



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

“INFLUENCIA DE LA SOLDADURA SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR
DEBIDO A REPARACIONES SUCESIVAS EN JUNTAS SOLDADAS DE
ACERO DE BAJA ALEACIÓN Y ALTA RESISTENCIA”

AUTOR: CRUZ ALDAZ, JOHN JAIRO

DIRECTOR: MSC. ING. NARANJO GUATEMALA, CARLOS RODRIGO

SANGOLQUÍ

2019



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “ *INFLUENCIA DE LA SOLDADURA SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR DEBIDO A REPARACIONES SUCESIVAS EN JUNTAS SOLDADAS DE ACERO DE BAJA ALEACIÓN Y ALTA RESISTENCIA*” fue realizado por el señor *Cruz Aldaz John Jairo* el mismo que ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de enero de 2019

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Carlos Rodrigo Naranjo Guatemala', is written over a horizontal dashed line.

MSc. Ing. Naranjo Guatemala Carlos Rodrigo

C. C: 1707087084



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Cruz Aldaz John Jairo*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Influencia de la soldadura sobre la microestructura y propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor debido a reparaciones sucesivas en juntas soldadas de acero de baja aleación y alta resistencia* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 25 de enero de 2019

Cruz Aldaz John Jairo

C. C: 172089945-7



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y LA MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, *Cruz Aldaz John Jairo* autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *Influencia de la soldadura sobre la microestructura y propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor debido a reparaciones sucesivas en juntas soldadas de acero de baja aleación y alta resistencia* en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 25 de enero de 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Cruz Aldaz John Jairo', written over a horizontal dashed line.

Cruz Aldaz John Jairo

C. C: 172089945-7

DEDICATORIA

Dedico este título de Ingeniero Mecánico a mis padres Marco Cruz y Jenny Aldaz quienes, con su amor, paciencia, esfuerzo y dedicación, desde el momento en que me tuvieron en sus brazos, han sabido guiarme y cuidarme durante todos estos años de mi vida para que así pueda ser un hombre de bien para la humanidad.

A mis hermanos y hermanas, Pamela C., Erick C., Michelle C. y Doménica C. por haberme tenido paciencia y haberme brindando todo su apoyo y ayuda durante toda esta travesía universitaria.

A todos mis familiares, amigos y personas que han creído en mí, ya que han contribuido con su aprecio y estima de una manera positiva en mi vida.

John Jairo Cruz Aldaz

AGRADECIMIENTO

Un infinito agradecimiento al Dios Padre Creador de todo, por haberme permitido nacer en esta tierra mágica llamada Ecuador y por haber estado guiando y cuidando cada uno de mis pasos durante todos estos años que me ha permitido vivir.

Agradezco a mis padres y hermanos por siempre haberme brindado su ayuda y apoyo incondicional en todo momento, demostrándome que su infinito amor y gracia siempre será más grande que cualquier circunstancia que podamos vivir.

Un agradecimiento a todos quienes conforman el departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas – ESPE y en especial al Ingeniero Carlos Naranjo director de mi tesis, quien, con su paciencia, conocimiento y guía adecuada, me ha permitido culminar con éxitos el proyecto de investigación, permitiéndome así crecer de manera positiva en mi formación como profesional.

Un agradecimiento muy especial a la empresa VALVULAS DEL PACIFICO y en especial al Ingeniero Jairo Barragán, quien desde el primer día en que llegamos al acuerdo cooperativo de trabajo, estuvo listo para brindarme un apoyo total para el desarrollo del proyecto de investigación.

A todos mis buenos amigos y personas que creyeron en mí, cada uno supo inyectarme una chispa de energía y de felicidad durante todo este tiempo de mi carrera universitaria.

John Jairo Cruz Aldaz

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e Importancia	2
1.3. Alcance.....	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
CAPITULO II.....	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Aceros de baja aleación y alta resistencia	5
2.1.1. Designación AISI/SAE	6
2.1.2. Acero SAE 4140	7
2.2. Soldadura por arco del acero 4140.....	8
2.2.1. Proceso de Soldadura por Arco de Gas (GMAW).....	9
2.2.2. Proceso de Soldadura por Arco de Metal Blindado (SMAW).....	11
2.3. Metalurgia de la Soldadura	13
2.4. La zona afectada por el calor (ZAC).....	14

2.5. Las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor	14
2.5.1. La dureza de la zona afectada por el calor	14
2.5.2. La tenacidad a la fractura de la zona afectada por el calor	15
2.5.3. Microestructuras susceptibles	17
2.6. ZAC en soldaduras con una sola pasada	18
2.6.1. Región de transición.....	19
2.6.2. Región de grano grueso.....	19
2.6.3. Región de grano refinado	20
2.7. ZAC en soldaduras con multipasadas	20
2.8. Ecuación de la temperatura máxima en cada punto de la ZAC	21
2.8.1. Determinación del ancho de la ZAC de la junta soldada:	21
2.9. Norma Aplicativa.....	21
2.9.1. Código ASME BPVC Sección IX	21
2.9.2. Especificación API 6 (ISO 10423).....	22
2.9.3. ASME B31	22
B31.1 - Tubería de Potencia	23
B31.3 - Tubería de Proceso	23
2.10. Procedimientos de Soldadura y Ensayos	24
2.10.1. Especificación de procedimiento de soldadura WPS.....	24
2.10.2. Ensayos no destructivos	24
2.10.2.1. Líquidos Penetrantes	25
2.10.3. Ensayos Mecánicos	26
2.10.3.1. Doblez guiado	26
2.10.3.2. Microdureza	27
2.10.3.3. Impacto	29
2.10.3.4. Metalografía.....	29
2.11. Cupón de prueba y especímenes de prueba	30
2.12. Soldadura de Reparación	32
2.12.1. Identificación de necesidades de reparación de soldaduras	32
2.12.2. Consideraciones para procedimientos de reparación	34

2.12.2.1. Procedimiento de reparación alternativo a PWHT, donde se realizan pruebas de impacto en el equipo original.....	34
2.12.2.2. Técnicas de soldadura de reparación:	36
CAPÍTULO III DISEÑO DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA DE REPARACION.....	37
3.1. Diseño de los WPS de Reparación.....	37
3.2. Diseño del Cupón de Soldadura.....	37
3.1.1. Dimensiones de la Junta.....	38
3.1.2. Dimensiones de Especímenes	39
3.1.2.1. Dimensiones de los especímenes de Doblado Lateral	40
3.1.2.2. Dimensiones de los especímenes de dureza y metalografías.....	41
3.1.2.3. Dimensiones de especímenes de impacto	41
3.1.3. Ubicación de los especímenes en el cupón de soldadura y dimensiones finales del mismo.....	42
3.3. Identificación de los WPS.....	42
3.4. Variables del proceso de soldadura bajo código ASME BPVC sección IX	44
3.4.1. Variables esenciales.....	44
3.4.1.1. Carbono equivalente	45
3.4.1.2. Espesor t.....	45
3.4.1.3. Temperatura de precalentamiento.....	46
3.4.1.4. Heat Input	47
3.4.1.5. Temperatura de interfase.....	48
3.5. Selección del consumible.....	48
3.5.1. Electrodos y varillas bajo norma AWS A5.18.....	48
3.5.2. Electrodos bajo norma AWS A5.5/5.5M.....	50
3.5.3. Diámetro de los electrodos.....	50
CAPÍTULO IV DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	51
4.1. Controles antes de la soldadura.....	53
4.1.1. Equipos.....	53
4.1.1.1. Soldadora para el proceso GMAW	53
4.1.1.2. Calibración de la soldadora MillerMatic 300.	55

4.1.1.3.	Soldadora para el proceso SMAW.....	56
4.1.1.4.	Calibración de la soldadora MillerMatic Syncrowave 250.....	57
4.1.1.5.	Pinza Amperimétrica	58
4.1.1.6.	Multímetro	59
4.1.1.7.	Termómetro Laser.....	60
4.1.2.	Cupones.....	60
4.1.3.	Pre-ensamble de los cupones	61
4.2.	Controles durante la soldadura.....	62
4.3.	Desarrollo de los ensambles de soldadura	66
4.4.	Caracterización de las juntas de soldadura	71
4.5.	Aplicación del END (Líquidos Penetrantes) a los ensambles soldados.....	72
4.6.	Ensayos mecánicos aplicados a los ensambles soldados	75
4.6.1.	Ductilidad.....	75
4.6.2.	Microdureza	76
4.6.3.	Impacto.....	78
4.6.3.1.	Control metrológico de las probetas de impacto.....	78
4.6.3.2.	Aplicación del ensayo de impacto a las probetas de reparación.....	78
4.7.	Ensayos metalográficos.....	79
CAPÍTULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS		82
5.1.	Análisis químico	82
5.1.1.	Material base	82
5.1.2.	Carbono equivalente	82
5.2.	Ensayo No Destructivo (Líquidos Penetrantes)	84
5.3.	Análisis Metalográfico de los ensambles.....	88
5.3.1.	Análisis Metalográfico del Ensamble de Producción	88
5.3.2.	Análisis Metalográfico del Ensamble de la Primera Reparación.....	91
5.3.3.	Análisis Metalográfico del Ensamble de la Segunda Reparación.....	95
5.3.4.	Análisis Metalográfico del Ensamble de la Tercera Reparación	99
5.4.	Análisis de los valores del ensayo de microdureza realizado en los ensambles soldados.....	103

5.5. Análisis de los valores del ensayo de doblado realizado en los ensambles soldados	109
5.6. Análisis de los valores de tenacidad a través del ensayo Charpy realizados en los ensambles soldados	113
CAPÍTULO VI ANÁLISIS ECONÓMICO	115
6.1. Costos Directos	115
6.1.1. Costos de consumibles y material base	115
a) Masa de material a utilizar en la junta de producción.	115
b) Masa de consumible a utilizar en la junta de producción.	116
c) Costo del electrodo.	116
6.1.2. Costos de Mano de Obra	117
6.1.3. Costos de Fabricación de las Probetas	118
6.1.4. Costos de los Ensayos	118
6.1.5. Costos de Electricidad	119
6.2. Costo total de la inversión para el desarrollo del proyecto	120
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	121
7.1. Conclusiones:	121
7.2. Recomendaciones:	123
BIBLIOGRAFÍA	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Composición química de los aceros HSLA más comunes y utilizados</i>	6
Tabla 2. <i>Propiedades físicas del acero SAE 4140</i>	8
Tabla 3. <i>Propiedades mecánicas del acero SAE 4140</i>	8
Tabla 4. <i>Tipos de daños que pueden necesitar reparación de soldadura</i>	34
Tabla 5. <i>Espesores de calificación para el cupón de prueba y la ranura de reparación</i>	36
Tabla 6. <i>Número de ensayos a realizar a cada ensamble</i>	39
Tabla 7. <i>Límites de espesor para calificación del procedimiento y especímenes de prueba QW-451</i>	45
Tabla 8. <i>Rango de temperatura de precalentamiento e interpaso para el grosor de sección indicado</i>	47
Tabla 9. <i>Identificación de los ensambles y trabajo a realizar</i>	52
Tabla 10. <i>Especificaciones técnicas de la soldadora MillerMatic 300</i>	54
Tabla 11. <i>Especificaciones técnicas de la soldadora MillerMatic Syncrowave 250</i>	57
Tabla 12. <i>Rendimiento térmico para varios procesos de soldadura con arco eléctrico</i>	64
Tabla 13. <i>Parámetros de soldadura usados para el Heat Input de la junta de producción</i>	64
Tabla 14. <i>Codificación de las distintas probetas para los ensayos mecánicos y metalográficos</i>	71
Tabla 15. <i>Composición química promedio del acero (BOHLER V320)</i>	82
Tabla 16. <i>Resultados del ensayo de líquidos penetrantes aplicados a las probetas de los ensambles</i>	87
Tabla 17. <i>Valores de dureza promedio de la ZAC de la zona superior</i>	106
Tabla 18. <i>Resultados de la diferencia de porcentaje de los valores de dureza promedio de la ZAC de la zona superior</i>	106
Tabla 19. <i>Valores de dureza promedio de la ZAC de la zona inferior</i>	107
Tabla 20. <i>Resultados de la diferencia de porcentaje de los valores de dureza promedio de la ZAC de la zona inferior</i>	107
Tabla 21. <i>Valores de energía absorbida de impacto obtenidos en el ensayo Charpy</i>	113
Tabla 22. <i>Cantidad y dimensiones de las juntas de soldadura a desarrollar</i>	115
Tabla 23. <i>Costos del Material Base y Consumibles de Soldadura</i>	117
Tabla 24. <i>Costos de mano de obra</i>	117
Tabla 25. <i>Costos de fabricación de las distintas probetas</i>	118
Tabla 26. <i>Costos de los distintos ensayos</i>	118
Tabla 27. <i>Costos de electricidad</i>	119
Tabla 28. <i>Costos totales para el desarrollo de proyecto</i>	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de soldadura por arco de gas y metal (GMAW), que muestra la antorcha, soldadura y conexión eléctrica.....	10
Figura 2. Esquema del proceso SMAW, que incluye: el porta electrodo y el electrodo, la soldadura y la conexión eléctrica.....	11
Figura 3. Diagrama Hierro-Carbono, mostrando las fases de transición de la ZAT en la soldadura.....	13
Figura 4. Gráfica de dureza vs contenido de carbono en función de la formación de martensita en un acero al carbono que se ha enfriado rápidamente	17
Figura 5. Regiones constitutivas de la ZAC en una sola pasada.....	18
Figura 6. Secuencia de prueba de tinte penetrante. A-El líquido penetrante se aplica a la soldadura. B-El penetrante se limpia de la soldadura. C-El revelador se aplica a la soldadura. D-La soldadura se inspecciona para detectar discontinuidades que aparecieron después de que se aplicó el revelador.....	25
Figura 7. Los tres tipos de pruebas de flexión. La prueba de doblado lateral coloca la mayor cantidad de tensión a lo largo del eje de soldadura	27
Figura 8. Penetrador piramidal Vickers	28
Figura 9. Esquema de un aparato estándar para la prueba de impacto	29
Figura 10. Cupón de prueba para espesores mayores a 19 mm para calificación de proceso de soldadura según QW-463.1 (b).....	30
Figura 11. Ubicación de los especímenes a obtener en el cupón de soldadura según el código ASME BPVC Sección IX.....	31
Figura 12. Reparación de las paletas de una turbina mediante proceso de soldadura GTAW	32
Figura 13. Forma y partes que conforman una junta soldada	38
Figura 14. Dimensiones recomendadas de los especímenes de doblado lateral, sección QW-462.2 contenidas al interior del código ASME BPVC Sección IX	40
Figura 15. Dimensiones del espécimen para el ensayo de doblado lateral	41
Figura 16. Dimensiones de los especímenes para el ensayo de dureza y metalografía	41
Figura 17. Especimen para la realización de ensayo de Impacto.....	42
Figura 18. Zona de donde se obtendrá el Especimen para la realización de ensayo de Impacto..	42
Figura 19. Identificación de los WPS a desarrollarse para las juntas soldadas de: Producción, 1era Reparación, 2da Reparación y 3era Reparación	44
Figura 20. Identificación de las varillas bajo norma AWS A5.18	49
Figura 21. Juntas de soldadura. (a) Forma de la junta de producción (b) Forma de la ranura de reparación a realizar en las juntas de reparación	52
Figura 22. Soldadora MillerMatic 300, usada para proceso de soldadura MIG/MAG perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE	54

Figura 23. Calibración de la soldadora MillerMatic 300 a través de la Verificación de los parámetros de salida mediante el uso de una pinza amperimétrica UNI-T UT208 y un multímetro FLUKE 87V	55
Figura 24. Soldadora MillerMatic Syncrowave 250, usada para proceso de soldadura GTAW/SMAW perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.....	56
Figura 25. Calibración de la soldadora MillerMatic Syncrowave 250. (a) Verificación de los parámetros de salida mediante el uso de una pinza amperimétrica UNI-T UT208 y un multímetro Fluke 87V (b) Valores de intensidad de corriente y voltaje, obtenidos a la salida de la soldadora	58
Figura 26. Pinza Amperimétrica UNI-T UT208	59
Figura 27. Multímetro Fluke 87V	59
Figura 28. Termómetro laser FLUKE 62 MAX.....	60
Figura 29. Control de cupones. (a) Control del ángulo del bisel mediante una galga para soldadura. (b) Control de la altura la raíz del cupón. (c) Control del ancho del cupón mediante un calibrador.....	61
Figura 30. Ensamble de los cupones. (a) Utilización de una galga para el control de la apertura de la raíz de la junta (b) Soldeo de los rigidizadores en un ensamble de reparación.....	61
Figura 31. Ensamble de los cupones. (a) Ensamble de producción terminado (b) Ensamblados de reparación terminados con sus respectivos números de reparaciones	62
Figura 32. Controles durante la soldadura. (a) Control de intensidad de corriente, voltaje y velocidad de avance en el proceso GMAW. (b) Control de la temperatura entre pases y temperatura medida en el tercer pase de cordón de soldadura realizado en la junta de producción	65
Figura 33. Ensamble de Producción. (a) Pre calentamiento de los cupones de producción y de reparación. (b) Control de la temperatura entre pases del ensamble de producción mediante el termómetro laser Fluke 62 Max	67
Figura 34. Control y soldeo de los ensambles. (a) Equipos usados para el control de las variables de soldadura (Pinza amperimétrica, termómetro laser, multímetro). (b) Proceso de soldeo de los ensambles mediante proceso de soldadura GMAW	68
Figura 35. Control y soldeo de los ensambles de reparación. (a) Resecado de los electrodos E-7018 (b) Control de la temperatura entre pases. (c) Limpieza de la ranura de reparación, previo a la realización de la reparación mediante proceso SMAW	70
Figura 36. Líquidos Penetrantes. (a) Penetrante aplicado a las juntas de reparación. (b) Limpieza del penetrante. (c) Aplicación del revelador sobre las juntas de reparación.....	73
Figura 37. (a) Líquidos penetrantes aplicados en la superficie de la raíz del ensamble de producción. (b) Líquidos penetrantes sobre las probetas de doblado del ensamble de	

producción. (c) Líquidos penetrantes sobre las probetas de doblado de un ensamble de reparación.....	74
Figura 38. Pruebas de Flexión. (a) Maquina de Ensayos Universales AMSLER (Universidad de las fuerzas Armadas-ESPE). (b) Ensayo de doblado lateral junto a sus componentes principales (Rodillos, Soportes, Probeta a ensayar).....	76
Figura 39. Esquema ilustrativo que muestra la ubicación de los lugares donde se deben realizar los perfiles de dureza y microdureza	77
Figura 40. Ensayo de microdureza. (a) Ejecución de la indentación en la probeta de la primera reparación. (b) Valor de microdureza Vickers (HV) obtenido en el material base	77
Figura 41. Control de las Probetas de impacto. (a)Montaje de una probeta de impacto sobre el proyector de perfiles. (b) Control metrológico de la muesca de la probeta de impacto.....	78
Figura 42. Probetas de impacto. (a) Probetas de impacto del ensamble de la primera reparación. (b) Probetas de impacto del ensamble de la segunda reparación. (c) Probetas de impacto del ensamble de la tercera reparación	79
Figura 43. Ensayo de impacto (a) Reducción de la temperatura, esta ira disminuyendo progresivamente hasta un valor de -31 °C. (b) Aplicación del ensayo de impacto a una probeta.....	79
Figura 44. Proceso de preparación de las muestras para el análisis metalográfico.....	80
Figura 45. Microscopia Óptica. (a) Microscopio Metalográfico MEIJI - TECHNO perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (b) Imagen obtenida a 200x mediante el microscopio metalográfico	81
Figura 46. Metalografías. (a) Metalografía de la 1era reparación con nital al 2%. (b) Metalografía de la 2da reparación con nital al 2%. (c) Metalografía de la 3era reparación con nital al 2%	81
Figura 47. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a la superficie del ensamble de producción	84
Figura 48. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a las probetas LP1JP y LP2JP del ensamble de producción.....	85
Figura 49. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a las probetas LP1R1 y LP2R1 del ensamble con una reparación	85
Figura 50. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a las probetas LP1R2 y LP2R2 del ensamble con dos reparaciones.....	86
Figura 51. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a las probetas LP1R3 y LP2R3 del ensamble con tres reparaciones.....	86

Figura 52. Microestructura de la junta de producción. (a) Microestructura del metal de soldadura (electrodo E70S-6). 200x (b) Microestructura martésítica del material base (AISI 4140). 500x.....	88
Figura 53. Microestructura de la ZAC superior del ensamble de producción, la cual posee martensita en forma acicular con agujas muy bien definidas. 200x	89
Figura 54. Microestructura de la ZAC de la raíz del ensamble de producción, la cual posee grupos de listones paralelos de martensita. 200x.....	90
Figura 55. Microestructura de la primera reparación. (a) Microestructura del metal de soldadura, martensita presente en la ZAC e inclusiones no metálicas (puntos negros). 200x. (b) Microestructura del material base (AISI 4140), martensita en forma de agujas y zonas de austenita. 500x	91
Figura 56. ZAC de la primera reparación. (a) Martensita en forma de listones paralelos junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 200x. (b) Martensita fina agrupada paralelamente en la microestructura de la ZAC.500x (c) Microestructura de la ZAC de la raíz, martensita mostrando grupos de agujas paralelos junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 500x	93
Figura 57. ZAC de la segunda reparación. (a) Microestructura, martensita fina presente en la ZAC, junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 200x (b) Microestructura del material base (AISI 4140), martensita en forma de agujas y zonas de austenita. 500x	95
Figura 58. Microestructura de la ZAC de la segunda reparación. (a) Microestructura en forma de martensita fina presente en la ZAC, junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 200x (b) Microestructura martensita fina difusa presente en la ZAC de la raíz, junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 200x	96
Figura 59. Fisuras en la ZAC de la segunda reparación. (a) Microestructura en forma de martensita fina presente en la ZAC junto a la presencia de una fisura generada en la ZAC. 200x (b) Aumento del análisis de una micro-grieta presente en la ZAC con una imagen a 500x	97
Figura 60. ZAC de la tercera Reparación. (a) Martensita fina en la ZAC con presencia de inclusiones. 200x (b) Microestructura del material base, martensita en forma de agujas y presencia de inclusiones no metálicas. 500x	99
Figura 61. (a) Microestructura en forma de martensita fina presente en la ZAC, presencia de inclusiones no metálicas y zonas de austenita. 200x (b) Martensita fina difusa presente en la ZAC de la raíz, junto a pequeñas inclusiones no metálicas. 500x.....	100
Figura 62. Fisuras en la ZAC de la tercera reparación. (a) Martensita presente en la ZAC, existencia de una fisura generada en la ZAC superior.100x (b) Microestructura martensita, presente en la ZAC de la raíz, existencia de una fisura generada en la ZAC inferior. 200x (c) Forma de la propagación de la fisura generada en la ZAC inferior. 200x	101

Figura 64. Zonas de las probetas donde se realizaron las indentaciones, para la determinación del perfil transversal de microdureza HV	103
Figura 64. Perfil transversal de microdureza HV de las probetas DZJP - DZ1R1 - DZ1R2 - DZ1R3, obtenidos en la zona superior de la ZAC	104
Figura 65. Perfil transversal de microdureza HV de las probetas DZJP - DZ1R1 - DZ1R2 - DZ1R3, obtenidos en la zona inferior de la ZAC	104
Figura 66. Perfil transversal de microdureza HV de las probetas DZJP - DZ2R1 - DZ2R2 - DZ2R3, obtenidos en la zona superior de la ZAC	105
Figura 67. Perfil transversal de microdureza HV de las probetas DZJP - DZ2R1 - DZ2R2 - DZ2R3, obtenidos en la zona inferior de la ZAC	105
Figura 68. Probetas dobladas del ensamble con una reparación	109
Figura 69. Presencia de porosidades en las probetas de doblado del ensamble con una reparación	109
Figura 70. Probetas dobladas del ensamble con dos reparaciones	110
Figura 71. Defectos en las probetas de doblado del ensamble con dos reparaciones. (a) Iniciación de la falla de la probeta de doblado del ensamble con dos reparaciones, debido a la presencia de grietas en la raíz. (b) Porosidades presentes en la parte baja de la probeta de doblado del ensamble de dos reparaciones	110
Figura 72. Probetas dobladas del ensamble con tres reparaciones.....	111
Figura 73. Iniciación de la falla de la probeta de doblado del ensamble con tres reparaciones, debido a la presencia de una grieta en la raíz	111
Figura 74. Comportamiento de la Energía de impacto absorbida (J) en las juntas de reparación	113
Figura 75. Falla frágil presente en las probetas de impacto de las distintas reparaciones realizadas	114

RESUMEN

La presente investigación analiza la influencia de la soldadura sobre la microestructura, ductilidad, dureza y tenacidad de la zona afectada por el calor debido a reparaciones sucesivas en juntas soldadas de acero de baja aleación y alta resistencia. El proceso de soldadura se llevó a cabo en 4 ensambles de placas de acero AISI 4140 de 200x75x40 mm que se soldaron conforme lo establecido en procedimientos de soldadura (WPS), que se utilizan en la fabricación de tubería de alta presión para centrales hidroeléctricas, tanto en las etapas de fabricación como de reparación. Se ejecutaron cuatro ensambles distribuidos en: un ensamble de producción, un ensamble con una reparación, un ensamble con dos reparaciones y uno con tres reparaciones. Las dimensiones y espesor de 40 mm, se determinaron en base al código ASME BPVC Sección IX. Se utilizaron normas ASTM y el código ASME BPVC Sección IX para la realización de ensayos mecánicos y metalúrgicos. Los ensayos mecánicos aplicados fueron: doblado, microdureza, impacto, complementados con un análisis metalúrgico y END, que permitirán determinar los cambios estructurales y microestructurales que suceden luego de cada una de las reparaciones. Los resultados obtenidos presentan una susceptibilidad al agrietamiento en la ZAC de la raíz de los ensambles que poseen más de una reparación, debido a la estructura martensítica presente y a la acumulación de esfuerzos causados por los gradientes térmicos desarrollados durante el proceso de producción y de reparación de los ensambles.

PALABRAS CLAVE:

- **ACERO AISI 4140**
- **CÓDIGO ASME BPVC SECCIÓN IX**
- **ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC)**
- **SOLDADURA DE REPARACIÓN**
- **AGRIETAMIENTO EN LA ZAC**

ABSTRACT

The present investigation analyzes the influence of the welding on the microstructure, ductility, hardness and tenacity of the zone affected by the heat due to successive repairs in soldered joints of low alloy steel and high resistance. The welding process was carried out in 4 assemblies of plates of AISI 4140 steel of 200x75x40 mm that were welded according to the established procedures of welding (WPS), which are used in the manufacture of high pressure piping for hydroelectric power stations, both in the manufacturing stages as repair. Four assemblies were executed distributed in: a production assembly, an assembly with a repair, an assembly with two repairs and one with three repairs. The dimensions and thickness of 40 mm were determined based on the code ASME BPVC Section IX. ASTM standards and the code ASME BPVC Section IX were used for mechanical and metallurgical tests. The applied mechanical tests were: bending, microhardness, impact, complemented with a metallurgical analysis and END, which will allow to determine the structural and microstructural changes that occur after each one of the repairs. The results obtained show a susceptibility to cracking in the root ZAC of the assemblies that have more than one repair, due to the martensitic structure present and the accumulation of stress caused by the thermal gradients developed during the production and repair process of the assemblies.

KEYWORDS:

- **STEEL AISI 4140**
- **CODE ASME BPVC SECTION IX**
- **HEAT AFFECTED ZONE (HAZ)**
- **REPAIR WELDING**
- **CRACKING IN THE HAZ.**

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

Los aceros (HSLA: aceros de baja aleación y de alta resistencia) se han vuelto ampliamente populares en la fabricación de diversas estructuras para aplicaciones críticas y no críticas debido a su economía razonable y altos esfuerzos de diseño que pueden soportar. La soldadura de secciones de acero pesadas impone una variedad de problemas tales como distorsión, tensión residual, ablandamiento y endurecimiento de ZAC, porque la mayoría de los aceros son sensibles a la estructura. Los aceros resistentes al calor que con frecuencia contienen Cr, Mo y bajo % en peso de C, se usan comúnmente para fabricar componentes para recipientes a presión, sistemas de energía, industrias nucleares y químicas, procesamiento de alimentos y petróleo.

(Pikula, Lomozik, & Pfeifer, 2017). Estudiaron las uniones de soldadura de fragmentos recortados de un muro de agua hecho de acero grado P265GH. Inicialmente, el diámetro del tubo y el grosor de la pared eran de 60,3 mm y 6,3 mm, respectivamente, y el grosor de la barra plana era de 6 mm. El muro de contención muestreado para las muestras de prueba se había operado durante 180000 horas a una temperatura de hasta 535°C y a una presión de 24 atmosferas, y requería reparación debido a la corrosión del oxígeno. La operación conduce a la reducción de espesor del tubo y la barra plana, que eran de 5,9 mm y 4,7 mm, respectivamente.

Se utilizó soldadura de metal de relleno cuya composición química era similar a los elementos soldados. Las juntas de reparación se soldaron usando el proceso manual de arco metálico (MMA). Un proceso de soldadura de reparación de una sola vez incluyó la eliminación de la soldadura y el proceso de soldadura de reparación. Se realizaron procesos de soldadura de reparación de dos, tres, cuatro y cinco veces. (Pikula, Lomozik, & Pfeifer, 2017)

En los especímenes a analizar, se realizaron pruebas metalográficas, pruebas de micro-dureza Vickers siguiendo los requisitos de EN ISO 6507-1:2007. Las pruebas justificaron que la soldadura de reparación múltiple es responsable de la diversificación de la microestructura ZAC en términos de fases y tamaños de grano. (Pikula, Lomozik, & Pfeifer, 2017)

Ya que, para la unión de tubería mediante soldadura en la industria petrolera, están presentes defectos o imperfecciones propias del proceso, sean estos de naturaleza humana, de la tecnología aplicada o bien del diseño del procedimiento de soldadura. (Chuquin Vasco & Fonseca Amaya, 2011)

Los distintos métodos que usaron para la evaluación de las propiedades se basaron en la medición de las características propias del metal base en la zona de afectación del calor, antes y después de la ejecución de la junta de soldadura al realizarse un número no determinado de reparaciones en la misma. Para aquello utilizaron ensayos cualitativos para determinar las propiedades mecánicas (Ductilidad, tenacidad y dureza) y metalúrgicas (macrografías y micrografías) posibilitando determinar los cambios estructurales que suceden luego de cada una de las reparaciones. Posterior a esto realizaron los análisis de los distintos ensayos ejecutados en varias probetas, las mismas que fueron extraídas de tubería de proceso SA-106-Gr.B. (Chuquin Vasco & Fonseca Amaya, 2011)

1.2. Justificación e Importancia

En la industria energética, durante la operación, elementos estructurales están sujetos a efectos acumulados localmente y campos de temperatura no estacionarios, cargas mecánicas, efectos ambientales, impacto, así como cambios en la heterogeneidad del material estructural. Lo anterior puede conducir a cambios de las propiedades mecánicas. (Pikula, Lomozik, & Pfeifer, 2017)

Si los elementos están expuestos a variaciones periódicas y aleatorias (sobrecargas), pueden ocurrir tensiones y fallas plásticas locales, que generalmente están presentes en áreas de acumulación de esfuerzos causada por muescas mecánicas, muescas estructurales y por el alto gradiente de temperatura, cambios estructurales, geometría y tensiones residuales en las uniones soldadas, estas desencadenan la concentración de tensiones, lo que reduce la resistencia a la fatiga (Bilous & Lagoda, 2009). En particular, en la zona afectada por el calor (ZAC), como es un área que tiene una microestructura diversificada, es susceptible a la iniciación de grietas.

Los distintos cambios que se pueden generar al momento de la realización de reparaciones en juntas soldadas a través de los distintos procesos de soldadura existentes, interfieren en una manera directa sobre las propiedades del metal base principalmente en la ZAC. Ya que si se desarrolla un proceso inadecuado de reparación es posible que se presenten grietas de soldadura que son defectos inaceptables, además de la reducción de la ductilidad que pueden comprometer la integridad de las estructuras soldadas.

El agrietamiento de la soldadura puede conducir a fallas estructurales que, en el mejor de los casos, requerirán medidas correctivas y, en el peor de los casos, pueden provocar la pérdida de vidas. Todas las industrias que utilizan la soldadura pueden verse afectadas, incluidas la nuclear, aeroespacial, automotriz, petrolera, naval y civil.

1.3. Alcance

Generar una mayor información en el campo de la soldadura de reparación, a través del análisis de la influencia de la soldadura sobre los cambios en la microestructura, ductilidad, dureza y tenacidad mediante la obtención de imágenes macroscópicas y microscópicas, imágenes de tamaño de grano junto a gráficas de distribución de micro dureza, tenacidad principalmente en la zona afectada por el calor (ZAC) debido a varias reparaciones realizadas en acero de baja aleación y alta

resistencia en espesores gruesos, en juntas soldadas de acero AISI 4130, 4140 o 4340 algunos de los más usados en el Ecuador, con un espesor recomendado a usar de 38-40 mm para ensayos mecánicos según el código ASME BPVC Sección IX.

