



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO DE ALTA ALEACIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA SMAW CON DIFERENTE MATERIAL DE APORTE.

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

CAIPE CISNEROS JOSÉ HUGO

jose.caipe@epn.edu.ec

DIRECTOR: SOTOMAYOR GRIJALVA MARÍA VERÓNICA

veronica.sotomayor@epn.edu.ec

COLABORADOR: VELASTEGUÍ BALDA GABRIEL EDMUNDO

gabriel.velastegui@epn.edu.ec

Quito, febrero 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **José Hugo Caipe Cisneros**, bajo nuestra supervisión.

Ing. Verónica Sotomayor, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Gabriel Velasteguí, M.Sc.

COLABORADOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

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

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

José Hugo Caipe Cisneros

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios ser supremo que nos da la vida y salud todos los días, a una persona muy especial para mí y que lamentablemente no le alcanzó el tiempo para compartir junto a toda su familia esta etapa de mi vida, esto es para ti “**Papá**”, me hubiese dado que felicidad de tenerte entre nosotros, pero Dios tenía otros planes, desde donde te encuentres gracias por cuidarme y protegerme siempre, te quiere con todo su corazón, tu hijo Hugo.

A mi querida madre “**Eloísa Cisneros**”, quien con su tiempo y dedicación siempre me ha apoyado incondicionalmente para seguir adelante, a mi esposa e hijo “**Sandra Chalapud y Gabriel Caibe**”, quienes me han apoyado en todo para culminar esta meta, y así poder estar juntos en familia.

A mis hermanas, hermanos, sobrinas, sobrinos, cuñadas y cuñados quienes siempre me apoyado con sus consejos y están pendientes de mí en todo momento.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por haberme dado la salud, la vida y fuerza necesaria para terminar este trabajo de titulación. Gracias por bendecirme cada día y darme los mejores padres quienes fueron el pilar fundamental durante mi vida y cada día me dieron su amor incondicional.

A mi esposa y mi hijo, por apoyarme y estar a mi lado en los momentos difíciles de mi vida, saben siempre estaremos juntos para compartir lo que Dios tiene preparado para nuestro hogar.

A mis hermano(as) por apoyarme y estar siempre a mi lado como mis mejores amigos. Saben que siempre cuenten con migo y estaré ahí para escucharlos y brindarles mi apoyo incondicional cuando lo requieran.

Agradezco al Ing. Verónica Sotomayor y al Ing. Gabriel Velasteguí, quienes con su conocimiento me guiaron para la realización del presente trabajo. Gracias por la disponibilidad y la comprensión dada.

Agradezco a mis amigos Ing. Geovanny Moreno, Ing. Patricio Fuentes, Ing. Javier Valverde quienes con su conocimiento y experiencia me guiaron para dar solución a inconvenientes encontrados durante la carrera.

Agradezco al Laboratorio de Fundición y a Don Fabián por abrirme las puertas para poder realizar mis pasantías y por toda la ayuda recibida.

A mis amigos Carlos Betancourt y Óscar Yépez con quienes compartimos momentos agradables en la EPN.

CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Aceros anti abrasivos.....	3
1.2. Composición química del acero anti abrasivo grado 400.....	3
1.3. Microestructuras del acero anti abrasivo.....	3
1.4. Principales aleantes de los aceros anti abrasivos.....	5
1.4.1. Manganeso (Mn).....	5
1.4.2. Fósforo (P).....	5
1.4.3. Cromo (Cr).....	5
1.4.4. Azufre (S).....	6
1.4.5. Níquel (Ni).....	6
1.4.6. Molibdeno (Mo).....	6
1.4.7. Boro (B).....	6
1.4.8. Vanadio (V).....	6
1.4.9. Titanio (Ti).....	6
1.5. Características del acero anti abrasivo.....	7
1.5.1. Dureza.....	8
1.5.2. Conformado en frío.....	8
1.5.3. Mecanizado.....	8
1.5.4. Corte térmico.....	8
1.5.5. Soldabilidad de aceros de alta resistencia.....	9
1.6. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW).....	9
1.6.1. Variables principales.....	10
1.6.1.1. Corriente de soldadura.....	10
1.6.1.2. Voltaje generado en el arco.....	10

1.6.1.3.	Velocidad de soldadura	11
1.6.2.	Ventajas y desventajas	12
1.6.3.	Material de aporte para el proceso SMAW.....	12
1.6.3.1.	Nomenclatura del electrodo según la AWS A5.1	13
1.6.3.2.	Características del electrodo (E6010)	14
1.6.3.3.	Características del electrodo (E7018)	14
1.6.3.4.	Nomenclatura del electrodo según la AWS A5.5.....	15
1.6.3.5.	Características y aplicaciones del electrodo (E9018)	15
1.6.3.6.	Características y aplicación del electrodo (E11018).....	16
1.7.	Pre-Calentamiento	17
1.7.1.	Carbono equivalente (CE).....	17
1.7.2.	Temperatura de precalentamiento	18
2.	METODOLOGÍA	19
2.1.	Caracterización del metal base	19
2.1.1.	Ensayo de espectrometría por chispa	19
2.1.2.	Ensayo de tracción	20
2.1.3.	Ensayo de dureza (Rockwell B)	21
2.2.	Corte y preparación de los cupones de prueba	22
2.2.1.	Obtención de las placas.....	22
2.2.2.	Preparación de la junta soldada.....	23
2.3.	Precalentamiento de las placas	23
2.4.	Equipo para soldar placas mediante el proceso SMAW.....	24
2.5.	Procedimiento de soldadura de las placas	25
2.6.	Preparación de las probetas	27
2.6.1.	Codificación de placas	28
2.6.2.	Equipo de corte.....	28
2.7.	Requerimientos de la norma AWS D1.1.....	29
2.8.	Ensayos no destructivos (END)	30
2.8.1.	Inspección Visual	30
2.8.1.1.	Criterios de aceptación	30
2.8.2.	Tintas Penetrantes.....	31
2.8.3.	Radiografías	32
2.8.3.1.	Criterios de aceptación	32
2.8.3.2.	Procedimiento.....	35
2.9.	Ensayos destructivos	37
2.9.1.	Ensayo de tracción en la sección reducida	37

2.9.1.1.	Criterios de aceptación	37
2.9.1.2.	Preparación de las probetas	38
2.9.1.3.	Procedimiento	39
2.9.2.	Ensayo de doblado de cara y raíz	39
2.9.2.1.	Criterios de aceptación	39
2.9.2.2.	Procedimiento del ensayo de doblado	40
2.10.	Metalografías	40
2.10.1.	Micrografía	40
2.10.1.1.	Preparación de la muestra	40
2.10.1.2.	Procedimiento	42
2.10.2.	Macrografía (macroscopía óptica)	43
2.10.2.1.	Criterios de aceptación	43
2.10.2.2.	Procedimiento del ensayo	43
2.11.	Ensayo de barrido dureza superficial	44
2.11.1.	Preparación de las muestras	44
2.11.2.	Procedimiento	44
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1.	Resultados de la caracterización del material base	45
3.1.1.	Ensayo de espectrometría por chispa	45
3.1.2.	Ensayo de dureza del material base	46
3.1.3.	Ensayo de tracción	47
3.1.4.	Resultado del ensayo de micrografías	49
3.2.	Parámetros del proceso de soldadura (SMAW)	49
3.2.1.	Calor entregado durante el proceso	49
3.2.2.	Resultados de las variable de soldadura	50
3.2.2.1.	Resumen del primer pase en cada una de las juntas	50
3.2.2.2.	Resumen del segundo pase en cada una de las juntas	50
3.2.2.3.	Resumen del tercer pase en cada una de las juntas	51
3.3.	Resultado de los ensayos no destructivos	51
3.3.1.	Inspección Visual	52
3.3.2.	Tintas penetrantes	52
3.3.3.	Radiografías	55
3.4.	Resultados de los ensayos destructivos	57
3.4.1.	Ensayo de tracción de las juntas soldadas	57
3.4.2.	Doblado de cara y raíz de la junta soldada	60
3.4.3.	El ensayo de barrido de dureza	65

3.5.	Resultados de micrografía	68
3.5.1.	Resultados de macrografía de las muestras soldadas	73
3.6.	Discusión de resultados	75
3.6.1.	Material base	75
3.6.2.	Temperatura de precalentamiento	75
3.6.3.	Inspección visual y tintas penetrantes.....	76
3.6.4.	Radiografías	76
3.6.5.	Ensayo de tracción de la sección reducida	76
3.6.6.	Ensayo de doblado de cara y raíz.....	77
3.6.7.	Ensayo de dureza	77
3.6.8.	Micrografías	77
3.6.9.	Macrografías.....	77
3.6.10.	Parámetros de soldadura.....	77
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
4.1.	Conclusiones	79
4.2.	Recomendaciones	80
	Referencias Bibliográficas	81
	Anexos	82
	ANEXO I. ENSAYO DE ESPECTROMETRÍA.....	83
	ANEXO II. ENSAYO DE TRACCIÓN MATERIAL BASE	86
	ANEXO III. ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES	88
	ANEXO IV. ENSAYOS DE RADIOGRAFÍAS	92
	ANEXO V. ENSAYO DE TRACCIÓN DE CADA JUNTA.....	96
	ANEXO VI. WPS PLACA 1	101
	ANEXO VII. WPS PLACA 2	102
	ANEXO VIII. WPS PLACA 3	103
	ANEXO IX. WPS PLACA 4	104
	ANEXO X. CATÁLOGO DEL MATERIAL BASE	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Fases del diagrama hierro carbono.....	4
Figura 1.2. Diagrama de transformación isotérmico de austenita.....	4
Figura 1.3. Representación del tipo de martensita que se encuentra en los aceros duros, (a) placas, (b) listones y (c) martensita templada.....	5
Figura 1.4. Aplicación de acero anti abrasivo.....	7
Figura 1.5. Máquina trituradora.....	7
Figura 1.6. Cucharón de excavadora fabricado de acero anti abrasivo.....	8
Figura 1.7. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido.....	9
Figura 1.8. Efectos de amperaje, longitud del arco y la velocidad de soldadura.....	11
Figura 2.1. Probeta con dimensiones para el ensayo de espectrometría.....	19
Figura 2.2. Probetas para ensayo de tracción.....	20
Figura 2.3. Especificaciones para la probeta de material base.....	21
Figura 2.4. Durómetro Brinell LAEV y Especificaciones de la probeta.....	22
Figura 2.5. Proceso de corte del acero anti abrasivo mediante oxicorte.....	22
Figura 2.6. Diseño de la junta soldada.....	23
Figura 2.7. Diagrama de proceso para los ensayos no destructivos (END).....	27
Figura 2.8. Diagrama de proceso de ensayos destructivos.....	27
Figura 2.9. Dimensión de las muestras.....	28
Figura 2.10. Extracción de las probetas según los ensayos.....	29
Figura 2.11. Limpiador o removedor (E -59 A), penetrante visible (VP -30) y revelador (D -70).....	32
Figura 2.12. Criterios de aceptación de discontinuidades para conexiones no tubulares cargadas estáticamente.....	34
Figura 2.13. Discontinuidades presentes en las radiografías dependiendo del espesor de la placa.....	35
Figura 2.14. Especificación de las medidas según el código de la AWS D1.1.....	38
Figura 2.15. Probetas maquinadas y adecuadas para el ensayo.....	38
Figura 2.16. Probeta de ensayo de doblado y mecanizadas.....	39
Figura 2.17. Muestras listas para el ensayo de metalografías.....	42
Figura 2.18. Muestras para el ensayo de barrido de dureza superficial.....	44
Figura 2.19. Representación esquemática de las mediciones de dureza.....	44
Figura 3.1. Dureza del acero anti abrasivo de grado 400.....	46
Figura 3.2. Resistencia a la tracción del acero anti abrasivo grado 400.....	47

Figura 3.3. Diagrama esfuerzo Vs deformación de P1.	48
Figura 3.4. Diagrama esfuerzo Vs deformación de P2.	48
Figura 3.5. Probetas luego del ensayo de tracción.	58
Figura 3.6. Comparación del esfuerzo máximo del material base y las juntas soldada con electrodos de la clase AWS. A5.1.	59
Figura 3.7 Comparación del esfuerzo máximo del material base y las juntas soldada con electrodos de la clase AWS. A5.5.	59
Figura 3.8. Comparación del esfuerzo máximo del material base y las juntas soldada con electrodos de la clase AWS. A5.1/AWS.A5.5.	60
Figura 3.9. Cuadro comparativo de las durezas según la zona estudiada.....	68
Figura 3.10. Macrografía de la muestra P1 (E9018).	73
Figura 3.11. Macrografía de la muestra P2 (E7018).	73
Figura 3.12. Macrografía de la muestra P3 (E6010).	74
Figura 3.13. Macrografía de la muestra P4 (E11018).....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición química (análisis de la colada, % masa).....	3
Tabla 1.2. Se detallan las ventajas y desventajas.....	12
Tabla 1.3. Especificaciones técnicas del electrodo (E6010).....	14
Tabla 1.4. Especificaciones técnicas del electrodo (E7018).....	15
Tabla 1.5. Especificaciones técnicas del electrodo (E9018).....	16
Tabla 1.6. Especificaciones técnicas del electrodo (E11018).....	17
Tabla 1.7. Fórmulas para el cálculo el carbono equivalente químico.	18
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del espectrómetro Bruker Q2-ION.....	20
Tabla 2.2. Máquina de ensayos universal del LAEV.	21
Tabla 2.3. Composición química del material base.	23
Tabla 2.4. Temperatura real de precalentamiento del material base y el carbono equivalente.	24
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del equipo para el proceso SMAW.	25
Tabla 2.6. Variable para el procedimiento de soldadura para la junta P1.....	25
Tabla 2.7. Variable para el procedimiento de soldadura para la junta P2.....	26
Tabla 2.8. Variable para el procedimiento de soldadura para la junta P3.....	26
Tabla 2.9. Variable para el procedimiento de soldadura para la junta P4.....	26
Tabla 2.10. Especificación técnica de la máquina de corte en frío.	28
Tabla 2.11. Cantidad de probetas para los ensayos según norma AWS D1.1.	29
Tabla 2.12. Criterios de aceptación del ensayo de inspección visual.	30
Tabla 2.13. Tipo de tintas penetrantes y método según ASTM E195.....	31
Tabla 2.14. Criterios de aceptación de discontinuidades ensayo radiografías.....	33
Tabla 2.15. Leyendas de la Figura 2. 12.	34
Tabla 2.16. Especificación del tubo de rayos catódicos y el equipo de rayos X (Consola de mando).	35
Tabla 2.17. Parámetros de trabajo para toma de radiografías.	36
Tabla 2.18. Procedimiento de revelado de la película.	36
Tabla 2.19. Nomenclatura de las probetas para los ensayos mecánicos.	37
Tabla 2.20. Criterios de aceptación para ensayo	38
Tabla 2.21. Criterio de aceptación para el ensayo de doblado de cara y raíz según el código AWS D1.1.	39
Tabla 2.22. Especificación técnica de la máquina desbastadora.	41
Tabla 2.23. Especificación técnica de la máquina automática de pulido fino.....	41

