-1} \quad \text{Ec. XII.1.}$$

Donde:

N Es el número de granos por pulgada cuadrada.

X Aumento de la micrografía.

N Tamaño de grano según la ASTM.

Para encontrar el número de granos por pulgada cuadra es necesaria la micrografía en tamaño real y sobre la misma colocar un cuadrado de una pulgada cuadrada como lo muestra la figura XII.1, el cuadrado se puede ubicar en cualquier parte de esta, es recomendable ubicarlo en donde el grano sea más homogéneo. Una vez escogido el lugar se recorta la sección como lo muestra la figura XII.2 se cuentan los granos del borde y del interior, teniendo en consideración que los granos del borde serán contabilizados como medio grano y cada grano del interior como un grano, como se muestra la figura XII.3.

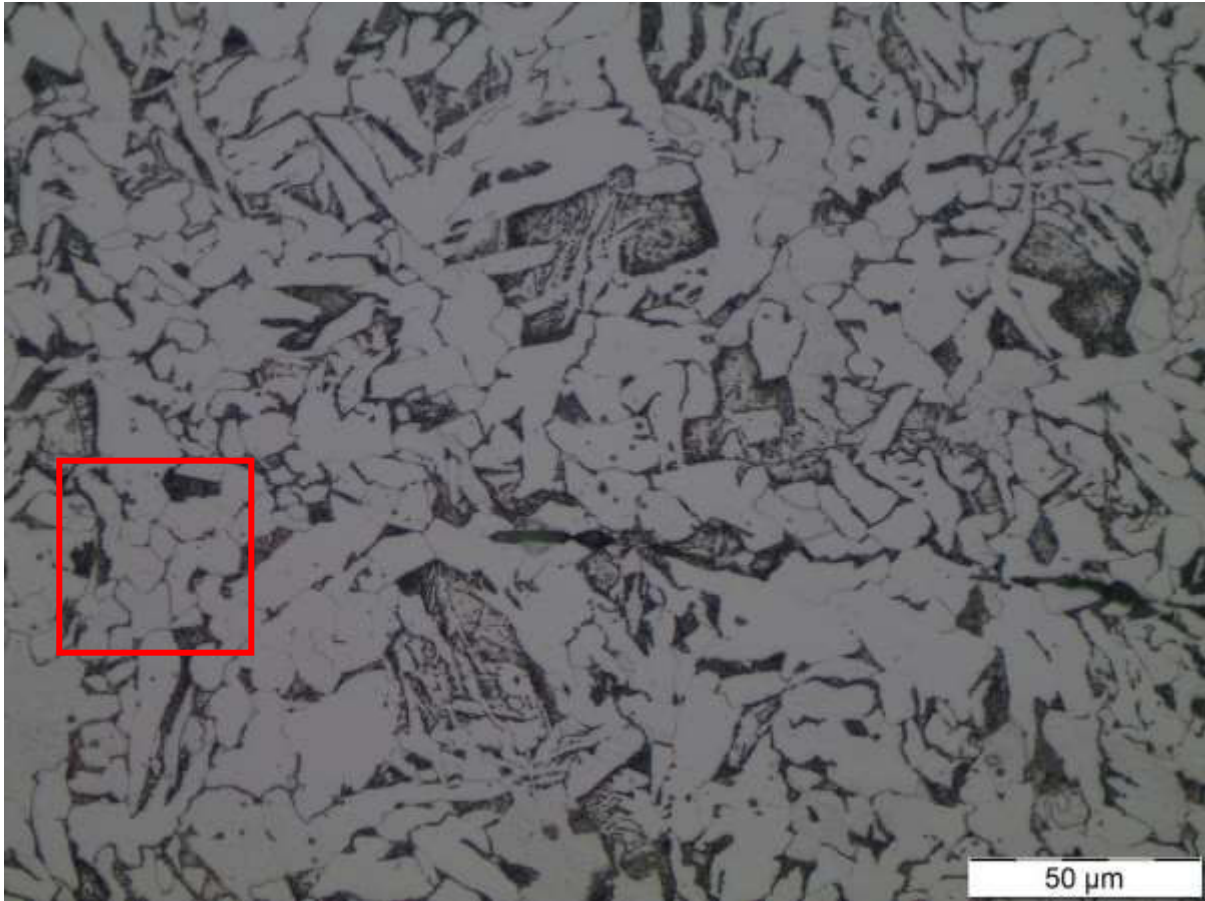


Figura XII.1. Micrografía del material base a 500x con un cuadrado de 1 pulgada cuadrada.



Figura XII.2. Sección de una pulgada cuadrada.

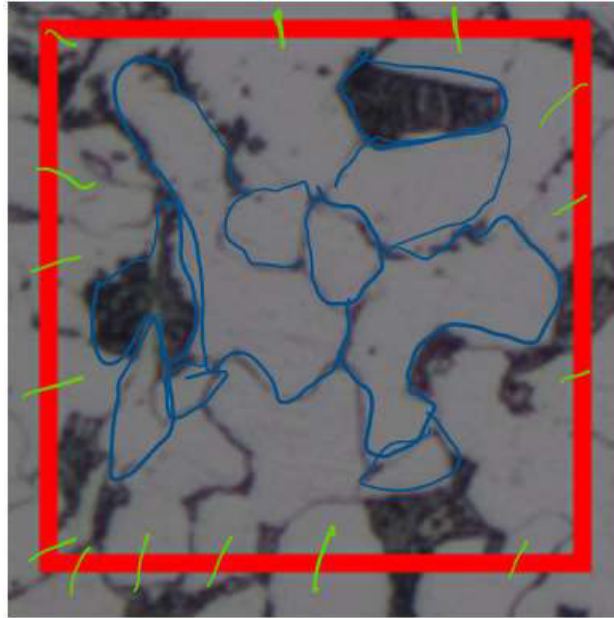


Figura XII.3. Conteo de granos del borde e internos.

Según la figura XII.3, se obtienen 15 granos en el borde y 10 granos en el interior, teniendo así un total de 18,5 granos. Además, la micrografía tiene un aumento de 500x. Los datos encontrados se reemplazan en la ecuación XII.1.

$$18,5 = \left(\frac{100}{500}\right)^2 * 2^{n-1}$$

$$n = 9,85 \approx 10$$

Mediante la figura XII.4 se observa el tamaño promedio de grano designado por la ASTM es de 11,2 μm .

En la tabla XII.1 se muestran los tamaños de grano de cada probeta.

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		\bar{T} Mean Intercept		\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Figura XII.4. Tamaño de grano según la ASTM

Tabla XII.1. Valores del tamaño de grano según ASTM.

Código de la probeta	Número de grano según ASTM	Tamaño de grano promedio [μm]
Material Base	10	11,2
S-P1-0R	10	11,2
S-P2-1R	11	7,9
S-P3-2R	10	11,2
SF-P4-0R	10	11,2
SF-P5-1R	10	11,2
SF-P6-2R	8	20

Fuente: (Propia)