1.4.Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Analizar la influencia de la soldadura sobre la microestructura, ductilidad, dureza y tenacidad de la zona afectada por el calor debido a reparaciones sucesivas en juntas soldadas de acero de baja aleación y alta resistencia.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Investigar y establecer los WPS para la ejecución de las soldaduras de producción y reparación, de aceros micro-aleados de alta resistencia.
- Ejecutar cupones de prueba para soldadura de producción y soldadura de reparación, con un máximo de tres reparaciones.
- Realizar los ensayos mecánicos y metalográficos, conforme el Código ASME BPVC sección IX y normas ASTM aplicables, para determinar la variación que sufren las propiedades mecánicas y metalúrgicas.
- Establecer lineamientos adecuados para los WPS tanto para una primera, segunda y tercera reparación, realizadas en ensambles soldados de acero de baja aleación y alta resistencia.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Aceros de baja aleación y alta resistencia

Los aceros de baja aleación de alta resistencia (HSLA: High Strength Low Alloy) fueron desarrollados en la década de 1930; poseen un bajo contenido de carbono (normalmente menos del 0.30%) y están aleados con pequeñas cantidades de otros elementos tales como Mn, Cu, Ni, Cr; que le brindan cualidades mecánicas superiores en comparación a los aceros dulces; estos aceros se caracterizan por su fácil soldabilidad y conformabilidad. (Kalpakjian & Schmid, 2002)

Los aceros de baja aleación de carbono medio se refuerzan al enfriarse para producir una estructura martensítica, seguido de un templado para obtener los niveles deseados de dureza, resistencia y ductilidad. La combinación de alto contenido de carbono, que promueve altos niveles de dureza máxima y alta capacidad de endurecimiento, que se producen por el contenido de carbono y aleaciones, resulta en una mayor susceptibilidad al agrietamiento de la soldadura.

La alta dureza de muchos de estos aceros en su estado final endurecido y templado a menudo impide su soldadura en esa condición, debido a la fuerte tendencia al agrietamiento en frío (es decir, el agrietamiento que se desarrolla después de que se completa la solidificación). A excepción de las reparaciones de soldadura, estos aceros normalmente se sueldan en condiciones de recocido o templado, y luego la soldadura completa se trata térmicamente para obtener el nivel deseado de dureza o resistencia.

Tabla 1.*Composición química de los aceros HSLA más comunes y utilizados*

AISI SAE	COMPOSITION, WT%						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
1330	0.28-0.33	1.60-1.90	0.15-0.30	...	...	...	...
1340	0.38-0.43	1.60-1.90	0.15-0.30	...	...	...	...
4023	0.20-0.25	0.70-0.90	0.15-0.30	...	...	0.20-0.30	...
4028	0.25-0.30	0.70-0.90	0.15-0.30	...	...	0.20-0.30	...
4047	0.45-0.50	0.70-0.90	0.15-0.30	...	...	0.20-0.30	...
4118	0.18-0.23	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.60	...	0.08-0.15	...
4130	0.28-0.33	0.40-0.60	0.15-0.30	0.80-1.10	...	0.15-0.25	...
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.15-0.30	0.80-1.10	...	0.15-0.25	...
4150	0.48-0.53	0.75-1.00	0.15-0.30	0.80-1.10	...	0.15-0.25	...
4320	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	0.40-0.60	1.65-2.00	0.20-0.30	...
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	0.15-0.30	0.70-0.90	1.65-2.00	0.20-0.30	...
4620	0.17-0.22	0.45-0.65	0.15-0.30	...	1.65-2.00	0.20-0.30	...
5120	0.17-0.22	0.70-0.90	0.15-0.30	0.70-0.90	...	...	...
5145	0.40-0.48	0.70-0.90	0.15-0.30	0.70-0.90	...	...	...
6150	0.48-0.53	0.70-0.90	0.20-0.35	0.80-1.10	...	...	0.15-0.25
8620	0.18-0.33	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.60	0.40-0.70	0.15-0.25	...
8630	0.28-0.33	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.60	0.40-0.70	0.15-0.25	...
8640	0.38-0.43	0.70-0.90	0.15-0.30	0.40-0.60	0.40-0.70	0.15-0.25	...

Fuente: (ASM Handbook, 1993)

2.1.1. Designación AISI/SAE

Los aceros se encuentran estandarizados a nivel mundial por la *American Iron and Steel Institute* (AISI) y la *Society of automotive Engineers* (SAE). En la descripción SAE se emplea cuatro dígitos del modo siguiente: El primer dígito es el tipo de acero, el segundo dígito es el porcentaje aproximado de elemento predominante en la aleación en un acero de aleación simple, el tercer y cuarto dígito hacen referencia al porcentaje aproximado de carbono por peso en 1/100 de un 1%.

La lista del primer dígito es la siguiente:

1XXX= acero al carbono.

2XXX= acero al níquel.

3XXX= cromo níquel.

4XXX= cromo molibdeno (*cro-moly*).

5XXX= cromo.

6XXX= cromo vanadio.

7XXX= fundición de aleación de acero resistente al calor.

8XXX= níquel, cromo, molibdeno.

9XXX= sílice y manganeso.

Por ejemplo, un SAE 4130 es un acero de cromo y molibdeno con un 1% de cromo y un 0,30% de carbono.

2.1.2. Acero SAE 4140

Pertenece a la serie 4000 AISI de los aceros. Es un acero de medio carbono. Esta aleación contiene Molibdeno y Cromo lo que le permite ser más resistente.

Los principales componentes del acero SAE 4140 son:

- 0.38%-0.43% de C
- 0.8%-1.1% de Cr
- 0.4%-0.6% de Mn
- 0.15%-0.25% de Mo
- 0.035% máximo de P
- 0.04% máximo de S
- 0.15%-0.35% de Si

Tabla 2.
Propiedades físicas del acero SAE 4140

Propiedad	Sistema Métrico	Sistema Ingles
Densidad	7.85 g/cm ³	491.4 lb/ft ³
Gravedad Específica	7.8	7.8
Coefficiente de Poisson	0.29	0.29
Módulo de Elasticidad	205 GPa	29700 Ksi
Capacidad Calorífica	0.477 J/g°C	0.114 Btu/lb°F
Punto de Fusión	1370-1400 °C	2957-3011 °Ra
Conductividad Térmica	42.7 W/m·K	296 Btu·in/hr·ft ²
Resistividad	2.23×10 ⁻⁵ Ω·cm	2.23×10 ⁻⁵ Ω·cm

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2002)

Tabla 3.
Propiedades mecánicas del acero SAE 4140

Propiedad	Sistema Métrico	Sistema Ingles
Dureza Brinell	197	197
Resistencia a la tracción	670 MPa	97200 Psi
Módulo de Compresibilidad	140 GPa	20300 Ksi
Módulo de Corte	80 GPa	11600 Ksi
Coefficiente de Expansión Térmica	7	7

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2002)

2.2.Soldadura por arco del acero 4140

El acero AISI 4140 al contener un 0.38 a 0.40 % C, se puede soldar con éxito mediante todos los procesos de soldadura por arco, como SMAW, SAW, GMAW, GTAW y FCAW; siempre que se tomen las precauciones adecuadas. El mayor contenido de carbono de estos aceros, junto con el manganeso del 0,6 al 1,65%, hace que estos aceros sean más endurecibles.

Debido a su versatilidad, a los simples requisitos de los equipos y a la disponibilidad de opciones de electrodos, el proceso SMAW se usa muy a menudo en la fabricación o reparación de soldadura

de aceros HSLA. El proceso GTAW es capaz de producir soldaduras con el contenido de hidrógeno más bajo, y este proceso es a menudo preferido para aplicaciones críticas.

Los consumibles y procedimientos con bajo contenido de hidrógeno también deben utilizarse para reducir la probabilidad de agrietamiento inducido por el hidrógeno. El mayor nivel de resistencia de estos aceros puede requerir el uso de un electrodo aleado para que coincida con las propiedades del metal base. También puede ser necesario realizar un tratamiento térmico posterior de la pieza para restaurar la resistencia y/o la resistencia de la HAZ. (ASM Handbook, 2004)

2.2.1. Proceso de Soldadura por Arco de Gas (GMAW)

El proceso de soldadura de arco de gas-metal (GMAW) (o gas inerte de metal, MIG) emplea un electrodo de alambre sólido consumible continuo (generalmente) y un gas de protección inerte suministrado externamente. En la Figura 1 se muestra un esquema del proceso. El electrodo de alambre consumible produce un arco con una pieza de trabajo que forma parte del circuito eléctrico y proporciona relleno a la unión soldada. El alambre se alimenta al arco mediante un alimentador automático de alambre, del cual se emplean ambos tipos de empuje y tracción, dependiendo de la composición del alambre, el diámetro y la aplicación de soldadura. (Messler, 2004)

El gas de protección suministrado externamente desempeña una doble función en el proceso GMAW: Primero, protege del aire al arco y al metal de soldadura fundido o caliente que se enfría. Segundo, proporciona las características de arco deseadas a través de su efecto sobre la ionización. (Messler, 2004)

Se pueden usar fuentes de alimentación de soldadura de CC de voltaje constante (CV), conectadas como se muestra en la Figura 1. DCSP (DCEN) o DCRP (DCEP) pueden ser utilizados, dependiendo del cable particular y el modo deseado de transferencia de metal fundido, pero el

modo DCRP (DCEP) es mucho más común. En el modo DCRP, los electrones de la pieza de trabajo negativa golpean el cable positivo para renunciar a su energía cinética en forma de calor para fundir y consumir el cable. (Messler, 2004)

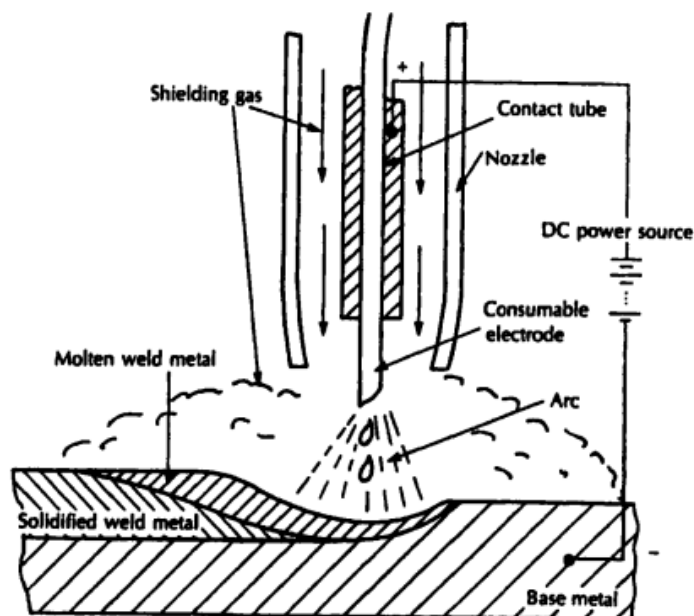


Figura 1. Esquema del proceso de soldadura por arco de gas y metal (GMAW), que muestra la antorcha, soldadura y conexión eléctrica

Fuente: (Messler, 2004)

Una clara ventaja de GMAW es que el modo de transferencia de metal fundido desde el electrodo de alambre consumible se puede cambiar y controlar intencionalmente a través de una combinación de composición de gas de protección, tipo de fuente de energía, tipo y forma de electrodo, corriente y voltaje de arco y velocidad de alimentación de alambre. Existen tres modos de transferencia de metal predominantes: *rociado*, *globular* y *cortocircuito*.

En resumen, el proceso GMAW ofrece flexibilidad y versatilidad, se automatiza fácilmente, requiere menos habilidad de manipulación que SMAW y permite altas tasas de deposición (5-20 kg o 10-40 lb por hora) y eficiencias (80-90%). (Messler, 2004)

2.2.2. *Proceso de Soldadura por Arco de Metal Blindado (SMAW)*

El proceso de soldadura de arco de metal blindado (SMAW) también se conoce como el proceso de soldadura de varilla. Como se muestra en la Figura 2, la coalescencia del metal es producida por el calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta del electrodo revestido de flujo (o "recubierto"), consumible discontinuo (o "palo") y la superficie del metal base que se está soldando. Un cable central conduce la corriente eléctrica desde una fuente de alimentación de corriente constante al arco y proporciona la mayor parte del metal de relleno a la junta. (Messler, 2004)

En la soldadura de electrodos revestidos el amperaje queda fijado por el diámetro del electrodo y tipo de revestimiento, el voltaje por la longitud del arco. Las funciones que cumple el revestimiento son las siguientes: Protección del metal fundido a través de la generación de gas, de la escoria, provee desoxidantes, provee elementos de aleación, facilita el inicio del arco y su estabilidad, determina la forma del cordón y su penetración, establece la posición de soldadura, transmite mayor o menor calor y determina la viscosidad y fusión de la escoria.

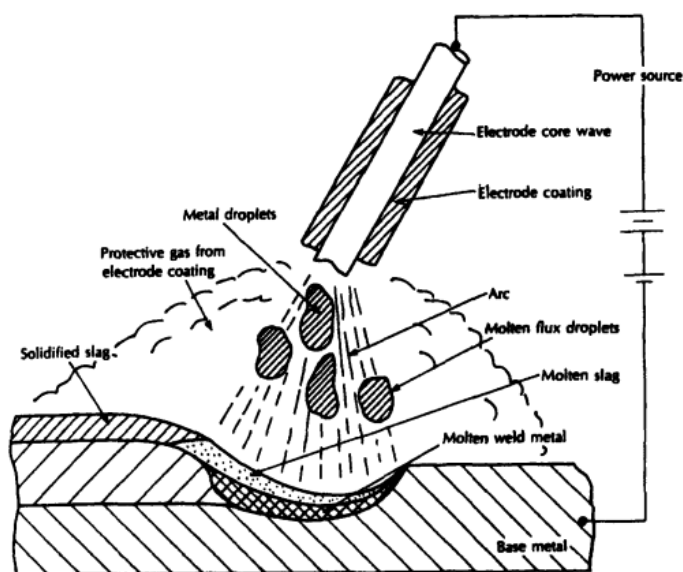


Figura 2. Esquema del proceso SMAW, que incluye: el porta electrodo y el electrodo, la soldadura y la conexión eléctrica

Fuente: (Messler, 2004)

El proceso SMAW puede funcionar con fuentes de alimentación de corriente continua (CC), con electrodo positivo o negativo, o fuentes de alimentación de corriente alterna (CA), según el diseño del recubrimiento. Por lo general, las corrientes varían de 50 a 300 A, basadas en gran medida en el diámetro del electrodo, a 10-30 V, lo que da como resultado tasas de deposición de 1 a 10 kg (2 a 20 lb) por hora. (Messler, 2004)

Las ventajas del proceso SMAW son: que es simple, portátil y que requiere equipo barato. El proceso es versátil, permite unir y recubrir o recubrir para restaurar dimensiones o mejorar la resistencia al desgaste (revestimiento duro o al desgaste) para la fabricación, ensamblaje, mantenimiento o reparación, en la planta o en el campo. (Messler, 2004)

Las deficiencias del proceso son que ofrece solo una protección limitada en comparación con los procesos de protección con gas inerte, proporciona tasas de deposición limitadas y generalmente se realiza de forma manual, se requiere una habilidad del operador justa para obtener los mejores resultados.

2.3. Metalurgia de la Soldadura

La metalografía que tiene lugar en una soldadura difiere de la que se obtiene en una pieza fundida; ya que en la soldadura el material fundido se solidifica en cuestión de algunos segundos, la temperatura de la fuente de calor y el material fundido exceden a la que existe en los hornos de fusión.

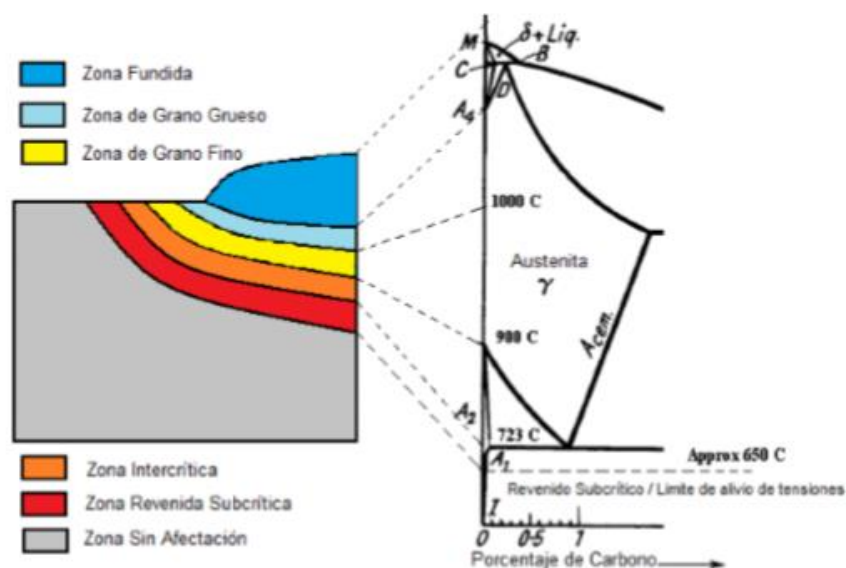


Figura 3. Diagrama Hierro-Carbono, mostrando las fases de transición de la ZAT en la soldadura

Fuente: (Welding Technology Institute of Australia, 2006)

Debido a la aportación de calor y al enfriamiento rápido el material base adyacente a la soldadura recibe el nombre de Zona Afectada Térmicamente o también conocida como ZAT. En esta zona se presentan alteraciones (Ver en la Figura 3) que dependen del tipo de material, precalentamiento y post-calentamiento.

Adyacente al material depositado se encuentra la zona de grano grueso la cual se forma al alcanzar temperaturas mayores a los 1000°C pero menores a la temperatura de fusión, a lado de esta zona se encuentra la zona de grano fino que se forma debido a que el calentamiento no es el

suficientemente largo para producir crecimiento entre los granos austeníticos, adena a esta zona se encuentra la zona intercrítica la cual se caracteriza por la descomposición de la perlita en granos más finos.

La zona que se encuentra entre la ZAT y el material base se denomina como zona revenida subcrítica, que se caracteriza por la recuperación de los granos deformados.

2.4. La zona afectada por el calor (ZAC)

Esta es la parte sin fundir del material original que ha sido sometida a ciclos térmicos durante la operación de soldadura y donde las propiedades originales se han alterado, generalmente en forma negativa. La extensión de esta zona depende de la tasa de entrada de calor. En soldaduras manuales en acero al carbono, tiene un ancho de 3-4 mm, generalmente se extiende no más allá del límite de fusión. (Lancaster, Handbook of structural welding, 1992)

2.5. Las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor

Las propiedades afectadas en la ZAC debido al calor, son: *la tenacidad a la fractura y la dureza* ya que estas presentan valores más elevados en comparación con los del metal base, influyendo en la resistencia final.

2.5.1. La dureza de la zona afectada por el calor

La dureza de la ZAC es una medida de la resistencia a la tracción del acero y, para cualquier tipo de aleación dada, da una indicación del grado de fragilidad. Para algunos aceros de baja aleación y alta resistencia a la tracción, una dureza de más de 350 BHN en la zona afectada por el calor se consideraría excesiva, lo que indica una susceptibilidad al agrietamiento. (Lancaster, Metallurgy of Welding, 1999)

La dureza depende directamente de la capacidad de endurecimiento del acero, de la velocidad de enfriamiento y en menor escala debido al tamaño de grano de la austenita anterior. A esta

capacidad de endurecimiento se le correlaciona generalmente con el carbono equivalente (CE), en el carbono equivalente el efecto de endurecimiento de cada elemento de la aleación se compara con el del carbono

La siguiente fórmula de CE fue ideada por Dearde y O'Neill, la misma que fue adoptada por HW en el año de 1967, la cual es:

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

Para los aceros micro-aleados de alta resistencia o los tipos de aceros al Cr-Mo de baja aleación se aplica la fórmula desarrollada debido a Ito y Bessyo, la cual fue adoptada por la Sociedad Japonesa de Ingeniería de Soldadura, la cual es:

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

Donde el P_{cm} se basa en una gama más amplia de aceros que la fórmula HW. Lancaster (1999) afirma:

Los equivalentes de carbono se pueden usar para calcular la dureza de la zona afectada por el calor utilizando un equivalente de dureza, que tiene en cuenta la velocidad de enfriamiento, y también un equivalente de soldabilidad, que determina la velocidad de enfriamiento máxima permitida para evitar el agrietamiento inducido por hidrógeno. (p.245)

2.5.2. La tenacidad a la fractura de la zona afectada por el calor

En algunos casos, todas las regiones de la zona afectada por el calor (grano grueso, grano refinado, intercrítico y subcrítico) están resguardadas en cierto grado en comparación con el material original. Sin embargo, si la resistencia a la fractura del material original es relativamente

baja, la zona afectada por el calor puede tener mejores propiedades, particularmente en la región refinada de grano.

Los factores que afectan la tenacidad de la zona afectada por el calor son:

- La naturaleza del ciclo térmico de la soldadura
- La temperatura de engrosado del grano
- Las características de transformación
- El contenido de aleación y el contenido no metálico.

Para cualquier contenido de martensita dado, la tenacidad se mejora mediante una reducción del ancho de las colonias de martensita. Sin embargo, la martensita auto-temperada (martensita baja en carbono que se forma a una temperatura suficientemente alta para que se produzca el revenido durante un enfriamiento adicional) es un producto relativamente resistente y tiene mejores propiedades en general que la bainita.

Las adiciones de níquel mejoran la tenacidad de la zona afectada por el calor y del acero en general. Otros elementos de aleación, como el cromo y el molibdeno, afectan la tenacidad de la zona afectada por el calor principalmente al modificar las características de transformación.

El acero al carbono o al carbono-manganeso con un equivalente de carbono de alrededor de 0,3 generalmente formará una estructura de perlita-bainita en la región supercrítica y esto puede ser más difícil que una región subcrítica con fragilidad, sin embargo, cuando se forma martensita en la región supercrítica, como puede suceder con CE de 0.45 y más, la región subcrítica es más dura que la supercrítica.

2.5.3. Microestructuras susceptibles

Una microestructura susceptible es cualquier producto de transformación duro y quebradizo formado en el HAZ o metal de soldadura. La martensita es, con mucho, la microestructura más susceptible encontrada en los aceros al carbono. En todas las zonas de soldadura de acero con bajo contenido de carbono, la martensita, cuando se forma, generalmente se mezcla con otros productos de transformación menos susceptibles (por ejemplo, perlita). Sin embargo, estas microestructuras mixtas son susceptibles de agrietarse, dependiendo del nivel de endurecimiento. La martensita en sí misma puede ser más o menos susceptible, dependiendo de su contenido de carbono. La martensita con mayor contenido de carbono es más dura, más quebradiza y más susceptible de agrietarse. La Figura 5 muestra el efecto del contenido de carbono en la dureza del acero para varios porcentajes de martensita.

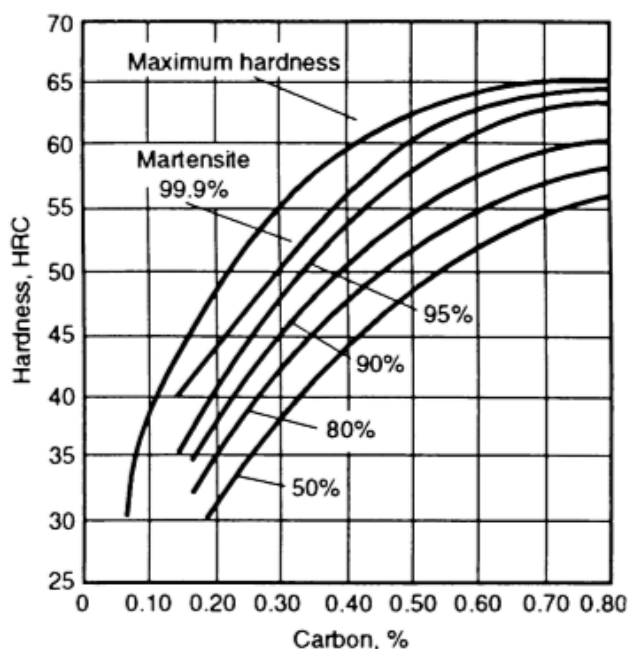


Figura 4. Gráfica de dureza vs contenido de carbono en función de la formación de martensita en un acero al carbono que se ha enfriado rápidamente

Fuente: (ASM Handbook, 1993)

2.6. ZAC en soldaduras con una sola pasada

Es la zona establecida entre el metal de soldadura y el metal bases. En esta región se presenta generalmente una microestructura ferrítica-perlítica, la cual se produce cuando el acero se enfría lentamente a partir de la austenita, convirtiéndose así en ferrita. Dada la susceptibilidad de las microestructuras generadas en esta zona, se puede presentar una fragilidad en comparación a las demás zonas que conforman la soldadura. Muchas de las fallas de soldadura se originan principalmente en la ZAC.

En esta zona se presentan tres regiones principales:

- Región de transición.
- Región de grano grueso.
- Región de grano refinado.

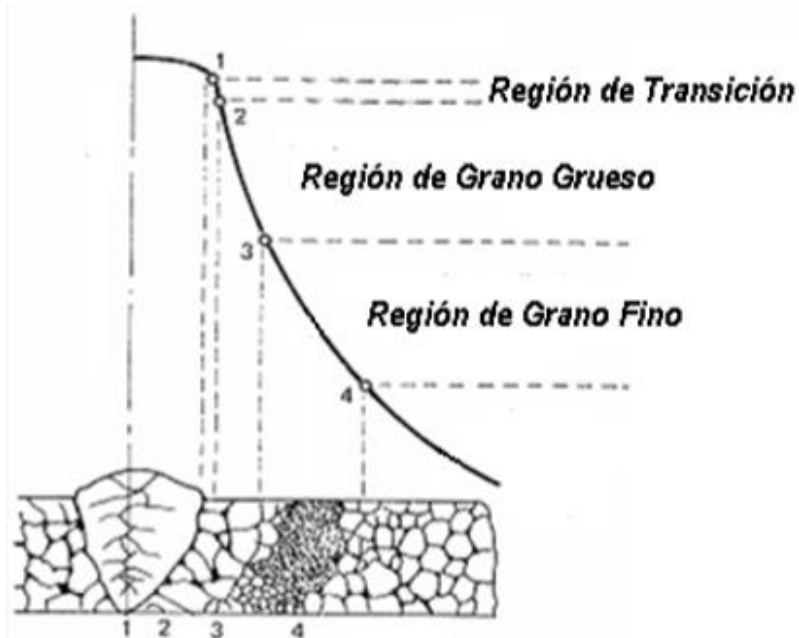


Figura 5. Regiones constitutivas de la ZAC en una sola pasada
Fuente: (Chuquin Vasco & Fonseca Amaya, 2011)

2.6.1. Región de transición

Es la fase sólido-líquido producido entre el metal de soldadura y el metal base. Se produce por el calentamiento en la zona crítica que transformó la perlita en austenita. El metal base junto a la línea de fusión se transforma en ferrita y la fase líquida se traslada al límite de grano porque la baja solubilidad del carbono y el manganeso en la ferrita (ambos formadores de austenita) tienden a segregarse y fusionarse en los límites de grano. En el retorno de la transformación de la austenita durante el ciclo de enfriamiento, el alto grado de segregación junto a los límites incrementa el arrastre hacia el límite de grano y entonces reduce el grano grueso, modificando así la composición de la austenita, generando así más estructura de ferrita equiaxial junto a la línea de fusión. (Chuquin Vasco & Fonseca Amaya, 2011)

2.6.2. Región de grano grueso

Dado que en esta zona se produce una temperatura superior a la crítica, la cual es causada por el calentamiento que sufre el metal base durante el proceso de soldeo se obtiene como resultado un crecimiento de grano que depende de la velocidad de enfriamiento que se da antes de la solidificación de la soldadura.

La microestructura presente en esta zona, está dada por la presencia de granos austenítico. Las altas temperaturas que ocurren durante el proceso de soldadura promueven la austenización y el crecimiento de los granos de austenita. Al contrario, la alta velocidad de calentamiento y el corto tiempo de mantenimiento a alta temperatura limitan el crecimiento de los granos.

El efecto del grano grueso deteriora la tenacidad haciendo que la ZAC, en esa región, sea más susceptible a la propagación de una fisura. Además, dependiendo del aporte térmico, la velocidad de enfriamiento y la composición del acero pueden originarse, por transformación, fases duras o frágiles sensibles a la aparición de fisuras

2.6.3. Región de grano refinado

En esta región el metal ha sido calentado hasta justo por encima de la temperatura crítica en donde el refinamiento de grano se ha completado, por ende, es más fino que la zona anterior. La recrystalización se ha completado y se muestra ferrita y perlita finas. En esta zona se produce el tratamiento térmico de normalizado. (Chuquin Vasco & Fonseca Amaya, 2011)

La temperatura de recrystalización decide la velocidad a la que se desarrollara la nucleación produciendo así austenitización con crecimiento de grano. El tamaño de la zona recrystalizada dependerá del tamaño del cordón de soldadura, el cual depende de las variables a contralrar durante el proceso de soldeo y de la cantidad de pases del cordón de soldadura que se lleven a cabo en la unión soldada.

2.7. ZAC en soldaduras con multipasadas

En las soldaduras multipasadas existe un mayor refinamiento en la microestructura, por consiguiente, aumenta la tenacidad y se reducen las tensiones residuales. Las razones fundamentales para esto son (Chuquin Vasco & Fonseca Amaya, 2011):

- Cada ciclo térmico de soldadura subsecuente efectivamente refina el grano o normaliza parte del metal de soldadura previo.
- La energía total incorporada por cordón de soldadura es menor, por lo que se reduce el crecimiento de grano.
- Los cordones de soldadura previos pueden proveer un cierto precalentamiento, por lo tanto, extienden el tiempo de enfriamiento.
- Los cordones de soldadura subsecuentes tienden a bajar las tensiones residuales producidas por los cordones previos.

2.8. Ecuación de la temperatura máxima en cada punto de la ZAC

Para poder analizar la influencia de las distintas variables presentes en el ciclo térmico que se produce durante un proceso de soldadura, es posible utilizar algunas ecuaciones que se desarrollan a partir de la ecuación de la temperatura en cada punto de la ZAC. (Fosca Pastor, 2003)

$$\frac{1}{T_{max} - T_0} = \frac{4,13\rho \cdot C \cdot t \cdot Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_{fusión} - T_0}$$

2.8.1. Determinación del ancho de la ZAC de la junta soldada:

E=22,8 V

T precalentamiento=100 C

I=200 A

T Fusión= 1400 C

Velocidad de soldeo= 2.6 mm/s

$\rho \cdot C = (7.85 \text{ g/cm}^3)(0.477 \text{ J/gC}) = 0,00374 \text{ J/mm}^3\text{C}$

Eficiencia térmica=0.9

t=40 mm

$$H_{net} = 22,8 \times 200 \times \frac{0,9}{2,5} = 1642 \frac{J}{mm}$$

$$\frac{1}{750 - 100} = \frac{4,13(0.0037) \cdot (40) \cdot Y}{1642} + \frac{1}{1400 - 100}$$

$$Y = 2,05mm$$

2.9. Norma Aplicativa

2.9.1. Código ASME BPVC Sección IX

El código BPVC ASME fue creado para estandarizar la construcción de calderas de vapor y otros recipientes de presión, además formula reglas estableciendo presiones máximas de diseño, además también se consideran los materiales, los métodos de fabricación y la calificación de procedimientos de soldadura y soldadores. El código ASME BPVC consta de 14 secciones las cuales cubren distintas áreas en la fabricación de recipientes a presión, siendo la Sección IX la que cubre la calificación de soldadura y de soldadores. (Morales Domínguez, 2014)

El código ASME BPVC Sección IX está constituida por dos partes, QW que se utiliza para la calificación de soldadura y QB que es utilizada para la calificación de soldadura por brazing. Este código es aplicable para la calificación de soldadores, operarios de soldadura y para procedimientos que son empleados para soldar.

2.9.2. Especificación API 6 (ISO 10423)

El mercado del Petróleo y Gas es uno de los más exigentes, pues todos sus componentes son de alta responsabilidad y estos ante todo deben trabajar eficientemente en condiciones muy severas de temperatura y presión. Las normas de referencia en este sector las emite la American Petroleum Institute, conocidas como normas API. Respecto a los aceros especiales, además de las exigencias mecánicas propias de cada tipo de acero, API exige el máximo rigor en el tratamiento térmico - temple y revenido.

La especificación API 6A comprende requerimientos detallados de la fabricación, tanto de válvulas como conectores utilizados en las locaciones de los pozos petroleros, que son ideal para aplicaciones de servicio general, construidas con aceros de baja aleación, inoxidable y resistentes al H₂S, presiones de trabajo hasta 5000 psi; con configuraciones de sellos resilentes o de metal a metal.

En lo que respecta a la calificación de la soldadura la especificación API 6A nos indica que estos procedimientos deben estar en concordancia con el código ASME BPVC Sección IX en los artículos II y III, la cual brinda los lineamientos necesarios para calificación de procedimientos.