Tabla 2 24. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico invertido.....	42
Tabla 2.25. Criterio de aceptación de código de la AWS D1.1 en las macrografías ...	43
Tabla 2.26. Especificaciones técnicas de esteromicroscopio trinocular.....	43
Tabla 3. 1. Comparación de la composición química del material base.	45
Tabla 3. 2. Temperatura promedio de precalentamiento del acero anti abrasivo.	46
Tabla 3. 3. Resultados del ensayo de tracción del material base.....	47
Tabla 3. 4. Resultado del ensayo de micrografía del material base (MB).....	49
Tabla 3. 5. Resultado del primer pase para cada una de la juntas.....	50
Tabla 3. 6. Resultado del segundo pase para cada una de la juntas.	50
Tabla 3. 7. Resultado del tercer pase para cada una de la juntas.....	51
Tabla 3. 8. Resultado del promedio del calor entregado en cada junta.	51
Tabla 3. 9. Resultado de inspección visual de los cuatro cupones.....	52
Tabla 3. 10. Resultados del ensayo de tintas penetrantes.	53
Tabla 3. 11 Resultado del ensayo de tintas penetrantes.....	55
Tabla 3. 12. Discontinuidades detectadas en la inspección radiográfica de las juntas.	56
Tabla 3. 13. Resultados de resistencia obtenido en el ensayo de tracción.....	57
Tabla 3. 14. Resumen de tracción en la sección reducida de 16 probetas.....	58
Tabla 3. 15. Resultados obtenido de la junta soldada P1 (E9018).....	61
Tabla 3. 16. Resultados obtenido de la junta soldada P2 (E7018).....	62
Tabla 3. 17. Resultados obtenido de la junta soldada P3 (E6060).....	63
Tabla 3. 18. Resultados obtenido de la junta soldada P4 (E11018).....	64
Tabla 3. 19. Resúmenes del ensayo de doblado de cara y raíz.	65
Tabla 3. 20. Resultado de barrido de dureza de la muestra P1.....	66
Tabla 3. 21. Resultado de barrido de dureza de la muestra P2.....	66
Tabla 3. 22. Resultado de barrido de dureza de la muestra P3.....	67
Tabla 3. 23. Resultado de barrido de dureza de la muestra P4.....	67
Tabla 3. 24. Resumen de barrido de dureza en las diferentes zonas.....	68
Tabla 3. 25. Análisis de micrografía de la muestra P1.	69
Tabla 3. 26. Análisis de micrografía de la muestra P2.	70
Tabla 3. 27. Análisis de micrografía de la muestra P 3.	71
Tabla 3. 28. Análisis de micrografía de la muestra P4.	72
Tabla 3. 29. Resumen del análisis del ensayo de macrografías.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Denominación
CE	Carbono equivalente
CE_T	Carbono equivalente total
CE_q	Carbono equivalente químico de Saferine
CE_e	Carbono equivalente de espesor
T_p	Temperatura de precalentamiento
MB	Material base
MA	Material de aporte
ZAC	Zona afectada por el calor
T_{pm}	Temperatura de precalentamiento promedio
I	Intensidad de corriente
V	Voltaje
Id.	Identificación
Va	Velocidad de avance
WPS	Especificaciones del procedimiento de Soldadura

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la soldabilidad de aceros de alta resistencia mediante el proceso SMAW usando distintos materiales de aporte. El trabajo se realiza desde el punto de vista estructural y metalúrgico en la etapa experimental considera las siguientes variables: intensidad de corriente, voltaje, velocidad de soldadura, material de aporte y temperatura de precalentamiento, con la finalidad de obtener la mejor junta soldada. Para comprobar la autenticidad del material base, se realizó el análisis químico por espectrometría de emisión atómica de chispa que determina su composición química y el ensayo de tracción en la sección reducida para comprobar su resistencia mecánica.

En las juntas soldadas se realizaron ensayos de inspección visual, no destructivos y mecánicos. Con estos resultados se obtienen las especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS) por sus siglas en inglés, calificado con las variables óptimas para garantizar la calidad del cordón de soldadura según el código AWS D1.1.

Finalmente se realizó un ensayo metalográfico con la finalidad de conocer la microestructura del material base (MB) de zona afectada por el calor (ZAC) y del material de aporte (MA), se considera que para conocer el área afectada por el calor es necesario realizar una macrografía y ensayos de dureza mediante la escala Rockwell B para así determinar la zona de mayor dureza.

Palabras clave: alta resistencia, material de aporte, precalentamiento, SMAW.

ABSTRACT

The present work aims to study the weldability of high strength steels using the SMAW process using different contribution materials. The work is carried out from the structural and metallurgical point of view and the experimental stage considered the following variables: current intensity, voltage, welding speed, input material and preheating temperature, these parameters are determined in order to obtain the best welded joint. In order to validate base material, a chemical analysis by spark emission spectrometry was performed to determine its chemical composition and a tensile test was applied in the reduced section to verify its mechanical resistance. In the welded joints, visual inspection tests, non-destructive tests, mechanical tests were carried out. With these results, the Welding Procedure Specifications (WPS) qualified with the optimal variables and to guarantee the quality of the weld according to the AWS D1.1 standard.

A metallographic test is carried out in order to know the variation of the microstructure in the base material, in the area affected by heat and contribution material, also to know the area affected by heat It is necessary to perform the macrography test, the hardness test using the Rockwell B scale makes it easy to determine the area where it has the greatest hardness.

Keywords: High strength, input material, preheating, SMAW.

ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO DE ALTA ALEACIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA SMAW CON DIFERENTE MATERIAL DE APORTE.

INTRODUCCIÓN

La minería en Ecuador necesita emplear elementos, equipos y máquinas que estarán expuestos al trabajo con materiales pétreos, por lo que se opta por el uso de acero anti abrasivo como una solución, ya que presenta excelentes propiedades de tenacidad, alta dureza (400HB) y resistencia mecánica. Este tipo de aceros es utilizado para fabricar máquinas y herramientas para perforaciones de rocas y extracción de minerales, además de equipos orientados a obras civiles, exploración y explotación de hidrocarburos, cuya función principal es soportar el desgaste producido por la fricción.

Este trabajo plantea el desarrollo experimental del análisis de soldabilidad del acero anti abrasivo como un trabajo alternativo para la fabricación de herramientas para la perforación minera. En el mercado existen diferentes marcas de aceros anti abrasivos entre las más comunes se tiene: hardox 400, relia 400,450, 500 urssa 450 y fora 450.

Es así que, en el desarrollo del proceso de soldadura se consideraron las siguientes variables, la intensidad de corriente, voltaje, el material de aporte y temperatura de precalentamiento, esta última garantiza que las propiedades no varíen por la presencia de deformación, especialmente en la zona afectada térmicamente. La selección de estas variables busca el mejor régimen de soldadura para el proceso SMAW, que garantice que la fabricación de herramienta para la perforación minera sea utilizada con seguridad.

Una vez establecido el régimen de soldadura para cada junta, se efectuaron los ensayos para la validación de la calidad en cada una de ellas basándose en el código AWS D1.1. Los ensayos que se realizaron para la calificación del WPS son: inspección visual, ensayos no destructivos, ensayo de doblado de cara y raíz y ensayo de tracción en la sección reducida, el cual ayudan a evaluar y determinar las propiedades mecánicas del acero anti abrasivo.

Objetivo general

Estudiar la soldabilidad de un acero de alta aleación mediante el proceso de soldadura SMAW con diferente material de aporte.

Objetivos específicos

- Determinar el voltaje, amperaje y velocidad de soldadura óptimos para la unión del acero de alta resistencia mediante el proceso SMAW.
- Determinar la temperatura de pre-calentamiento y post-calentamiento que mejore las propiedades de soldabilidad.
- Analizar propiedades mecánicas y metalúrgicas de la soldadura de acuerdo a los requerimientos de la norma AWS D1.1
- Elaborar un procedimiento de soldadura que cumpla los requerimientos de aplicación para el acero anti abrasivo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aceros anti abrasivos

Los aceros anti abrasivos son materiales útiles y eficientes en industrias como la minería, automotriz, obras civiles, construcción y reciclaje. La presencia de nuevas aleaciones ofrecen materiales con mejores propiedades mecánicas que son usados para fabricar componentes de mayor vida útil, que mejoran la velocidad de trabajo a un menor costo. Los aceros anti abrasivos en su microestructura presentan un mejor balance entre resistencia a la penetración y capacidad de deformación, siendo materiales apropiados para las necesidades de un trabajo severo. (CAYA, 2014).

1.2. Composición química del acero anti abrasivo grado 400

La resistencia a la abrasión está directamente relacionada con la composición química del acero, al existir diferentes combinaciones de aleantes que ayudan a prevenir el desgaste del material. En Tabla 1.1 se muestra la composición química de planchas de aceros anti abrasivos especiales XAR® 400 con espesores de 3 a 100 mm.

Tabla 1.1. Composición química (análisis de la colada, % masa).

Composición química del acero anti abrasivo (%).								
Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	B
%	≤20,00	≤0,80	≤1,50	≤0,02	≤0,07	≤1,00	≤0,05	≤5,00x10 ⁻³

Fuente: (XAR® 400, 2014)

1.3. Microestructuras del acero anti abrasivo

La microestructura del acero anti abrasivo depende del tipo de enfriamiento de la colada, como se observa en la Figura 1.1. De acuerdo a la velocidad de enfriamiento lento, moderado, rápido se obtendrá microestructura perlítica, bainítica y martensítica respectivamente. Por la exigencia mecánicas, que tienen los aceros anti abrasivos requieren una alta resistencia al desgaste, por lo que la martensita se somete a un tratamiento térmico para transformar su microestructura en martensita revenida que es la estructura típica de aceros de alta resistencia.

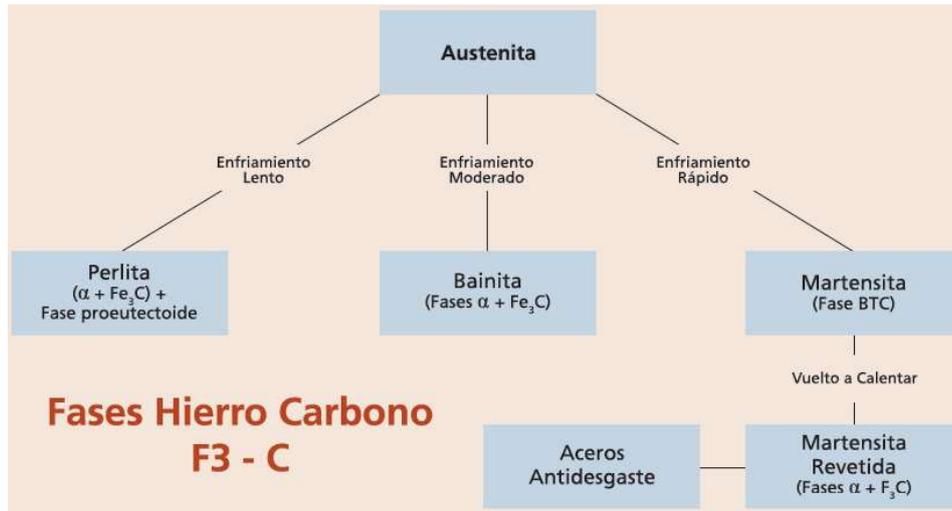


Figura 1.1. Fases del diagrama hierro carbono.

Fuente: (Villar, 2009)

En la Figura 1.2, se presenta el diagrama de transformación isotérmico de la austenita, que ayuda a conocer el procedimiento de transformación en función de sus elementos de aleación.

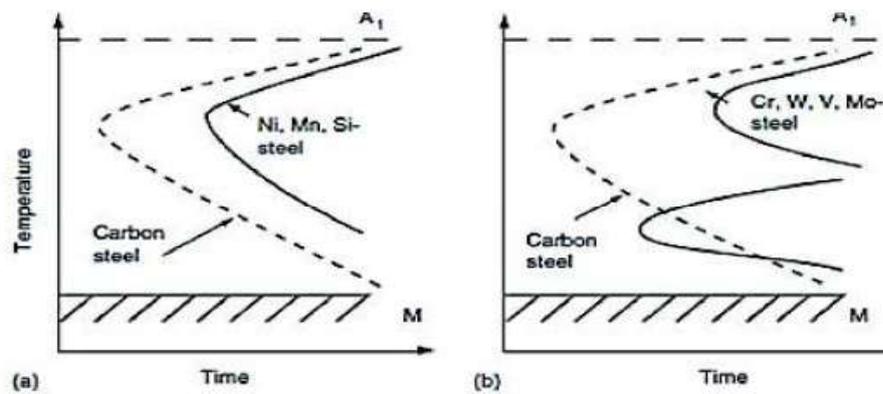


Figura 1.2. Diagrama de transformación isotérmica de austenita.

Fuente: (STEPHANIA, Quito, abril 2019).

En el diagrama Fe-C la presencia de carbono y manganeso hace que la zona de austenita se expanda, provocando la disminución de la temperatura de descomposición de la austenita. Si esta temperatura está cerca de la temperatura de inicio de martensita, se limitará la transformación de fase controlada por difusión necesaria para formar bainita superior. (STEPHANIA, Quito, abril 2019).

La microestructura de los aceros duros es martensita revenida es decir martensita sometida a un tratamiento térmico posterior; la martensita se forma cuando el

enfriamiento es rápido, y es un componente duro debido al carbono que se encuentra atrapado en una solución sólida.

La martensita se puede visualizar de tres maneras: listones, placas en estado puro, martensita templada luego de un tratamiento térmico, como se ilustra en la Figura 1.3.

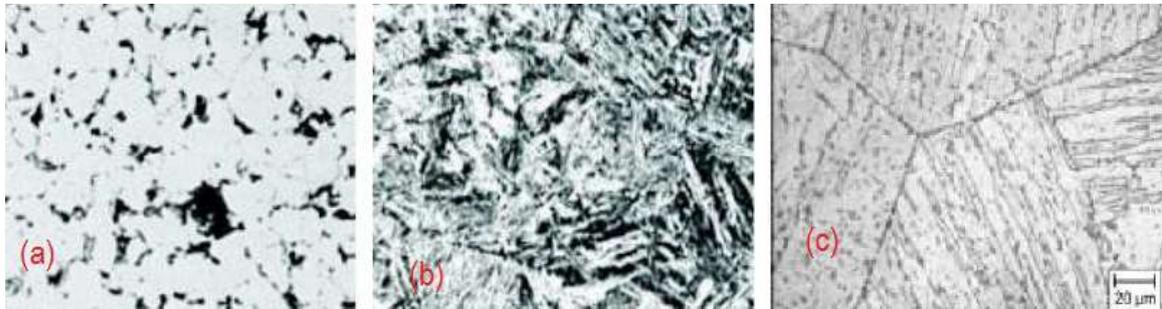


Figura 1.3. Representación del tipo de martensita que se encuentra en los aceros duro, (a) placas, (b) listones y (c) martensita templada.