2.9.3. ASME B31

El Código B31 para tuberías a presión, desarrollado por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos - ASME, cubre tuberías de energía, tuberías de gas combustible, tuberías de

proceso, sistemas de transporte de tuberías para hidrocarburos líquidos y otros líquidos, tuberías de refrigeración y componentes de transferencia de calor y tuberías de servicios de edificios.

El paquete de tuberías de alimentación y proceso ASME B31.1 / B31.3 se describe a continuación sus partes principales que abarca.

B31.1 - Tubería de Potencia

Este código prescribe los requisitos mínimos para el diseño, materiales, fabricación, montaje, prueba e inspección de sistemas de tuberías de servicio auxiliar y de energía para estaciones de generación eléctrica, plantas industriales institucionales, plantas de calefacción central y de distrito.

El código cubre tuberías externas de calderas para calderas de potencia y calderas de agua a alta temperatura y alta presión en las que se genera vapor o vapor a una presión de más de 15 PSIG; y el agua a alta temperatura se genera a presiones superiores a 160 PSIG y / o temperaturas que exceden los 250 grados F.

B31.3 - Tubería de Proceso

Este Código contiene reglas para tuberías típicamente encontradas en refinerías de petróleo; plantas químicas, farmacéuticas, textiles, papel, semiconductores y criogénicas; y plantas y terminales de procesamiento relacionadas.

Este Código prescribe los requisitos para materiales y componentes, diseño, fabricación, montaje, montaje, inspección, inspección y prueba de tuberías. Este Código se aplica a las tuberías para todos los fluidos, incluidos: (1) productos químicos crudos, intermedios y terminados; (2) productos derivados del petróleo; (3) gas, vapor, aire y agua; (4) sólidos fluidizados; (5) refrigerantes; y (6) fluidos criogénicos.

2.10. Procedimientos de Soldadura y Ensayos

2.10.1. Especificación de procedimiento de soldadura WPS

El WPS también conocido como EPS es un documento escrito que es preparado y aprobado mediante la calificación del mismo y éste es utilizado para brindar las directrices necesarias para ejecutar la soldadura y realizar la inspección.

Contenido del WPS:

En el procedimiento de soldadura se debe relacionar todas las variables que se citan en QW-250 para los distintos procesos de soldadura tales como el SMAW, GMAW, FCAW, etc.

Estas variables incluyen:

- Variables esenciales: son todas aquellas que al cambiar afectan directamente las propiedades mecánicas de la junta soldada.
- Variables no esenciales: son todas aquellas que al cambiar no afectan a ninguna propiedad mecánica de la junta.
- Variables esenciales suplementarias: son todas aquellas que al cambiar afectan las propiedades de impacto.
- Rangos aceptables.
- Información útil.

2.10.2. Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos o NDT son pruebas practicadas a los materiales que no alteran permanentemente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y dimensionales.

En el apartado QW-190 “OTHER TESTS AND EXAMINATIONS” del código ASME BPVC Sección IX, se destacan los ensayos no destructivos más utilizados:

- Rayos X (QW-191.1)

- Ultrasonido (QW-191.2)
- Inspección Visual (QW-194)
- Ensayo de Tintas Penetrantes (QW-195)

2.10.2.1. Líquidos Penetrantes

Una prueba de penetrante (PT) es un método sensible para detectar y localizar discontinuidades que se encuentran abiertas a la superficie de la soldadura. Se aplica un líquido penetrante (tinte) sobre la superficie de la soldadura. El fluido entra entonces en la discontinuidad. Después de un corto período de tiempo, el exceso de penetrante se elimina de la superficie. Se aplica un revelador a la superficie y se deja secar. El penetrante en la discontinuidad se eleva a la superficie por acción capilar, haciendo que la discontinuidad sea fácil de ver. (Minnick & Prosser, 2013)

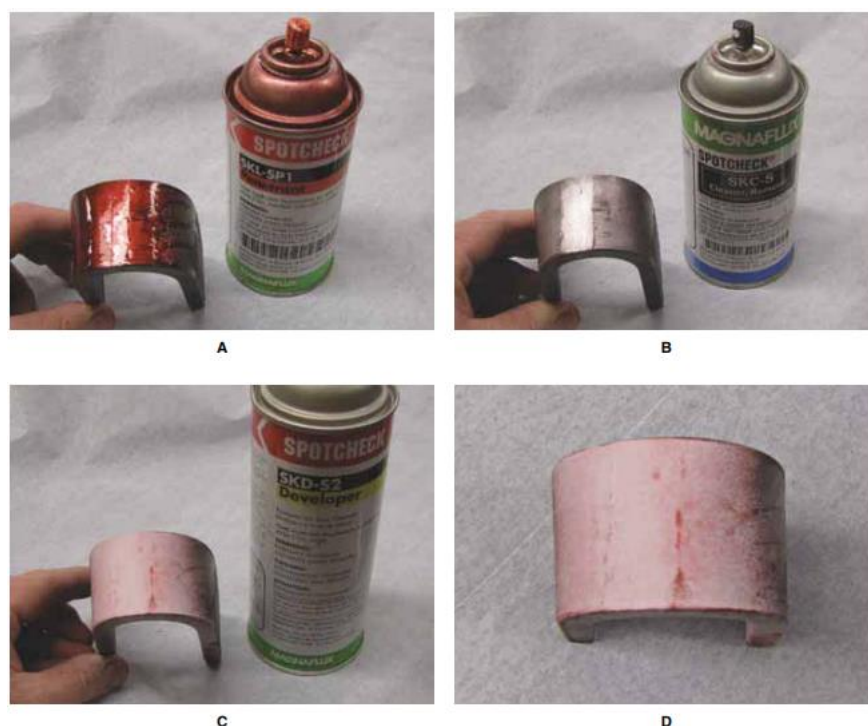


Figura 6. Secuencia de prueba de tinte penetrante. A-El líquido penetrante se aplica a la soldadura. B-El penetrante se limpia de la soldadura. C-El revelador se aplica a la soldadura. D-La soldadura se inspecciona para detectar discontinuidades que aparecieron después de que se aplicó el revelador

Fuente: (Minnick & Prosser, 2013)

2.10.3. Ensayos Mecánicos

Para realizar la calificación del procedimiento de soldadura según ASME Sección IX se usan cinco tipos de ensayos diferentes que son utilizados de acuerdo al caso y estos son:

- Ensayo de Tensión (QW-150)
- Ensayo de Doblez Guiado (QW-160)
- Ensayo de Tenacidad (QW-170)
- Ensayos de Soldadura en Filete (QW-180)
- Ensayos en Soldadura de Pernos (QW-192)

Para garantizar la junta soldada también se realizan otros ensayos tales como:

- Ensayo de dureza
- Metalografías

2.10.3.1. Dobleza guiado

Las normas ASTM E190, AWS B4.0, especifican los requisitos para los ensayos de flexión guiados en materiales soldados. Este ensayo proporciona un control de calidad que ayuda a determinar la ductilidad de la soldadura y la eficacia del proceso de soldadura. Hay tres tipos diferentes de pruebas de flexión, las cuales se muestran en la Figura 7:

- Doblado de la cara (se prueba la cara de la soldadura)
- Doblado de la raíz (se prueba la raíz de la soldadura)
- Doblado lateral (los lados de la soldadura son probados)

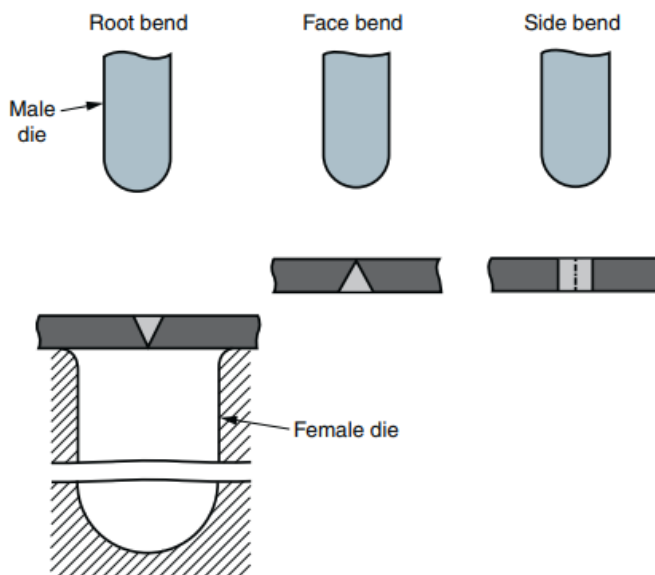


Figura 7. Los tres tipos de pruebas de flexión. La prueba de doblado lateral coloca la mayor cantidad de tensión a lo largo del eje de soldadura
Fuente: (Minnick & Prosser, 2013)

En las pruebas de flexión, una soldadura se corta en tiras reactivas, llamadas probetas. La soldadura luego se dobla alrededor de un troquel de un tamaño específico, creando una herradura en forma de U de la probeta. Este proceso estira la soldadura para probar la integridad de la soldadura. Después de doblarse, la superficie exterior y la superficie interior de la U se revisan para detectar grietas y otras indicaciones según lo exijan los criterios de inspección de la soldadura. (Minnick & Prosser, 2013)

2.10.3.2. Microdureza

Este ensayo consiste en generar una huella muy pequeña para medir la dureza de muestras de pequeño tamaño. Esto se hace aplicando cargas muy pequeñas. Para este tipo de ensayos, la carga aplicada varía entre 1 y 1000 grf. El principal inconveniente es que necesitan una gran preparación superficial del material a probar, llegando al pulido metalográfico, también denominado “acabado espejo”.

Microdureza Vickers (HV)

Se emplea el penetrador piramidal Vickers de la Figura 8 y la dureza se determina por la ecuación siguiente, solo que, en este caso, por la gran sensibilidad del método, la constante se toma con mayor exactitud ($2\sin(68^\circ) = 1,85436$).

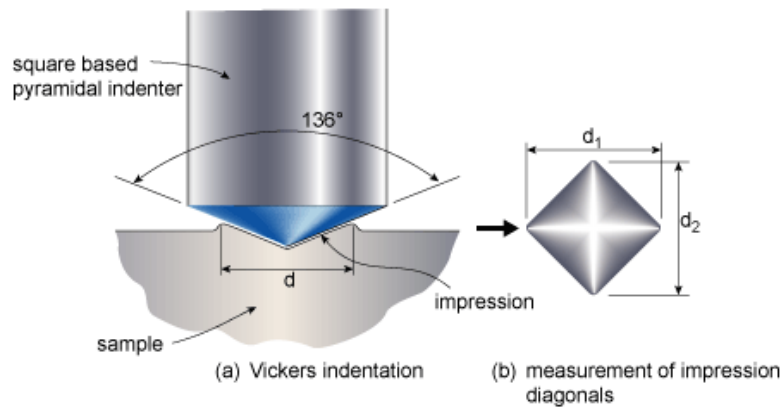


Figura 8. Penetrador piramidal Vickers

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2002)

$$HV = \frac{P(\text{aplicada})}{A(\text{huella})} = \frac{P}{\frac{d^2}{2\sin(\alpha/2)}} = \frac{2P\sin(\alpha/2)}{d^2}$$

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

Donde:

HV = Número de dureza de Vickers.

P = Carga Aplicada en (kgf o N)

d = Diagonal promedio de la huella (mm)

α = Ángulo entre caras del indentador (136°)

2.10.3.3. Impacto

El ensayo de impacto conocido también como prueba de resistencia a la muesca es un ensayo dinámico en el cual una probeta se rompe por medio de un único golpe realizado. Dicha probeta es maquinada, pulida superficialmente y presenta una muesca en el punto donde debe romperse.

Las pruebas de impacto se utilizan para definir la capacidad de las soldaduras para resistir el agrietamiento o la propagación de grietas a bajas temperaturas bajo cargas. Al medir la energía absorbida durante el impacto, se obtiene una medida de la tenacidad de un material, estas medidas se expresan joules o en pies-libras.

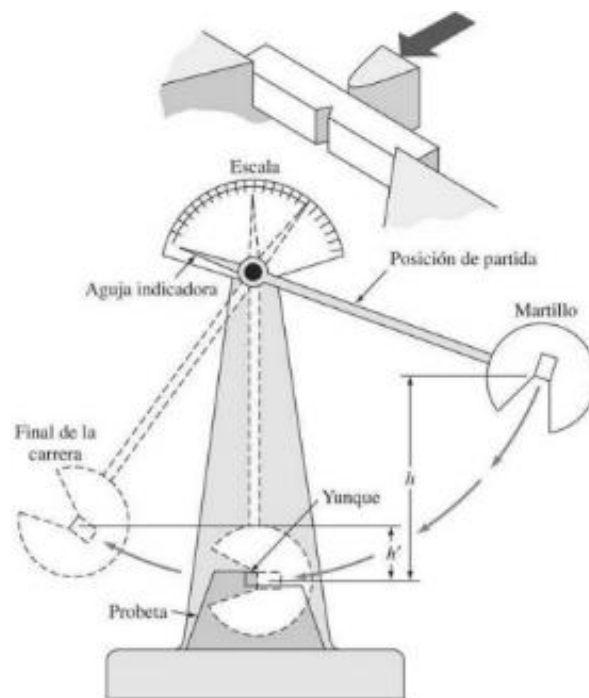


Figura 9. Esquema de un aparato estándar para la prueba de impacto
Fuente: (UMSS)

2.10.3.4. Metalografía

A través de un Análisis Metalográfico se pueden determinar características como: su microestructura, tamaño de grano, distribución de las fases que componen la aleación, inclusiones no metálicas como sopladuras, micro-cavidades, escorias, etc., las cuales son posteriormente

analizados en un microscopio. La metalografía es clave en el desarrollo de muchas investigaciones ya que puede proporcionar una evidencia crítica necesaria para hacer una determinación definitiva de la causa de la falla.

2.11. Cupón de prueba y especímenes de prueba

Para realizar los cupones para la calificación del procedimiento de soldadura es necesario identificar si se realizará en placa o en tubería, también es necesario identificar el espesor ya que dependiendo de estas condiciones del código BPVC ASME Sección IX nos remite a QW-463.1 que proporciona el esquema de los distintos cupones los cuales son:

**QW-463.1(b) PLATES — $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) AND OVER
THICKNESS AND ALTERNATE FROM $\frac{3}{8}$ in. (10 mm)
BUT LESS THAN $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) THICKNESS
PROCEDURE QUALIFICATION**

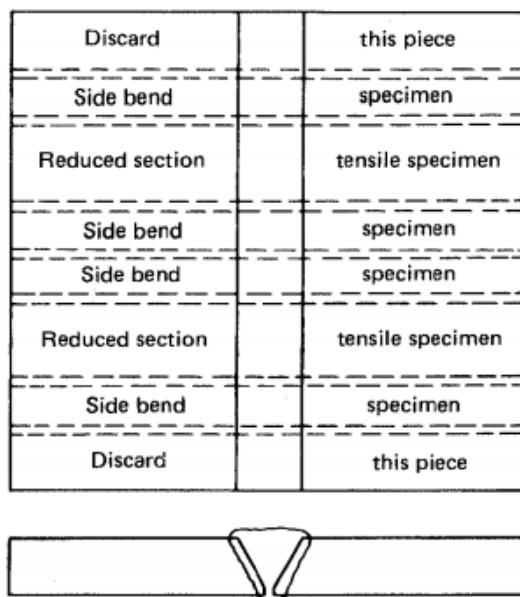


Figura 10. Cupón de prueba para espesores mayores a 19 mm para calificación de proceso de soldadura según QW-463.1 (b)

Fuente: (ASME Boiler and Pressure Vessel, 2013)

De estos cupones de pruebas se extraen los distintos especímenes para realizar los diversos ensayos para calificar los procedimientos, la cantidad de especímenes y las dimensiones de estos

está dado por la tabla QW-451.1 “GROOVE-WELD TENSION TEST AND TRANSVERSAL-BEND TEST” (Ensayo de tracción y doblado lateral de soldaduras de ranura) y QW-462 “TEST SPECIMENS” (Probetas de ensayos).

Sin embargo, también se pueden realizar otros ensayos tales como el ensayo de impacto o también una macro y micrografía, por lo que los esquemas propuestos por el código ASME BPVC Sección IX, pueden verse modificados según los especímenes que se requieran realizar y las dimensiones de estos estarán sometidas a las normas a las cuales nos remita ASME BPVC Sección IX.

DESCARTAR	DESCARTAR
PROBETA	DOBLADO LATERAL
PROBETA	DUREZA
PROBETA	SECCIÓN REDUCIDA
PROBETA	DOBLADO LATERAL
PROBETA	DUREZA
PROBETA	IMPACTO
PROBETA	IMPACTO
PROBETA	IMPACTO
PROBETA	IMPACTO
PROBETA	DUREZA
PROBETA	DOBLADO LATERAL
PROBETA	SECCIÓN REDUCIDA
PROBETA	DUREZA
PROBETA	DOBLADO LATERAL
DESCARTAR	DESCARTAR

Figura 11. Ubicación de los especímenes a obtener en el cupón de soldadura según el código ASME BPVC Sección IX

Fuente: (ASME Boiler and Pressure Vessel, 2013)

2.12. Soldadura de Reparación

La soldadura de mantenimiento y reparación es uno de los métodos más ampliamente utilizados en la recuperación de elementos mecánicos, lo anterior se debe a las posibilidades que brinda para la aplicación de capas de material en zonas desgastadas y la capacidad de reparación de piezas agrietadas.

Pueden surgir problemas en la soldadura de reparación de componentes debido al alto contenido de carbono y los altos niveles de impurezas, y tales condiciones exigen el uso de un metal de soldadura que pueda acomodar la dilución sin agrietamiento por solidificación y tenga un bajo potencial de hidrógeno.

Los aceros de baja aleación de 0,3-0,4% C no toleran el hidrógeno y para tales materiales puede ser necesario precalentar (digamos a 150 °C) y controlar el contenido de hidrógeno de los electrodos.



Figura 12. Reparación de las paletas de una turbina mediante proceso de soldadura GTAW
Fuente: (Hydro Expolitation)

2.12.1. Identificación de necesidades de reparación de soldaduras

La necesidad de reparación de soldaduras se utiliza cuando se produce una falla completa, la renovación de componentes homogéneos como soldados, lo que los hace aptos para un futuro

servicio seguro. En la práctica para poder determinar una reparación se debe realizar una inspección completa a través de métodos típicos de inspección como los son: *inspección visual, partículas magnéticas, tintas penetrantes e inspección ultrasónica* y, *en algunos casos especiales, radiografía*. Esto puede complementarse con técnicas de replicación, para permitir la detección de daños microscópicos.

Si una pieza requiere reparación, se debe establecer un procedimiento de soldadura completo para minimizar el efecto de la reparación en la porción restante de la soldadura.

(Klenk, Issler, Shibli, & Williams, 2003), afirman:

La decisión de reparar será controlada por factores tales como:

- Las inspecciones iniciales, que, una vez detectados los defectos, pueden repetirse utilizando métodos de mayor resolución.
- Mapeo de defectos para definir el tamaño, la extensión y la posición del daño.
- Determinación de la causa raíz del daño.
- Valoración de la vida del componente.
- Consideración económica basada en la necesidad de ejecutar, disponibilidad de reemplazo, disponibilidad y factibilidad del equipo de reparación.
- Consideración y viabilidad de llevar a cabo un procedimiento de soldadura de diseño completo, que incluye precalentamiento y tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT).
- La determinación del correcto procedimiento de soldadura, teniendo en cuenta las circunstancias locales.

- La necesidad potencial de reparación de soldadura en frío utilizando un relleno a base de Ni o un emparejador.

Algunos tipos de causa raíz que llevan a una exigencia de reparación de soldadura se presentan a continuación en la Tabla 4:

Tabla 4.

Tipos de daños que pueden necesitar reparación de soldadura

Causa Principal	Tiempo aproximado para soldar la reparación (horas)
Fabricación primaria	0 h
Defectos de fabricación detectados por inspección	0 h
Defectos de fabricación no detectados en la inspección inicial	Primera inspección importante durante la operación. 30 – 40,000 h
Defectos o daños generados durante el servicio por cualquier motivo	Generalmente más de 50,000 - 100,000 h

Fuente: (Klenk, Issler, Shibli, & Williams, 2003)

2.12.2. Consideraciones para procedimientos de reparación

2.12.2.1. Procedimiento de reparación alternativo a PWHT, donde se realizan pruebas de impacto en el equipo original

Cuando la construcción original requirió la prueba de impacto, se requiere la prueba de resistencia V-Notch como lo requiere el código de construcción. Un procedimiento debe calificarse por separado mediante el uso de una soldadura de ranura en la placa. Algunos requisitos adicionales que pueden considerarse más allá de la variable esencial complementaria son (GUPTE):

- Este procedimiento está limitado a P1; Aceros P3 y P4.
- Se aplican todos los elementos esenciales suplementarios de ASME Sección IX para QW-250.

- El área de soldadura se precalienta y se mantiene a un mínimo de 150 °C durante la soldadura. La temperatura se mide para garantizar que el material de 4" o 4 veces el espesor (lo que sea mayor) de cada borde de la soldadura se mantenga durante la soldadura.
- La temperatura máxima de Interfase no superara los 315 °C.
- La entrada máxima de calor se debe calcular e implementar durante las reparaciones. Las entradas de calor máximas según el procedimiento calificado no deben exceder durante la soldadura.
- El espesor de la calificación para el material de la placa y las ranuras es según la tabla 4.
- Si la soldadura se realiza de acuerdo con la norma NACE, MR 0175, entonces se debe realizar una prueba adicional para medir la dureza.
- Para el proceso de soldadura SMAW, se deben usar electrodos con un designador suplementario de hidrógeno difusible adicional H8 o inferior. El gas utilizado en GTAW o GMAW o FCAW exhibirá un punto de rocío no superior a menos 50 grados centígrados.
- La soldadura se llevará a cabo de acuerdo con la deposición controlada, la perla de temple o la técnica de media perla.
- Después de completar la soldadura, sin permitir que se reduzca el precalentamiento, la temperatura se eleva a 230 a 280 °C y se mantiene durante un período mínimo de aproximadamente 2 horas para ayudar al tratamiento de horneado con hidrógeno.
- El tratamiento de horneado con hidrógeno puede omitirse si se utilizan electrodos con un designador H4 de hidrógeno difusible suplementario.

2.12.2.2. *Técnicas de soldadura de reparación:*

a) **Técnica de soldadura con perlas de temple:**

La zona afectada por el calor de la perla inferior debido a la perla superior aplicada con un electrodo de menor tamaño, deja menos del 20 al 30% del área de la sección transversal del metal de soldadura como "granos de columna típicos" y el balance es Una estructura normalizada. La capa superior del refuerzo, que consiste principalmente en granos columnares, se debe rectificar para que coincida con el contorno de la superficie.

b) **Técnica de soldadura de medio cordón:**

Después de cada pasada, la mitad superior del cordón de soldadura se tritura antes de aplicar la siguiente capa. Dicha técnica de media perla también logra el efecto similar de la técnica de perla de temple, pero luego el consumo de electrodos de soldadura puede dispararse.

Tabla 5.

Espesores de calificación para el cupón de prueba y la ranura de reparación

Profundidad de la ranura de prueba	Profundidad de la ranura de reparación	Espesor del cupón de prueba	Espesor de la base
t	< t	< 2"	Hasta 2"
t	< t	> 2"	Por encima de 2"

Fuente: (GUPTE)

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LOS PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA DE REPARACION

3.1. Diseño de los WPS de Reparación

El procedimiento de soldadura o (WPS) (Welding Procedure Specification), es un documento diseñado por un departamento técnico o de ingeniería de determinada empresa, para brindar instrucciones precisas y detalladas al personal que ejecuta la unión soldada (soldadores) y al que inspecciona las uniones soldadas (Inspectores), y así asegurar el cumplimiento de los requerimientos del código.

El propósito principal de este WPS de Reparación, es definir y documentar todos los detalles que se deben tener en cuenta al realizar reparaciones sucesivas en aceros de baja aleación y alta resistencia.

3.2. Diseño del Cupón de Soldadura

El contenido de una especificación del procedimiento de soldadura (WPS):

- 1. Todas las variables esenciales, relativas al proceso de soldadura utilizado.
- 2. Todas las variables no esenciales, relativas al proceso de soldadura utilizado.
- 3. Información adicional que se considere necesaria para obtener las uniones soldadas deseadas.

Para el diseño del cupón de soldadura que será utilizado para la calificación del procedimiento se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- Dimensiones de la junta
- Dimensiones de especímenes
- Ubicación de los especímenes en el cupón de soldadura y dimensiones finales del mismo.

En el desarrollo del presente capítulo se mostrará la selección de las variables usadas para el diseño y la posterior calificación del procedimiento de soldadura.

Los WPS usados en el desarrollo de este tema de investigación se encuentran detallados en el contenido del Anexo 1.

3.1.1. Dimensiones de la Junta

Para el diseño de la geometría de la junta soldada hay que tomar en cuenta que elementos forman la junta los cuales están identificados en la Figura 13. Si se posee un ángulo de ranura más delgado implica menos material depositado con tiempos de producción más cortos, sin embargo, si este ángulo es muy pequeño no habrá espacio suficiente para manipular el electrodo.

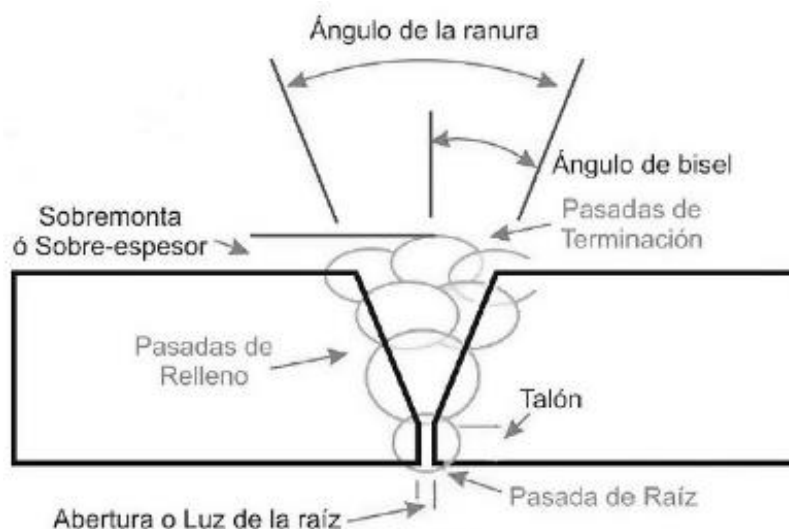


Figura 13. Forma y partes que conforman una junta soldada
Fuente: (UMSS)

Las dimensiones de las juntas de producción y reparación se detallan en los procedimientos de soldadura (WPS) de producción como de reparación que se encuentran disponibles en la sección Anexos y capítulo IV “Desarrollo Experimental” de esta investigación.

3.1.2. Dimensiones de Especímenes

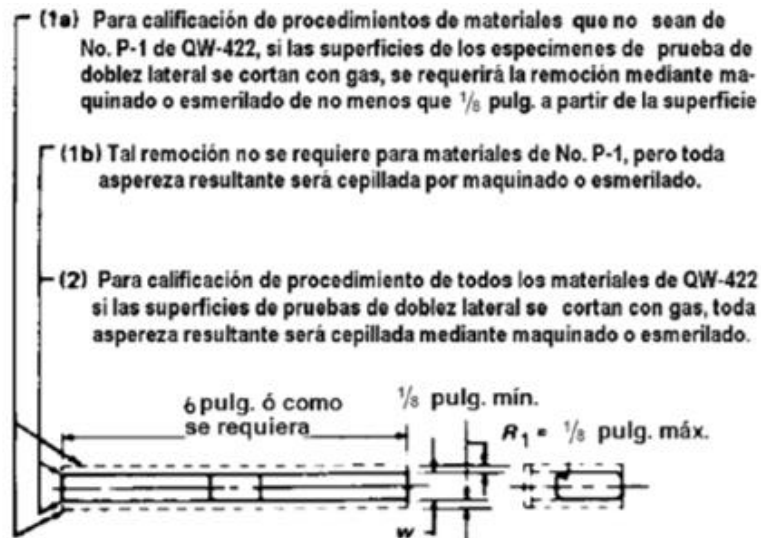
Para determinar las dimensiones que tendrá el cupón de soldadura, es necesario e importante determinar el número de ensayos que se llevaran a cabo ya que estos dependen del espesor del cupón, el espesor que se usara para el desarrollo de los cupones de prueba será de 40 mm y cuya elección se describirá posteriormente.

En el código ASME BPVC Sección IX en la sección QW-451.1 se tiene el distinto número de ensayos recomendados a realizar para espesores entre 38 a 150 mm de espesor, en los cuales es necesario realizar ensayos de doblado cuya ubicación de extracción se encuentra en la sección QW-463.1 (b), además para poder garantizar la mayoría de las propiedades mecánicas del WPS, será necesario realizar ensayos de microdureza, impacto y metalografías. Para el desarrollo de este proyecto de investigación el número de ensayos totales a realizar se encuentran resumidos en la Tabla 6.

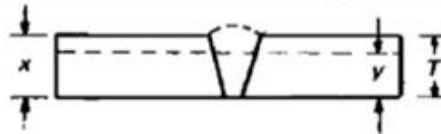
Tabla 6.
Número de ensayos a realizar a cada ensamble

Ensayo	N° Probetas	N° Probetas Total	
		Ensamble de producción	Ensamblados de Reparación (1ra, 2da, 3ra Reparación)
Tintas Penetrantes	4	3	9
Doblado lateral	4	4	12
Dureza	2	1	6
Metalografías	2	1	6
Impacto	3	0	9

3.1.2.1. Dimensiones de los especímenes de Doblado Lateral



T , pulg.	y , pulg.	w (pulg.)	
		P-No. 23, F-No. 23, ó P-No. 35	Todos los otros metales
$\frac{3}{8}$ a $1\frac{1}{2}$ incl.	T	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$
$> 1\frac{1}{2}$	[Nota (1)]	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$



NOTA GENERAL:

El refuerzo de soldadura y la tira de respaldo o el anillo de respaldo, si existe, pueden ser removidos a ras con la superficie del espécimen. Se puede emplear corte térmico, maquinado, o esmerilado. El enderezamiento en frío es permitido antes de la remoción del refuerzo.

NOTA:

- (1) Cuando el espesor del espécimen T excede de $1\frac{1}{2}$ pulg., use uno de los siguientes:
- Corte el espécimen en múltiples especímenes de prueba y de aproximadamente iguales dimensiones ($\frac{3}{4}$ pulg. a $1\frac{1}{2}$ pulg.).
 y = espesor de espécimen probado cuando se toman múltiples especímenes de una muestra
 - El espécimen se puede doblar al ancho pleno. Vea requerimientos sobre ancho del dispositivo en QW-466.1.

Figura 14. Dimensiones recomendadas de los especímenes de doblado lateral, sección QW-462.2 contenidas al interior del código ASME BPVC Sección IX

Fuente: (ASME Boiler and Pressure Vessel, 2013)

Las probetas de doblado lateral, se adaptarán a las dimensiones de las juntas desarrolladas previamente, dando como resultado dimensiones finales de las probetas, que se muestran en la Figura 15.

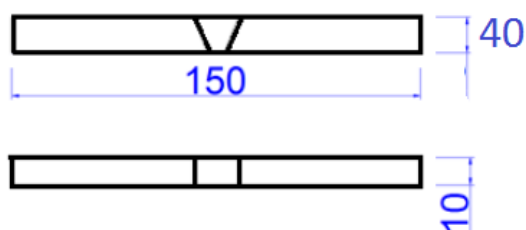


Figura 15. Dimensiones del espécimen para el ensayo de doblado lateral

3.1.2.2. Dimensiones de los especímenes de dureza y metalografías

Las probetas empleadas para los especímenes de durezas y metalografías serán las mismas, ya que se realizará primero la metalografía y posterior a este se realizarán las indentaciones con el micro durómetro para poder medir de dureza en la zona de transición (Metal depositado - ZAC), la ZAC y parte del material base para su análisis. Las dimensiones de estas probetas se pueden apreciar en la Figura 16.

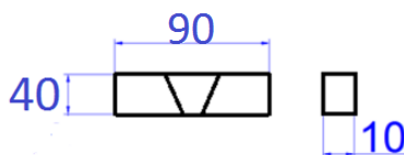


Figura 16. Dimensiones de los especímenes para el ensayo de dureza y metalografía

3.1.2.3. Dimensiones de especímenes de impacto

Para el dimensionamiento de las probetas para el ensayo de impacto, debemos remitirnos a la norma ASTM E23, ya que esta describe las pruebas de impacto de probetas metálicas entalladas. La norma hace referencia tanto a Charpy como a Izod y describe los métodos de ensayo para medir la energía absorbida por el espécimen roto.

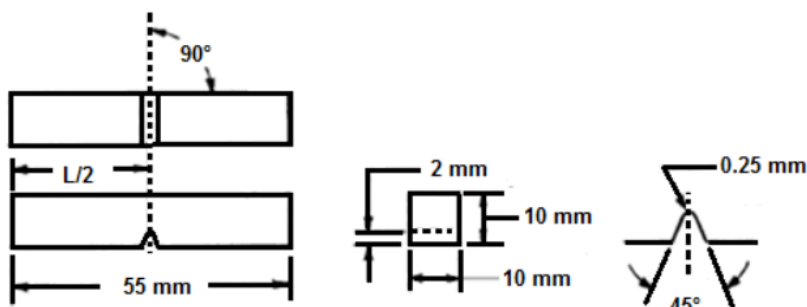


Figura 17. Espécimen para la realización de ensayo de Impacto
Fuente: (ASME Boiler and Pressure Vessel, 2013)

Lo más importante en el desarrollo de este ensayo es la ubicación específica de la cual se extraerá la probeta, esta probeta será extraída de tal manera que la muesca se encontrará en la ZAC de la soldadura. Las dimensiones y forma de esta probeta se pueden apreciar en la Figura 17.

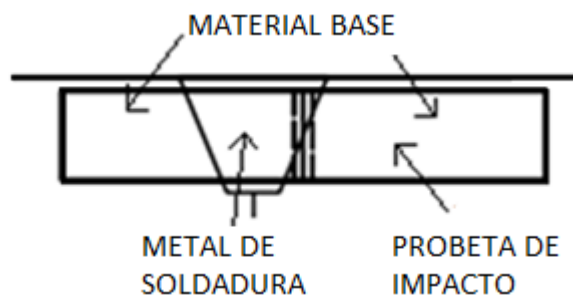


Figura 18. Zona de donde se obtendrá el Espécimen para la realización de ensayo de Impacto
Fuente: (Morales Domínguez, 2014)

3.1.3. Ubicación de los especímenes en el cupón de soldadura y dimensiones finales del mismo

En la Figura 11 podemos observar la ubicación de los distintos especímenes para las pruebas según el código ASME VPVC Sección IX. Las dimensiones más detalladas del cupón de soldadura se encuentran en la sección Anexos.

3.3. Identificación de los WPS

Para el desarrollo y enfoque específico de los WPS de Reparación se tendrá presente que los elementos estructurales y mecánicos están expuestos a sobrecargas periódicas y aleatorias, en

donde pueden ocurrir fallas y fallas plásticas locales, que generalmente están presentes en áreas de acumulación de tensión causada por muescas mecánicas, muescas estructurales y por el alto gradiente de temperatura. Los cambios estructurales, la geometría y las tensiones residuales en las uniones soldadas provocan la concentración de las tensiones, lo que reduce la resistencia a la fatiga. En particular, la zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés), como un área que tiene una microestructura diversificada, es susceptible al inicio de grietas.

Los distintos cupones de soldadura a desarrollarse tendrán la siguiente especificación:

- **PROD:** Procedimiento de soldadura de producción, mediante proceso GMAW.
- **JR01:** Procedimiento de soldadura de producción, mediante proceso GMAW y un procedimiento soldadura de reparación mediante proceso SMAW, con una primera reparación a una profundidad de 24 mm.
- **JR02:** Procedimiento de soldadura de producción, mediante proceso GMAW y un procedimiento soldadura de reparación mediante proceso SMAW, con una primera reparación a una profundidad de 24 mm y una segunda reparación a una profundidad de 18 mm.
- **JR03:** Procedimiento de soldadura de producción, mediante proceso GMAW y un procedimiento soldadura de reparación mediante proceso SMAW, con una primera reparación a una profundidad de 24 mm, una segunda reparación a una profundidad de 18 mm y una tercera reparación a una profundidad de 14 mm.

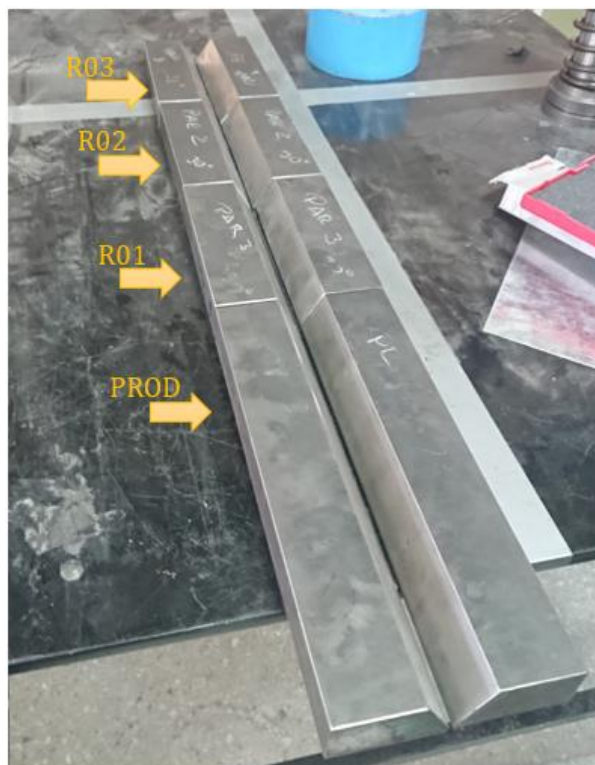


Figura 19. Identificación de los WPS a desarrollarse para las juntas soldadas de: Producción, 1era Reparación, 2da Reparación y 3era Reparación

3.4. Variables del proceso de soldadura bajo código ASME BPVC sección IX

Para diseñar un procedimiento de soldadura acorde a lo establecido en el código ASME BPVC Sección IX hay que delimitar las variables, tanto esenciales como no esenciales, sin embargo, al estar tomando como referencia lo establecido en procedimientos de soldadura (WPS) que se utilizan en la fabricación de tubería de alta presión y distribuidores para centrales hidroeléctricas en las etapas de fabricación como de reparación, las variables esenciales a tomar en cuenta se detallan a continuación.

3.4.1. Variables esenciales

Las variables esenciales son aquellas en las cuales un cambio puede afectar a las propiedades mecánicas de la pieza soldada y por lo tanto deben estar descritas claramente en el WPS.

3.4.1.1. Carbono equivalente

Al estar trabajando con un acero AISI 4140 es necesario calcular el carbono equivalente del mismo, el cual se puede calcular con la fórmula descrita en QW-403.26, sin embargo, para los procedimientos de soldadura (WPS) de producción y de reparación, es posible utilizar la ecuación desarrollada por Ito y Bessyo descrito en el Capítulo II, para los aceros micro-aleados.

3.4.1.2. Espesor t

El código ASME BPVC Sección IX, permite trabajar con la mayor cantidad de espesores disponibles, lo cual se encuentra en QW-451.1 donde se presentan los distintos rangos de espesores que se pueden soldar seleccionando un espesor determinado para el cupón de pruebas.

Tabla 7.

Límites de espesor para calificación del procedimiento y especímenes de prueba QW-451

Espesor T del cupón de prueba, soldado, pulg	Espesor t de Metal			Tipo y número de pruebas requeridas			
	Orden de Espesor T de metal base calificado, pulg. [Nota (1) y (2)]		de Soldadura Depositado Calificado, pulg. [Nota (1) y (2)]	Pruebas de Tensión y de Doble Guiado [Nota (2)]			
	Min	Max	Max	Tensión QW-150	Doble Lateral QW-160	Doble de cara QW-160	Doble de raíz QW-160
Menos de 1/16	T	2T	2t	2	...	2	2
1/16 a 3/8, incl.	1/16	2T	2t	2	Nota [5]	2	2
Arriba de 3/8, pero menos de 3/4	3/16	2T	2t	2	Nota [5]	2	2
3/4 hasta menos de 1 1/2	3/16	2T	2t cuando $t < 3/4$	2 Nota [4]	4	...	...
3/4 hasta menos de 1 1/2	3/16	2T	2t cuando $t \geq 3/4$	2 Nota [4]	4	...	...
1 1/2 y más	3/16	8 (3)	2t cuando $t < 3/4$	2 Nota [4]	4	...	...
1 1/2 y más	3/16	8 (3)	8 (3) cuando $t \geq 3/4$	2 Nota [4]	4	...	...

Fuente: (ASME Boiler and Pressure Vessel, 2013)

Nota (ASME Boiler and Pressure Vessel, 2013):

- (1) Las siguientes variables restringen aún más los límites que se muestran en esta tabla cuando se hace referencia en QW-250 para el proceso en cuestión: QW-403.9, QW-403.10, QW-404.32 y QW-407A. Además, QW-202.2, QW-202.3 y QW-202A proporcionan excepciones que reemplazan los límites de esta tabla.
- (2) Para la combinación de procedimientos de soldadura, vea QW-200A.
- (3) Para los procesos de soldadura SMAW, SAW, GMAW, PAW y GTAW solamente; de lo contrario, según la Nota (1) o 2T, o 2t, lo que sea aplicable.
- (4) Consulte QW-151.1, QW-151.2 y QW-151.3 para obtener detalles sobre muestras múltiples cuando el grosor del cupón es superior a 1 pulg. (25 mm).
- (5) Cuatro pruebas de curva lateral pueden sustituirse por las pruebas de curva de cara y raíz requeridas, cuando el grosor T es de 3/8 pulg. (10 mm) o más.

3.4.1.3. Temperatura de precalentamiento

Para una temperatura inicial del metal base (precalentamiento) y un nivel de entrada de energía durante la soldadura, aumentar el grosor de la sección aumentará la velocidad de enfriamiento.

En los WPS de producción como de reparación se especifica la temperatura mínima de precalentamiento que se deberá aplicar a los ensambles, la cual debe ser controlada constantemente. Sin embargo, a continuación, podemos observar en la tabla 8 las temperaturas de precalentamiento dependiendo del acero que se va a usar, según el Handbook de la ASM volumen 6.

Tabla 8.

Rango de temperatura de precalentamiento e interpaso para el grosor de sección indicado

STEEL	PREHEAT AND INTERPASS TEMPERATURE RANGE FOR INDICATED SECTION THICKNESS					
	AT ≤ 13 MM ($\leq \frac{1}{2}$ IN.)		AT 13-25 MM ($\frac{1}{2} - 1$ IN.)		AT 25-50 MM (1 - 2 IN.)	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F
1330	175-230	350-450	205-260	400-500	230-290	450-550
1340	205-260	400-500	260-315	500-600	315-370	600-700
4023	[GES]40	[GES]100	95-150	200-300	120-170	250-350
4028	95-150	200-300	120-175	250-350	205-260	400-500
4047	205-260	400-500	230-290	450-550	260-315	500-600
4118	95-150	200-300	175-230	350-450	205-260	400-500
4130	150-205	300-400	205-260	400-500	230-290	450-550
4140	175-230	350-450	230-290	450-550	290-345	550-650
4150	205-260	400-500	260-315	500-600	315-370	600-700
4320	95-150	200-300	175-230	350-450	205-260	400-500
4340	290-345	550-650	315-370	600-700	315-370	600-700
4620	[GES]40	[GES]100	95-100	200-300	120-175	250-350
4640	175-230	350-450	205-260	400-500	230-290	450-550
5120	[GES]40	[GES]100	95-150	200-300	120-175	250-350
5145	205-260	400-500	230-290	450-550	260-315	500-600
8620	[GES]40	[GES]100	95-150	200-300	120-175	250-350
8630	95-150	200-300	120-175	250-350	175-230	350-450
8640	120-175	250-350	175-230	350-450	205-260	400-500

Fuente: (ASM Handbook, 1993)

3.4.1.4. Heat Input

Conocido como aporte térmico, es el calor aportado para realizar la soldadura. Es una variable muy importante a efectos de la calidad de la unión.

El aporte térmico depende de:

- Tensión e intensidad de soldeo, siendo mayor el aporte térmico cuanto mayor son estas variables.

- La velocidad de soldeo, cuanto menor es, mayor será la energía aportada.

El código ASME BPVC Sección IX en QW-409.1, nos brinda una ecuación que permite el cálculo de la entrada de calor en los procesos de soldadura por arco, la cual viene dada de la siguiente manera:

$$\text{Entrada de calor (Julios/mm)} = \frac{\text{Voltaje (V)} \times \text{Intensidad (A)} \times 60}{\text{Velocidad de avance (mm/min)}}$$

3.4.1.5. Temperatura de interpase

La temperatura de interpase en una soldadura de pase múltiple, es la temperatura de la soldadura entre los pases del trabajo soldado. El objetivo de controlar la temperatura del paso intermedio para la mayoría de los aceros es minimizar el riesgo de agrietamiento. Esto se hace asegurándose de que los alrededores de la soldadura no caigan por debajo de un nivel seguro durante toda la operación de soldadura.

En los WPS de producción y reparación se especifica una temperatura máxima de interpasos para el acero AISI 4140, ya que al ser un acero de medio carbono, se considera que existe un riesgo de agrietamiento por solidificación.

3.5. Selección del consumible

Para el proceso GMAW es necesario la utilización de electrodos y varillas de acero al carbono para soldadura por arco con protección de gas, los cuales se encuentran bajo la norma AWS A5.18., mientras que para el proceso SMAW es necesario la utilización de electrodos revestidos los cuales se encuentran bajo la norma AWS A5.5/A5.5M.

3.5.1. Electrodos y varillas bajo norma AWS A5.18

La norma AWS A5.18 (Electrodos y varillas de acero al carbono para soldadura por arco con protección de gas), trabaja con la siguiente designación:

ER70-SX

Las letras ER se usan como prefijo. La ER indica la resistencia a la tracción mínima de una buena soldadura. La fuerza real se obtiene sumando tres ceros a la derecha del número dado, por ejemplo, ER70S-S es 70000 psi. La S ubicada a la derecha de la resistencia a la tracción indica que este es un cable sólido. El último número 2, 3, 4, 5, 6 o 7 o el medidor G se usa para indicar la composición del metal de relleno y las propiedades mecánicas de las soldaduras, Figura 20.

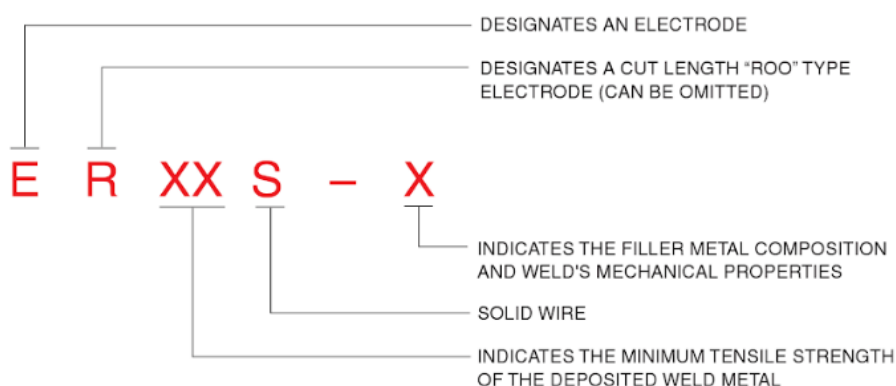


Figura 20. Identificación de las varillas bajo norma AWS A5.18

Fuente: (Jeffus & Bower, 2010)

Electrodo ER70S-6

Este es un buen cable de relleno de uso general. Tiene los niveles más altos de manganeso y silicio. El alambre se puede usar para hacer soldaduras suaves en chapa o secciones más gruesas. Argón-oxígeno, argón-CO₂ y CO₂ se pueden usar como gases de protección. Las soldaduras se pueden realizar en todas las posiciones.

Este cable de relleno con un diámetro de 1.2mm, se utilizará para el desarrollo del proceso de la soldadura producción, cumpliendo con los requerimientos del procedimiento de soldadura (WPS) de producción, el cual se detalla en los Anexos.

3.5.2. Electrodo bajo norma AWS A5.5/5.5M

La especificación AWS A5.5 la cual se refiere a los electrodos para soldadura de aceros al carbono, trabaja con la siguiente designación para electrodos revestidos:

E XXYY

Donde:

E: Indica electrodo para soldadura por arco

XX: designan la mínima resistencia a la tensión del metal depositado, en Ksi.

YY: designan las posiciones de soldadura en que puede trabajar el electrodo, el tipo de revestimiento y el tipo de corriente adecuado para el electrodo. El primer dígito indica la posición (1= todas, 2=plana y horizontal, 4 todas y vertical descendente).

Electrodos de bajo hidrógeno

Estos electrodos están diseñados para producir soldaduras de alta calidad en aplicaciones en las cuales el metal base tiene tendencia al agrietamiento, los espesores a soldar son relativamente grandes (mayores a 19 mm) o cuando el metal base tiene un contenido de aleantes ligeramente mayor al de los aceros dulces. Los electrodos de bajo hidrógeno pertenecientes a esta clasificación son el: E-7018 y E-7028.

3.5.3. Diámetro de los electrodos

El cable de relleno ER70S-6 con un diámetro de 1.2mm, se utilizará para el desarrollo del proceso de la soldadura producción, cumpliendo con los requerimientos del WPS de producción, el cual se detalla en los Anexos.

El electrodo de bajo hidrogeno E7018 con un diámetro de 3.2mm y 4mm, se utilizará para el desarrollo del proceso de la soldadura de reparación, cumpliendo con los requerimientos del WPS de reparación, el cual se detalla en los Anexos.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo experimental de la investigación, el material base a utilizar es un acero de alta resistencia y baja aleación, también conocido como acero HSLA, el acero disponible en el mercado local es un AISI 4140 en forma de placas, este acero posee características semejantes a los aceros usados en la elaboración de tubería de alta presión o distribuidores de turbinas para centrales hidroeléctricas. La soldadura de los ensambles de prueba se llevará a cabo tomando como referencia lo establecido en procedimientos de soldadura (WPS) que se utilizan en la fabricación de tubería de alta presión para centrales hidroeléctricas, tanto para las etapas de fabricación como de reparación.

Los ensambles de prueba estarán compuestos por dos placas de 200x75x40 mm, estas dimensiones se las determino en base al código ASME BPVC Sección IX y al número de especímenes a obtener para los ensayos mecánicos y metalográficos requeridos para alcanzar el objetivo del proyecto de investigación. El espesor de 40mm definido anteriormente, se debe a que la tubería de alta presión y carcasa de los distribuidores utilizan espesores entre (30mm a 70mm), además que el código ASME BPVC Sección IX permite calificar los distintos ensayos en espesores que comprenden entre (1 ½ in a 6 in) con probetas que tengan un espesor de 38.1mm.

Los ensayos mecánicos que se van a realizar serán: ensayo de ductilidad mediante doblez lateral, microdureza Vickers (HV), impacto; estos a su vez se complementarán con una inspección mediante END y adicionalmente se realizara un estudio metalográfico mediante ensayos de microscopía óptica (MO). Algunas de las características de los ensambles a desarrollar se detallan en la Tabla 9 y la Figura 21.

Tabla 9.*Identificación de los ensambles y trabajo a realizar*

Cupón	WPS	Código	Trabajo	Proceso de soldadura
1	WPS EP	PRO	Soldadura de producción	GMAW
2	WPS ER	R01	Soldadura de producción + una reparación de 24 mm de profundidad	GMAW + SMAW
3	WPS ER	R02	Soldadura de producción + una reparación de 24 mm de profundidad + una segunda reparación de 18 mm de profundidad	GMAW + SMAW
4	WPS ER	R03	Soldadura de producción + una reparación de 24 mm de profundidad + una segunda reparación de 18 mm de profundidad + una tercera reparación de 14mm de profundidad	GMAW + SMAW

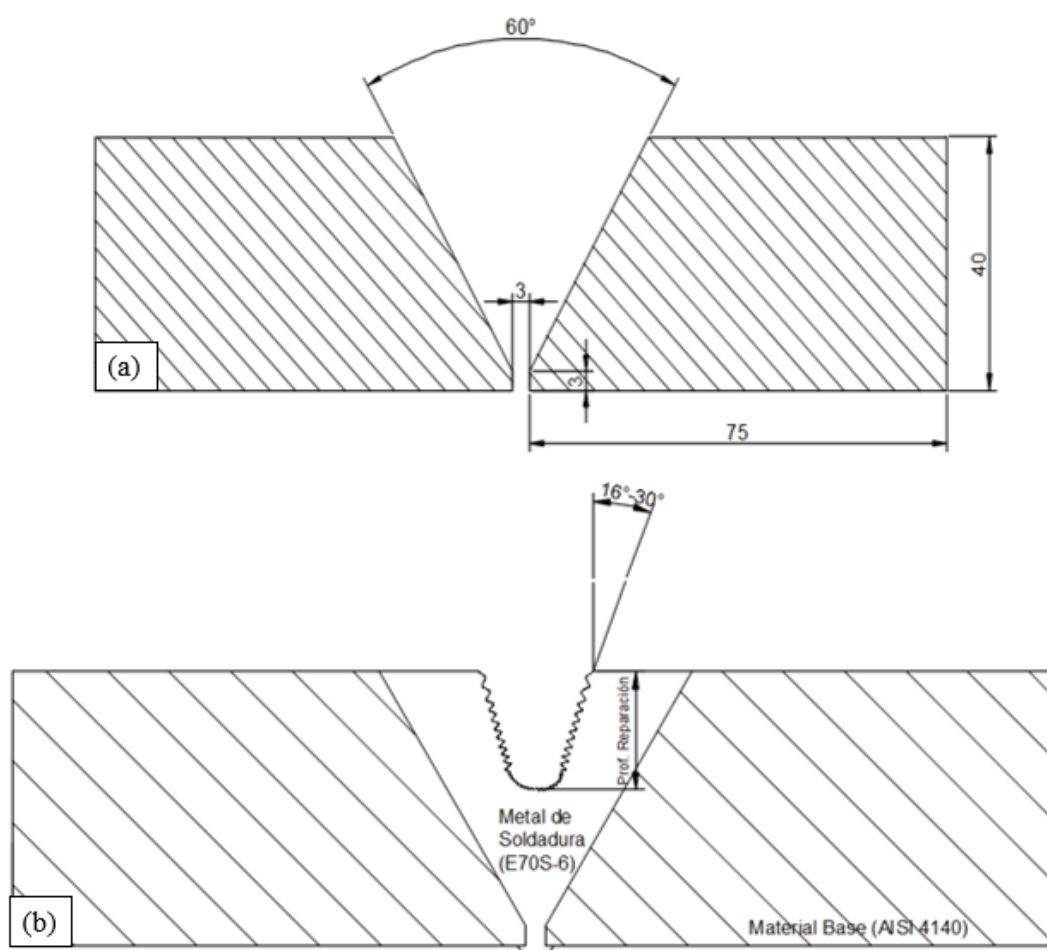


Figura 21. Juntas de soldadura. (a) Forma de la junta de producción (b) Forma de la ranura de reparación a realizar en las juntas de reparación

4.1. Controles antes de la soldadura

Antes de realizar la soldadura es necesario aplicar una inspección general a todos los elementos que van a estar inmersos en proceso de soldadura, tales como:

- Equipos
- Materiales
- Pre-ensamble de los cupones

4.1.1. Equipos

Es necesario identificar las especificaciones técnicas de las máquinas de soldar que se van a utilizar, además también se debe identificar las especificaciones de los equipos de medición principales que se van a usar para el control de la temperatura como para los controles de las variables de soldadura durante el proceso de soldeo y calibración de los parámetros de salida de las soldadoras.

4.1.1.1. Soldadora para el proceso GMAW

La selección de la soldadora será en función de la actividad que vamos a realizar, esta soldadora deberá poseer características adecuadas para poder cumplir con los requerimientos de las variables de soldadura que el *WPS de Producción* manifiesta. La soldadora debe poseer una salida de 250 a 300 amperes o amperios, ya que este tipo de máquinas de soldar se utilizan generalmente para soldaduras en general (Trabajos de producción medianos, mantenimiento, reparaciones, etc.).

Para el proceso GMAW se empleará una soldadora MillerMatic 300, la cual posee características adecuadas en función de los requerimientos del WPS de Producción, sus características técnicas se encuentran resumidas en la tabla 10.



Figura 22. Soldadora MillerMatic 300, usada para proceso de soldadura MIG/MAG perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

Tabla 10.

Especificaciones técnicas de la soldadora MillerMatic 300

Salida Nominal		Voltaje de Circuito Abierto Máximo	Entrada en Amperios a la Carga Nominal, 50 or 60 Hz			
			400V	440V	520V	KVA KW
300 Amps @ 32 VCD, 60% Ciclo de trabajo	240 Amps @ 32 VCD, 100% Ciclo de trabajo	38	54	47	23,5	18,6 13
			Velocidad de Alimentación de Alambre	Dimensiones	Peso	
Sólido	Inoxidable	Tubular	,65-17,8 m/min (25-700 in/min)	Prof.: 940 mm (37 in) Ancho: 483 mm (19 in) Alto: 768 mm (30-1/4 in)	125 kg (275 lb)	
0,6-1,6 mm (,023-1/16 in)	0,6-0,9 mm (,023-,035 in)	0,8-1,6 mm (,030-1/16 in)				
* Prendido, Sin Arco						
Gama de temperatura para operación - -20C hasta +40C			Gama de temperaturas para almacenar - -30C hasta +50 C			

Fuente: (MILLER Welding)

4.1.1.2. Calibración de la soldadora MillerMatic 300.

Para la calibración y verificación de los valores reales que tenemos a la salida de la soldadora MillerMatic 300, se verificó el estado de los componentes del equipo, una vez elegido el tipo de gas y el tipo de alambre a utilizar, se procede a calibrar la velocidad de alimentación del alambre, la cual controla la intensidad de la soldadura, para verificar la salida de intensidad de corriente, se usó una pinza amperimétrica UNI-T UT208 con la cual se midió la corriente AC y corrientes de arranque, para verificar la salida del voltaje se usó un multímetro FLUKE 87V con el cual se midió voltaje AC/ DC.

La puesta a punto de todos estos parámetros se realizó siguiendo las instrucciones del WPS de Producción, complementado con la experiencia del soldador calificado que se utilizó para el desarrollo de los ensambles soldados.



Figura 23. Calibración de la soldadora MillerMatic 300 a través de la Verificación de los parámetros de salida mediante el uso de una pinza amperimétrica UNI-T UT208 y un multímetro FLUKE 87V

4.1.1.3. Soldadora para el proceso SMAW

La selección de la soldadora será en función de la actividad que vamos a realizar, esta soldadora deberá poseer características adecuadas para poder cumplir con los requerimientos de las variables de soldadura que el **WPS de Reparación** manifiesta. Al ser un proceso SMAW el que se va a utilizar, tomaremos en cuenta el tamaño del electrodo, este tiene una relación directa con la potencia de la soldadora, es decir si poseemos una mayor potencia de salida podremos utilizar un electrodo de mayor diámetro.

Por lo tanto, la soldadora debe poseer una salida de 200 a 250 amperes o amperios, dado que este tipo de máquinas de soldar se utilizan generalmente para soldaduras en general (Trabajos de producción medianos, mantenimiento, reparaciones, etc.); además se la considera de uso industrial. Para el proceso SMAW se empleará una soldadora MillerMatic Syncrowave 250, la cual posee características adecuadas en función de los requerimientos del WPS de Reparación, sus características técnicas se detallan a continuación en la tabla 11.



Figura 24. Soldadora MillerMatic Syncrowave 250, usada para proceso de soldadura GTAW/SMAW perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

Tabla 11.*Especificaciones técnicas de la soldadora MillerMatic Syncrowave 250*

Salida Nominal de Soldadura	CFP**	Entrada de Amperios a la Carga Nominal, CA equilibrada, 50/60 Hz, monofásica						Gama de Amperaje	VCA máximo (Uo)	Voltaje nominal pico de inicio (Up)
		220V	400V	440V	520V	KVA	KW			
Clase NEMA I (40)-200 A, 28	No	82	45	41	35	17.6	8.6	3-310 A	80 V	15 KV°
VCA, 60% de ciclo de trabajo	Con	*3.0	*1.6	*1.4	*1.2	*.59	*.29			
	PFC	61	34	31	26	12.06	8.11	3-310 A	80 V	15 KV°
	PFC	*45.9	*25.1	*22.8	*23.2	*11.2	*.39			
Clase NEMA II (40)-250 A, 30	No	100	55	50	42	21.98	11.76	3-310 A	80 V	15 KV°
VCA, 40% de ciclo de trabajo	Con	*3.0	*1.6	*1.4	*1.2	*.59	*.29			
	PFC	81	44	40	34	16.32	11.81	3-310 A	80 V	15 KV°
	PFC	*45.9	*25.1	*22.8	*23.2	*11.2	*1.93			

*Mientras Trabaja sin carga

**Corrección del factor de potencia

° El Dispositivo de iniciar el arco está diseñado para guiadas a mano

Fuente: (MILLER Welding)

4.1.1.4. Calibración de la soldadora MillerMatic Syncrowave 250

Para la calibración y verificación de los valores reales que tenemos a la salida de la soldadora MillerMatic Syncrowave 250 para proceso GTAW/SMAW, se verificó el estado de los componentes del equipo, elegido el tipo de electrodo y diámetro a usar, se procede con la verificación de la salida de intensidad de corriente y voltaje de la soldadora, para aquello se usó una pinza amperimétrica UNI-T UT208 con la cual se midió la corriente AC, las corrientes de arranque, se usó además un multímetro FLUKE 87V con el cual se midió voltaje AC/ DC, la velocidad de avance en este tipo de proceso depende principalmente de la experiencia y habilidad del soldador.

La puesta a punto de todos estos parámetros se realizó siguiendo las instrucciones del *WPS de Reparación* complementado con la experiencia del soldador calificado que se utilizó para el desarrollo de los ensambles soldados.



Figura 25. Calibración de la soldadora MillerMatic Syncrowave 250. (a) Verificación de los parámetros de salida mediante el uso de una pinza amperimétrica UNI-T UT208 y un multímetro Fluke 87V (b) Valores de intensidad de corriente y voltaje, obtenidos a la salida de la soldadora

4.1.1.5. Pinza Amperimétrica

Para realizar la calibración de las máquinas de soldar y el control de la intensidad de corriente durante el proceso de soldeo, se contó con la disponibilidad de una pinza amperimétrica de la marca: UNI-T, modelo: UT207A, que es un equipo diseñado para medir voltaje AC y DC, corriente AC, resistencia y temperatura, también permite realizar el chequeo de diodos y de continuidad. Su rango de medición es de: 600V AC/DC 1000A 1kA AC/DC. El equipo antes de ser usado contaba con una calibración actual.



Figura 26. Pinza Amperimétrica UNI-T UT208
Fuente: (DMU Energy)

4.1.1.6. Multímetro

Para realizar la calibración de las máquinas de soldar y el control del voltaje durante el proceso de soldeo, se contó con la disponibilidad de multímetro de la marca: FLUKE, modelo: 87V, que es un equipo que permite realizar medidas precisas de voltaje y frecuencia en variadores de velocidad y otros equipos con gran cantidad de ruido eléctrico. Su rango de medición es de hasta 1000 V CA y CC, posee además una resolución de 4-1/2 dígitos para obtener medidas precisas (20 000 recuentos).



Figura 27. Multímetro Fluke 87V
Fuente: (RS Components)

4.1.1.7. Termómetro Laser

Para el control de la temperatura de precalentamiento y entre pases, se contó con la disponibilidad de un termómetro laser de la marca: FLUKE, modelo: 62 MAX, este es un equipo extremadamente preciso que permite medir temperaturas de - 30 °C a 650 °C (-22 °F a 1202 °F), además posee una precisión de hasta +1.0 °C o +1.0 % del alcance. El equipo antes de ser usado contaba con una calibración actual.



Figura 28. Termómetro laser FLUKE 62 MAX
Fuente: (RS Components)

4.1.2. Cupones

Antes de iniciar la soldadura es necesario controlar las medidas del bisel, además de las dimensiones finales de los cupones de soldadura para no tener ningún problema al momento de manufacturar las probetas para los distintos ensayos a realizar. A continuación, se muestra en la Figura 29 el procedimiento realizado para el control de las medidas de los ensambles a través de la utilización de un pie de rey marca: Starrett y una galga de inspección de soldadura.

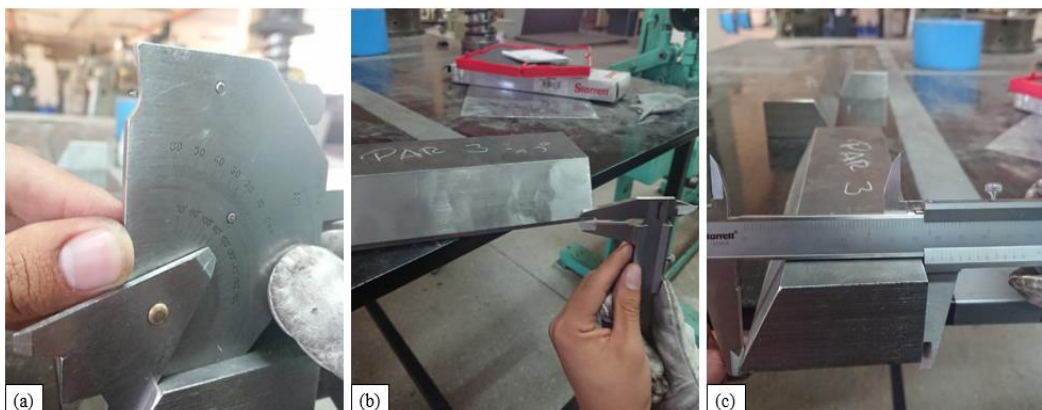


Figura 29. Control de cupones. (a) Control del ángulo del bisel mediante una galga para soldadura. (b) Control de la altura la raíz del cupón. (c) Control del ancho del cupón mediante un calibrador

4.1.3. Pre-ensamble de los cupones

El pre-ensamble de los cupones se lo realizo a través del control de las dimensiones físicas que deben poseer los cupones dados en el *WPS de Producción y de Reparación* respectivamente, además se los codificó para los distintos números de reparaciones a realizar y fue necesario el soldeo de rigidizadores para así disminuir la distorsión que se presenta al momento del proceso de soldeo. En la Figura 30 se muestra los ensambles de producción y de reparación ya terminados después de haber sido previamente pre-ensamblados.