Fuente: (STEPHANIA, Quito, abril 2019)

1.4. Principales aleantes de los aceros anti abrasivos

1.4.1. Manganeso (Mn)

Este elemento contribuye a mejorar la resistencia, dureza y templabilidad, facilitando la laminación, aumentando la penetración de temple y proporcionando equilibrio entre el azufre y oxígeno. El manganeso actúa como desoxidante neutralizando los efectos nocivos del azufre con la ayuda del oxígeno y evitando que se desprendan gases indeseables durante la solidificación del acero (STEPHANIA, Quito, abril 2019).

1.4.2. Fósforo (P)

El fósforo durante el proceso de soldadura actúa en la solidificación formando el fósforo de hierro FeP_3 , y reduciendo la soldabilidad cuando su contenido es mayor al 0,04%, cantidad que tiende a disolverse en la ferrita, mejorando la resistencia y dureza (Marilú C. C., 2008).

1.4.3. Cromo (Cr)

El cromo en los aceros aleados aumenta la dureza, resistencia al desgaste o abrasión y a la tracción, este elemento tiene una tendencia a formar carburo de cromo y carburos complejos (Marilú C. C., 2008).

1.4.4. Azufre (S)

Normalmente es una impureza y se mantiene a un bajo nivel, sin embargo, algunas veces se agrega intencionalmente en grandes cantidades (0,06 a 0,30%) para aumentar la maleabilidad (habilidad para ser trabajado mediante cortes) tanto de los aceros aleados como al carbono (STEPHANIA, Quito, abril 2019).

1.4.5. Níquel (Ni)

Este elemento mejora la resistencia a la corrosión de líquidos no oxidantes, mejora las propiedades del tratamiento térmico, reduciendo la temperatura de endurecimiento y distorsión al ser templado, aumenta la capacidad de ser soldado, y al emplearse junto con el cromo mejora las propiedades mecánicas (Mauricio Ibarra Echeverria, 2010).

1.4.6. Molibdeno (Mo)

Este elemento ayuda a mejorar la resistencia a temperaturas elevadas, a la corrosión en medios no oxidantes y a la corrosión por picadura en todos los medios, por otro lado también mejora la templabilidad (Mauricio Ibarra Echeverria, 2010).

1.4.7. Boro (B)

Este elemento aumenta la templabilidad sin reducir la maquinabilidad del acero, además puede combinarse con carbono para formar carburos proporcionando un revestimiento duro, es común en aceros que contienen entre 0,30% a 0,50% de carbono (M, 2013).

1.4.8. Vanadio (V)

Este elemento es un desoxidante muy fuerte, su función es afinar el grano y disminuir la templabilidad del acero, también puede formar carburos, por lo que se añade en porcentajes entre 0,02% a 0,03% (Cueto, 2016).

1.4.9. Titanio (Ti)

Este elemento es utilizado en aceros de alta gama y en bajas cantidades, actúa como desoxidante y tiene la capacidad de afinar el grano. Es un gran formador de carburos y se combina rápidamente con el nitrógeno. Se usa también en los aceros inoxidable cromo-níquel (Cueto, 2016).

1.5. Características del acero anti abrasivo.

El acero anti abrasivo tiene excelentes propiedades mecánicas, se caracteriza por tener dureza superior a 350 Brinell (HB), buena tenacidad, resistencia mecánica, muy buena resistencia a la deformación plástica y al desgaste por impacto (Villar, 2009), es por estas razones que se usa en el transporte de material pétreo como cajones de volquetas, (Figura 1.4). En la industria minera específicamente en la fabricación de excavadoras, (Figura 1.5) y en la fabricación de cucharones de excavación (Figura 1.6).



Figura 1.4. Aplicación de acero anti abrasivo.

Fuente: (Villar, 2009).



Figura 1.5. Máquina trituradora.

Fuente: (AG, 2010)



Figura 1.6. Cucharón de excavadora fabricado de acero anti abrasivo.

Fuente: (STEPHANIA, Quito, abril 2019)

1.5.1. Dureza

El aumento de la dureza produce una disminución de la profundidad de indentación o penetración del elemento abrasivo y, por lo tanto, una disminución del tamaño de los surcos ocasionados en el deslizamiento, mejorando la vida útil y el desempeño.

1.5.2. Conformado en frío

Los aceros anti abrasivos tienen alta dureza debido a su composición química, todos los productos que son procesados con este tipo de aceros se deben sujetar a ciertas especificaciones para el conformado en frío. La deformación del acero disminuye al aumentar la dureza, por lo que estos procesos se deben realizar a baja velocidad y constante precalentamiento de las planchas en caso de ser necesario. Un alivio de tensiones no es requerido para estos aceros (XAR® 400, 2014).

1.5.3. Mecanizado

Los aceros anti abrasivos presentan un buen comportamiento frente al mecanizado a pesar de su alta resistencia, sin embargo es necesario el uso de máquinas herramientas suficientemente robustas y la utilización de herramientas de corte de metal duro para el efecto. La velocidad de corte y de avance estará acorde a la alta dureza del material (XAR® 400, 2014).

1.5.4. Corte térmico

Para cortar aceros de alta resistencia se debe utilizar el proceso de oxicorte sin precalentamiento para espesores pequeños (menores a 30 mm), sin embargo, se utiliza

el proceso de corte por plasma con el objetivo de obtener una mínima distorsión, si la temperatura de la pieza de trabajo es inferior a 5°C, los bordes cortados deben ser posteriormente procesados por conformado en frío, en el que un precalentamiento a 150°C se debe considerar con el objetivo de evitar el agrietamiento (XAR® 400, 2014).

1.5.5. Soldabilidad de aceros de alta resistencia

La soldabilidad de los aceros anti abrasivos es limitada, debido a su composición química, y se puede usar procesos manuales y automáticos para realizar el proceso.

Para prevenir el agrietamiento en frío en las juntas soldadas sólo se deben usar materiales de aporte con bajo contenido de hidrógeno para mantener un buen depósito (XAR® 400, 2014).

1.6. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW)

La soldadura por arco con electrodo revestido, por sus siglas en inglés SMAW (Shield Metal Arc Welding), es un proceso de soldadura que usa un electrodo consumible y consiste en una varilla de metal de relleno recubierta con materiales químicos que proporcionan un fundente y protección, como se ilustra en la Figura 1.7.

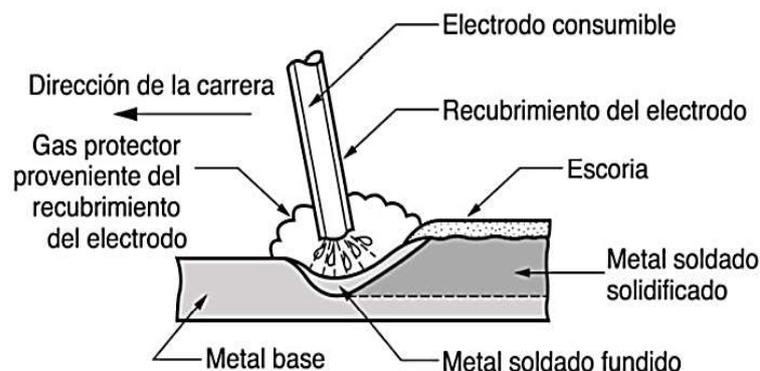


Figura 1.7. Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido.

Fuente: (SANDOVAL, 2019)

El metal de relleno usado en la varilla debe ser compatible con el metal que se va a soldar. El recubrimiento consiste en celulosa pulverizada (por ejemplo, polvos de algodón y madera) mezclados con óxidos, carbonatos y otros ingredientes integrados mediante un aglutinante de silicato. Algunas veces se incluyen en el recubrimiento polvos metálicos para aumentar la cantidad de metal de relleno y agregar elementos aleantes. El calor del proceso de soldadura, generado por el arco eléctrico, funde el recubrimiento y proporciona una atmósfera protectora y escoria en la operación de soldadura. También

ayuda a estabilizar el arco y regular la velocidad a la que se funde el electrodo (SANDOVAL, 2019).

1.6.1. Variables principales

En el proceso de soldadura SMAW las variables principales son:

- Corriente de soldadura (I).
- Voltaje generado en el arco (V).
- Velocidad de soldadura (Va).

Estas variables deben ser controladas de forma correcta, para que el cordón de soldadura tenga buenas características de penetración, geometría y metalográficas.

1.6.1.1. Corriente de soldadura

En el proceso SMAW se puede usar corriente alterna o continúa, con el fin de mejorar la estabilidad del arco de soldadura, cualquiera que sea la selección de la corriente se debe controlar, ya que es un factor importante que determina la fusión y penetración.

El material de aporte, según su diámetro, posee un rango de corriente que se debe utilizar y no superarse, ya que se produciría mordeduras y apareamiento de grietas. Sin embargo cuanto mayor sea la intensidad de corriente utilizada mayores serán la penetración y la tasa de deposición. La intensidad de corriente utilizada depende de la posición de soldeo y del tipo de unión. Como regla general, se deberá ajustar la intensidad de corriente a un nivel en que la cavidad del baño de fusión sea visible. Por ejemplo, si cavidad es muy grande y tiene forma elíptica, significa que la intensidad es excesiva (Universidad Tecnológica de Pereira, 2018).

1.6.1.2. Voltaje generado en el arco

El voltaje tiene una relación directa con la longitud del arco (distancia entre el núcleo de la punta del electrodo y la superficie del arco de soldadura).

La elección adecuada de la longitud del arco hace que se tenga una excelente soldadura; en general se conoce que la longitud del arco no debe exceder el diámetro del núcleo electrodo. Una longitud de arco muy corta genera un cortocircuito al instante del depósito del material fundido, si la longitud del arco es extremadamente larga el material que se deposita del electrodo al material base es dispersado, produciendo salpicaduras y un depósito ineficiente (Washington, 2018).

1.6.1.3. Velocidad de soldadura

La velocidad de soldadura es el avance del electrodo a lo largo de la junta soldada, está influenciada por los siguientes parámetros:

- Tipo de corriente, amperaje y polaridad.
- Posición de soldadura.
- Velocidad de fusión del electrodo
- Espesor del material base.
- Condición superficial del material base.
- Tipo de junta.
- Manipulación del electrodo.

Si la velocidad de soldadura es alta; reduce el ancho del cordón de soldadura, aumenta la penetración, produce mordeduras, y favorece al atrapamiento de gases generando poro en el cordón.

Si la velocidad de recorrido es baja, se aumenta el ancho del cordón, presenta una soldadura convexa con escasa penetración, debido a que reside demasiado tiempo en arco sobre el metal depositado. La velocidad de avance tiene una relación directa con el aporte de calor, es decir si la velocidad de soldadura es baja la zona afectada por el calor (ZAC) aumenta en el material base, afectando a micrografías y a la velocidad de enfriamiento (Washington, 2018). En la Figura 1.8 se muestra cómo afectan los parámetros mencionados en el cordón de soldadura.

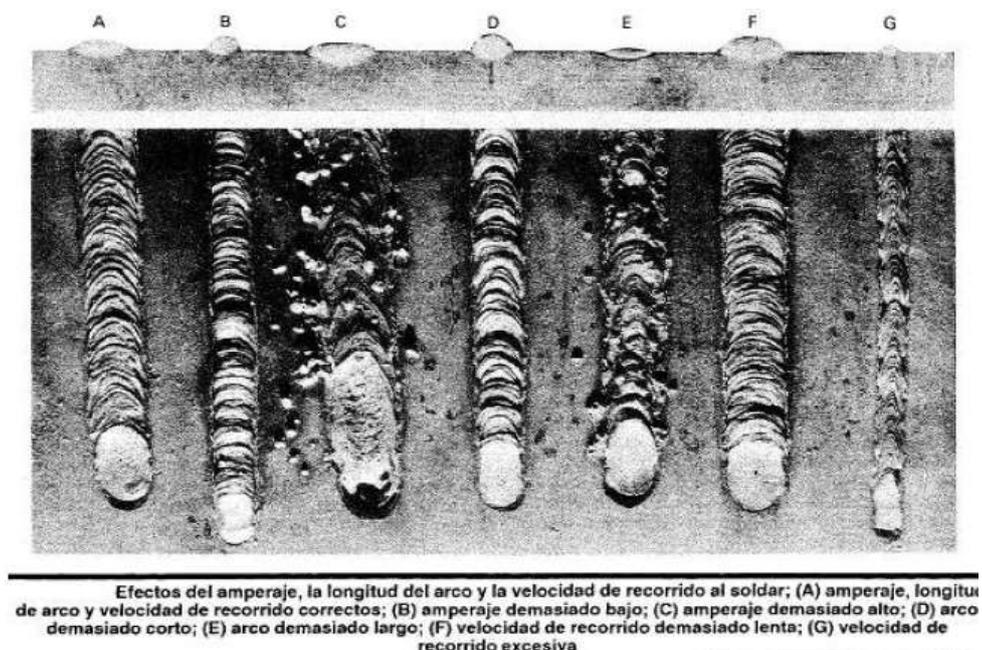


Figura 1.8. Efectos de amperaje, longitud del arco y la velocidad de soldadura.

Fuente:(American Welding Society, 1996)

1.6.2. Ventajas y desventajas

En la Tabla 1.2 se detallan las ventajas y desventajas del proceso de soldadura SMAW.

Tabla 1.2. Se detallan las ventajas y desventajas.

Proceso de soldadura (SMAW).	
No	Ventajas
1	Utiliza equipos simples, económicos y fácil de transportar
2	Los electrodos se encargan en suministrar el material de aporte y la protección del arco.
3	No es necesario de gases de protección adicional
4	No presenta sensibilidad a la corriente del aire, como se presenta en los que usan gases de protección.
5	Se realiza en área de acceso restringido.
6	Es amigable con la mayoría de los metales aleados.
Desventajas	
1	No es un proceso adecuado para metales o aleaciones que presenten un punto de fusión muy bajo como en el caso de plomo y el estaño.
2	Presenta limitaciones al soldar metales radiactivos como el titanio, zirconio, tantalio y columbio.
3	Es un proceso que depende de la habilidad del soldador para obtener una buena soldadura.
4	En algunas ocasiones hay un desperdicio de electrodos, ya que en algunos casos no se los consume en su totalidad.
5	El rendimiento es bajo, así como también su velocidad de depósito.

(Fuente: Propia, 2020)

1.6.3. Material de aporte para el proceso SMAW

En este proceso de soldadura se utilizan electrodos revestidos; según el material que están formados se clasifican en:

Según su núcleo:

- Electrodos para aceros al carbón (bajo y alto).
- Electrodos para aceros inoxidable o de aleación especial.
- Electrodos para hierro fundido.
- Electrodos para metales no ferrosos (aluminio, bronce, etc.).