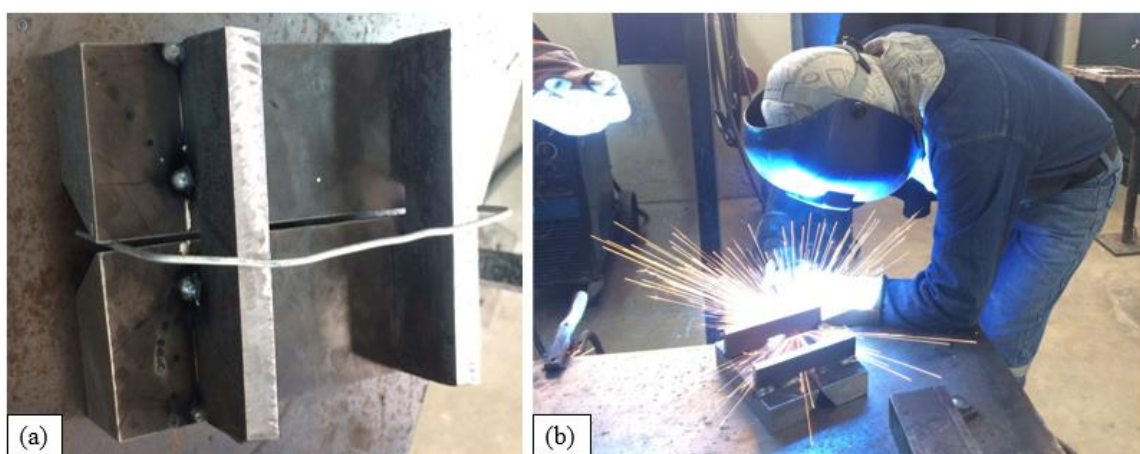


Figura 30. Ensamble de los cupones. (a) Utilización de una galga para el control de la apertura de la raíz de la junta (b) Soldeo de los rigidizadores en un ensamble de reparación

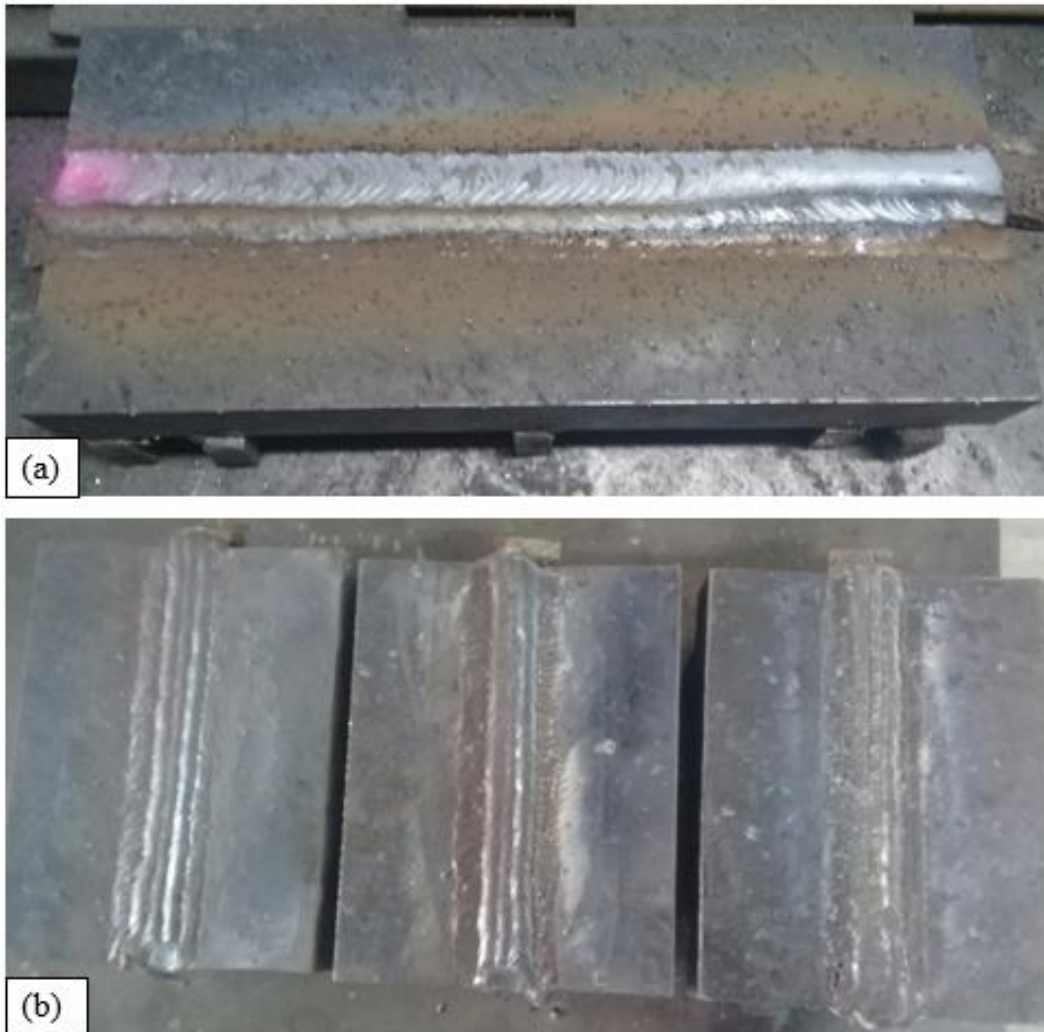


Figura 31. Ensamble de los cupones. (a) Ensamble de producción terminado (b) Ensamblados de reparación terminados con sus respectivos números de reparaciones

4.2. Controles durante la soldadura

- Tensión de arco
- Intensidad de arco
- Velocidad de avance
- Heat input
- Temperatura entre pases

Los respectivos ajustes y controles de las variables en las maquinas soldadoras se lo llevo a cabo con los mismos equipos usados para la calibración previa de las soldadoras, es decir a través del uso de una pinza amperimétrica UNI-T UT208, un multímetro FLUKE 87V, ya que por distintos motivos ajenos al proceso de soldadura puede existir una caída de voltaje y amperaje.

Para el proceso GMAW se controló la velocidad de alimentación del alambre, la cual podemos regular en la máquina, el ajuste de esta velocidad conllevará a un mayor o menor flujo en el material depositado en la franja de soldadura, en lo que se refiere a la velocidad de avance de la pistola esta depende de la habilidad del soldador y tipo de técnica de soldar que este aplicando, se debe evitar el sobrecalentamiento de la pistola para obtener depósitos de soldadura de calidad.

La velocidad de avance en el proceso SMAW depende de la habilidad y experiencia del soldador, otro de los factores que influyen aquí es el tipo de técnica de manipulación de electrodo que el soldador está aplicando, para poder controlar esta velocidad de avance en este proceso, se llevó a cabo varios cordones de soldadura tomando el tiempo que se demora en soldar una distancia determinada el soldador.

Finalmente, el control de la temperatura de precalentamiento y temperatura entre pases se lo realizó antes de comenzar un nuevo cordón de soldadura, mediante el uso de un termómetro FLUKE 62 MAX, la temperatura máxima permisible es de 250 °C Max., la misma que es un valor específico tanto del WPS de Producción como del de Reparación.

Mediante el control de la intensidad de corriente, voltaje y velocidad de avance se logró obtener valores promedios durante el proceso de pruebas de soldeo en el proceso GMAW y SMAW, permitiendo que se puedan obtener valores de Heat Input promedio. La entrada de calor en los procesos de soldadura por arco puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$H_n(\text{Julios/mm}) = f \times \frac{\text{Tensión}(V) \times \text{Intensidad}(A)}{\text{Velocidaddesoldeo}(\text{mm/seg})}$$

Siendo f el rendimiento térmico de cada proceso de soldadura.

Tabla 12.

Rendimiento térmico para varios procesos de soldadura con arco eléctrico

Proceso de soldadura con arco eléctrico	Rendimiento térmico f típico
Soldadura metálica con arco protegido	0,9
Soldadura metálica con arco eléctrico y gas	0,9
Soldadura con núcleo de fundente	0,9
Soldadura con arco sumergido	0,95
Soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas	0,7

Fuente: (UMSS)

A continuación, se presenta el cálculo de la entrada de calor o Heat Input para la junta de producción con sus parámetros de soldadura a usar en la misma.

Tabla 13.

Parámetros de soldadura usados para el Heat Input de la junta de producción

Parámetros de soldadura	Junta de Producción
Amperaje	230 A
Voltaje	24 V
Velocidad de avance promedio	2,6 mm/s

$$H_n(\text{Julios/mm}) = f \times \frac{\text{Tensión}(V) \times \text{Intensidad}(A)}{\text{Velocidaddesoldeo}(\text{mm/seg})}$$

$$H_n(\text{Julios/mm}) = 0,9 \times \frac{24V \times 230A}{2,6 \text{ mm/seg}} = 1910,76 \text{ J/mm}$$



Figura 32. Controles durante la soldadura. (a) Control de intensidad de corriente, voltaje y velocidad de avance en el proceso GMAW. (b) Control de la temperatura entre pases y temperatura medida en el tercer pase de cordón de soldadura realizado en la junta de producción

4.3.Desarrollo de los ensambles de soldadura

La secuencia resumida de los pasos seguidos durante la aplicación y control de la soldadura del *proceso de producción de los ensambles*, fueron los siguientes:

- Pre-ensamble de los cupones mediante puntos de soldadura y rigidizadores.
- Precalentamiento a cada lado del bisel y dentro del bisel a través del calentamiento de los cupones, mediante la utilización de un mechero de GLP durante 20 minutos para alcanzar la temperatura predefinida de 100 °C, el control continuo de la temperatura se lo realizó mediante un termómetro FLUKE 62 MAX.
- Aplicación del WPS de Producción a todos los ensambles, control continuo de la temperatura entre pases (250 °C) al inicio de cada nuevo pase de cordón de soldadura a realizar mediante un termómetro laser FLUKE 62 MAX., continuando con la aplicación de los depósitos de soldadura de los distintos cordones, culminando con una inspección visual de las soldaduras terminadas y enfriamiento de los ensambles a temperatura ambiente.

Algunos de los procesos realizados en el proceso de soldeo de los ensambles mediante la aplicación del *proceso de producción* se observan en las Figuras 33-34.

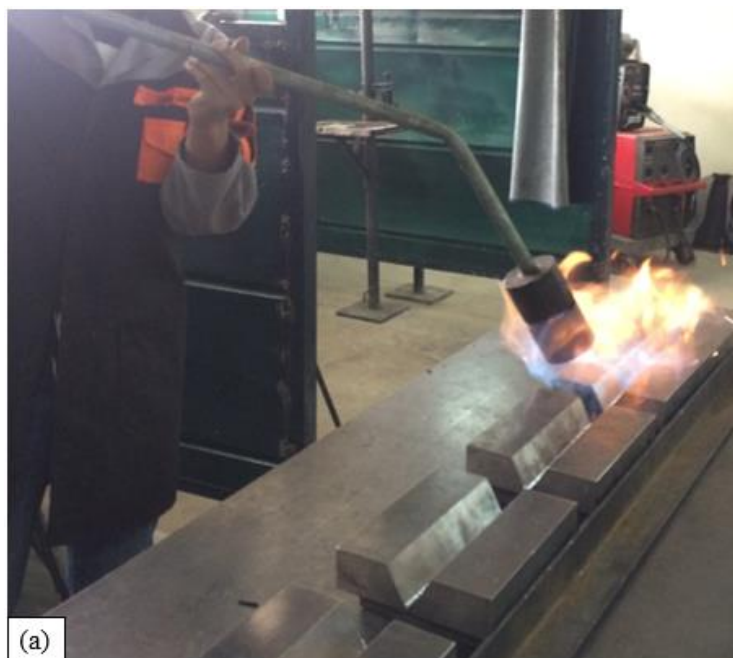


Figura 33. Ensamble de Producción. (a) Pre calentamiento de los cupones de producción y de reparación. (b) Control de la temperatura entre pases del ensamble de producción mediante el termómetro laser Fluke 62 Max



Figura 34. Control y soldeo de los ensamblés. (a) Equipos usados para el control de las variables de soldadura (Pinza amperimétrica, termómetro laser, multímetro). (b) Proceso de soldeo de los ensamblés mediante proceso de soldadura GMAW

La secuencia resumida de los pasos seguidos durante la aplicación y control de la soldadura del *proceso de reparación de los ensambles*, fueron los siguientes:

- Ensamble de los cupones mediante puntos de soldadura y rigidizadores.
- Precalentamiento cada lado del bisel y dentro del bisel a través del calentamiento de los cupones, mediante la utilización de un mechero de GLP durante 20 minutos para alcanzar la temperatura predefinida de 100 °C, el control continuo de la temperatura se lo realizó mediante un termómetro laser FLUKE 62 MAX.
- Resecado de los electrodos E-7018 para evitar la presencia de hidrogeno durante el proceso de soldadura, ya que estos son electrodos de bajo hidrogeno.
- Aplicación del WPS de reparación a los ensambles, control continuo de la temperatura entre pases (250 °C) al inicio de cada nuevo pase de cordón de soldadura a realizar mediante un termómetro laser FLUKE 62 MAX, se continua con la aplicación de los depósitos de soldadura de los distintos cordones, culminando con una inspección visual de las soldaduras terminadas y enfriamiento de los ensambles a temperatura ambiente.

Algunos de los procesos realizados en el proceso de soldeo de los ensambles mediante la aplicación del *proceso de reparación* se observan en la Figura 35.



Figura 35. Control y soldeo de los ensambles de reparación. (a) Resecado de los electrodos E-7018 (b) Control de la temperatura entre pases. (c) Limpieza de la ranura de reparación, previo a la realización de la reparación mediante proceso SMAW

4.4. Caracterización de las juntas de soldadura

La caracterización de las juntas de soldadura de reparación se desarrolló mediante la realización de ensayos mecánicos como: Ensayo de ductilidad mediante doblado lateral, microdureza Vickers (HV), ensayo de impacto; que se complementaron con una inspección visual mediante END; adicionalmente se realizó una caracterización microestructural mediante ensayos de microscopía óptica (MO).

Tabla 14.

Codificación de las distintas probetas para los ensayos mecánicos y metalográficos

Ítem	WPS	Cupón	Probeta	Identificación	Cant. de ensayos
1	WPS JP	PROD	END	LP1JP - LP2JP	2
			Doblado	D1JP - D2JP - D3JP - D4JP	4
			Metalografía	M1JP	1
			Dureza	DZ1JP	18
			Impacto	---	---
2	WPS JR	R01	END	LP1R1 - LP2R1	2
			Doblado	D1R1 - D2R1 - D3R1 - D4R1	4
			Metalografía	M1R1 - M2R1	2
			Dureza	DZ1R1 - DZ2R1	36
			Impacto	IMP1R1 - IMP2R1 - IMP3R1	9
2	WPS JR	R02	END	LP1R2 - LP2R2	2
			Doblado	D1R2 - D2R2 - D3R2 - D4R2	4
			Metalografía	M1R2 - M2R2	2
			Dureza	DZ1R2 - DZ2R2	36
			Impacto	IMP1R2 - IMP2R2 - IMP3R2	9
2	WPS JR	R02	END	LP1R3 - LP2R3	2
			Doblado	D1R3 - D2R3 - D3R3 - D4R3	4
			Metalografía	M1R3 - M2R3	2
			Dureza	DZ1R3 - DZ2R3	36
			Impacto	IMP1R3 - IMP2R3 - IMP3R3	9

4.5. Aplicación del END (Líquidos Penetrantes) a los ensambles soldados

Las normas y códigos que se usaron para la aplicación de este ensayo no destructivo (END), fueron las normas ASTM E165 que cubre los procedimientos para el examen de líquidos penetrantes para la industria en general, mientras que el código ASME BPVC Sección IX en QW-195.2 brinda los criterios de aceptación para el ensayo de líquidos penetrantes.

Antes de realizar este ensayo se requirió realizar una limpieza para eliminar la presencia de contaminantes como: óxidos, grasas, impurezas, etc., ya que estos pueden provocar falsas indicaciones o hacer que el líquido penetrante no se introduzca en las discontinuidades. Para la realización del ensayo se utilizó un kit para inspección por líquido penetrante visible removible con solvente de la marca MAGNAFLUX, el cual consistió de dos partes:

Primero se aplicó el ensayo a la superficie superior e inferior de los ensambles soldados, como segunda parte se realizó el mismo ensayo a la superficie lateral de dos probetas de doblado pertenecientes a cada ensamble, este proceso adicional que se lo llevo a cabo fue específicamente realizado para poder detectar discontinuidades que no fuesen fáciles de detectar o que no se encontraban muy cercanas a la superficie. Los resultados obtenidos se pueden consultar en el Capítulo 5.

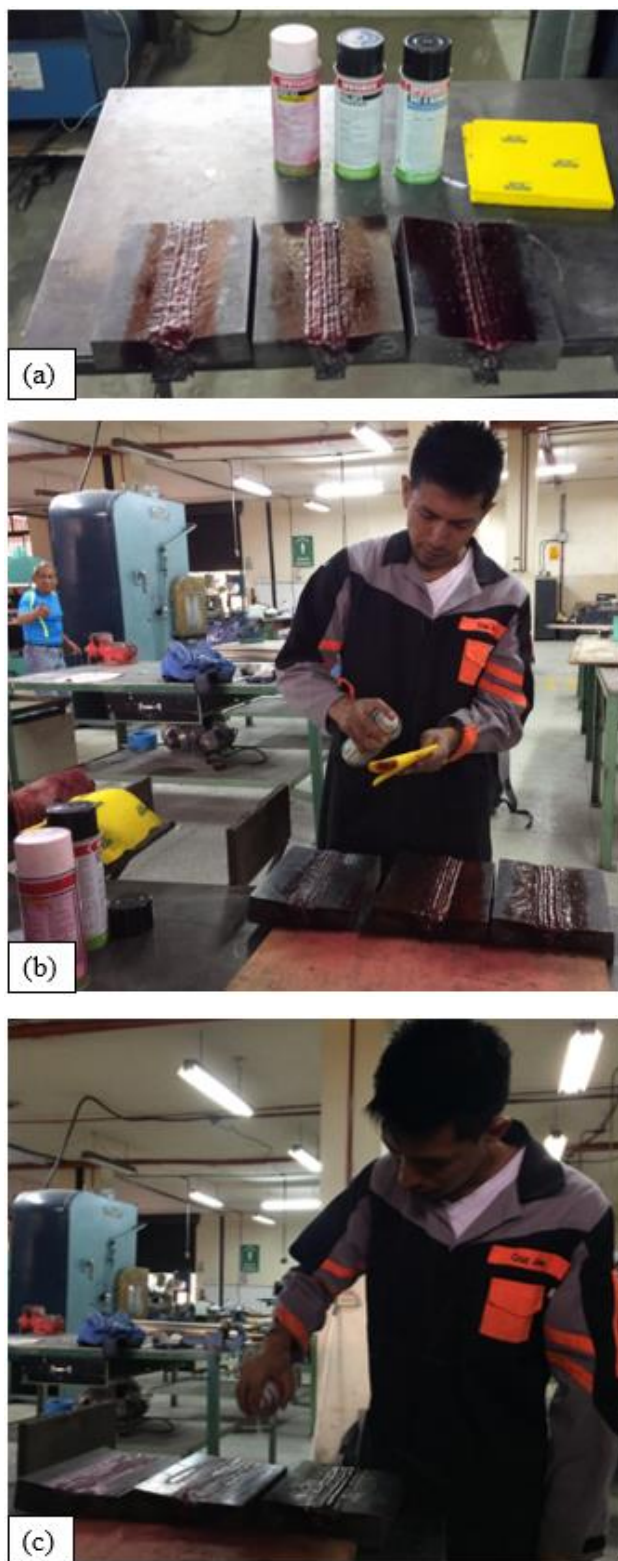


Figura 36. Líquidos Penetrantes. (a) Penetrante aplicado a las juntas de reparación. (b) Limpieza del penetrante. (c) Aplicación del revelador sobre las juntas de reparación

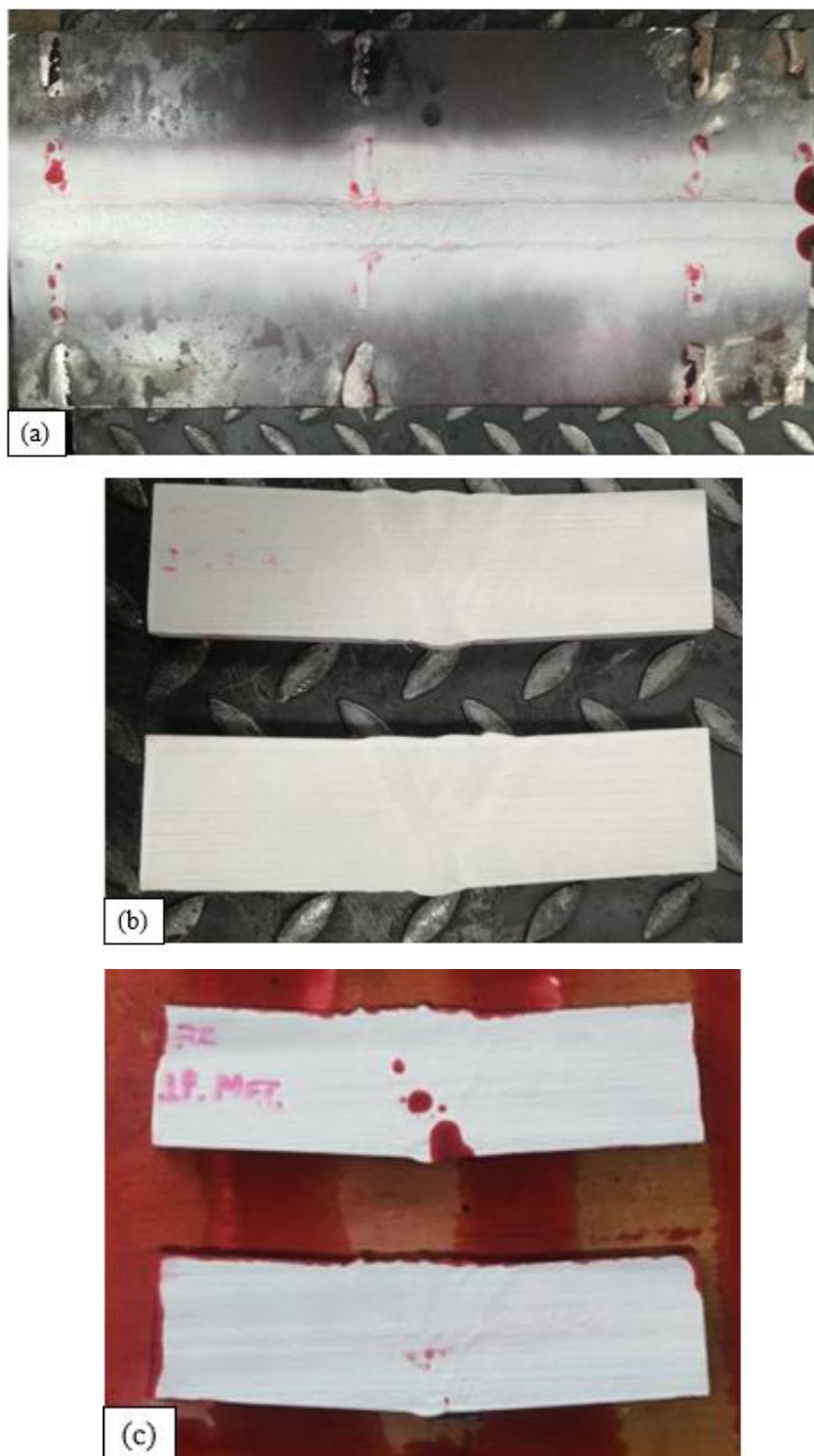


Figura 37. (a) Líquidos penetrantes aplicados en la superficie de la raíz del ensamble de producción. (b) Líquidos penetrantes sobre las probetas de doblado del ensamble de producción. (c) Líquidos penetrantes sobre las probetas de doblado de un ensamble de reparación

4.6. Ensayos mecánicos aplicados a los ensambles soldados

4.6.1. Ductilidad

Las normas ASTM E190, AWS B4.0 y código ASME BPVC Sección IX, especifican los requisitos para los ensayos de flexión guiados en materiales soldados. Este ensayo proporciona un control de calidad que ayuda a determinar la ductilidad de la soldadura y la eficacia del proceso de soldadura.

Para el ensayo de doblado lateral se aplicó el procedimiento y criterios de aceptación que se encuentran en el código ASME BPVC Sección IX en QW-160 y QW-162, ya que el apartado QW-162 hace referencia al dispositivo utilizado para realizar este ensayo el cual debe cumplir los requerimientos de QW-466, además para las dimensiones de las probetas a testear se aplicó los requerimientos del mismo código en QW-462.2.

Para la realización del ensayo se utilizó la máquina de Ensayos Universales marca AMSLER perteneciente al laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, el cual hizo uso de un rodillo de $R=4$ cm, determinando una distancia de 62 mm entre apoyos, para que se pueda aplicar la carga mediante el émbolo y el soporte, la sección 6.8 del código AWS B4.0 recomienda que se puede usar cualquier medio para mover suavemente el émbolo alrededor de 15 segundos a 2 minutos durante la aplicación del ensayo.

Los resultados obtenidos en este ensayo se pueden consultar en el Capítulo 5.



Figura 38. Pruebas de Flexión. (a) Maquina de Ensayos Universales AMSLER (Universidad de las fuerzas Armadas - ESPE). (b) Ensayo de doblado lateral junto a sus componentes principales (Rodillos, Soportes, Probeta a ensayar)

4.6.2. *Microdureza*

Microindentación de las probetas de producción y de reparación.

Las probetas fueron sometidas a pruebas de microdureza Vickers (HV) siguiendo los requerimientos de la norma ASTM-E384, la cual brinda lineamientos para la realización de ensayos de microdureza Vickers y Knoop para materiales. La ubicación de indentaciones para obtener los perfiles de microdureza sobre la ZAC, metal de soldadura y material base, se muestran a continuación en la Figura 39.

Para el desarrollo del ensayo se utilizó un microdurómetro marca METKON, modelo DUROLINE M, serial T20140048, con una aplicación de carga de 500 grf y 1000 grf durante 10 segundos, la carga y tiempo de indentación aplicados, son valores recomendados por la sección 6

de la norma ASTM-E384. El equipo utilizado tuvo su última calibración en noviembre de 2016. Los resultados obtenidos se pueden consultar en el Capítulo 5.

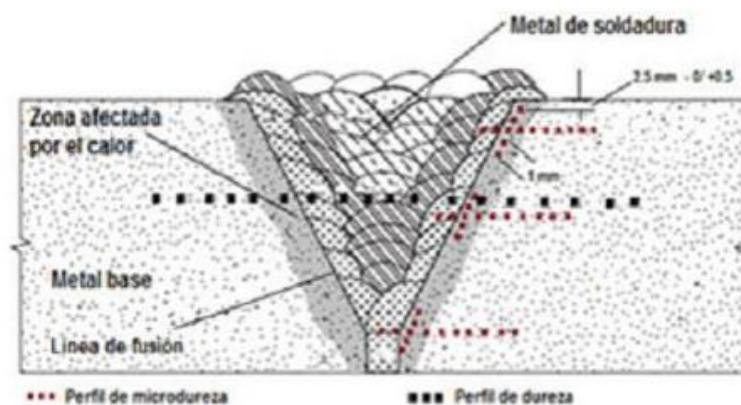


Figura 39. Esquema ilustrativo que muestra la ubicación de los lugares donde se deben realizar los perfiles de dureza y microdureza
Fuente: (Gómez Mendoza, 2016)

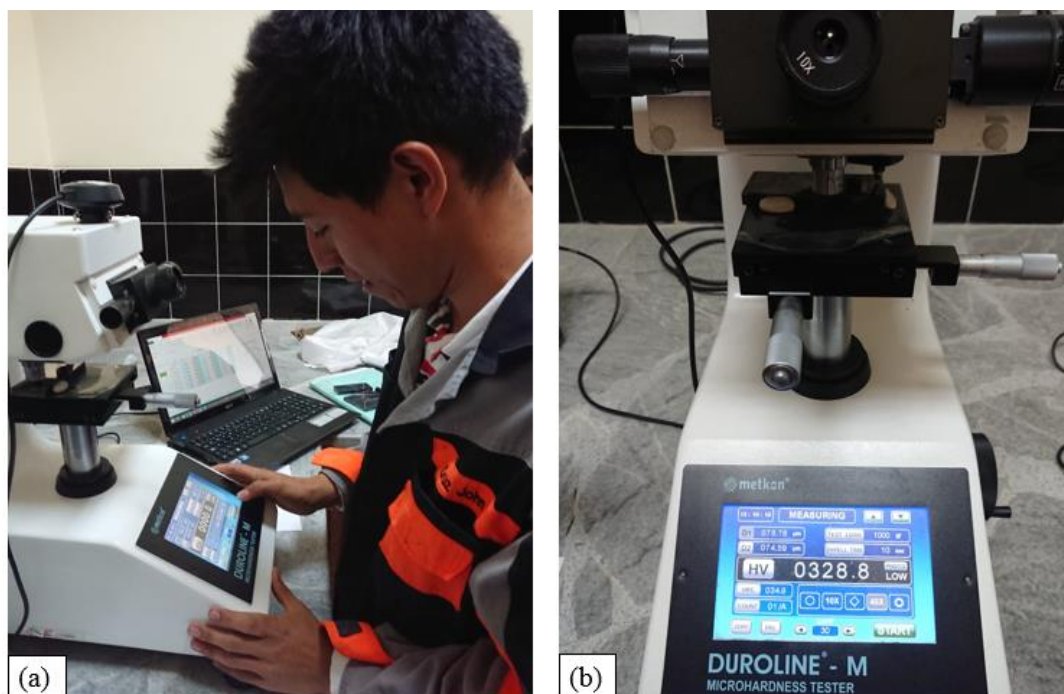


Figura 40. Ensayo de microdureza. (a) Ejecución de la indentación en la probeta de la primera reparación. (b) Valor de microdureza Vickers (HV) obtenido en el material base

4.6.3. Impacto

4.6.3.1. Control metrológico de las probetas de impacto

El control metrológico de las probetas de impacto se centra en las dimensiones de la muesca sin embargo toda la probeta tiene tolerancias dimensionales que se encuentran especificadas en la norma ASTM E23. Para realizar el control metrológico se utilizó el proyector de perfiles del Laboratorio de Metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

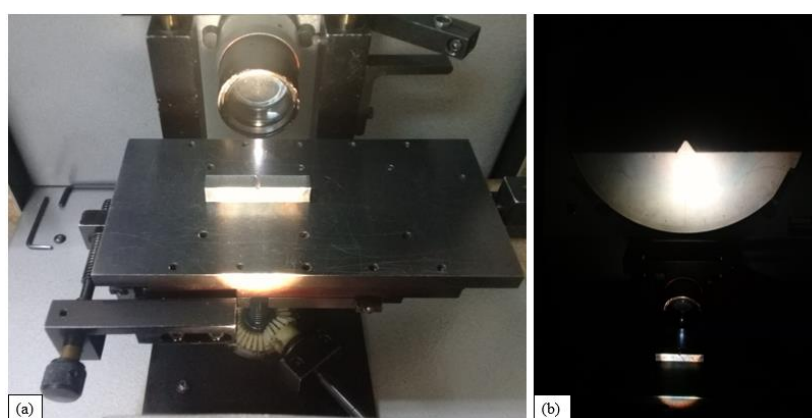


Figura 41. Control de las Probetas de impacto. (a) montaje de una probeta de impacto sobre el proyector de perfiles. (b) Control metrológico de la muesca de la probeta de impacto

4.6.3.2. Aplicación del ensayo de impacto a las probetas de reparación

Este ensayo se lo realizó aplicando los direccionamientos de la Norma ASTM E23 que describe las pruebas y el dimensionamiento de probetas metálicas entalladas tanto para ensayo Charpy como Izod. Este ensayo se complementó al utilizar las menciones que hace el código ASME BPVC Sección IX en QW-171 que nos remite a SA-370 para el procedimiento a seguir en este ensayo.

Las probetas fueron sometidas a pruebas de impacto a través del péndulo de Charpy. Para el desarrollo del ensayo se utilizó una máquina de Ensayos de Impacto por Péndulo marca AMSLER perteneciente al Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, sobre la cual se montarán las probetas, este ensayo es necesario realizarlo a una

temperatura de -29°C para lo cual se usa dióxido de carbono en estado sólido (hielo seco) el cual debe disolverse en una solución acuosa de alcohol industrial.

Los resultados obtenidos en este ensayo se pueden consultar en el Capítulo 5.