Según su revestimiento:

- Celulósico. Es aquel que tiene alto contenido de celulosa en el revestimiento, se caracteriza por presentar máxima penetración, solidificación rápida, buenas características de resistencia, elasticidad y ductilidad.
- Rutílico. Su nombre se debe al alto contenido de rutilo (óxido de titanio) y se caracteriza por su mediana penetración, arco suave.
- Básico o de bajo hidrógeno. El revestimiento del electrodo no tiene humedad (hidrógeno) y se caracteriza por su alta penetración, máxima resistencia en los depósitos, alta ductilidad, alta resistencia a los impactos a baja temperatura.
- Hierro en polvo. Son parte de los electrodos que contienen una cantidad de hierro en polvo, se caracteriza por su alta penetración, relleno rápido, suaviza la energía del arco (SANDOVAL, 2019).

1.6.3.1. Nomenclatura del electrodo según la AWS A5.1

Según la AWS A5.1, los electros revestidos deben ser identificados de la siguiente manera:

E XX YZ - 1 HZR

Dónde:

E: Indica electrodo soldar por arco y su función es conducir la corriente.

XX: Determinan la mínima resistencia a la tracción del metal depositado, en Ksi.

Y: El tercer dígito indica la posición en la que se puede soldar satisfactoriamente si vale (1 = todas, 2 = plana y horizontal, 4 = plana pero especialmente vertical descendente).

Z: El último dígito, que está íntimamente relacionado con el anterior, es indicativo del tipo de corriente eléctrica y polaridad en la que mejor trabaja el electrodo, e indica a su vez el tipo de revestimiento

1: Designa que el electrodo (E 7016, E 7018 o E 7024) cumple con los requisitos de impacto mejorados E y de ductilidad mejorada en el caso E 7024.

HZ: Indica que el electrodo cumple con los requisitos de la prueba de hidrógeno difusible para niveles de "Z" de 4.8 o 16 ml de H₂ por 100gr de metal depositado (solo para electrodos de bajo hidrógeno).

R: Indica que el electrodo cumple los requisitos de la prueba de absorción al 80% de humedad relativa y al 80°F (solo para electrodos de bajo hidrógeno).

1.6.3.2. Características del electrodo (E6010)

Es un electrodo revestido con alto contenido de celulosa, diseñado para proporcionar un arco uniforme, penetración profunda dentro del metal base, gran eficiencia de deposición y poca pérdida por salpicaduras. Este electrodo produce un cordón de soldadura con ondulaciones gruesas y una escoria delgada de fácil remoción, puede ser usado en posiciones planas, horizontales, verticales o elevadas. Este tipo de electrodo se utiliza para construcción de campo, astilleros, torres de agua, recipientes a presión, tubería a presión, piezas de acero fundido y aceros galvanizados, etc. (spanish carbon , 2000), su especificación técnica se detalla en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Especificaciones técnicas del electrodo (E6010).

Análisis típico del electrodo (% en peso)						
Elementos químicos	C	P	Mn	S	Si	
porcentajes	0,10	$1,40 \times 10^{-2}$	0,47	$1,20 \times 10^{-2}$	0,20	
Propiedades mecánicas del metal depositado según (AWS A5.1)						
	[Ksi]		[MPa]			
Límite elástico	52 - 62		360 - 427			
Resistencia a la tracción	62 - 72		427 - 496			
Alargamiento a 2" %	22 - 23					
Reducción de área %	60					
Propiedades de soldadura y especificaciones						
Diámetro (pulg)	3/32	1/8	5/32	3/16	7/32	1/4
Longitud (pulg)	14	14	14	14	14	14
Amperaje (A)	60 - 85	80 - 120	110 - 160	150 - 200	160 - 210	190 - 240
Voltaje(V)	50 - 70	70 - 110	110 - 150	130 - 170	130 - 190	---
Polaridad invertida	AC o DC+					

Fuente: (spanish carbon , 2000)

1.6.3.3. Características del electrodo (E7018)

El electrodo AWS A5.1/ ASME-SFA 5.1 E7018 es un electrodo con alto contenido de celulosa, que generalmente se utiliza para soldar líneas de tuberías para servicio al vapor con presiones y temperaturas altas. Este electrodo es utilizado en todas las posiciones de soldadura, proporciona un arco fuerte con penetración profunda, produciendo un depósito de soldadura que se humedece y se distribuye de forma correcta, con una solidificación rápida que produce escoria delgada y de fácil remoción.

Tabla 1.4. Especificaciones técnicas del electrodo (E7018).

Análisis típico del electrodo (% en peso)						
Elementos químicos	C	P	Mn	S	Si	
Porcentajes	0,09	0,02	1,05	1,50x10 ⁻²	0,55	
Propiedades mecánicas del metal depositado según (AWS A5.1)						
	[ksi]			[MPa]		
Límite elástico	58 - 70			400 - 483		
Resistencia a la tensión	70 - 80			483 - 552		
Alargamiento a 2" %	22 - 36					
Propiedades de soldadura y especificaciones						
Diámetro (pulg)	3/32	1/8	5/32	3/16	7/32	1/4
Longitud (pulg)	14	14	14	14	14	14
Amperaje (A)	60 - 85	80 -145	110 - 160	150 - 200	160 - 210	190 - 240
Voltaje(V)	50 - 70	70 -110	110 - 150	130 - 170	130 - 190	---
Polaridad Invertida	AC o DC+					

Fuente: (spanish carbon , 2000)

1.6.3.4. Nomenclatura del electrodo según la AWS A5.5

Según la AWS A5.5., todos los electrodos deben ser identificados de la siguiente manera:

E XX YY - Z

Dónde:

E: Indica electrodo para soldadura por arco.

XX: La resistencia mínima a la tracción en Ksi, o Mpa dividido para 10.

YY: La posición de soldadura que es utilizado el electrodo, el tipo de revestimiento, y el tipo de corriente para la que los electrodos apropiados.

Z: Es composición química del metal de soldadura no diluido producido por el electrodo utilizando soldadura por arco metálico.

1.6.3.5. Características y aplicaciones del electrodo (E9018)

El electrodo AWS A5.5 Clase E9018-B3 es de bajo contenido de hidrógeno, se utiliza para soldar aceros con contenido de 0,25 - .2% de Cr- 1% de Mo, tubos de aceros para calderas y tubos de intercambiadores de calor (A199-722, A200-T22, A213-T22), aceros laminados (A387-D), aceros fundidos y aceros forjados, que están sujetos a altas temperaturas. Este electrodo tiene una eficiencia extremadamente alta de depósito, produciendo depósitos de soldadura de calidad de rayos X, propiedades mecánicas que

cumplen con las normas AWS-ASTM. Este tipo de electrodo proporciona un arco estable y poca salpicadura, se puede utilizar corriente alterna (polaridad inversa).

Tabla 1.5. Especificaciones técnicas del electrodo (E9018).

Análisis típico del electrodo (% en peso)								
Elementos químicos	C	P	Mn	S	Si	Cr	Ni	Mo
porcentajes	0,05	$1,20 \times 10^{-2}$	0,86	$9,00 \times 10^{-3}$	0,55	2,31	0,06	1,08
Propiedades mecánicas del metal depositado según (AWS A5.5)								
	[ksi]				[MPa]			
Límite elástico	62 - 72				427 - 496			
Resistencia a la tensión	70 - 82				483 - 565			
Alargamiento a 2" %	22-36							
Propiedades de soldadura y especificaciones								
Diámetro (pulg)	3/32	1/8	5/32	3/16	7/32	1/4		
Longitud (pulg)	14	14	14	14	14	14		
Amperaje (A)	60 - 85	90 - 140	110 - 160	150 - 200	160 - 210	190 -240		
Voltaje(V)	50 - 70	70 - 110	110 - 150	130 - 170	130 - 190	---		
Polaridad Invertida	AC o DC+							

Fuente: (spanish carbon , 2000)

1.6.3.6. Características y aplicación del electrodo (E11018)

El electrodo AWS A5.5, E11018-M es un electrodo de bajo contenido de hidrógeno con hierro en polvo en su revestimiento. Posee una gran velocidad de deposición y permite obtener uniones de alta resistencia mecánica. Los depósitos obtenidos son de excelente calidad radiográfica.

Este electrodo es diseñado para soldar aceros templados y enfriados con una resistencia a la tensión de hasta 110000 Ksi, tales como ASTM 514, A517, HY80, T-1, SSS-100, etc.

Tabla 1.6. Especificaciones técnicas del electrodo (E11018).

Análisis típico del electrodo (% en peso)								
Elementos químicos	C	P	Mn	S	Si	Cr	Ni	Mo
porcentajes	0,04	0,013	1,54	$1,00 \times 10^{-2}$	0,32	0,30	1,86	0,40
Propiedades mecánicas del metal depositado según (AWS A5.5)								
	[ksi]			[MPa]				
Límite elástico	98 - 110			680 - 760				
Resistencia a la tensión	110 - 114			760 - 780				
Alargamiento a 2" %	20-23							
Propiedades de soldadura y especificaciones								
Diámetro (pulg)	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4			
Longitud (pulg)	14	14	14	14	14			
Amperaje (A)	55 - 85	90 - 140	140 - 190	180 - 230	250 - 320			
Voltaje(V)	50 - 80	80 - 120	110 - 150	130 - 190	---			
Polaridad Invertida	AC o DC+							

Fuente: (spanish carbon , 2000)

1.7. Pre-Calentamiento

Las placas antes de soldar son precalentadas, con el fin de controlar la velocidad de enfriamiento de la soldadura, impidiendo los cambios bruscos en su microestructura. La temperatura de pre-calentamiento se determina de acuerdo a la composición química, y espesor del metal base.

1.7.1. Carbono equivalente (CE)

El carbono equivalente es el resultado de los elementos aleados y el carbono, los porcentajes de cada elemento son los responsables de soldabilidad del acero. La determinación de la temperatura de pre-calentamiento que está en función del (CE), se lo realiza según la formas detallados en la Tabla 1.7. La calidad de la soldabilidad del acero no solo depende de la composición química sino de otros factores.

Tabla 1.7. Fórmulas para el cálculo el carbono equivalente químico.

Autor	Fórmula
Seferián	$CEq = \%C + \frac{1}{9}(\%Mn + \%Cr) + \frac{1}{8}\%Ni + \frac{7}{90}\%Mo$
AWS D1.1	$CEq = \%C + \frac{1}{6}(\%Mn + \%Si) + \frac{1}{5}(\%Cr + \%Mo + \%V) + \frac{1}{15}(\%Ni + \%Cu)$

Fuente: (STEPHANIA, Quito, abril 2019)

1.7.2. Temperatura de precalentamiento

La función principal de la temperatura de precalentamiento es disminuir la velocidad de enfriamiento de la soldadura, reducir las tensiones residuales disminuyendo los gradientes térmicos, además ayuda a controla la microestructura de la zona afectada por calor (ZAC). La velocidad de enfriamiento depende de los espesores del material base, la geometría de la unión, el calor aportado y la temperatura de precalentamiento (CAYA, 2014)

Los factores que se consideran para determinar la temperatura de precalentamiento son: composición química del acero, difusión de hidrógeno, calor entregado, espesor del metal base, tensiones residuales en la soldadura, caminos de dispersión de calor, restricción de la junta, tipo de proceso de soldadura (STEPHANIA, Quito, abril 2019)

2. METODOLOGÍA

El estudio de la soldabilidad de un acero anti abrasivo de grado 400, se realiza debido a que tiene excelentes propiedades mecánicas y se encuentra en el mercado ecuatoriano. Mediante el proceso SMAW y con distintos materiales de aporte como: AWS A5.1 (E6010, E7018), AWS A5.5 (E9018 y E11018) se analiza la soldabilidad de las juntas. Se usa el proceso SMAW por ser fácil, económico y presentar buena calidad en la junta soldada.

En esta sección se detallan: (1) métodos empleados para caracterizar el material base, (2) corte y preparación de las juntas, (3) procedimiento de soldadura, (4) preparación de las probetas, (5) código de soldadura AWS D1.1, ensayos no destructivos, (6) ensayos destructivos, (7) ensayo de micrografías, (8) ensayo de macrografías (9) barrido de dureza.

Para utilizar el proceso de soldadura SMAW el fabricante del acero anti abrasivo recomienda lo siguiente:

- Para espesores menores a 20 mm biselar en V, para espesores superiores se recomienda biselar en X.
- Según el espesor de la plancha, el fabricante se recomienda utilizar una adecuada temperatura de precalentamiento.
- Emplear electrodos de bajo contenido de hidrógeno.

2.1. Caracterización del metal base

Se detalla los diferentes ensayos realizados al material base para validar su calidad.

2.1.1. Ensayo de espectrometría por chispa

Se realizó el ensayo de espectrometría por chispa con el fin de conocer la composición química del acero anti abrasivo, en muestras como la ilustrada en la Figura 2.1.

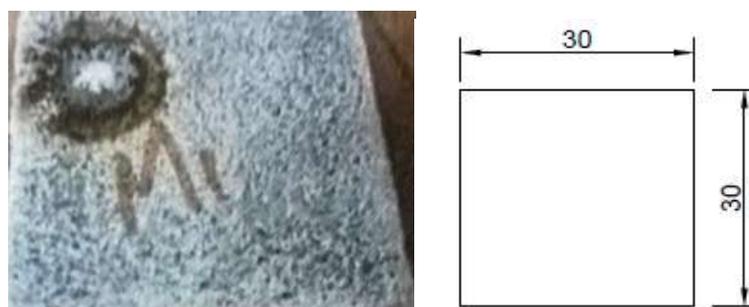


Figura 2.1. Probeta con dimensiones para el ensayo de espectrometría.

(Fuente: Propia, 2020)

Este ensayo consiste en determinar la longitud de onda características de cada elemento cuando sus electrones son excitados mediante una chispa. Se utilizó un espectrómetro Bruker (Tabla 2.1), disponible en el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del espectrómetro Bruker Q2-ION.

Especificaciones		Imagen
Marca :	BLUKER	
Modelo:	Q2 ION	
Cobertura del espectro:	170-411 [nm]-687 [nm]	
Descarga de chispa y arco:	10 [μ s] a 2 [ms]	
Compensación de ambiente activo :	10 [°C] a 45 [°C]	
Voltaje:	100 a 240 [V]	
Frecuencia:	50/60 [Hz]	

(Fuente: Propia, 2020)

2.1.2. Ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción del material base (MB) se fabricaron dos probetas bajo la norma ASTM E-8 (Figura 2.2), para comprobar las especificaciones técnicas del fabricante y sus características.



Figura 2.2. Probetas para ensayo de tracción.

(Fuente: Propia, 2020)

Las dimensiones de las probetas según la norma ASTM E-8 para estos ensayos de tracción, se detallan en la Figura 2.3.

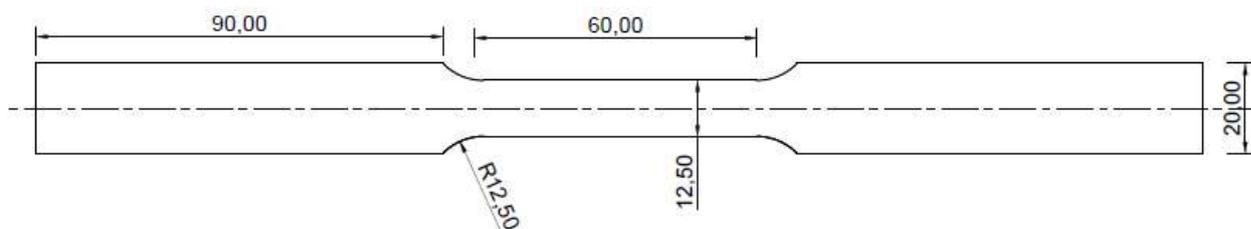


Figura 2.3. Especificaciones para la probeta de material base en (mm).

Fuente: (ASTM E8 / E8M, 2016)

Para realizar el ensayo de tracción se utilizó la máquina universal del Laboratorio de Análisis de Esfuerzo y Vibraciones (LAEV), (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Máquina de ensayos universal del LAEV.

Especificaciones		Imagen
Marca:	Tiniuns Olsen	
Modelo:	L	
Velocidad de ensayo:	0- 76 [mm/min]	
Carga máxima:	3000 [kN]	

(Fuente: Propia, 2020)

Para realizar el ensayo se debe marcar dos puntos en la probeta en la sección reducida a una longitud de 50 mm, la misma que posteriormente ayudará a medir la elongación; se debe regular la velocidad de avance de la máquina universal y su calibración, una vez hecho esto se procede a sujetar la probeta en la mesa fija y se desplaza la mesa móvil para colocar la probeta en la mordaza de la máquina. El movimiento de la mesa móvil hace que se fracture la probeta durante el ensayo, los valores de los parámetros que se consideran en este ensayo se detallan en el informe LAEV-M19.135.

2.1.3. Ensayo de dureza (Rockwell B)

El método consiste en introducir un indentador (cono de diamante o bola de acero endurecido), sobre la pieza de trabajo, mediante la aplicación sucesiva de dos cargas según las condiciones específicas de la prueba que se esté realizando y medir la deformación o profundidad de la huella dejada por el indentador. La unidad de medida de la profundidad S es 0,002 mm y a partir de esta medida se deduce el número de dureza (CENAMI, 1998). Este ensayo permite comprobar las especificaciones técnicas del

fabricante del acero anti abrasivo, por lo que se utilizó un durómetro Rockwell que facilitó la medición de la dureza del material base (MB) (Figura 2.4).



Figura 2.4. Durómetro Rockwell LAEV.
(Fuente: Propia, 2020)

2.2. Corte y preparación de los cupones de prueba

Este apartado detalla la obtención de las placas y procedimiento de preparación de las juntas a soldar.

2.2.1. Obtención de las placas

De la plancha de acero anti abrasivo de dimensiones 6000 x 2500 x 6 (mm), se extraen ocho placas, mediante oxicorte (Figura 2.5), las cuales se sueldan en pares, con cuatro electrodos diferentes, para analizar la soldabilidad del acero, mediante el proceso SMAW.



Figura 2.5. Proceso de corte del acero anti abrasivo mediante oxicorte.
(Fuente: Propia, 2020)

2.2.2. Preparación de la junta soldada

La preparación de la junta soldada empieza por la eliminación de la escoria producto del corte y la realización de un bisel de 30° a cada placa; para el presente trabajo la junta soldada tiene un talón de 2 mm y una separación entre placas de 3 mm (Figura 2.6.)

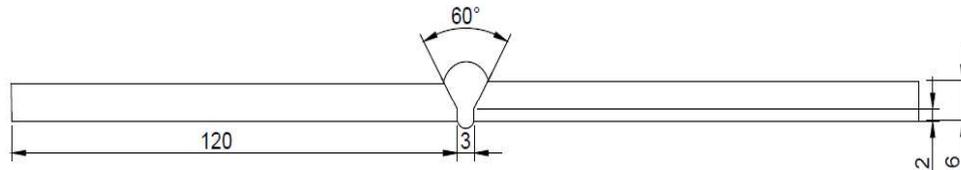


Figura 2.6. Diseño de la junta soldada.

(Fuente: Propia, 2020)

2.3. Pre calentamiento de las placas

Las placas del material base antes de soldar son pre calentadas, con la finalidad de homogenizar la microestructura y mejorar las propiedades mecánicas. Para el cálculo de la temperatura de pre calentamiento se consideró la composición química del acero y su espesor. Los datos de la composición química fueron obtenidos mediante el ensayo de espectrometría por chispa, en el proceso de caracterización del material base, estos valores se encuentran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición química del material base.

Composición química del material base					
Carbono	%C	$1,50 \times 10^{-1}$	Cromo	%Cr	$3,11 \times 10^{-1}$
Silicio	%Si	$4,61 \times 10^{-1}$	Molibdeno	%Mo	$2,20 \times 10^{-2}$
Manganeso	%Mn	$9,81 \times 10^{-1}$	Níquel	%Ni	$3,90 \times 10^{-2}$
Fósforo	%P	$2,00 \times 10^{-2}$	Cobre	%Cu	$2,20 \times 10^{-2}$
Azufre	%S	$7,30 \times 10^{-3}$	Cobalto	%Co	$5,90 \times 10^{-3}$

(Fuente: Propia, 2020)

Para determinar la temperatura de pre calentamiento se usa el método de Saferine que relaciona la composición química del material y su espesor, usando las siguientes ecuaciones (STEPHANIA, Quito, abril 2019)

$$T_p(^{\circ}\text{C}) = 350 * \sqrt{CE_T - 0,25}$$

Ecuación 2. 1.

Dónde:

- T_p = temperatura de precalentamiento mínima [°C].
- CE_T = Carbón equivalente total.

$$CE_T = CE_q + CE_e = CE_q(1 + 0,005 * e)$$

Ecuación 2. 2.

Dónde:

- CE_q = Carbono equivalente químico de Saferine
- CE_e = carbono equivalente de espesor.
- e = Espesor de material base [mm].

$$CE_q = \%C + \frac{(\%Mn + \%Cr)}{9} + \frac{\%Ni}{18} + \frac{7 * \%Mo}{90}$$

Ecuación 2. 3.

En la Tabla 2.4 se detalla los valores del carbono equivalente químico, carbono total y el valor de la temperatura.

Tabla 2.4. Temperatura real de precalentamiento del material base y el carbono equivalente.

Valores reales		
CE_q	CE_T	T_p (°C)
$29,74 \times 10^{-2}$	$30,63 \times 10^{-2}$	83,00

(Fuente: Propia; 2020)

El proceso de precalentamiento se realiza a través de llama oxigas, y se controla con un pirómetro digital.

2.4. Equipo para soldar placas mediante el proceso SMAW

Las características del equipo que se utiliza para soldar las placas de dimensiones 450 X 120 X 6 mm, se observan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del equipo para el proceso SMAW.

Especificaciones		Imagen
Marca:	Lincoln Electric	
Modelo:	Invertec V350-Pro	
Potencia de entrada:	200/220/380/415/440/1/3/50-60 350 [A] /34 [V] 60 %	
Salida nominal:	300 [A] /32 [V] 100 %	
Corriente de entrada:	32 [A]	
Rango de salida:	5-425 [A]	

(Fuente: Propia, 2020)

2.5. Procedimiento de soldadura de las placas

Para la soldadura de las placas se emplea junta a tope, con bisel en V de 30° en cada placa, una separación de 3 mm y un talón de 2 mm para garantizar que la raíz del cordón sea homogénea, se colocan puentes entre las placas y se sueldan los extremos. Las ocho placas son soldadas, para formar los cuatro cupones, cada cupón con diferente material de aporte, con el fin de obtener las mejores características del cordón de soldadura. En las tablas 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9 se detallan las variables usadas en el procedimiento de soldadura mediante el proceso SMAW.

Tabla 2.6. Variable para el procedimiento de soldadura para la junta P1.

Pase	Temperatura TP.	Metal de aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de soldadura
		Clase AWS	Diámetro	Tipo y polaridad	Amperaje		
	[°C]	A5.5	[mm]		[A]	[V]	[mm/min]
1	135	E9018	3,20	DC+	74,00	20,30	39,90
2	145				110,00	21,93	79,82
3	155				121,00	24,00	79,84

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 2.7. Variable para el procedimiento de soldadura para la junta P2.

Pase	Temperatura	Metal de aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de soldadura
	Tp.	Clase AWS	Diámetro	Tipo y polaridad	Amperaje		
	[°C]	A5.1	[mm]		[A]		
1	125	E7018	3,20	DC+	79,00	19,17	79,59
2	135				110,00	21,16	79,76
3	145				126,00	23,00	59,76

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 2.8. Variable para el procedimiento de soldadura para la junta P3.

Pase	Temperatura	Metal de aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de soldadura
	Tp.	Clase AWS	Diámetro	Tipo y polaridad	Amperaje		
	[°C]	A5.1	[mm]		[A]		
1	115	E6010	3,20	DC+	45,00	22,12	39,95
2	125				80,00	29,00	119,92
3	135				145,00	23,00	79,71

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 2.9. Variable para el procedimiento de soldadura para la junta P4.

Pase	Temperatura	Metal de aporte		Corriente		Voltaje	Velocidad de soldadura
	Tp.	Clase AWS	Diámetro	Tipo y polaridad	Amperaje		
	[°C]	A5.5	[mm]		[A]		
1	145	E11018	3,20	DC+	85,00	21,05	47,89
2	155				95,00	22,40	47,97
3	165				107,00	24,00	47,84

(Fuente: Propia, 2020)

Al usar electrodos de las clases AWS A5.1 y ASW A5.5 se puede comprobar resultados de forma más fácil debido a que presentan diferentes características en composición químicas, amperaje, voltaje por lo que generan distintos resultados. Se usó los valores de

amperajes y voltajes que se detallan en las tablas 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9 ya que se encuentran dentro del rango recomendado por el proveedor de los electrodos.

Luego de terminar de soldar las juntas con el electrodo correspondiente, se retira inmediatamente los puentes que se colocaron al inicio de la soldadura y se coloca cada una de las juntas soldada en un recipiente con arena que es el medio de enfriamiento que mantendrá invariables las propiedades del material base.

2.6. Preparación de las probetas

La preparación de las probetas para realizar el procedimiento de ensayos no destructivos, se detalla en la Figura 2.7, mientras que el procedimiento se ilustra en la Figura 2.8.



Figura 2.7. Diagrama de proceso para los ensayos no destructivos (END).

(Fuente: Propia, 2020)

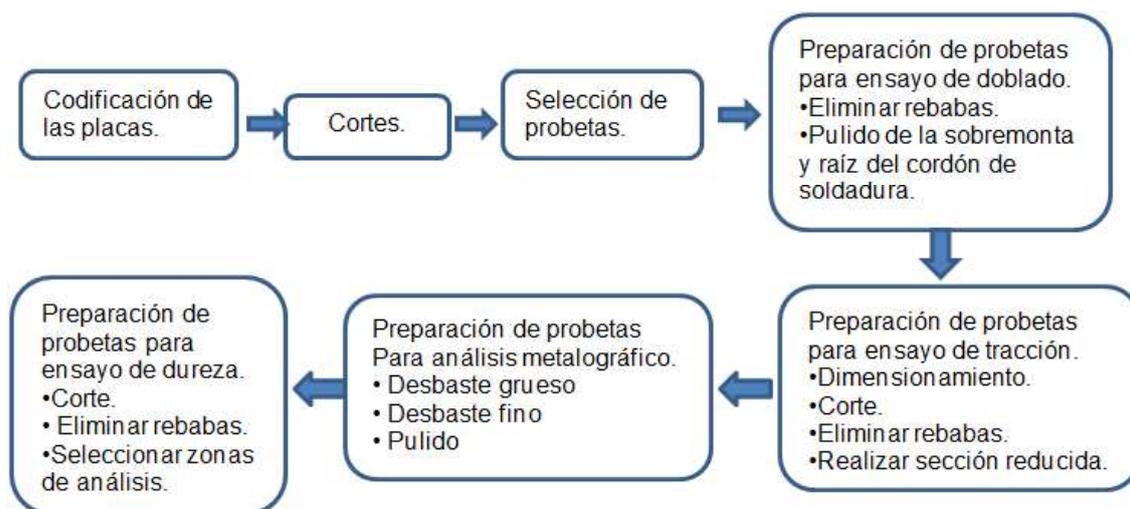


Figura 2.8. Diagrama de proceso de ensayos destructivos.

(Fuente: Propia, 2020)

2.6.1. Codificación de placas

La codificación de las placas se realiza de acuerdo a las especificaciones con las que fueron soldadas, cada probeta se designa de acuerdo a los ensayos destructivos y un número dado, ver la Figura 2.9.

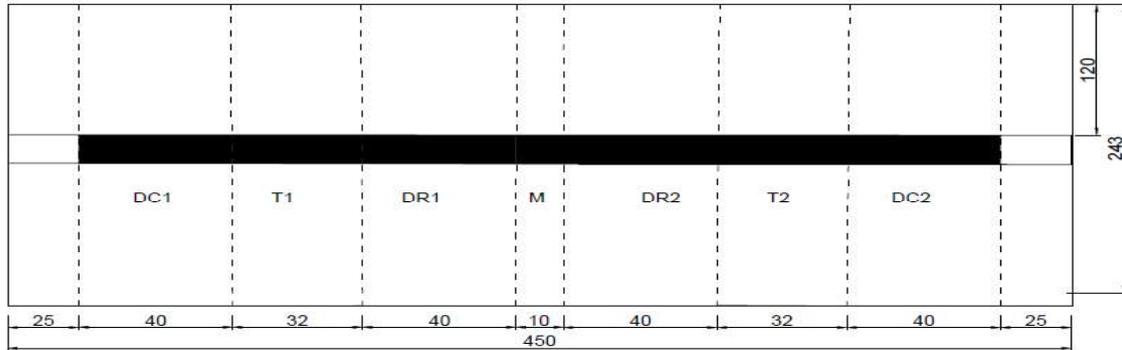


Figura 2.9. Dimensión de las muestras.

(Fuente: Propia, 2020)

En los extremos de las placas soldadas no se consideran una longitud de 25 mm, para evitar una interferencia en los ensayos, ya que pueden presentar discontinuidades en la soldadura.

2.6.2. Equipo de corte

Es una máquina que permite los cortes de las probetas (Tabla 2.10), tiene un sistema de refrigeración de agua, para evitar que el calor generado por el corte cambie las propiedades mecánicas del material base.

Tabla 2.10. Especificación técnica de la máquina de corte en frío.

Especificaciones		Imagen
Marca:	W.J.SAVAGE CO.IG	
Modelo:	SN-10 10T86-199	
Potencia del motor:	10 [HP]	
Voltaje:	220 [V]	
Amperaje:	26 [A]	
Frecuencia	60 [Hz]	
Elemento de refrigeración	Agua	
Disco de corte:	14 pulgadas.	

(Fuente: Propia, 2020)

2.7. Requerimientos de la norma AWS D1.1

La norma AWS D1.1M:2015, designa la cantidad de probetas para ensayos destructivos según el espesor del material base, ver la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Cantidad de probetas para los ensayos según norma AWS D1.1.