Figura 42. Probetas de impacto (a) Probetas de impacto del ensamble de la primera reparación. (b) Probetas de impacto del ensamble de la segunda reparación. (c) Probetas de impacto del ensamble de la tercera reparación



Figura 43. Ensayo de impacto (a) Reducción de la temperatura, esta ira disminuyendo progresivamente hasta un valor de -31°C . (b) Aplicación del ensayo de impacto a una probeta

4.7. Ensayos metalográficos

Este ensayo se lo realizo aplicando los direccionamientos de la Norma ASTM E3 que es la guía estándar para la preparación de muestras metalográficas y la norma ASTM E407 que es el estándar

para micrograbado de metales y aleaciones. La realización de este ensayo metalográfico permitirá revelar los constituyentes y la estructura del metal de soldadura depositado y de la ZAC de los ensambles.

El procedimiento para la realización de este ensayo metalográfico incluye: la extracción, preparación y ataque químico de la muestra, terminando con la observación microscópica. El ataque químico se lo realizó mediante el uso de nital (solución acuosa o alcohólica de ácido nítrico al 2%), mediante la inmersión de las probetas durante 3 a 4 segundos.

El nital al 2% utilizado, es una composición común para aceros al carbono y de baja aleación según el capítulo “Carbon and Steel Alloy” del volumen 9 del Handbook de la ASM. El tiempo de ataque químico aplicado a las probetas, se lo realizó bajo recomendaciones del literal 74 de la tabla 2 de la norma ASTM E407.

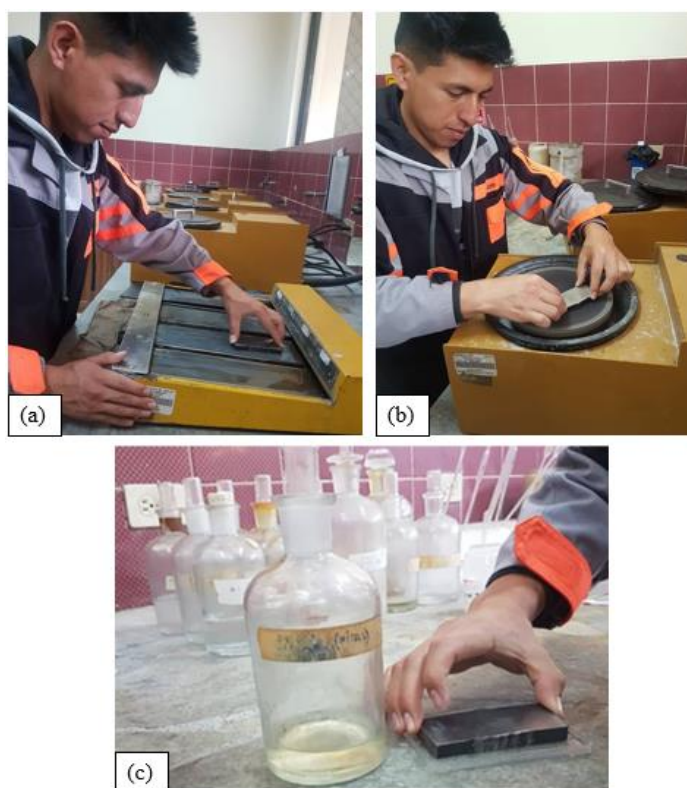


Figura 44. Proceso de preparación de las muestras para el análisis metalográfico

Para el análisis metalográfico se utilizó el siguiente equipo: Microscopio metalográfico marca MEIJI TECHNO serie ML7000. Los resultados obtenidos se pueden consultar en el Capítulo 5.

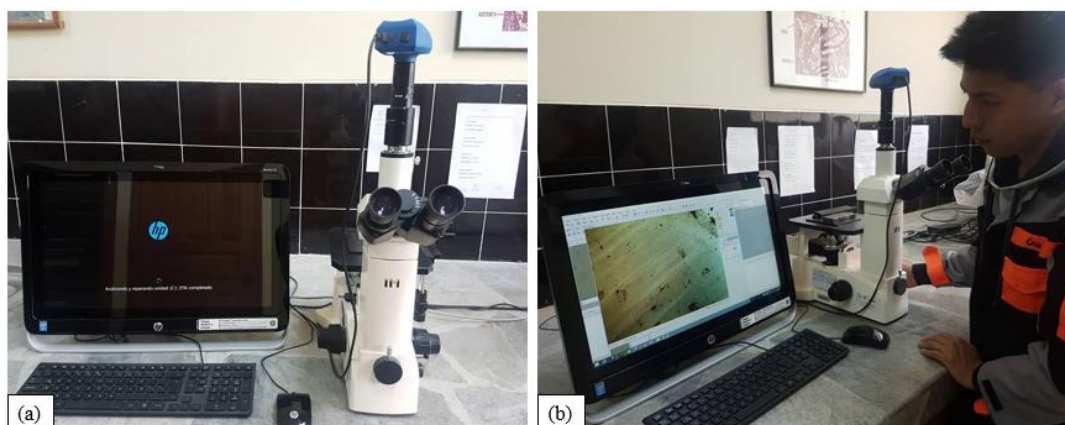


Figura 45. Microscopia Óptica. (a) Microscopio Metalográfico MEIJI TECHNO perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE (b) Imagen obtenida a 200x mediante el microscopio metalográfico

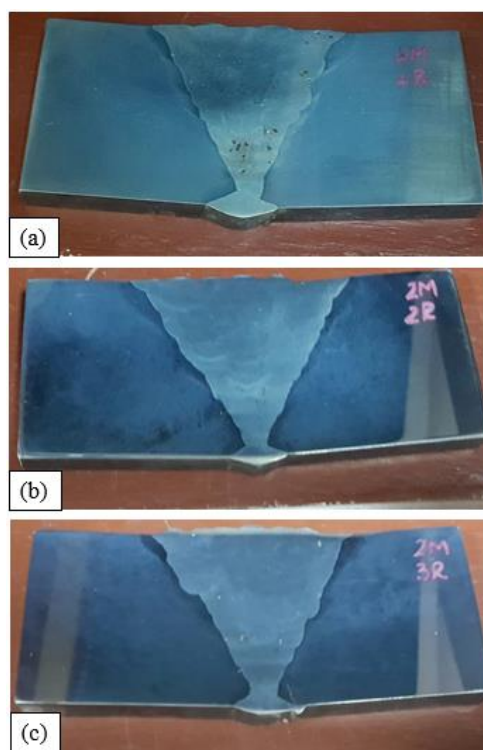


Figura 46. Metalografías. (a) Metalografía de la 1era reparación con nital al 2%. (b) Metalografía de la 2da reparación con nital al 2%. (c) Metalografía de la 3era reparación con nital al 2%

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis químico

5.1.1. Material base

En la siguiente tabla se presentan los valores promedios de los elementos químicos que conforman el acero AISI 4140, el acero usado en este proyecto de investigación fue el acero BOHLER V320:

Tabla 15.

Composición química promedio del acero (BOHLER V320)

Elemento	Porcentaje en peso (%)
Carbono (C)	0,40 %
Manganeso (Mn)	0,87 %
Fosforo (P)	0,03 %
Azufre (S)	0,04 %
Silicio (Si)	0,25 %
Cromo (Cr)	0,95 %
Molibdeno (Mo)	0,20 %

Fuente: (BOHLER, Colombia)

5.1.2. Carbono equivalente

El carbono equivalente (P_{cm}) del metal base fue calculado utilizando la fórmula desarrollada por Ito y Bessyo, que se utiliza para los aceros micro-aleados de alta resistencia o los tipos de aceros al Cr-Mo de baja aleación, la cual es :

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

$$P_{cm} = 0,4 + \frac{0,25}{30} + \frac{0,87 + 0 + 0,95}{20} + \frac{0}{60} + \frac{0,20}{15} + \frac{0}{10} + 5(0)$$

$$P_{cm} = 0,512\%$$

El carbono equivalente calculado para el acero AISI 4140, usado en este proyecto de investigación posee un valor de 0,52 %. Este valor indica que es necesario realizar un precalentamiento para disminuir el riesgo de que se generen fisuras. El WPS que se aplicará establece un valor mínimo de 100 °C como temperatura de precalentamiento.

Conforme recomendaciones del Volumen 6 del Handbook de la ASM, la temperatura del acero AISI 4140 deberá ser de 230° C Min, revisar la Tabla 8, sin embargo, al estar haciendo uso de procedimientos de soldadura (WPS) que se utilizan en las etapas de producción y reparación de tubería de alta presión para hidroeléctricas, el precalentamiento se regirá estrictamente al valor recomendado en estos procedimientos de soldadura de producción y de reparación que se van a aplicar, la cual es de 100°C mínimo como temperatura de precalentamiento.

Nota: Revisar la Tabla 8 que se encuentra en el Capítulo III de esta investigación, en ella se podrá encontrar las recomendaciones de temperatura de precalentamiento y temperatura entrepases para distintos espesores de chapa metálica de algunos de los aceros HSLA más utilizados.

5.2. Ensayo No Destructivo (Líquidos Penetrantes)

El código BPVC ASME Sección IX en QW-195.2 brinda los criterios de aceptación para el ensayo de tintas penetrantes, para lo cual define tres términos los cuales son:

- Indicaciones importantes: indicaciones con dimensiones principales mayores que 1.5 mm.
- Indicaciones lineales: una indicación que tiene una longitud mayor a tres veces su ancho.
- Indicaciones redondas: una indicación de forma circular o elíptica con longitud igual o menor a tres veces su ancho.

a) Aplicación de Líquidos Penetrantes a las superficies de los Ensamblajes



Figura 47. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a la superficie del ensamble de producción

En las superficies del cupón de producción se determinó que no existen ningún tipo de discontinuidades o imperfecciones, además se observa que existen indicaciones redondeadas en las zonas donde se soldaron los rigidizadores, estas indicaciones al estar a 7mm fuera de la ZAC, no representan ninguna afectación al cupón.

- b) Aplicación de Líquidos Penetrantes a las superficies laterales de las probetas de los Ensamblés.

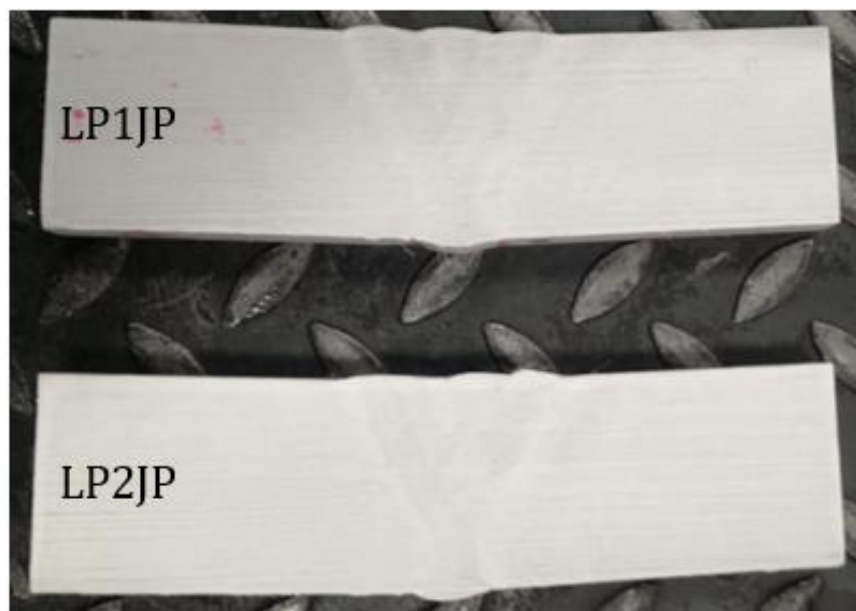


Figura 48. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a las probetas LP1JP y LP2JP del ensamble de producción

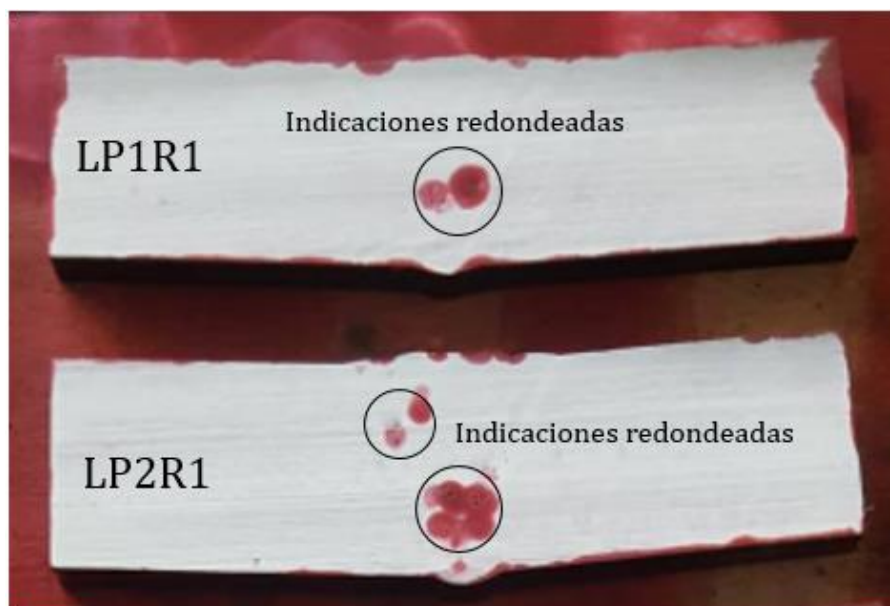


Figura 49. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a las probetas LP1R1 y LP2R1 del ensamble con una reparación

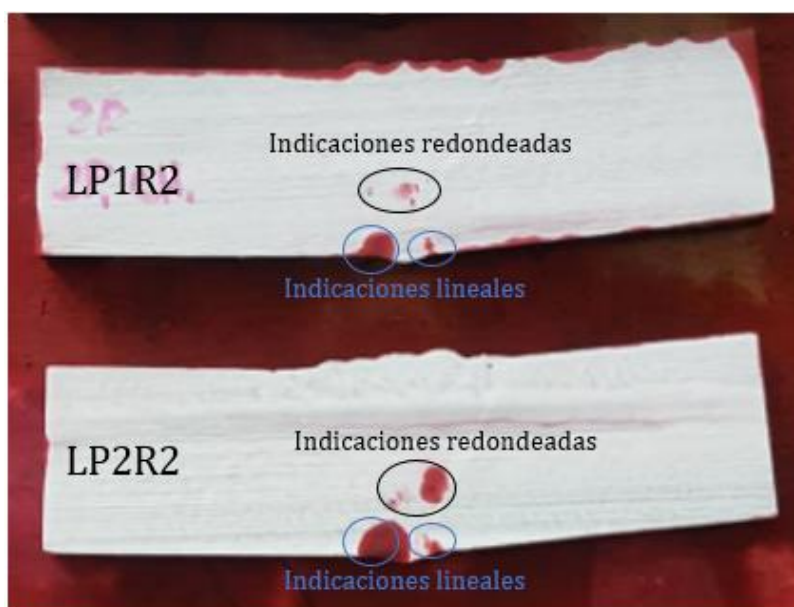


Figura 50. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a las probetas LP1R2 y LP2R2 del ensamble con dos reparaciones



Figura 51. Ensayo de líquidos penetrantes aplicado a las probetas LP1R3 y LP2R3 del ensamble con tres reparaciones

A continuación, en la Tabla 16, se presentan las distintas características de las indicaciones encontradas mediante el ensayo no destructivo de líquidos penetrantes en cada una de las probetas de los ensambles.

Tabla 16.

Resultados del ensayo de líquidos penetrantes aplicados a las probetas de los ensambles

Probeta	Indicaciones				Observaciones
	Redondeada	Tamaño	Lineal	Tamaño	
LP1JP	---	---	---	---	No presentan ninguna indicación
LP2JP	---	---	---	---	
LP1R1	2	Entre 1, 1.2 y 1.5 mm	---	---	Dado el tamaño de la indicaciones redondeadas, estas son admisibles según Código ASME BPVC Sección IX
LP2R1	6	Entre 0.8, 1.2 y 1.5 mm	---	---	
LP1R2	3	Entre 0.8 y 1.2 mm	2	De 7 y 6 mm cada una	Dado el tamaño de la indicación lineal, es inadmisibles según Código ASME BPVC Sección IX
LP2R2	3	Entre 1 y 1.2 mm	2	De 7 y 6.5 mm cada una	
LP1R3	4	Entre 0.5 y 1.2 mm	1	De 5 mm	Dado el tamaño de la indicación lineal, es inadmisibles según Código ASME BPVC Sección IX
LP2R3	4	Entre 0.8 y 1.2 mm	1	De 5 mm	

Las indicaciones redondeadas que aparecieron en las probetas de los ensambles de reparación se presentaron en forma de agrupamiento de porosidades de distintos tamaños en el metal de soldadura, los tamaños de estas indicaciones son admisibles comparándolo con los requerimientos del Código ASME BPVC Sección IX,

Las indicaciones lineales que aparecieron en las probetas de los ensambles de reparación se presentaron en forma de grietas en la ZAC de la raíz, dado su tamaño son inadmisibles para el

Código ASME BPVC Sección IX, las presencias de estas grietas se pueden haber producido por causa de un enfriamiento brusco o debido a los excesivos gradientes térmicos que soporto el espesor grueso de los ensambles.

5.3. Análisis Metalográfico de los ensambles

5.3.1. Análisis Metalográfico del Ensamble de Producción

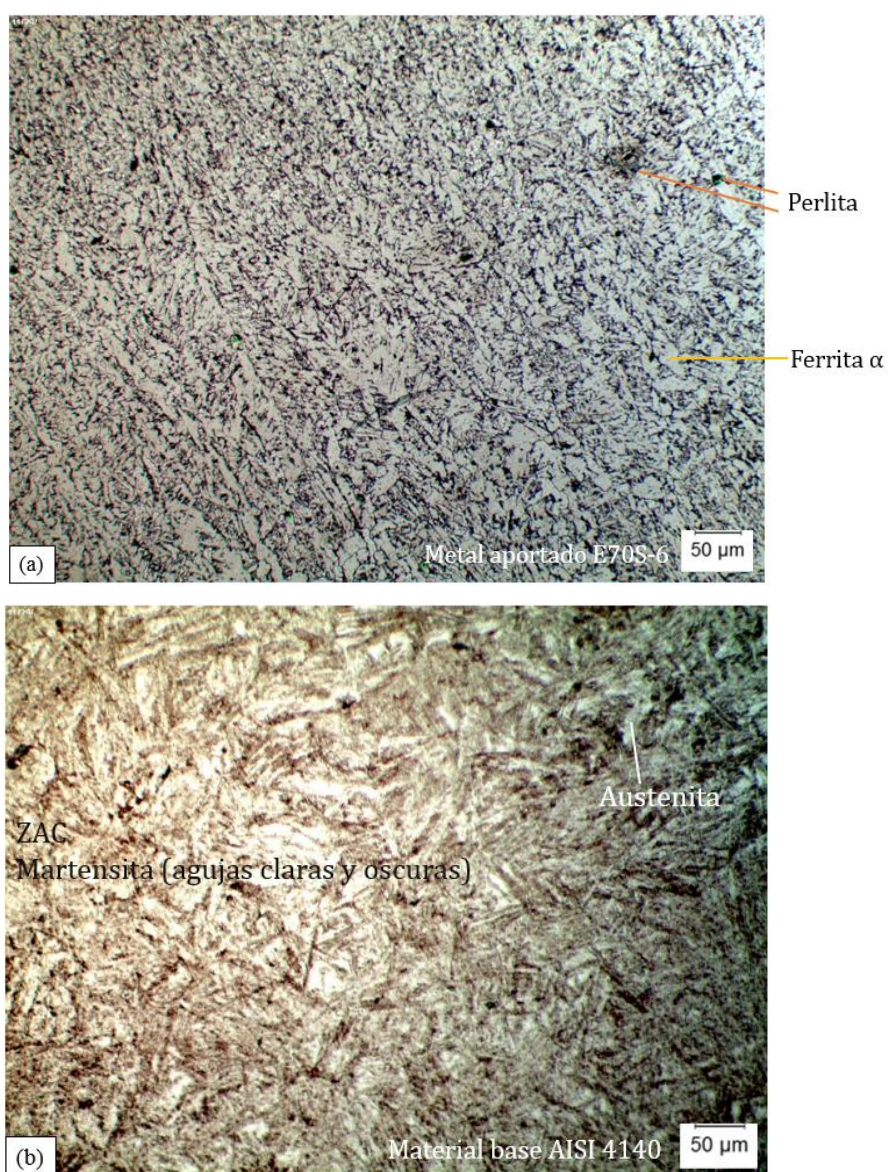


Figura 52. Microestructura de la junta de producción. (a) Microestructura del metal de soldadura (electrodo E70S-6). 200x (b) Microestructura martensítica del material base (AISI 4140). 500x

La microestructura obtenida en el metal de soldadura ver Figura 52 (a) está formada por ferrita equiaxial (zonas de color blanco) y granos de perlita refinados, debido al recalentamiento causado por la deposición de pases de relleno y acabado. Este tipo de microestructura es característica de aceros con un porcentaje bajo de carbono ya que el electrodo usado el E70S-6 posee una composición semejante a la de un acero con bajo contenido de carbono.

La microestructura obtenida en el material base ver la Figura 52 (b) es una estructura martensítica típica de los aceros aleados y de medio carbono, esta martensita se obtiene por el enfriamiento rápido de la austenita, sin que actúe la difusión, la martensita acicular presente en la ZAC, muestra un aspecto metalográfico de agujas en zig-zag a través de agujas claras y agujas ennegrecidas con presencia de austenita (espacios de color blanco).

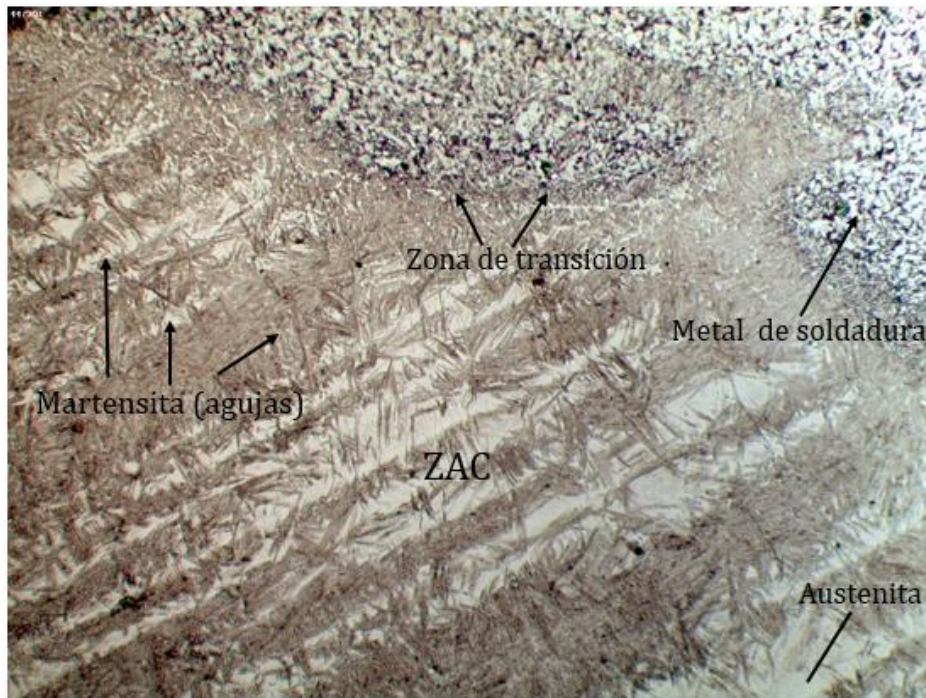


Figura 53. Microestructura de la ZAC superior del ensamble de producción, la cual posee martensita en forma acicular con agujas muy bien definidas. 200x

En la microestructura de la Figura 53, existe la presencia predominante de una estructura conformada por martensita, la cual tiene una forma marcadamente acicular formando agujas en zig-zag. Esta martensita se presenta en aceros que poseen un porcentaje de carbono menor al 0,6% C, también es conocida como martensita de listón y esta tiende a alinearse entre sí en el grano de austenita original presente en las zonas de transición, mostrando grupos de listones paralelos. Sin embargo, no aparece una precipitación de carburo obvia, es decir las microestructuras obtenidas están libres de cementita y están formadas por una estructura de martensita en forma de agujas.

A continuación, se presenta la microestructura de la ZAC de la raíz del ensamble de producción, la cual se puede observar sus características en la Figura 54, que son: Estructura martensítica, que se encuentra distribuida a través de grupos o bloques paralelos de martensita en forma de agujas a lo largo de toda la ZAC, y que además se encuentran presentes en pequeñas cantidades en la zona de transición.

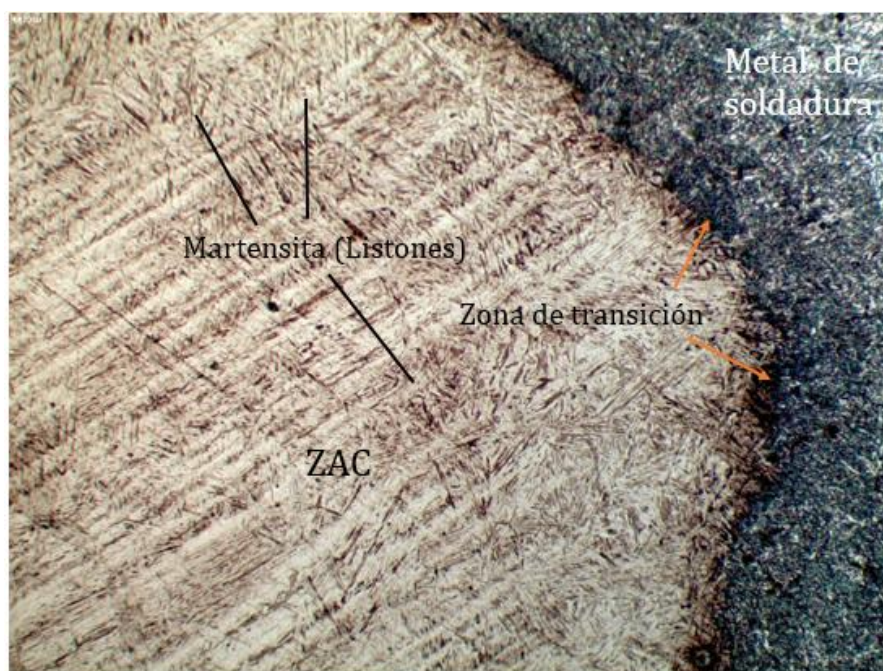


Figura 54. Microestructura de la ZAC de la raíz del ensamble de producción, la cual posee grupos de listones paralelos de martensita. 200x

5.3.2. Análisis Metalográfico del Ensamble de la Primera Reparación

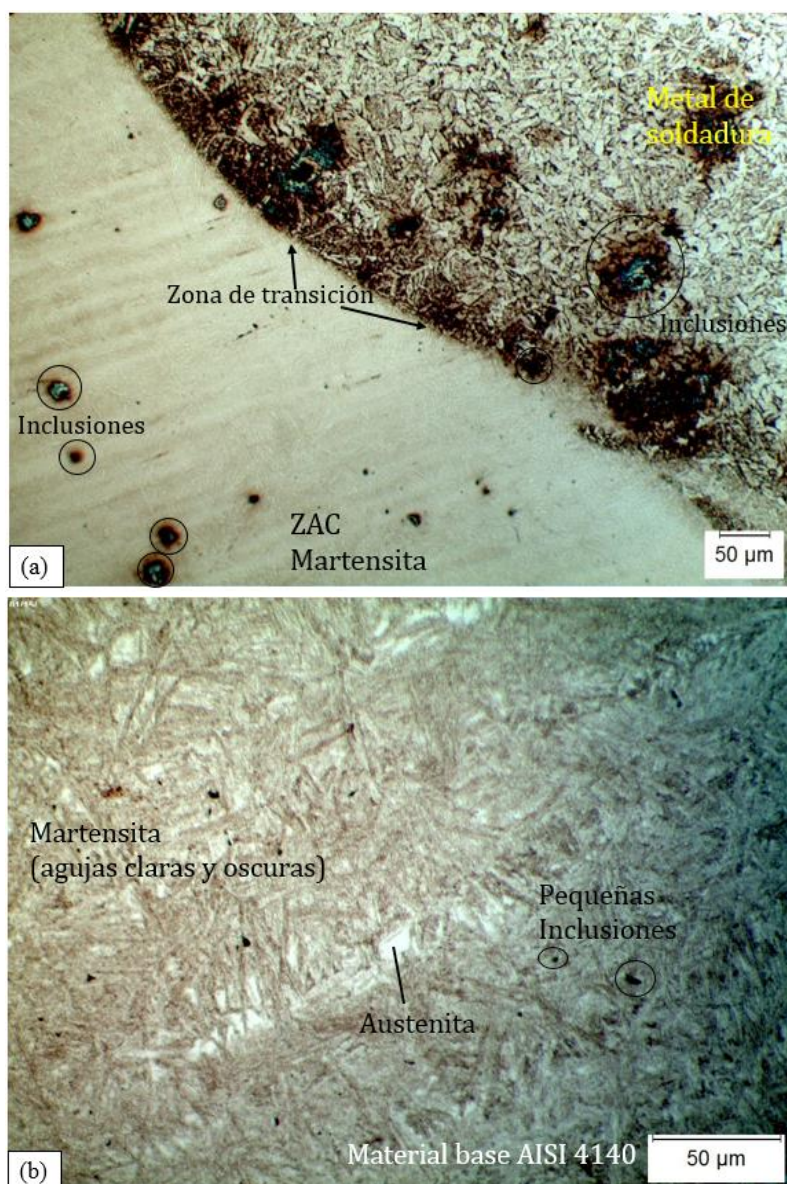


Figura 55. Microestructura de la primera reparación. (a) Microestructura del metal de soldadura, martensita presente en la ZAC e inclusiones no metálicas (puntos negros). 200x. (b) Microestructura del material base (AISI 4140), martensita en forma de agujas y zonas de austenita. 500x

La microestructura obtenida en el metal de soldadura y material base del ensamble con una primera reparación ver Figura 55 (a), (b), presentan las mismas características mostradas en la

microestructura de la Figura 52, sin embargo, existe la presencia de inclusiones no metálicas como: Sulfuros mixtos de Fe y Mn conteniendo unos pequeños puntos de óxido (negro).

Las inclusiones se presentaron debido a que, en la soldadura por arco eléctrico de aceros, existe la presencia de inclusiones no metálicas en el metal de soldadura. El metal líquido de soldadura antes y durante la solidificación interactúa con el medio que lo rodea disolviendo gases (oxígeno, nitrógeno, hidrógeno). Las reacciones que se producen entre estos elementos disueltos y los que se encontraban disueltos previamente (Mn, Si, C, Fe, Al, Ti, etc.) dan origen a las inclusiones no metálicas.

Los óxidos presentes se formaron durante el enfriamiento inicial del material, a una temperatura de 1800°K (1527 °C), mientras que los sulfuros de manganeso y hierro se forman durante la solidificación o en el posterior enfriamiento en estado sólido de la unión soldada. Estas inclusiones tienen un marcado efecto sobre las propiedades mecánicas del material, como lo es la reducción de la ductilidad y una mayor facilidad a la fractura por acumulación de inclusiones.

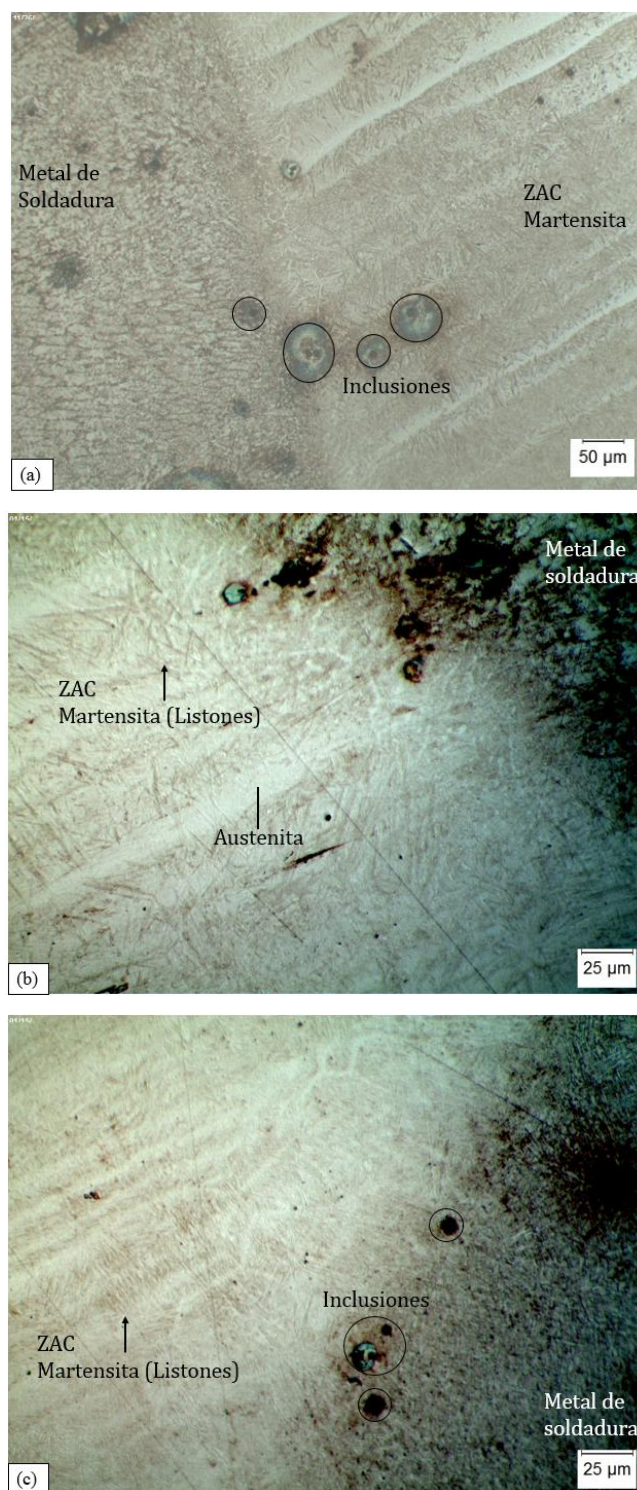


Figura 56. ZAC de la primera reparación. (a) Martensita en forma de listones paralelos junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 200x. (b) Martensita fina agrupada paralelamente en la microestructura de la ZAC. 500x (c) Microestructura de la ZAC de la raíz, martensita mostrando grupos de agujas paralelos junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 500x

En las imágenes microscópicas del ensamble de la primera reparación, se observa que las agujas de martensita, presentan un refinamiento en lo que se refiere a su tamaño y longitud permitiendo tener colonias paralelas de martensita fina en comparación al tamaño más grande de agujas presentes en la martensita de la junta de producción, debido a que el ciclo de calor de la soldadura de reparación cambió la microestructura, provocando un intenso refinamiento del grano y cambios en la morfología del grano de martensita.

Una característica microestructural importante de estas láminas de martensita que se observan es la tendencia de la mayoría de las láminas para alinearse paralelas entre ellas en grandes áreas de los granos de la austenita que son las zonas blancas. Estas regiones de láminas paralelas alineadas se llaman paquetes y tienden a desarrollarse más preponderantemente en las aleaciones de bajo C.

Se puede observar que existe la presencia de inclusiones no metálicas como: Sulfuros mixtos de Fe y Mn conteniendo unos pequeños puntos de óxido (negro), tanto en la ZAC como en el metal de soldadura depositado.

Las microestructuras martensíticas obtenidas en la ZAC del ensamble con una primera reparación, poseen características semejantes a imágenes metalográficas que contiene el volumen número 9 (Metallography and Microstructures) de la ASM, permitiendo la confirmación y validación de los resultados obtenidos mediante el microscopio metalográfico MEIJI TECHNO perteneciente al Laboratorio de Ciencia de Materiales de las Fuerzas Armadas - ESPE.

5.3.3. Análisis Metalográfico del Ensemble de la Segunda Reparación

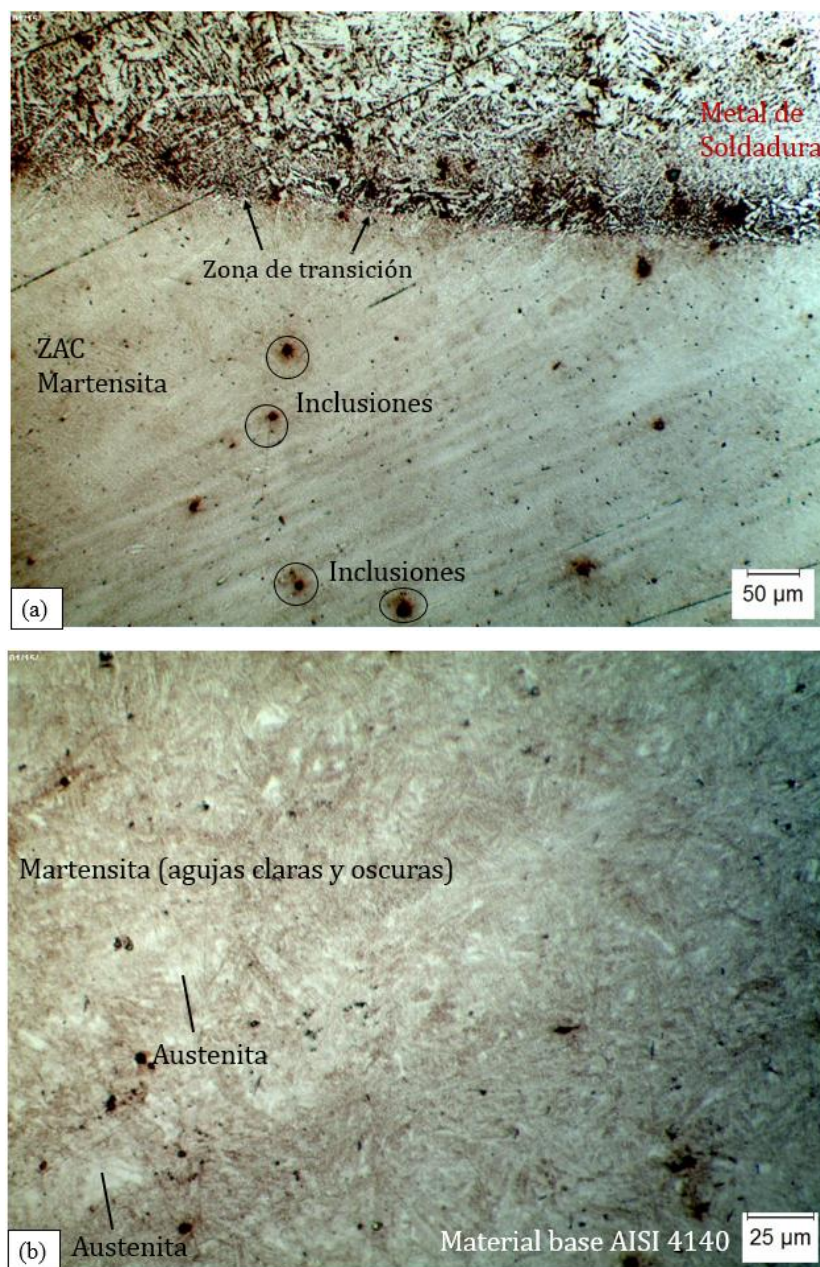


Figura 57. ZAC de la segunda reparación. (a) Microestructura, martensita fina presente en la ZAC, junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 200x (b) Microestructura del material base (AISI 4140), martensita en forma de agujas y zonas de austenita. 500x

La microestructura obtenida en el metal de soldadura y material base del ensemble con dos reparaciones ver Figura 57 (a), (b), presentan las mismas características mostradas en la

microestructura del ensamble de producción, sin embargo, existe la presencia de inclusiones no metálicas tanto en la zona de transición (Metal de soldadura - ZAC), en la ZAC y en el material base a través de Sulfuros mixtos de Fe y Mn conteniendo unos pequeños puntos de óxido (negro).

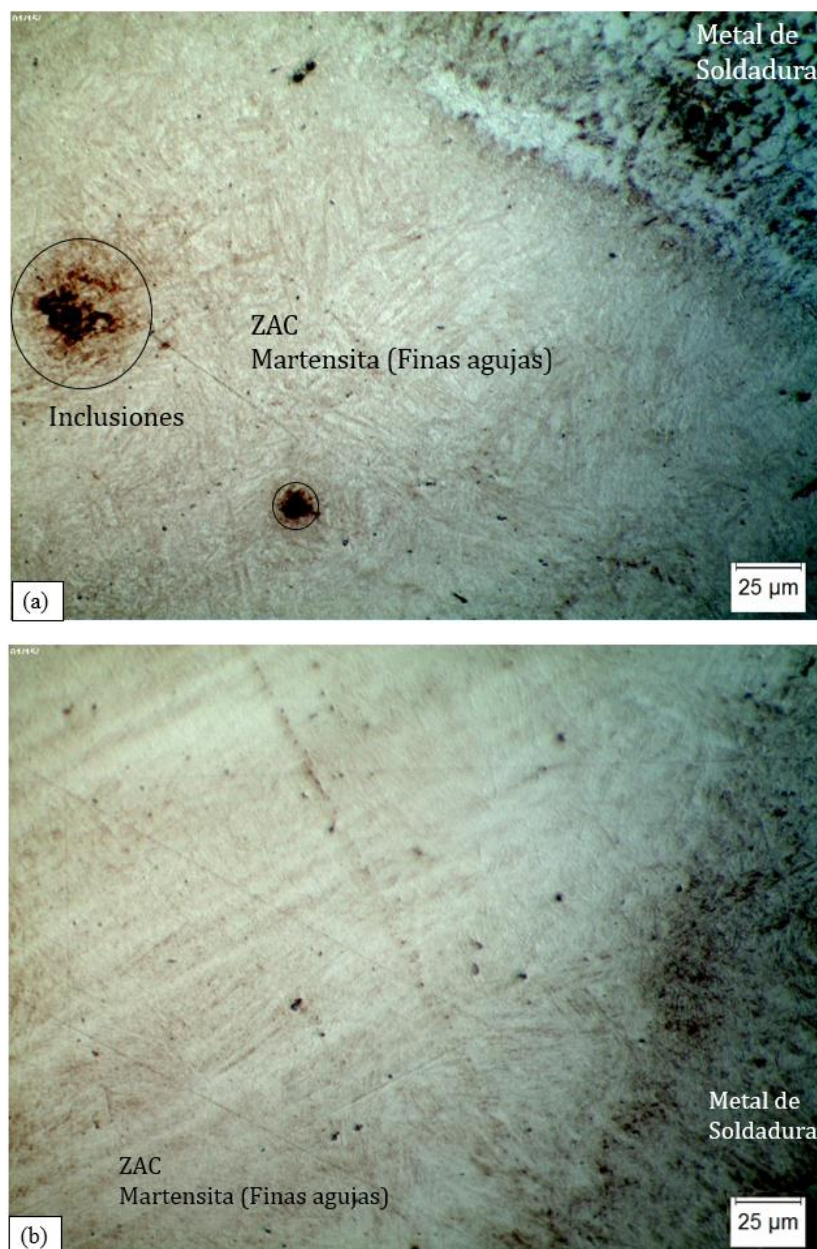


Figura 58. Microestructura de la ZAC de la segunda reparación. (a) Microestructura en forma de martensita fina presente en la ZAC, junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 200x (b) Microestructura martensita fina difusa presente en la ZAC de la raíz, junto a la presencia de inclusiones no metálicas. 200x

La microestructura obtenida en la ZAC superior y de la raíz de la Segunda reparación ver Figura 58 (a), (b), presentan características muy similares a las mostradas en el ensamble de la primera reparación, sin embargo, existe un aumento en el tamaño de la presencia de inclusiones no metálicas como: Sulfuros mixtos de Fe y Mn conteniendo unos pequeños puntos de óxido (negro). La generación de estas inclusiones se detallaron en el análisis de la Figura 55.

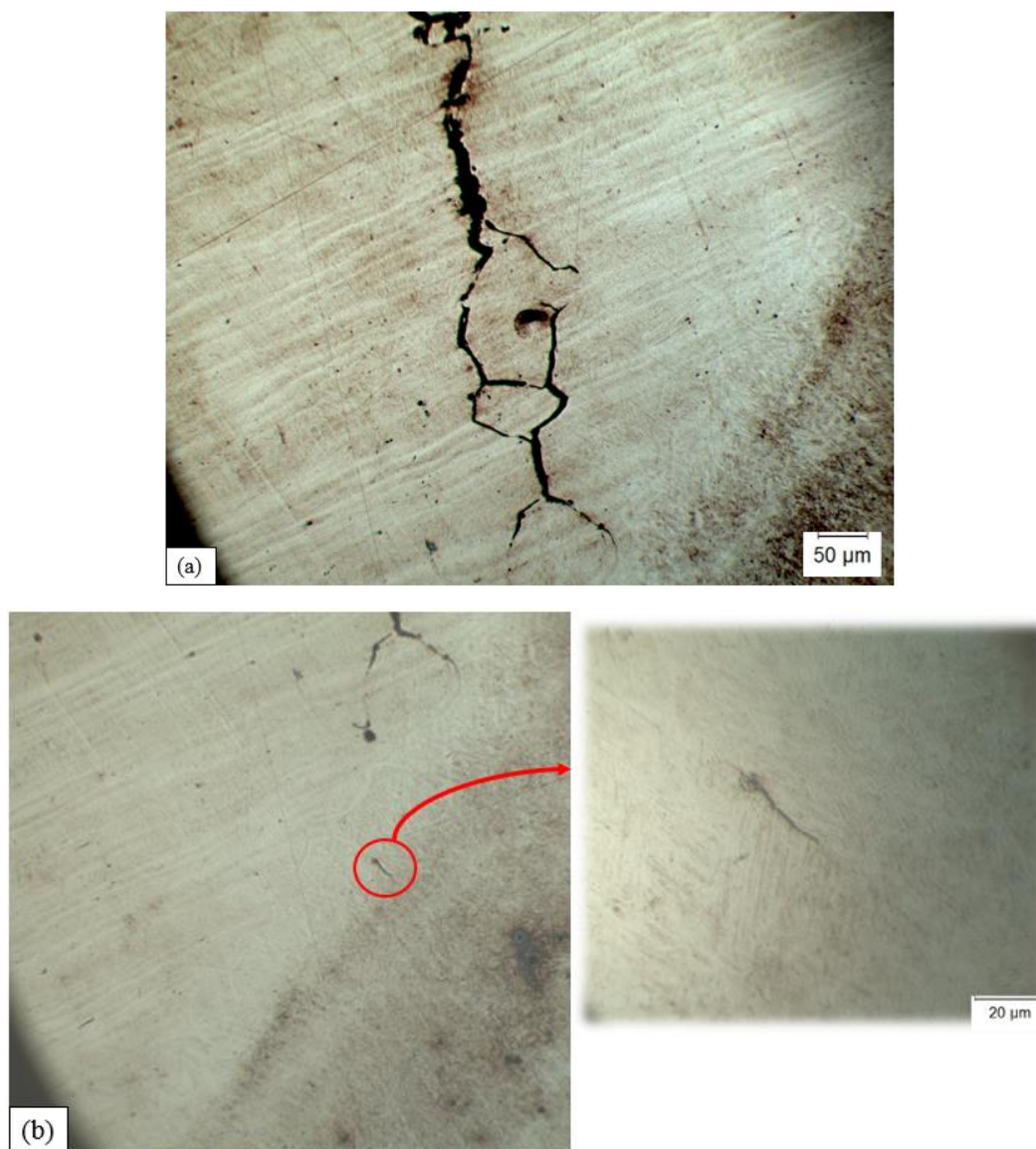


Figura 59. Fisuras en la ZAC de la segunda reparación. (a) Microestructura en forma de martensita fina presente en la ZAC junto a la presencia de una fisura generada en la ZAC. 200x
(b) Aumento del análisis de una micro-grieta presente en la ZAC con una imagen a 500x

En la Figura 59 (a), (b), se puede observar la presencia de una grieta que se va desarrollando en forma transversal a los granos de martensita (Agujas finas orientadas paralelamente en bloques), estas agujas finas presentes en la ZAC poseen un tamaño de alrededor de 20um a 25um.

La aparición de las grietas que se suscitaron en la ZAC de la raíz desarrollada en el proceso de producción, se deben a que los bordes de los ensambles soldados representan áreas de acumulación de esfuerzos causados por: un alto gradiente de temperatura, por tensiones residuales acumuladas en la unión soldada durante la aplicación de las dos reparaciones a el ensamble; otro factor que influye en el aparecimiento de estas grietas, se debe a que el contenido de carbono presente en el material base causa que la dureza y la resistencia de la martensita aumenten, volviéndola más frágil y quebradiza, permitiendo que en estas áreas se pueda desarrollar un agrietamiento.

5.3.4. Análisis Metalográfico del Ensamble de la Tercera Reparación

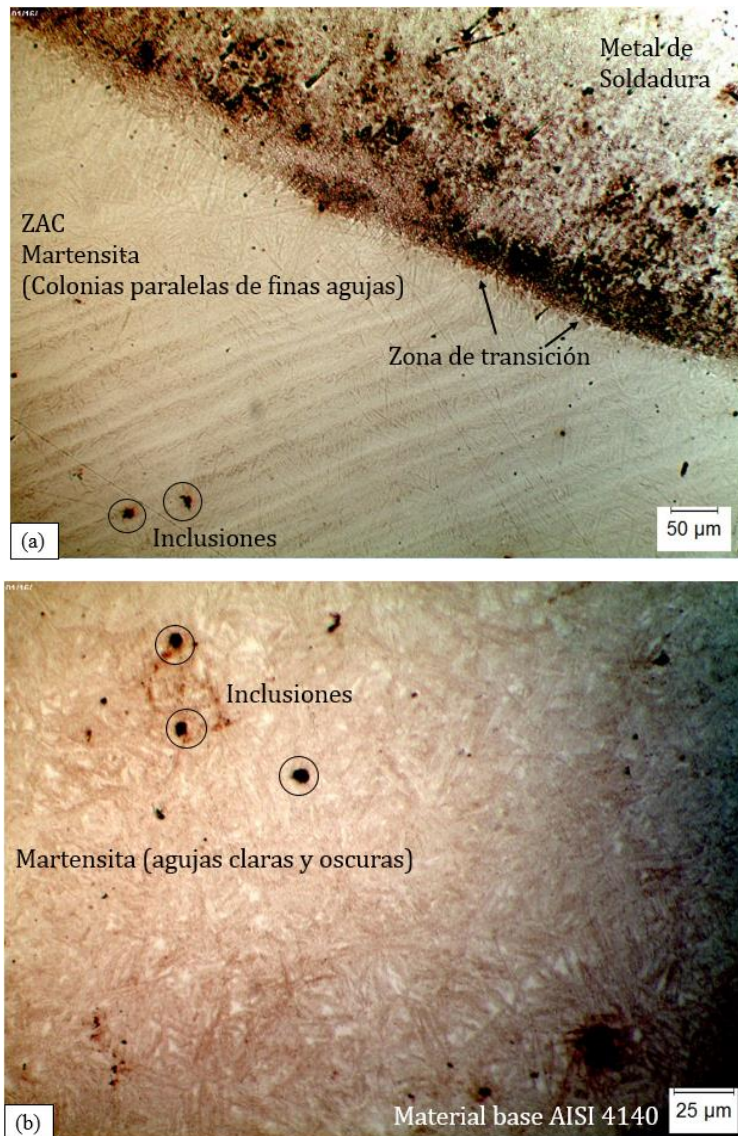


Figura 60. ZAC de la tercera Reparación. (a) Martensita fina en la ZAC con presencia de inclusiones. 200x (b) Microestructura del material base, martensita en forma de agujas y presencia de inclusiones no metálicas. 500x

La microestructura obtenida en el metal de soldadura y material base del ensamble con tres reparaciones ver Figura 60 (a), (b), presentan las mismas características mostradas en la microestructura de la Figura 55, sin embargo, existe un aumento de la presencia de inclusiones no metálicas tanto en la zona de transición (Metal de soldadura - ZAC). Debido a la aplicación de más

de un proceso de reparación. Se puede presentar un mayor número de inclusiones no metálicas en el metal de soldadura, aumentando la presencia de óxidos formados durante el enfriamiento del material y una mayor presencia de sulfuros de manganeso formados durante el enfriamiento del ensamble.

A continuación, se presenta la microestructura obtenida en la ZAC del ensamble con tres reparaciones ver Figura 61 (a), (b), estas microestructuras presentan características similares a las mostradas en la primera reparación.

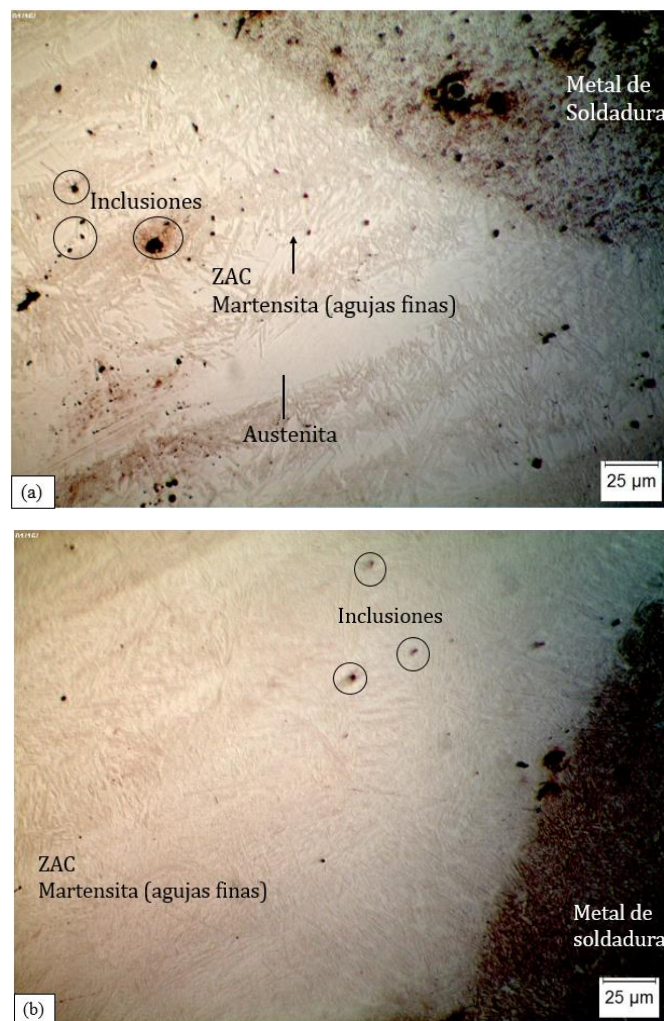


Figura 61. (a) Microestructura en forma de martensita fina presente en la ZAC, presencia de inclusiones no metálicas y zonas de austenita. 200x (b) Martensita fina difusa presente en la ZAC de la raíz, junto a pequeñas inclusiones no metálicas. 500x

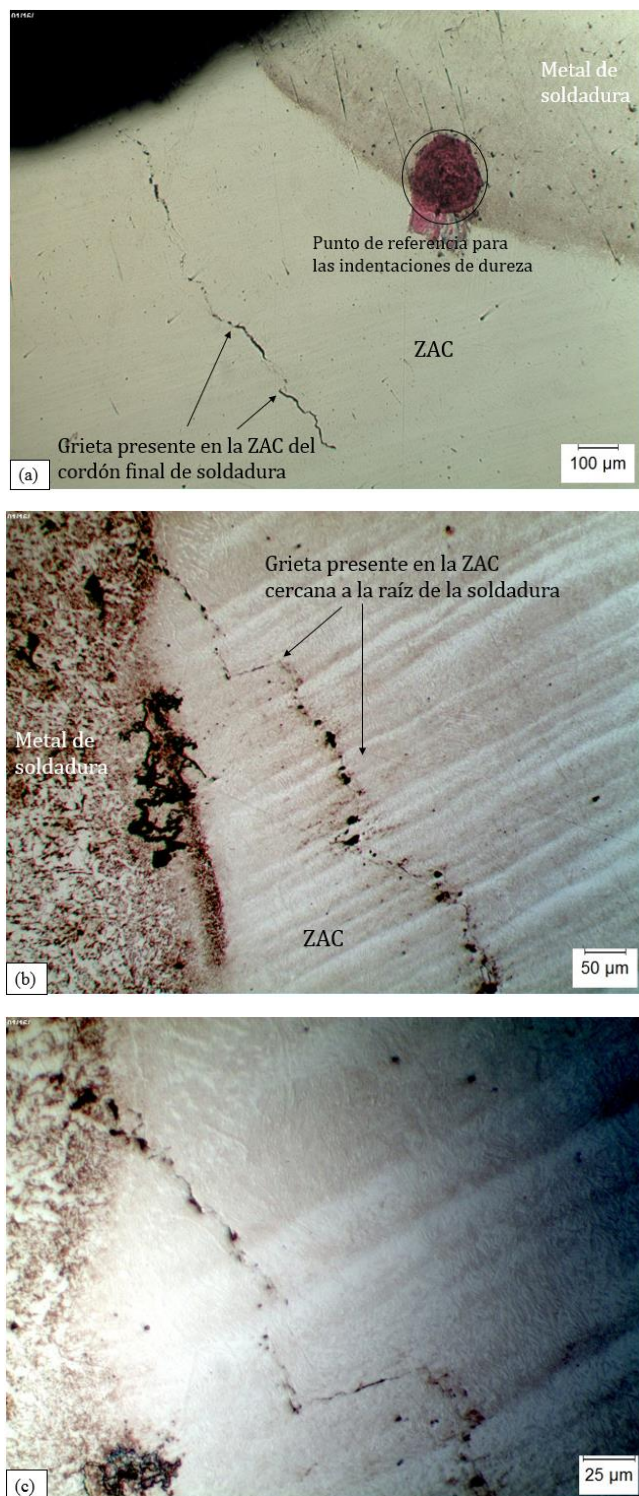


Figura 62. Fisuras en la ZAC de la tercera reparación. (a) Martensita presente en la ZAC, existencia de una fisura generada en la ZAC superior. 100x (b) Microestructura Martensita, presente en la ZAC de la raíz, existencia de una fisura generada en la ZAC inferior. 200x (c) Forma de la propagación de la fisura generada en la ZAC inferior. 200x

En la Figura 62 (a), se puede observar la presencia de una grieta en la ZAC asociada a la capa del cordón, esta grieta es el resultado de la soldadura de reparación, puesto que la ranura de la tercera reparación se llevó a cabo en una parte del metal de aporte y parte de la ZAC inicial, al aplicar el proceso de soldadura de reparación, el ensamble sufre una acumulación de esfuerzos inducidos debido al gradiente térmico que recibe la ZAC inicial durante las reparaciones y combinado con la presencia de una matriz martensítica es fácilmente obtener zonas frágiles, esta grieta al propagarse podrá causar un fallo frágil.

En la Figura 62 (b), (c), se puede observar la presencia de una grieta que se va desarrollando en forma transversal a los granos de martensita (Agujas finas orientadas paralelamente en bloques), estas agujas finas poseen un tamaño de alrededor de 25um a 30um. La aparición de la grieta en la ZAC de la raíz, se debe a que la ZAC posee en su mayoría una estructura conformada por martensita con características mencionadas anteriormente en los análisis de los ensambles con distintas reparaciones.

5.4. Análisis de los valores del ensayo de microdureza realizado en los ensambles soldados

a) Perfiles de dureza promedio de las probetas DZ1JP - DZ1R1 - DZ1R2 - DZ1R3

Las zonas donde se llevaron a cabo las indentaciones se detallan a continuación:

- El metal de soldadura (MS),
- La zona de transición (ZT),
- La zona afectada por el calor (ZAC),
- La zona de transición cercana al metal base (ZTMB) y en
- El metal base (MB).

En el ensayo se realizaron 3 indentaciones en cada punto de la sección transversal de la unión soldada, la indentaciones se realizaron cada 1 mm de distancia tomando como punto de origen la indentación realizada en el metal de soldadura.



Figura 63. Zonas de las probetas donde se realizaron las indentaciones, para la determinación del perfil transversal de microdureza HV

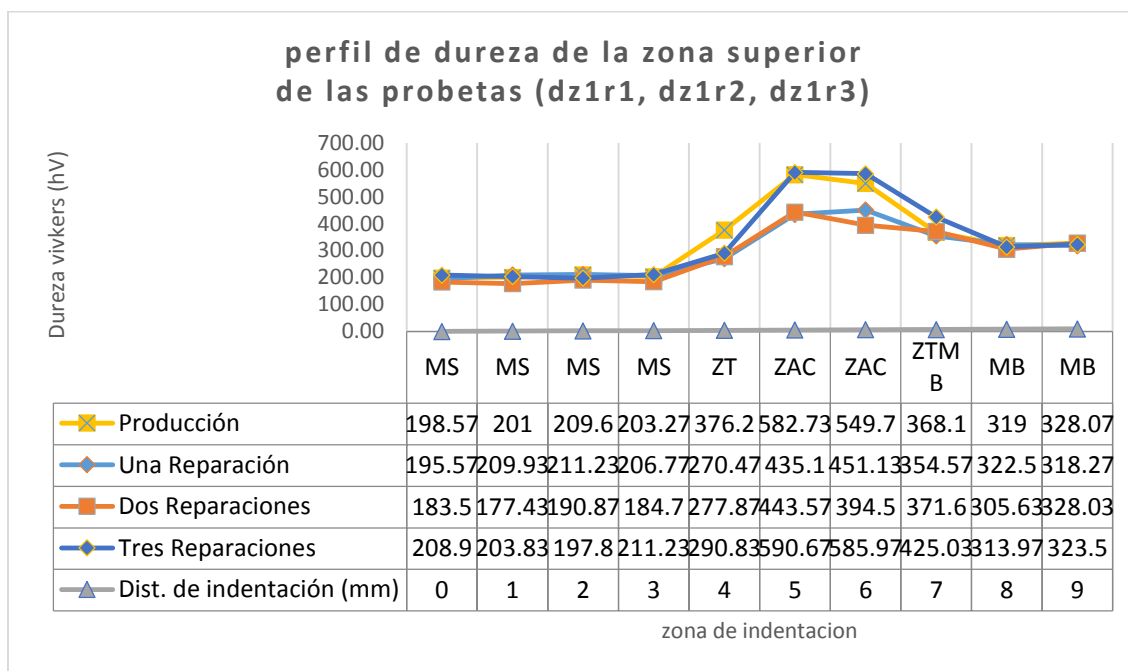


Figura 64. Perfil transversal de microdureza HV de las probetas DZJP - DZ1R1- DZ1R2 - DZ1R3, obtenidos en la zona superior de la ZAC

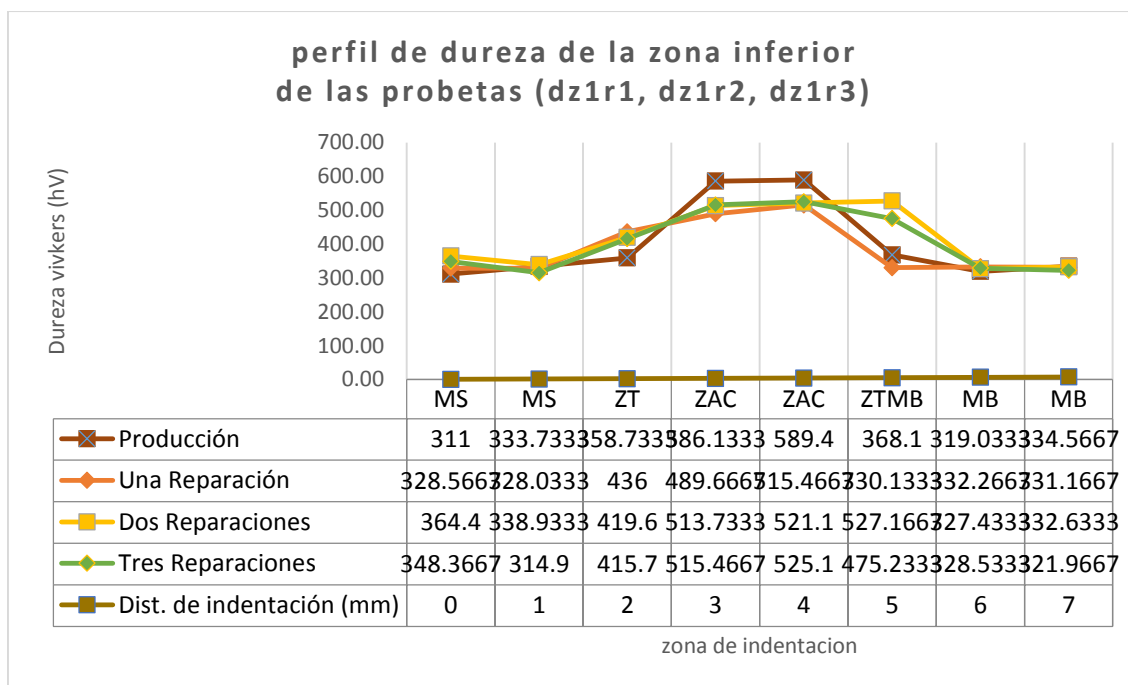


Figura 65. Perfil transversal de microdureza HV de las probetas DZJP - DZ1R1 - DZ1R2 - DZ1R3, obtenidos en la zona inferior de la ZAC

b) Perfiles de dureza promedio de las probetas DZ1JP – DZ2R1 – DZ2R2 – DZ2R3

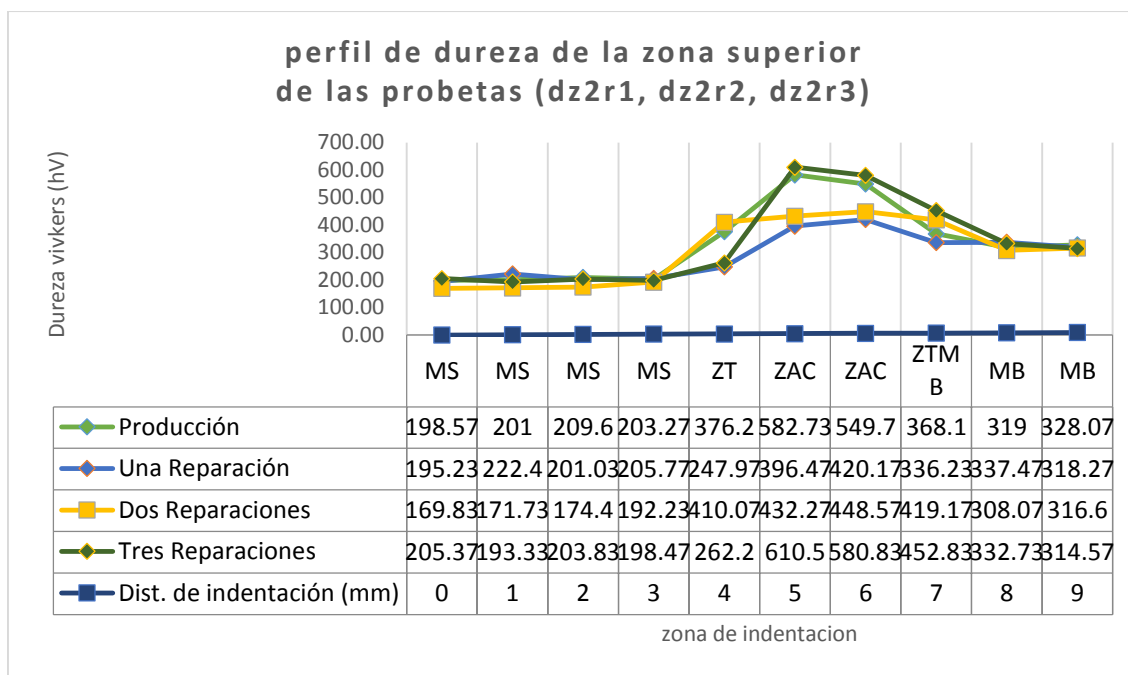


Figura 66. Perfil transversal de microdureza HV de las probetas DZJP - DZ2R1 - DZ2R2 - DZ2R3, obtenidos en la zona superior de la ZAC

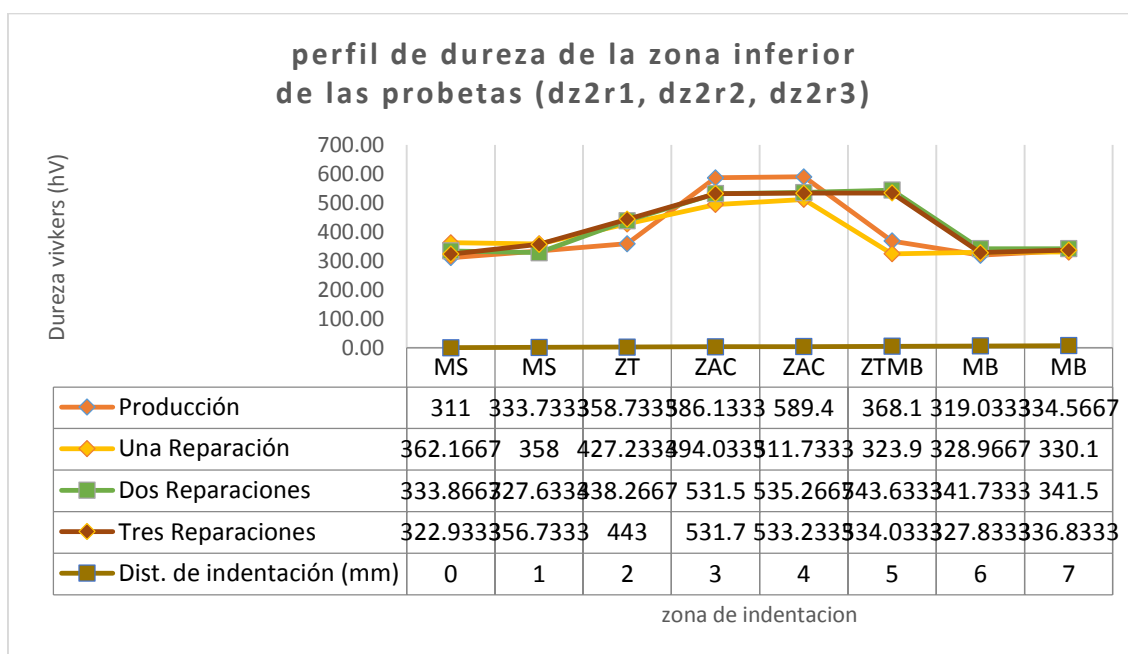


Figura 67. Perfil transversal de microdureza HV de las probetas DZJP - DZ2R1 - DZ2R2 - DZ2R3, obtenidos en la zona inferior de la ZAC

c) Análisis de resultados del perfil de dureza de las probetas

Los valores de microdureza Vickers (HV) obtenidos en el sentido transversal son mayores en la ZAC, los mismos que son usuales en el proceso de soldeo de este tipo de aceros, presentando los menores valores de dureza en el metal de soldadura depositado, además se presentan valores de dureza sin mayor variación en el material base, que comparados con la dureza inicial de (250HB a 310HB o 265HV-325 HV) del acero AISI 4140 cuando es provisto por el fabricante.