Espesor nominal (t) (mm)	Número de probetas					
	Tensión reducida	Doblado de cara	Doblado de raíz	Doblado de lado	Micrografía	Dureza
3<t<10	2	2	2	---	---	---
10<t<25	2	---	---	4	---	---
t>25	3	---	---	5	---	---

Fuente: (American Welding Society, 2015)

La norma designa la posición de la extracción de las probetas de acuerdo al ensayo requerido, como se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Extracción de las probetas según los ensayos.

Fuentes: (American Welding Society, 2015)

2.8. Ensayos no destructivos (END)

Los ensayos no destructivos permiten conocer el estado geométrico, mecánico o químico de la pieza, discontinuidades superficiales e internas de materiales, soldadura, elementos fabricados. Las cuatro juntas soldadas se evaluaron mediante, inspección visual, tintas penetrantes y radiografías, según la norma AWS D1.1:2015.

2.8.1. Inspección Visual

La inspección visual, es un método necesario para una junta soldada, con el fin de evaluar las discontinuidades superficiales en el cordón de soldadura, previo a la realización de cualquier otro ensayo. Este ensayo se realizó en las cuatro juntas soldadas en la superficie de la cara y raíz del cordón de soldadura, considerando los criterios de aceptación del código AWS D1.1:2015.

2.8.1.1. Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación según la norma AWS D1.1:2015 para la soldadura en ranura se detallan en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Criterios de aceptación del ensayo de inspección visual.

No	Criterios
1	No se debe aceptar grietas de ninguna dimensión.
2	Todas las mordeduras presentes en la soldadura se deben completar hasta su sección transversal.
3	Debe haber una fusión completa entre el metal base y el metal de aporte. El refuerzo no debe superar los 3 mm.
4	El máximo valor de socavación debe ser de 1 mm.
5	No se acepta grietas, penetración inadecuada o fusión incompleta en la raíz de soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP).
6	La perforación por fusión o concavidad de raíz de un lado sin respaldo en soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP) deben ajustarse a lo siguiente: <ul style="list-style-type: none">• Si el espesor total de la soldadura es igual o mayor al metal base, la concavidad de raíz no debe superar los 2 mm.• La perforación por fusión no debe exceder los 3 mm.

Fuente: (American Welding Society, 2015)

El ensayo de inspección visual se lo realizó a las cuatro juntas soldadas, en la superficie de la cara y raíz del cordón de soldadura, considerando los criterios de aceptación.

2.8.2. Tintas Penetrantes

El ensayo no destructivo de tintas penetrantes, tiene como finalidad evaluar discontinuidades superficiales en el cordón de soldadura. En este trabajo se efectuó este ensayo como complemento de la inspección visual.

- Los criterios de aceptación del ensayo de tintas penetrantes, están sujetos a los criterios de aceptación de inspección visual.
- El ensayo de tintas penetrantes se realizó según la norma ASTM E165, este método estándar que examina líquidos penetrantes en la industria en general, es de tipo II, y método A, correspondiente a tintas visibles, ver la Tabla 2.13, los líquidos usados para el ensayo es del fabricante Met-L-Chek, como se ilustra en la Figura 2.11.

Tabla 2.13. Tipo de tintas penetrantes y método según ASTM E195.

Tipo I- Examinación por penetrante fluorescente		
Método	A.	Lavable con agua.
	B.	Post- emulsificables, lipofílicos.
	C.	Removibles con solventes.
	D.	Post- emulsificable, hidrofílicos.
Tipo II- Examinación por penetrantes visibles		
Método	A.	Lavado con agua.
	B.	Removible con solventes.

Fuente: (ROSAS, 2019)



Figura 2.11. Limpiador o removedor (E -59 A), penetrante visible (VP -30) y revelador (D -70).

(Fuente: Propia, 2020)

Para el ensayo de tintas penetrantes se realizó el siguiente procedimiento:

- Se usa el líquido Met-L-Chek E-59A para retirar polvos, óxidos, aceites, etc, que son los agentes principales que impiden la acción del líquido penetrante, el tiempo de su acción en la superficie soldada es de 10 minutos.
- El líquido Met-L-Chek VP-30, se aplica a una distancia aproximada de 15 cm y permanece en la superficie de soldadura por 12 minutos.
- Se retira la cantidad de tinta en exceso en la junta soldada con una tela de algodón empapada en agua.
- El líquido revelador Met- L- check D-70, se aplica de forma uniforme sobre el cordón de soldadura durante cinco minutos.

Luego de realizar los pasos anteriores, empieza la inspección visual de la junta soldada, por el cual se trata de encontrar discontinuidades superficiales, y posteriormente evaluarlas según el código de la AWS D1.1. Todas las probetas fueron sometidas a este ensayo.

2.8.3. Radiografías

El método de radiografía permite evaluar las condiciones internas de un cordón de soldadura en todo su espesor, a través de radiaciones ionizantes (rayos X o rayos gamma) de elevada penetración, generadas por rayos X o una fuente radioactiva, esta radiación incide sobre una película, generando registros de discontinuidades en la junta soldada.

2.8.3.1. Criterios de aceptación

Las pruebas radiográficas fueron evaluadas de acuerdo a los criterios de aceptación según el código AWS D1.1:2015, (Tabla 2.14).

Tabla 2.14. Criterios de aceptación de discontinuidades ensayo radiografías.

No	Criterios
1	Las discontinuidades alargadas tendrán como máximo el tamaño calculado en la Figura 2.12.
2	La holgura mínima admisible entre los bordes de las discontinuidades será calculada en la Figura 2.12.
3	Las discontinuidades redondeadas superiores a un tamaño máximo de $E/3$, no deben exceder de 6 mm. La separación mínima de las discontinuidades redondeadas que sean mayores o iguales a 2,5 mm hasta una discontinuidad alargada o redondeada aceptable hasta un borde deberá ser tres veces mayor que la dimensión de mayor longitud de las discontinuidades más grandes que estén siendo consideradas.
4	Las discontinuidades aisladas tales como un grupo de indicaciones redondeadas, cuando la suma de sus dimensiones mayores supere el tamaño máximo de discontinuidad permitido en la Figura 2.12. La separación mínima hasta otra discontinuidad agrupada, alargada o redondeada o hasta un borde deberá ser tres veces mayor que la dimensión de mayor longitud de las discontinuidades que estén siendo consideradas.
5	La suma de las discontinuidades individuales, cada una con una dimensión mayor de 2,5 mm no debe exceder de $2E/3$ o 10 mm, cualquiera que sea menor en el tramo lineal de 25 mm de soldadura.
6	Discontinuidades en línea, en las que la suma de las dimensiones más grandes sea mayor que E en cualquier tramo de $6E$ de longitud. Cuando la longitud de la soldadura examinada sea inferior a $6E$, la suma admisible de las dimensiones más grandes debe ser proporcionalmente inferior.

Fuente: (American Welding Society, 2015)

La Figura 2.12, sirve de apoyo para los cálculos de los criterios de aceptación y la Figura 2.13, detalla las dimensiones máximas permitidas de las discontinuidades presentes en radiografía dependiendo del espesor de la placa. Las definiciones de las leyendas de la Figura 2.12 se presentan en la Tabla 2.15. Leyendas de la Figura 2.12.

Tabla 2.15. Leyendas de la Figura 2.12.

Letra	Significado
E	Tamaño de la soldadura.
B	Máximo tamaño admisible de una discontinuidad radiografiada.
C	Holgura mínima admisible medida a lo largo del eje longitudinal de la soldadura entre los bordes de discontinuidades de cualquier tamaño mayor o igual a 2,5 mm.
T	Espesor de la placa para soldaduras en ranura con penetración completa de la junta (CJP).

Fuente: (American Welding Society, 2015)

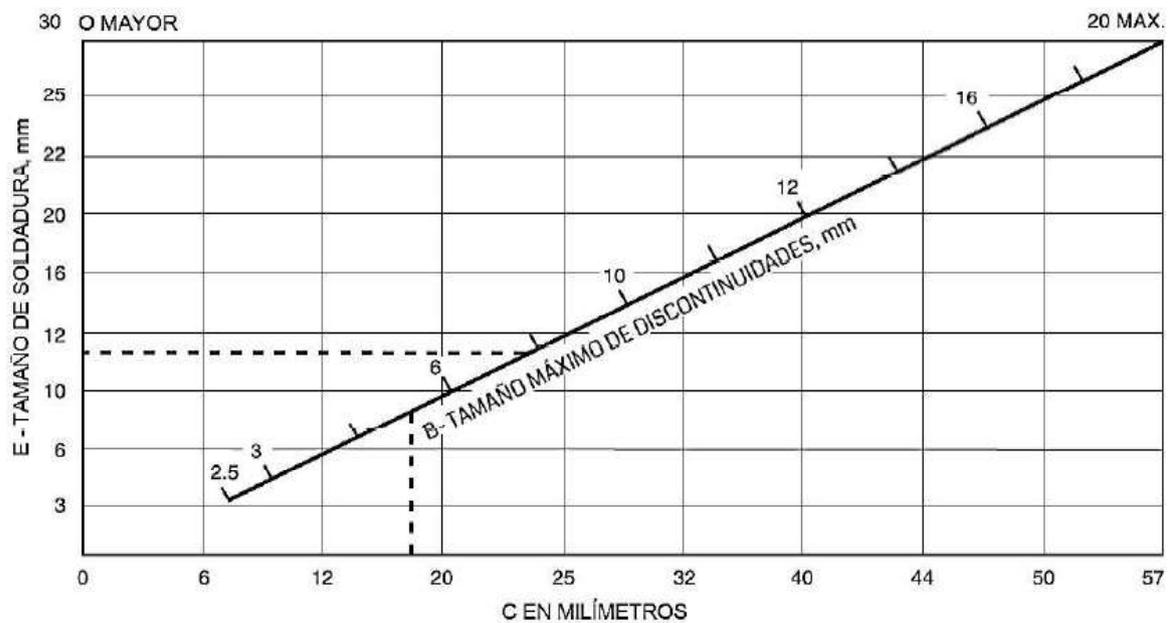


Figura 2.12. Criterios de aceptación de discontinuidades para conexiones no tubulares cargadas estáticamente.

Fuente: (American Welding Society, 2015)

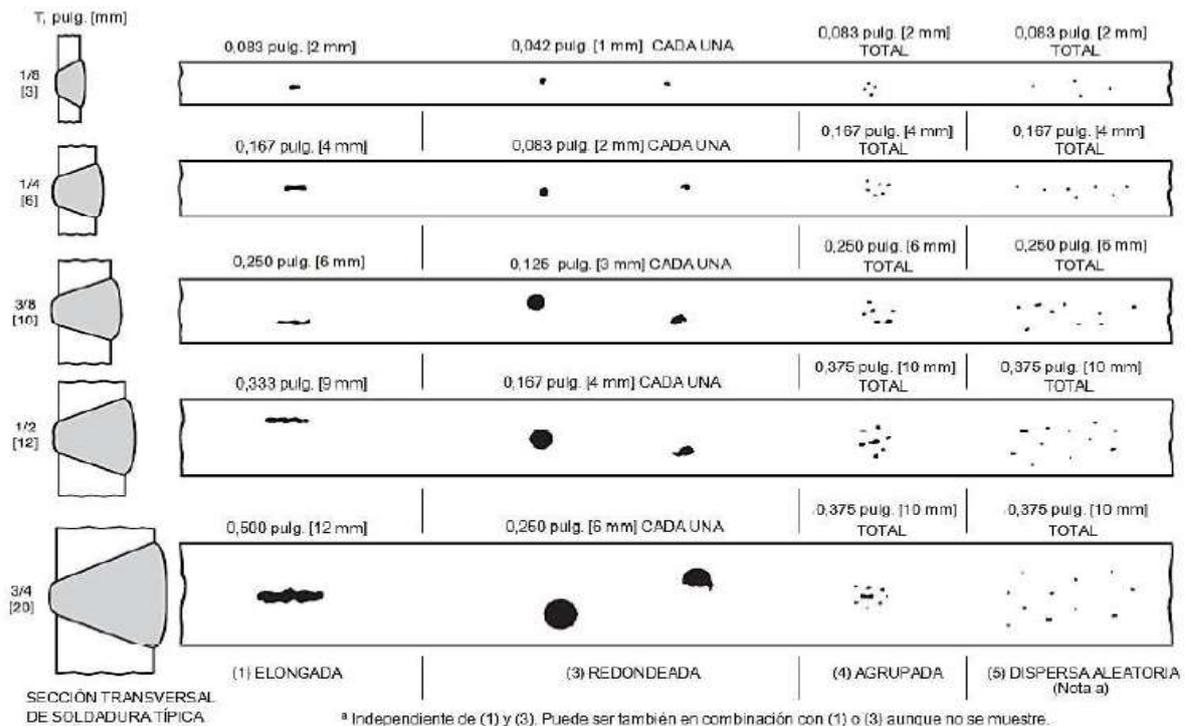


Figura 2.13. Discontinuidades presentes en las radiografías dependiendo del espesor de la placa.

Fuente: (American Welding Society, 2015)

2.8.3.2. Procedimiento

El ensayo de radiografía se realiza en el laboratorio de END en (EPN), considerando los criterios de aceptación según código AWS D1.1:2015. Se utilizó un equipo de rayos X, cuyas características se detallan en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16. Especificación del tubo de rayos catódicos y el equipo de rayos X (Consola de mando).

Características del tubo de rayos catódico		Consola (END)
Marca.	Baltographe BF-200/10	
Potencia.	600 [W]	
Voltaje máximo.	200 [kV]	
Amperaje máximo.	10 [mA]	
Peso.	13 [Kg]	
Flujo de enfriamiento.	0,57 [lt/min]	
Consola de mando		
Marca	Belteau	

(Fuente: Propia, 2020)

Los parámetros necesarios para el funcionamiento del equipo de rayos X previo a las radiografías, como voltaje [Kv], amperaje [mA], y tiempo de exposición [min], se detallan en la Tabla 2.17. Se tomaron dos radiografías en cada uno de las juntas soldadas con el fin de cubrir el cordón de soldadura completamente.

Tabla 2.17. Parámetros de trabajo para toma de radiografías.

Técnica utilizada		Simple pared – simple imagen	
Voltaje [kV]		140	
Amperaje [mA]		5	
Tipo de radiográfica		Tipo II-Structuris D7	
Junta soldada	Toma:	Tiempo de exposición [min]	Distancia a la fuente [cm]
P1	1-A	1	54
	1-B	1	54
P2	2-A	1	54
	2-B	1	54
P3	3-A	1	54
	3-B	1	54
P4	4-A	1	54
	4-B	1	54

(Fuente: Laboratorio de END, 2020)

Al establecer los parámetros para las tomas radiográficas, se procede a preparar el cordón de soldadura de cada cupón según los indicadores de calidad de imágenes (IQI) tipo 1B, nomenclatura designada por el laboratorio de END. Se procede a obtener las radiografías de todas las placas, para posteriormente realizar el procedimiento de película de imagen latente visible mediante diferentes líquidos, los que se ilustran en la Tabla 2.18, considerando los criterios de aceptación para analizar cada toma radiográfica.