Los valores de microdureza Vickers (HV) presentes en la ZAC, son típicos en microestructuras martensíticas, confirmando una vez más ese cambio microestructural importante obtenido en el análisis metalográfico previamente realizado.

Tabla 17.

Valores de dureza promedio de la ZAC de la zona superior

Zona de indentación	Valores de dureza promedio de las probetas						
	DZ1JP	DZ1R1	DZ2R1	DZ1R2	DZ1R2	DZ1R3	DZ2R3
ZAC – SUP	528.73	435.10	396.47	443.57	432.27	590.67	610.50
ZAC – SUP	549.70	451.13	420.17	394.50	448.57	585.97	580.83

Tabla 18.

Resultados de la diferencia de porcentaje de los valores de dureza promedio de la ZAC de la zona superior

Zona	Variación porcentual entre probetas					
	DZ1R1	DZ2R1	DZ1R2	DZ2R2	DZ1R3	DZ2R3
	DZJP	DZJP	DZJP	DZJP	DZJP	DZJP
ZAC - SUP	25.33 %	31.96 %	23.88 %	25.82 %	1.36 %	4.76 %
ZAC - SUP	21.85 %	23.56 %	28.23 %	18.40 %	6.60 %	5.66 %
Promedio	23.59 %	27.76 %	26.06 %	22.11 %	3.98 %	5.21 %
Promedio Total	- 25.68 %		- 24.09 %		4.60 %	

Los valores de dureza de la ZAC de la zona superior disminuyeron en los ensambles con una y dos reparaciones en valores porcentuales promedios de 25,68% y 24,09% respectivamente, sin embargo en el ensamble con tres reparaciones estos valores de dureza aumentaron en un 4,60%, debido a que la tercera ranura de reparación fue realizada entre el metal base y el metal de soldadura que fue previamente depositado mediante proceso GMAW, pero al realizar esta reparación se genera una ZAC superior nueva en toda la longitud de la zona donde fue realizada dicha reparación.

Tabla 19.

Valores de dureza promedio de la ZAC de la zona inferior

Zona de indentación	Valores de dureza promedio de las probetas						
	DZ1JP	DZ1R1	DZ2R1	DZ1R2	DZ1R2	DZ1R3	DZ2R3
ZAC – INF	586.13	489.67	494.03	513.73	531.5	515.47	531.70
ZAC – INF	589.40	515.47	511.73	521.10	535.27	525.10	533.23

Tabla 20.

Resultados de la diferencia de porcentaje de los valores de dureza promedio de la ZAC de la zona inferior

Zona	Variación porcentual entre probetas					
	DZ1R1	DZ2R1	DZ1R2	DZ2R2	DZ1R3	DZ2R3
	DZJP	DZJP	DZJP	DZJP	DZJP	DZJP
ZAC - INF	16.46 %	15.71 %	12.35 %	9.32 %	12.06 %	9.29 %
ZAC - INF	12.54 %	13.18 %	11.59 %	9.18 %	10.91 %	9.53 %
Promedio	14.50 %	14.45 %	11.97 %	9.25 %	11.48 %	9.41 %
Promedio Total	- 14.48 %		- 10.61 %		- 10.45 %	

Los valores de dureza de la ZAC de la zona inferior disminuyeron en los ensambles con una reparación, dos reparaciones y tres reparaciones un 14,48%, 10,61% y 10,45% respectivamente, esta disminución se sustenta en que cada junta de soldadura se ha conformado por multipasadas,

las mismas que generan un proceso de revenido reduciendo el tamaño de grano de martensita, que además permite que se lleve a cabo un alivio de tensiones acumulados en la ZAC, debido a los procesos sucesivos de reparación que sufren los ensambles.

La transformación martensítica da como resultado un endurecimiento del acero. La extensión de la transformación martensítica depende de la temperatura, y solo ocurre dentro de un rango de temperatura definido por la temperatura de inicio de martensita (M_s) y de acabado de martensita (M_f).

Los mayores valores de dureza obtenidos, dependieron en gran manera a la velocidad de enfriamiento que sufre el ensamble después de los procesos de producción y de reparación, la cual se vio afectada por estas características específicas con las que conto la elaboración de los ensambles soldados, las cuales fueron:

- Temperatura de precalentamiento de 100°C .
- Un espesor de 40mm.
- Presencia de carbono medio en el metal base
- Menores Gradientes térmicos aportados durante el proceso de reparación mediante el proceso SMAW.
- Ausencia de un tratamiento de post-calentamiento, posterior a los procesos de producción y de reparación.

5.5. Análisis de los valores del ensayo de doblado realizado en los ensambles soldados

a) Probetas de doblado del ensamble con una primera reparación



Figura 68. Probetas dobladas del ensamble con una reparación

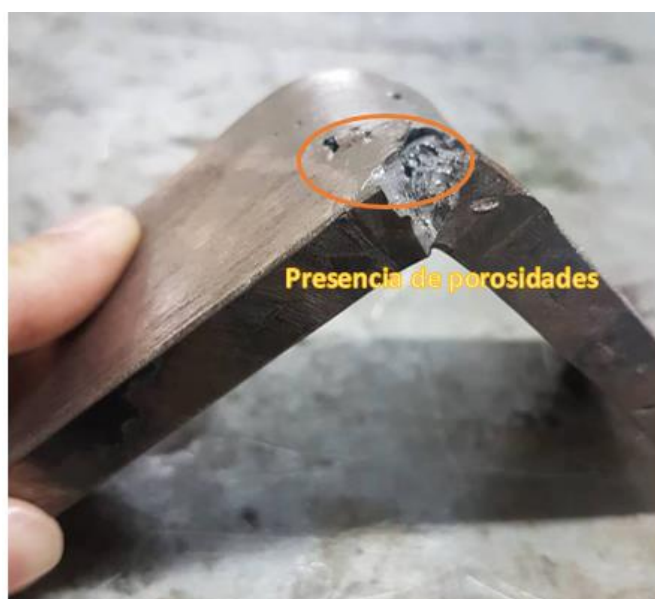


Figura 69. Presencia de porosidades en las probetas de doblado del ensamble con una reparación

b) Probetas de doblado del ensamble con dos reparaciones



Figura 70. Probetas dobladas del ensamble con dos reparaciones



Figura 71. Defectos en las probetas de doblado del ensamble con dos reparaciones. (a) Iniciación de la falla de la probeta de doblado del ensamble con dos reparaciones, debido a la presencia de grietas en la raíz. (b) Porosidades presentes en la parte baja de la probeta de doblado del ensamble de dos reparaciones

c) **Probetas de doblado del ensamble con tres reparaciones**



Figura 72. Probetas dobladas del ensamble con tres reparaciones



Figura 73. Iniciación de la falla de la probeta de doblado del ensamble con tres reparaciones, debido a la presencia de una grieta en la raíz

d) Análisis del ensayo de doblado

Como se puede observar en todas las probetas de los ensambles de reparación existe la presencia de discontinuidades del tipo volumétrico y una forma de doblado tipo en V en donde se puede observar la forma de fracturación de las probetas debido a una ductilidad muy baja. La iniciación de estas fallas se llevó a cabo en la raíz de la soldadura de los ensambles, en las zonas comprendidas entre el metal de soldadura depositado y la ZAC, estas fallas continuaron desarrollándose a los lados de la soldadura en dirección paralela a la ZAC.

Las discontinuidades presentes en las probetas, si se hubieran dado en un material con características de dúctil, al momento de realizar la deformación de la probeta, estas podrían adquirir una forma alargada, permitiendo que la deformación dúctil de la probeta se pueda llevar a cabo sin ningún inconveniente.

Se pudo evidenciar la presencia de grietas en las probetas de los ensambles con dos y tres reparaciones, las cuales se encontraban presentes en la ZAC de la raíz, que es la zona opuesta a las ranuras de reparación; ya que aquí es donde existe una elevada dureza y una facilidad para el agrietamiento según los resultados encontrados en los ensayos de dureza y análisis metalográficos realizados, permitiendo que se pueda afirmar que el borde inferior de estos ensambles representan zonas críticas de falla.

5.6. Análisis de los valores de tenacidad a través del ensayo Charpy realizados en los ensambles soldados

Los resultados obtenidos de los ensayos de impacto están resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 21.

Valores de energía absorbida de impacto obtenidos en el ensayo Charpy

Número de pruebas	1era Reparación	2da Reparación	3era Reparación
	Energía Absorbida (J)	Energía Absorbida (J)	Energía Absorbida (J)
Probeta 1	25,50	21,57	50,99
Probeta 2	54,92	33,34	47,07
Probeta 3	35,30	21,57	25,50
Promedio	38,57	25,50	41,18

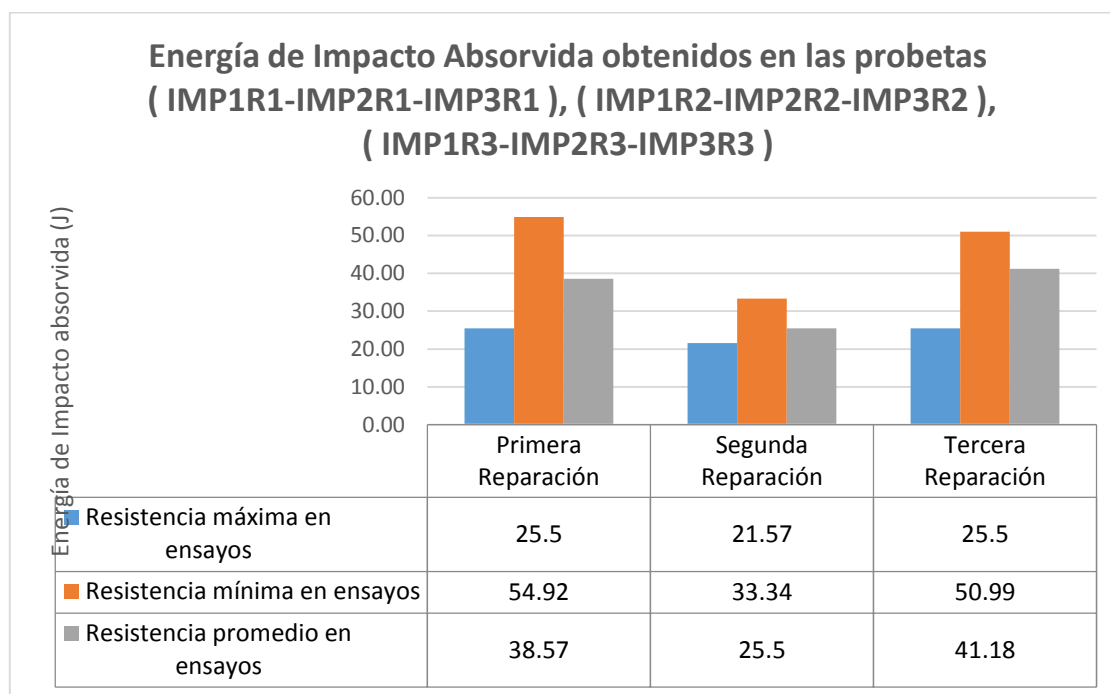


Figura 74. Comportamiento de la Energía de impacto absorbida (J) en las juntas de reparación

En el ensayo de impacto se presentaron valores de absorción de energía de impacto mayores a 27J en algunas probetas, demostrando que poseen tenacidad, lo cual está en contraposición con los resultados obtenidos en los demás ensayos; y esto se debe a que al momento de la realización de

las probetas no existió un control adecuado de las dimensiones superficiales durante el proceso de maquinado. Lo que influyó en el aumento del entalle de la muesca en V de las probetas en un 20%, en comparación a las tolerancias que especifica el código usado.

Las probetas del ensamble con una reparación y tres reparaciones respectivas presentan los mayores valores de tenacidad. Sin embargo, las probetas del ensamble con dos reparaciones presentan la menor tenacidad, debido a la fragilidad (fragilidad de la martensita o la fragilidad del temple), la cual se suscita en el proceso de reparación dado el enfriamiento rápido que sufre el ensamble después de aplicarse el proceso de reparación.



Figura 75. Falla frágil presente en las probetas de impacto de las distintas reparaciones realizadas

La forma de ruptura de las probetas presenta una forma del tipo frágil, esta depende de los valores de energía obtenidos. Las características de ruptura tipo frágil de las probetas se producen a lo largo de planos cristalográficos característicos, llamados planos de fractura y se debieron a las propagaciones de grietas y micro-grietas, ya que al presentar la martensita una capacidad de deformarse plásticamente, menor es la tenacidad y mayor es la fracción de energía absorbida asociada con el inicio de la fisura.

CAPÍTULO VI ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1. Costos Directos

6.1.1. Costos de consumibles y material base

Para el cálculo del material necesario para llenar la junta, es necesario la determinación de su volumen a depositar, para el cual se determina el área de la forma geométrica de la sección transversal de dicha junta, la cual se multiplicará por la longitud total del cordón.

a) Masa de material a utilizar en la junta de producción.

Para la elaboración de los ensambles soldados se utilizaron chapas metálicas de acero AISI 4140 con las siguientes características:

Tabla 22.

Cantidad y dimensiones de las juntas de soldadura a desarrollar

Tipo de junta	Material	Cantidad	Dimensiones
Producción	AISI SAE 4140	2	350x75x40 [mm]
Primera reparación	AISI SAE 4140	2	200x75x40 [mm]
Segunda reparación	AISI SAE 4140	2	200x75x40 [mm]
Tercera reparación	AISI SAE 4140	2	200x75x40 [mm]

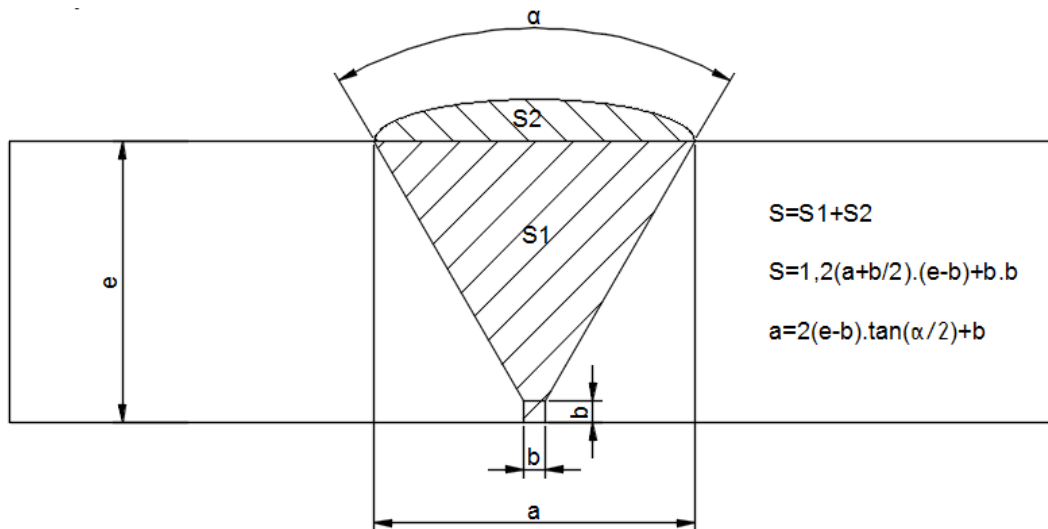
$$v = 6 * (200 \times 75 \times 40) \text{mm}^3 + (350 \times 75 \times 40) \text{mm}^3$$

$$v = 4,65 \times 10^6 \text{mm}^3 = 4,65 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

$$M_{mat} = v * \rho$$

$$M_d = (4,65 \times 10^{-3} \text{m}^3) * \left(7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 36,50 \text{kg}$$

b) *Masa de consumible a utilizar en la junta de producción.*



$$a = 2(40 - 3) * \tan\left(\frac{60}{2}\right) + 3 = 45,72mm$$

$$S = 1,2\left(\frac{45,72 + 3}{2}\right) * (40 - 3) + (3 * 3) = 1090,58mm^2$$

$$V_{ma} = S * L = (1090,58) * (800) = 872464mm^3 = 8,7246 \times 10^{-4}m^3$$

$$M_d = V_{ma} * \rho$$

$$M_d = (8,7246 \times 10^{-4}m^3) * \left(7850 \frac{kg}{m^3}\right) = 6,85kg$$

c) *Costo del electrodo.*

$$Costoelectrodo = \frac{Pmd \left(\frac{Kg}{ml}\right) \times Valorelectrodo \left(\frac{\$}{Kg}\right)}{Eficienciadeposicion(\%)}$$

$$Costoelectrodo = \frac{6,85 \left(\frac{Kg}{ml}\right) \times 2,20 \left(\frac{\$}{Kg}\right)}{0,93} = \$16,20 \approx \$17,00$$

Tabla 23.
Costos del Material Base y Consumibles de Soldadura

Ítem	Descripción	Cant.	P. Unit.	P. Total
1	Placa de acero AISI 4140	40 kg	7.5	300.00
2	ER70S-6 - Ø1.2	15 Kg	2.21	37.791
3	E7018-G - 1/8	5 Kg	2.38	13.566
4	E7018-G - 5/32	5 Kg	2.38	13.566
5	Mezcla AGA Mix 20	6 m ³	100.0	100.00
TOTAL				\$ 464.91

6.1.2. Costos de Mano de Obra

Los costos referidos a la mano de obra requeridos para desarrollar un trabajo de soldadura, se encuentra en función del tiempo necesario para ejecutarlo, del factor de operación respectivo de cada proceso de soldadura a ejecutar, del costo por unidad de la mano de obra.

Tabla 24.
Costos de mano de obra

Item	Cantidad	Costo
Inspector	2 días	240
Soldador	2 días	180
Ayudante del soldador	2 días	100
TOTAL		\$ 520

Como se trata de WPS que se utilizan en los procesos de producción y reparación de tubería de alta presión y distribuidores de centrales eléctricas, es necesario el uso de un soldador calificado, los soldadores cobran alrededor de 90 dólares el día de trabajo, además siempre deben de estar acompañados de un ayudante que les provea de lo necesario y haga la limpieza de la escoria después de cada pase.

6.1.3. Costos de Fabricación de las Probetas

Para los costos de fabricación de las probetas se toman en cuenta los valores referenciales de empresas que realizan trabajos en piezas mecánicas en lo que se refiere a cada uno de las distintas formas a obtener para los ensayos.

Tabla 25.

Costos de fabricación de las distintas probetas

Ítem	Descripción	Cant.	P. Unit.	P. Total
1	Cortado de probetas para Doblado	12	4.0	48.00
2	Cortado de probetas para Metalografía y dureza	8	5.0	40.00
3	Cortado de probetas para Charpy	9	6.0	54.00
4	Fresado de probetas para Charpy	9	10.0	90.00
TOTAL				\$ 232.00

6.1.4. Costos de los Ensayos

Cada de uno de los ensayos fueron realizados en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, en los laboratorios de: Mecánica de Materiales, Ciencia de Materiales y Biotecnología, cuyos valores están detallados a continuación.

Tabla 26.

Costos de los disitintos ensayos

Ítem	Descripción	Cant.	P. Unit.	P. Total
1	Ensayo de doblado lateral	12	5.0	60.00
2	Ensayo de Impacto	9	10.0	90.00
3	Ensayo de Microdureza	8×18×3	2.0	864.00
4	Metalografías	8	10.0	80.00
TOTAL				\$ 1094.00

6.1.5. Costos de Electricidad

El costo de energía eléctrica se encuentra en función de la potencia eléctrica media (Kw) desprendida durante el proceso de soldadura, del tiempo de abertura del arco, la eficiencia eléctrica del equipo de soldadura, la cual gira en torno del 80% y del valor de la energía eléctrica a nivel industrial (\$/Kwh).

Para poder determinar los costos diarios de funcionamiento durante la soldadura. Se debe tomar la potencia de entrada que posee cada soldadora y multiplicar por las horas que la fuente de corriente está activa, obtenido este total lo multiplicamos por el precio del Kwh de energía eléctrica.

El precio oficial de la energía en el Ecuador, se mantiene en un costo de 9.33 ctvs por cada Kwh.

Tabla 27.
Costos de electricidad

Item	Cantidad	Costo
Amoladora	2.5 Kwh	0.23
Soldadora Miller 250	48.6 Kwh	4.52
Soldadora Miller 300	78.0 Kwh	7.27
Termo secador de electrodos	3.0 Kwh	0.27
Lámparas	0.1 Kwh	0.009
TOTAL		\$ 12.29

6.2. Costo total de la inversión para el desarrollo del proyecto**Tabla 28.***Costos totales para el desarrollo de proyecto*

Item	Valor
Costo del material base y consumibles	464.91
Costo de la electricidad	12.29
Costo de mano de obra	520
Costo de fabricación de probetas	232
Costos de ensayos	1094
Costo de capacitación y asesoría	1000
Costo de la intervención del investigador	1200
TOTAL	\$ 4523.2

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones:

- La ejecución de los 4 ensambles se los llevo a cabo conforme lo establecido en procedimientos de soldadura confidenciales, que se utilizan en la fabricación de tubería de alta presión para centrales hidroeléctricas, tanto para las etapas de fabricación como de reparación.
- Se verificó con los distintos ensayos mecánicos y metalográficos que: Se generó martensita en todos los ensambles con valores de dureza de hasta 610.5 HV en la ZAC; existe una falta de ductilidad causada por una expansión y contracción térmica desigual en los ensambles causando fallas del tipo frágil en las probetas de doblado e impacto; aparecieron grietas en la zona superior e inferior de la ZAC de los ensambles.
- La formación de martensita en la ZAC, se debe a que el ciclo térmico de la soldadura de producción, hace que se lleve a cabo un proceso de temple, por lo cual se genera una estructura martensítica en la ZAC de la unión soldada. Esta transformación martensítica se genera por la presencia de un carbono equivalente de 0.52 y un espesor grueso de chapa que permite que se produzca un enfriamiento rápido de los ensambles.
- En los ensambles con una y dos reparaciones, se verificó que este proceso de reparación generó un revenido sobre la zona afectada térmicamente por la soldadura de producción, produciéndose una disminución de dureza. Los valores de dureza de la ZAC superior disminuyeron un 25%, respecto a la dureza presentada en la ZAC del ensamble de producción.

- En el ensamble con tres reparaciones se verificó que aumento la dureza de la ZAC superior en un 4.60% respecto a la del ensamble de producción, probablemente por la ranura de reparación se ubicó en la ZAC inicial asociada a la capa del cordón, generando otro proceso de enfriamiento rápido, lo que da como consecuencia el aumento de la dureza.
- Los distintos ensayos mecánicos y metalográficos aplicados bajo el Código ASME BPVC Sección IX y normas ASTM, permitieron constatar el apareamiento de grietas en la ZAC de la raíz de los ensambles con dos y tres reparaciones, debido a la acumulación de esfuerzos en los bordes del extremo contrario a la zona donde se realizó la reparación. Los detalles de los resultados obtenidos se los puede encontrar a mayor detalle en el Capítulo V de esta investigación.
- Los resultados del Ensayo Charpy muestran que la ZAC de los ensambles reparados, poseen tenacidad, lo cual está en contraposición en los resultados obtenidos en los ensayos de doblado guiado, microdureza y análisis metalográfico. Esta variación se debe a que el entalle de la muesca en V de las probetas fue mayor en un 20% comparada con los valores que establece el estándar aplicado. Por lo tanto, los valores obtenidos en este ensayo no representan ninguna validez y no se los puede tomar como información real.
- Debido a las reparaciones sucesivas realizadas en los ensambles, la ZAC presenta una mayor tendencia al agrietamiento conforme aumenta el número de reparaciones; por lo tanto, será necesario limitar el número de reparaciones a un máximo de una reparación, sin embargo, se debe realizar una investigación más a detalle del tratamiento térmico de pre-soldadura y post-soldadura.

7.2. Recomendaciones:

- Si se aplican este tipo de procedimientos de reparación en aceros con un porcentaje de carbono equivalente del 0.52 o mayores. Se recomienda realizar una investigación más a detalle sobre el tratamiento térmico presoldadura y postsoldadura que se pueden realizar en etapas de producción y reparación, para disminuir la probabilidad del agrietamiento causado por la acumulación de esfuerzos debido a la soldadura.
- Se recomienda que para futuras investigaciones se deben utilizar materiales base y materiales de aporte certificados, ya que los resultados obtenidos son muy susceptibles a la calidad de los materiales. Así también se debe contar con soldadores calificados que posean experiencia y habilidad en cuanto al manejo de los equipos de soldadura con los que cuenta la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Se recomienda para futuras investigaciones, la ejecución de un proceso intenso de verificación de probetas que permita asegurar las tolerancias dimensionales de las mismas, principalmente de las probetas para ensayo Charpy mediante un control metrológico. Los equipos que se pueden usar para este fin son: Microscopio de herramientas, proyector de perfiles, estereomicroscopio.
- Realizar un análisis de Fractografía en las probetas que fueron sometidas al ensayo de doblado, para generar un mayor conocimiento sobre la generación de grietas y sus mecanismos de propagación en ensambles soldados.
- Realizar ensayos basados en la medición de la apertura de la punta de entalla como el CTOD para revelar los efectos de: la composición química del material, procesos termomecánicos y relevo térmico de esfuerzos residuales, que influyen en la tenacidad de fractura de un material.

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Handbook. (1993). *Welding Brazing and Soldering* (Vol. 6). United States of America: ASM International.
- ASM Handbook. (2004). *Metallography and Microstructures* (Vol. 9). (G. F. Voort., Ed.) United States of America: ASM International.
- ASME Boiler and Pressure Vessel. (2013). *Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators* (2013 ed.). New York, State United of America: ASME.
- Bilous, P., & Lagoda, T. (2009, Diciembre). Structural notch effect in steel welded joints. *Materials and Design*, 4562-4564. doi:10.1016/j.matdes.2009.04.022
- Chuquin Vasco, J. P., & Fonseca Amaya, H. M. (2011). *Determinación del número de reparaciones sucesivas de juntas soldadas para tubería de procesos en aceros SA A-106*. Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito. Retrieved Abril 5, 2018, from <http://bibdigital.epn.edu.ec>
- Fosca Pastor, C. (2003). *Introducción a la metalurgia de la soldadura* (Cuarta ed.). (P. S. Mecánica., Ed.) Lima, Perú.
- Giachino, J. W., & Weeks, W. (2007). *Técnica y práctica de la soldadura*. Editorial Reverté.
- Gómez Mendoza, F. (2016). *Influencia de la entrada de calor en las características mecánicas y micro-estructurales finales de la zona por el calor (ZAC) en uniones soldadas en tubería para transporte de hidrocarburos*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co>
- GUPTE, S. V. (n.d.). *Inspection and Welding Repairs of Pressure Vessels*. India. Retrieved from www.ndt.net
- Jeffus, L., & Bower, L. (2010). *WELDING Skills, Processes and Practices for Entry-Level Welders* (First ed.). DelMar Cengage Learning.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (Cuarta ed.). México, México: Pearson Educación.

- Klenk, A., Issler, S., Shibli, A., & Williams, A. (2003, Abril). *Some Characteristics of Weld Repair for Creep Applications*. Retrieved Diciembre 7, 2018, from Metserve International: www.metserve.co.za
- Lancaster, J. (1992). *Handbook of structural welding*. Abington Hall, England: Abintong Publishing Ltd.
- Lancaster, J. (1999). *Metallurgy of Welding* (Sixth ed.). Abington Hall, England: Abington Publishing Ltd.
- Messler, R. W. (2004). *Principles of Welding*. Wiley-VCH.
- Minnick, W. H., & Prosser, M. A. (2013). *Gas tungsten Arc Welding Handbook* (Sixth ed.). The Goodheart-Willcox Company, Inc.
- Morales Domínguez, J. A. (2014). *Diseño de un procedimiento de soldadura sin post-calentamiento para el acero AISI 4130 bajo la norma API 6A y norma ASME Sección 9*. Tesis pregrado, ESPE-Universidad de las Fuerzas Armadas, Ciencias de la Energía y Mecánica.
- Mutton, P. J. (1988). *Abrasion resistant materials for the Australian minerals industry*. Melbourne: AMIRA.
- Pikula, J., Lomozik, M., & Pfeifer, T. (2017). The influence of manual metal arc multiple repair welding of long operated waterwall on the structure and hardness pf the heat affected zone of welded joints. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(1), 327-333. doi:10.1515/amm-2017-0049
- UMSS. (n.d.). Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología, Cochabamba. Retrieved from <http://www.umss.edu.bo>