Tabla 2.18. Procedimiento de revelado de la película.

Nº	Proceso	Tiempo	Líquido
1	Revelado	5 min	Solución alcalina (PH 10)
2	Baño de parada	2 min	Agua
3	Fijador	10 min	Solución ácida (PH4)
4	Baño de parada	5 min	Agua
5	Secado	30 min	---

(Fuente: Laboratorio de END)

2.9. Ensayos destructivos

Los ensayos destructivos permiten determinar las propiedades mecánicas de la junta soldada mediante la destrucción del cordón de soldadura cuando se aplica el ensayo de tracción en la sección reducida, doblado de cara y raíz y metalografías.

La extracción de las probetas, se realizó mediante la máquina de corte que se detalla en la sección 2.6.2, considerando la secuencia de extracción detallada en la sección 2.6.1. Las nomenclaturas de las probetas se ilustran en la Tabla 2.19, según el ensayo.

Tabla 2.19. Nomenclatura de las probetas para los ensayos mecánicos.

Junta soldada	Ensayo de tensión	Doblado de cara	Doblado de raíz
P1	P1T-1	P1DC1	P1DR1
	P1T-2	P1DC2	P1DR2
P2	P2T-1	P2DC1	P2DR1
	P2T-2	P2DC2	P2DR2
P3	P3T-1	P3DC1	P3DR1
	P3T-2	P3DC2	P3DR2
P4	P4T-1	P4DC1	P4DR1
	P4T-2	P4DC2	P4DR2

(Fuente: Propia, 2020)

2.9.1. Ensayo de tracción en la sección reducida

Mediante este método se conoce la resistencia a la tracción en la junta soldada, se realizó este ensayo en la máquina universal, que se encuentra en el laboratorio análisis de esfuerzo y vibraciones (LAEV).

2.9.1.1. Criterios de aceptación

Las probetas ensayadas de cada una de las juntas soldadas fueron evaluadas bajo los criterios de aceptación según la norma AWS D.1:2015, (ver la Tabla 2.20).

Tabla 2.20. Criterios de aceptación para ensayo

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

Fuente: (American Welding Society, 2015)

2.9.1.2. Preparación de las probetas

La preparación de las probetas consiste, en retirar la sobremonta de cara y raíz en cada una de las 8 probetas obtenidas de las cuatro juntas soldadas, mediante una amoladora y un disco de desbaste, luego se maquina la sección reducida de cada una de las probetas en el laboratorio de máquinas y herramientas, considerando las dimensiones y geometría que se detallan en las figuras 2.14 y 2.15 respectivamente según el código de soldadura de la AWS D1.1.

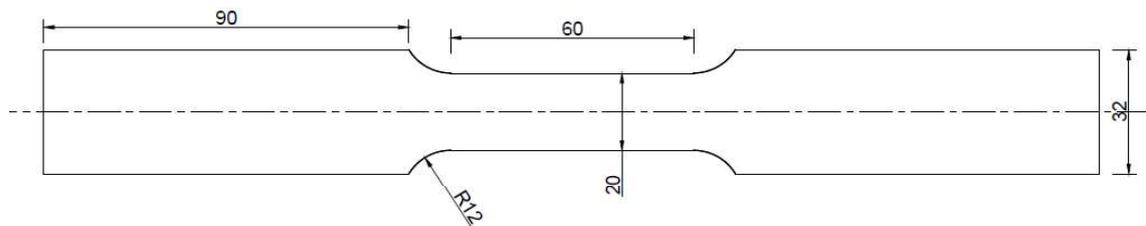


Figura 2.14. Especificación de las medidas según el código de la AWS D1.1.

(Fuente: Propia, 2020)



Figura 2.15. Probetas maquinadas y adecuadas para el ensayo.

(Fuente: Propia, 2020)

2.9.1.3. Procedimiento

El procedimiento para este apartado es el mismo que se emplea en la caracterización del material base en la sección 2.1.2.

2.9.2. Ensayo de doblado de cara y raíz

Con el ensayo de doblado se puede determinar propiedades como: ductilidad y la rigidez en las juntas soldadas. En la Figura 2.16 se detalla la geometría de las probetas según el código de la AWS D1.1



Figura 2.16. Probeta de ensayo de doblado y mecanizada.

(Fuente: Propia, 2020)

2.9.2.1. Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación para este ensayo están en concordancia con el código AWS D1.1:2015 (Tabla 2.21), y facilitaran la evaluación de las probetas ensayadas.

Tabla 2.21. Criterio de aceptación para el ensayo de doblado de cara y raíz según el código AWS D1.1.

Nº	Criterios
1	El tamaño de las discontinuidades superficiales no debe de exceder 3 mm en cualquier dirección.
2	La suma de todas las discontinuidades que se encuentre en el rango de 1 mm a 3 mm no debe exceder a 10 mm.
3	La grieta de borde tendrá una dimensión máxima de 6 mm, excepto cuando se derive de una discontinuidad de fusión o una evidente inclusión de escoria donde tendrá un valor de 3 mm.
4	Las probetas con grietas de borde que excedan 6 mm sin evidencia de inclusiones de escoria u otra discontinuidad de fusión deben descartarse y se debe ensayar una probeta de reemplazo de la soldadura original.

Fuente: (American Welding Society, 2015)

2.9.2.2. Procedimiento

Este ensayo se realizó en el equipo que se encuentra en el laboratorio de análisis de esfuerzo y vibraciones (LAEV) que es el mismo que se usó para el ensayo de tracción de la sección reducida que se encuentra en la sección 2.1.2.

Se debe identificar el cordón de soldadura, luego colocar la probeta en la matriz de la plantilla guía con la soldadura en la mitad del vano. Las probetas de doblado de cara se deben colocar con la cara de la soldadura dirigida hacia la abertura y si es de raíz se coloca la raíz de la soldadura hacia la abertura.

El embolo debe forzar la probeta hacia la matriz hasta que la probeta forme una U. la soldadura debe estar centrada y completamente dentro de la parte doblada, cuando se utiliza la plantilla de envolvente, la probeta debe de estar firmemente sujeta en un extremo de manera que no se deslice durante el ensayo (American Welding Society, 2015)

2.10. Metalografías

El análisis metalográfico se evalúa mediante, micrografías y macrografías que permiten identificar las siguientes zonas en la junta soldada material de base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y material de aporte (MA).

2.10.1. Micrografía

El ensayo micrográfico permite identificar la microestructura interna, es decir la presencia de diferentes zonas que se generan al unir las placas mediante la soldadura; para tener resultados adecuados la superficie debe ser desbastada, pulida y atacada químicamente. La preparación de probetas se realizó de acuerdo a la norma ASTM E3-17.

2.10.1.1. Preparación de la muestra

Las muestras se obtienen por medio de una máquina de corte en frío que utiliza un disco de 14 pulgadas (detallado en la sección 2.6.2), que corta transversal y longitudinalmente el material a ser analizado.

Una vez extraído las muestras se colocan en resina de poliéster con la finalidad de mejorar la manipulación. Para realizar el desbaste grueso se utilizó una lija de lona para metales (óxido de aluminio) de granulometría número 100 colocada sobre una máquina desbastadora (características técnicas detalladas en la Tabla 2.22). Luego se realiza el desbaste fino mediante lijas de agua para metales (carburo de silicio) en el siguiente orden granulométrico: 240, 320, 400, 600 y 1200, y finalmente se realiza un pulido fino de

las muestras con suspensión de diamante de 1 micra y lubricante a base de agua en una máquina automática (especificaciones técnicas Tabla 2.23).

Tabla 2.22. Especificación técnica de la máquina desbastadora.

Especificaciones		Imagen
Marca:	Buehler	
Modelo:	121-OM-84	
Potencia del motor:	1 [PH]	
Voltaje:	220 [V]	
Frecuencia:	60 [Hz]	
Tipo lijas	No 100	

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 2.23. Especificación técnica de la máquina automática de pulido fino.

Especificaciones		Imagen
Marca:	METKON	
Modelo:	FORCIMAT	
Potencia del motor :	150 [W]	
Voltaje:	220 [V]	
Frecuencia:	50-60 [Hz]	
Sistema de sujeción:	Neumático	
Diámetro del plato:	250 [mm]	

(Fuente: Propia, 2020)

Estos mecanismos permiten el desarrollo de la preparación de las muestras, obteniendo superficie planas, brillantes y sin defectos superficiales que perjudiquen el ensayo metalográfico (Figura 2.17).

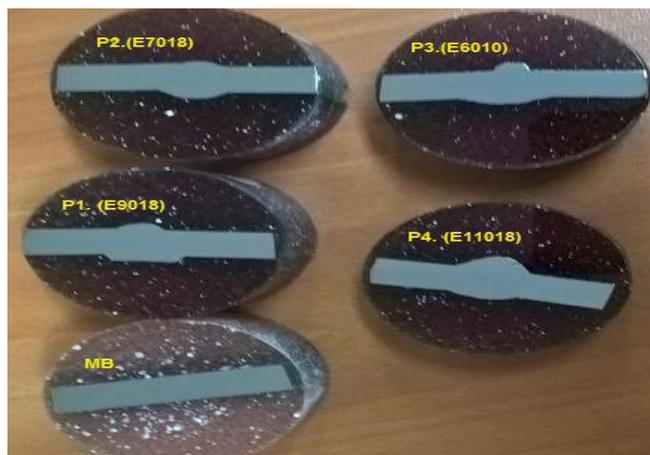


Figura 2.17. Muestras listas para el ensayo de metalografías.

(Fuente: Propia, 2020)

2.10.1.2. Procedimiento

Para llevar a cabo este ensayo, se usa el microscopio cuyas especificaciones técnicas se observan en la Tabla 2. 24, y que se encuentra en el laboratorio de metalografía, desgaste y falla de la FIM – EPN.

Tabla 2. 24. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico invertido.

Especificacion		Imagen
Marca:	OLYMPUS	
Modelo:	GX41F	
Voltaje:	110 [V]	
Rango de magnificacion:	5X, 10X, 20X, 50X, 100X, 500X	
Sistema de iluminaci3n:	Luz hal3gena de 30 [W]	
Sistema de visualizaci3n:	Binocular	
Sistema de enfoque	Manual	
Software:	STREAM ESSENTIALS	

(Fuente: Propia, 2020)

El ensayo empieza con el ataque qu3mico con nital 10% (mezcla de 90 ml de etano y 10 ml de 3cido n3trico), las muestras se sumergen 15 [s] en esta mezcla. Se utiliz3 un microscopio metalogr3fico para observar las muestras de forma secuencial en aumento de 100X y 500X, para analizar la zona del material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y material de aporte (MA), con el fin de conocer la microestructura y el 3rea afectada por el calor.

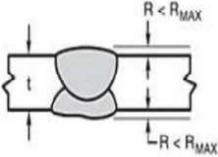
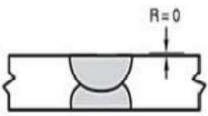
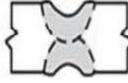
2.10.2. Macrografía (macroscopía óptica)

A través de este método se busca conocer las discontinuidades o defectos en la junta soldada, se utiliza las muestras del ensayo micrográfico.

2.10.2.1. Criterios de aceptación

Se considera los criterios de aceptación del código de la AWS D1.1: 2015 que se ilustran en la Tabla 2.25, para la evaluación visual de las macrografías.

Tabla 2.25. Criterio de aceptación de código de la AWS D1.1 en las macrografías.

Nro.	Criterios
1	No deben existir grietas.
2	La fusión debe ser completa entre el metal base y el metal de aporte
3	El máximo valor de socavación debe ser de 1 mm.
4	El valor de la sobremonta no debe de superar 3 mm. <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>DESEABLE</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>ACEPTABLE</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>INACEPTABLE</p>  </div> </div>

Fuente: (American Welding Society, 2015)

2.10.2.2. Procedimiento

Para llevar a cabo este ensayo se usa un equipo estereomicroscopio trinocular, que se encuentra en laboratorio de metalografía, desgaste y falla de la FIM – EPN, ver la Tabla 2.26.

Tabla 2.26. Especificaciones técnicas de esteromicroscopio trinocular.

Especificaciones		Imagen
Marca:	OLYPMUS	
Modelo:	SZX7	
Voltaje de alimentación:	110 [V]	
Rango de magnificación:	0,4x a 2,8x	
Sistema de iluminación:	Luz halógena de 30[W]	
Sistema de visualización:	Binocular	
Sistema de enfoque:	Manual	
Software:	STREAM ESSENTIALS	

(Fuente: Propia, 2020)

La toma de las imágenes se realizó con aumentos de magnificación de 0,50X y 0,8X, para obtener imágenes en las zonas deseadas área del material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y material de aporte (MA), la dimensión de cara y raíz de la sobremonta, se determinó utilizando el AutoCAD 2014.

2.11. Ensayo de barrido dureza superficial

Este ensayo se realizó sobre las cuatro muestras para determinar la dureza superficial del material usando la escala Rockwell B, mediante el método de indentación.

2.11.1. Preparación de las muestras

Las muestras se cortaron con la máquina que se detalla en la sección 2.6.2, (Figura 2.18).



Figura 2.18. Muestras para el ensayo de barrido de dureza superficial.

(Fuente: Propia, 2020)

2.11.2. Procedimiento

El equipo que se detalló en la sección 2.1.3, es usado en este ensayo, el procedimiento consiste en colocar la muestra cerca al indentador hasta hacer contacto entre sí, para aplicar una carga de 10 [Kgf], seguida de otra carga de 100 [Kgf] para obtener la indentación. En el indicador analógico se aprecia el valor de la dureza según la escala Rockwell B, este procedimiento se realiza en las cuatro probetas con un muestreo de ocho mediciones, como se puede apreciar en la Figura 2.19.



Figura 2.19. Representación esquemática de las mediciones de dureza.

(Fuente: Propia, 2020)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se detalla los resultados de la caracterización del material base, y materiales de aporte, una vez realizado los ensayos no destructivos (inspección visual, tintas penetrantes, y radiografía), mecánicos (tracción, doblado de cara y raíz), micrografías, macrografías y análisis de dureza superficial del cordón de la junta soldada lo que conlleva a determinar el procedimiento más adecuado para soldar un acero anti abrasivo mediante el proceso SMAW.

3.1. Resultados de la caracterización del material base

En este apartado se detallan los resultados de los ensayos de: espectrometría, dureza, tracción, micrografías del material base.

3.1.1. Ensayo de espectrometría por chispa

Los resultados de este ensayo sobre el material base, se observa en la Tabla 3.1, En el Anexo I se encuentra el informe entregado por el Laboratorio de Fundición.

Tabla 3.1. Comparación de la composición química del material base.

Composición química.		
Elementos	Real [%]	Valores máximo del fabricante [%]
Carbono [C]	0,15	0,15
Silicio [Si]	$4,61 \times 10^{-1}$	0,07
Manganeso [Mn]	0,98	1,60
Fosforo [P]	0,02	0,25
Azufre [S]	$7,30 \times 10^{-3}$	0,01
Cromo [Cr]	0,31	0,50
Molibdeno [Mo]	0,22	0,25
Níquel [Ni]	$3,90 \times 10^{-2}$	0,25
Cobre [Cu]	$2,20 \times 10^{-2}$	---
Cobalto [Co]	$5,90 \times 10^{-3}$	---
Vanadio [V]	$<3,00 \times 10^{-3}$	---
Wolframio [W]	<0,02	---
Hierro [Fe]	97,98	

(Fuente: Propia, 2020)

En la Tabla 3.2 se detalla una comparación de carbono equivalente químico, carbono total y la temperatura de precalentamiento mediante los valores reales y valores del fabricante.

Tabla 3.2. Temperatura promedio de precalentamiento del acero anti abrasivo.

Comparación de valores reales y fabricante.			
Carbono equivalente	CE_q	CE_T	T_p (°C)
Valores reales	$29,74 \times 10^{-2}$	$30,63 \times 10^{-2}$	83,00
Valores el fabricante uno.	$41,67 \times 10^{-2}$	$41,29 \times 10^{-2}$	148,00
Temperatura precalentamiento promedio	T_{pm}		115,00

(Fuente: Propia, 2020)

De acuerdo a los valores obtenidos para la composición química del acero anti abrasivo, esto corresponden al acero chronit T-1 400, ya que se encuentran dentro de los valores establecidos por el fabricante, por lo tanto se trata de un acero de alta resistencia.

3.1.2. Ensayo de dureza del material base

El acero anti abrasivo de grado 400 tiene un rango de 360- 430 [HBW] establecido por el fabricante, en la Figura 3.1, se puede observar que el acero que se empleó para este trabajo tiene un valor de dureza que se encuentra dentro del intervalo establecido por el fabricante.

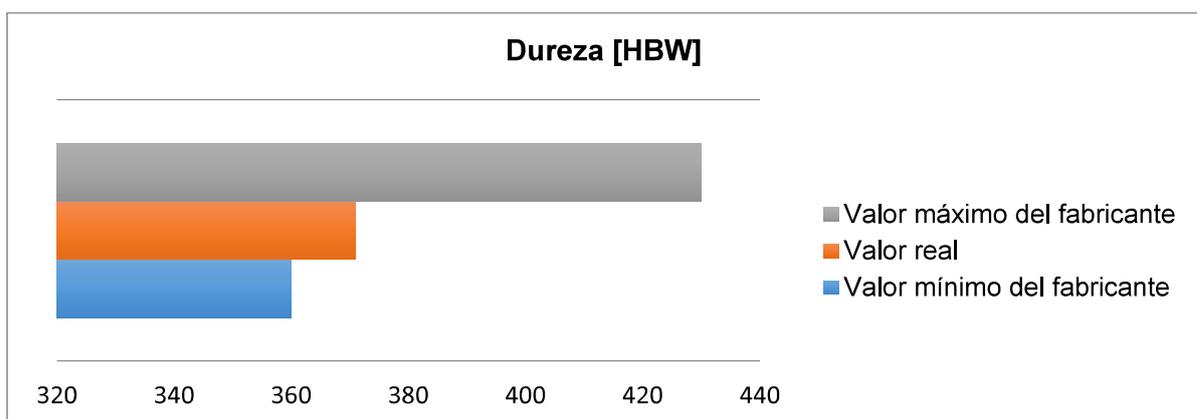


Figura 3.1. Dureza del acero anti abrasivo de grado 400.

(Fuente Propia, 2020)

3.1.3. Ensayo de tracción

Los resultados del ensayo de tracción del material base se detallan en la Tabla 3.3, se puede observar que estos valores de resistencia a la tracción se encuentran en el rango dado por el fabricante (1000 a 1250) [MPa], como se ilustra en la Figura 3. 2. El informe completo entregado por el (LAEV) se encuentra en el Anexo II.

Tabla 3.3. Resultados del ensayo de tracción del material base.

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50
	[mm]	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]	[Ksi]	[MPa]	[mm]
T-1	16,06	6,04	23695	105401	155,4	1071	157,70	1087	11,40
T-2	15,48	6,08	23092	102718	153,1	1056	158,30	1091	13,10

(Fuente: Propia, 2020)

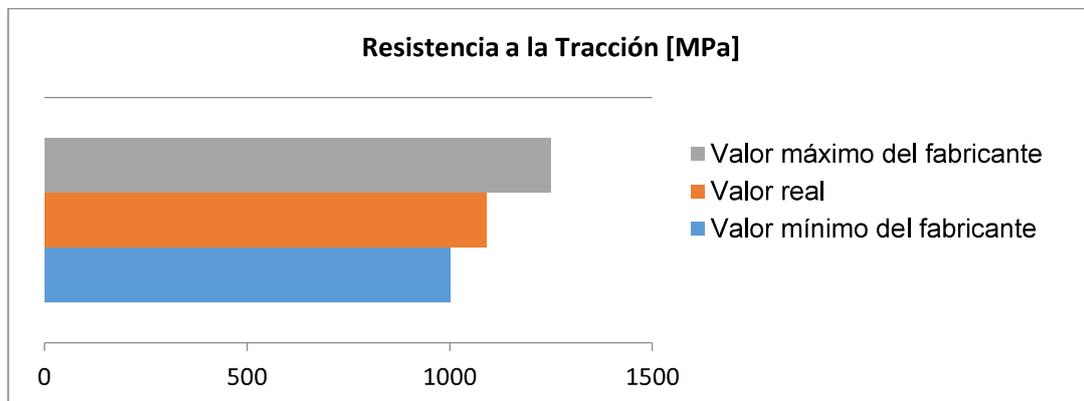


Figura 3. 2. Resistencia a la tracción dela acero anti abrasivo grado 400.

(Fuente: Propia, 2020)

Los diagramas que se detallan en Figura 3.3 y Figura 3.4 se los determinó en base a la carga que soportaron cada probeta en el ensayo de tracción.

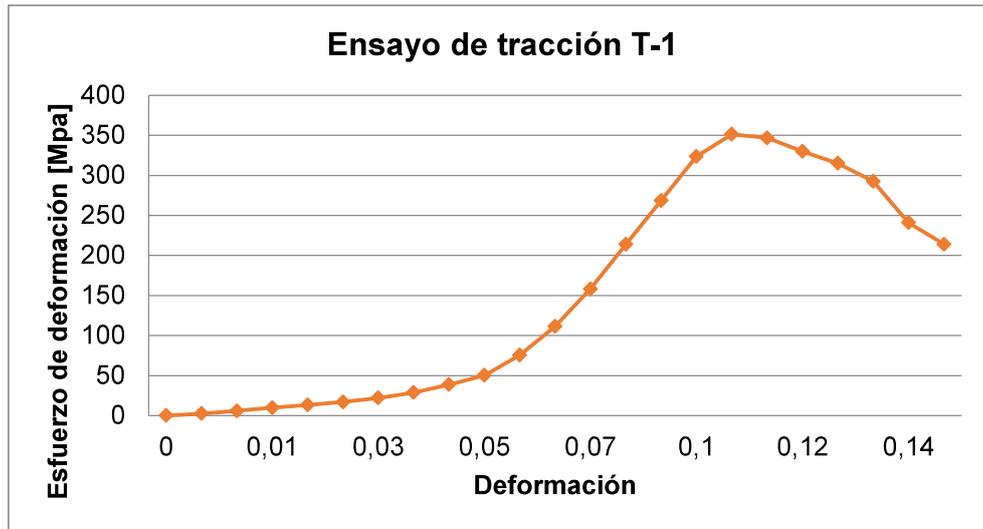


Figura 3.3. Diagrama esfuerzo Vs deformación de P1.

(Fuente: Propia, 2020)

En el diagrama esfuerzo vs deformación del ensayo de tracción para la probeta P1 del material de base, se puede observar que a partir del 6% se incrementa el valor de la resistencia linealmente hasta un valor de 341,11 [MPa], para luego llegar al valor máximo de 342,29 [MPa] en la deformación máxima del 11,4%

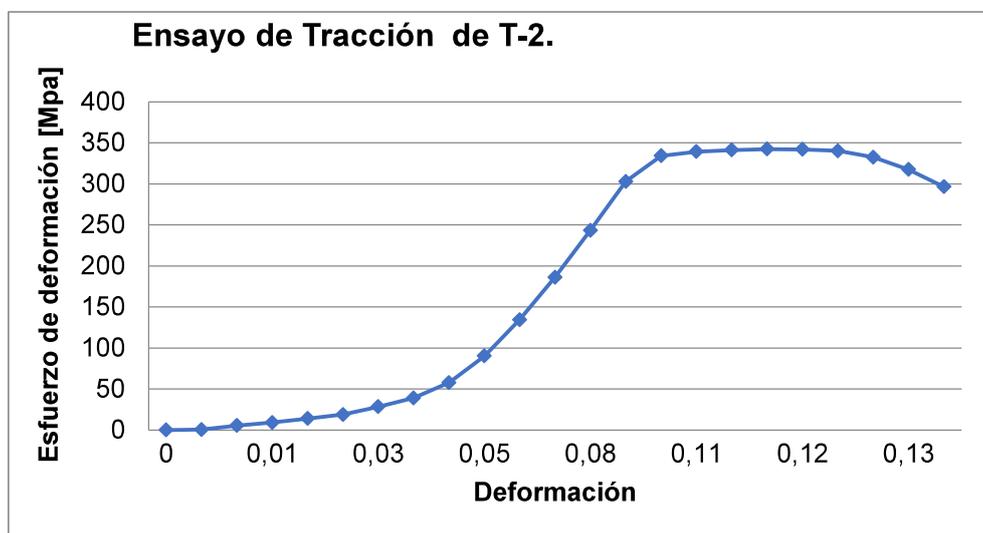


Figura 3.4. Diagrama esfuerzo Vs deformación de P2.

(Fuente: Propia, 2020)

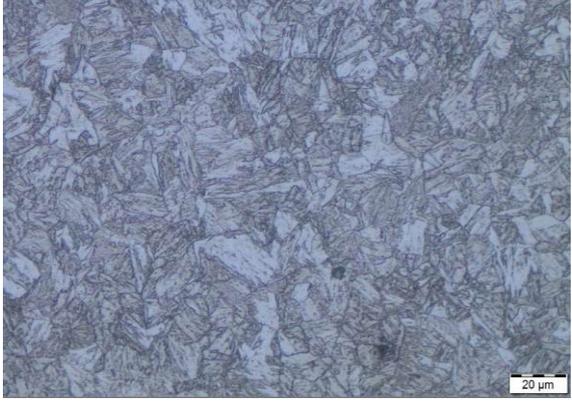
En el diagrama esfuerzo deformación para la probeta P2 del material base, se puede observar que a partir del 5% se incrementa el valor de la resistencia linealmente hasta un

valor de 323,68 [MPa], para luego llegar al valor máximo de 351,33 [MPa] en la deformación máxima del 13,10%.

3.1.4. Resultado del ensayo de micrografías

El material base es sometido al ensayo de micrografía para conocer su estructura interna en la Tabla 3.4, se detallan las fases que forman este acero anti abrasivo de grado 400.

Tabla 3.4. Resultado del ensayo de micrografía del material base (MB).

Muestra:	Imagen	Observaciones
MB		En la micrografía del material base con un aumento de 500X, cuya microestructura es martensítica con óxidos.

(Fuente: Propia, 2020)

3.2. Parámetros del proceso de soldadura (SMAW)

En este apartado se detallan las variables de soldadura usadas en cada uno de los pase y además el calor entregado durante el proceso de soldadura.

3.2.1. Calor entregado durante el proceso

El calor que se entrega (Q_e) en el proceso de soldadura SMAW, se calcula con la Ecuación 3.1.

$$Q_e = \frac{0,06 * I * V}{V_a} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right]$$

Ecuación 3.1.

Dónde:

Q_e = Energía suministrada por unidad de longitud soldada [kJ/mm]

I = Intensidad de corriente [A]

V = Voltaje del arco [(V)]

V_a = Velocidad de avance [mm/min]

Factor= 0, 06 [s*kJ/min*J]

3.2.2. Resultados de las variable de soldadura

El diámetro de los cuatro electrodos usados en cada una de las juntas soldadas es de 1/8 de pulgada y el tipo de polaridad empleada es DC+, el resumen del primero, segundo y tercer pase en las juntas se detalla en las Tablas 3.5, 3.6 y 3.7 respectivamente.

3.2.2.1. Resumen del primer pase en cada una de las juntas

Tabla 3.5. Resultado del primer pase para cada una de la juntas.

Variables del primer pase de cada junta.						
Juntas soldadas	Electrodo AWS5.1/ AWS5.5	Temperatura Tp.	Corriente	Voltaje	Velocidad de soldadura	Calor entregado (Qe)
		[°C]	[A]	[V]	[mm/min]	[kJ/mm]
P1.	E9018	135,00	74,00	20,30	39,90	2,25
P2.	E7018	125,00	79,00	19,17	79,59	1,14
P3.	E6010	115,00	45,00	22,12	39,95	1,49
P4.	E11018	145,00	85,00	21,05	47,89	2,29

(Fuente: Propia, 2020)

3.2.2.2. Resumen del segundo pase en cada una de las juntas

Tabla 3.6. Resultado del segundo pase para cada una de la juntas.

Variables del segundo pase de cada junta.						
Juntas soldadas	Electrodo AWS5.1/ AWS5.5	Temperatura Tp.	Corriente	Voltaje	Velocidad de soldadura	Calor entregado (Qe)
		[°C]	[A]	[V]	[mm/min]	[kJ/mm]
P1.	E9018	145,00	110,00	21,93	79,82	1,81
P2.	E7018	135,00	110,00	21,16	79,76	1,75
P3.	E6010	125,00	80,00	29,00	119,92	1,16
P4.	E11018	155,00	95,00	22,40	47,97	2,66

(Fuente: Propia, 2020)

3.2.2.3. Resumen del tercer pase en cada una de las juntas

Tabla 3.7. Resultado del tercer pase para cada una de la juntas.

Variables del tercer pase de cada junta.						
Juntas soldadas	Electrodo AWS5.1/ AWS5.5	Temperatura Tp.	Corriente	Voltaje	Velocidad de soldadura	Calor entregado (Qe)
		[°C]	[A]	[V]	[mm/min]	[kJ/mm]
P1.	E9018	155,00	121,00	24,00	79,84	2,17
P2.	E7018	145,00	126,00	23,00	59,76	2,96
P3.	E6010	135,00	145,00	23,00	79,71	2,48
P4.	E11018	165,00	107,00	24,00	47,84	3,15

(Fuente: Propia, 2020)

Con los resultados obtenidos del calor entregado (Qe) en cada uno de los pases, se puede obtener el total (Qt) en cada una de las juntas soldadas como se ilustra en la Tabla 3.8, y relacionar con la cantidad de calor entregada al área de la zona afectada térmicamente.

Tabla 3.8. Resultado del promedio del calor entregado en cada junta.

Junta soldada	Electrodos	Calor entregado [kJ/mm]
P1	AWS 5.5 E9018	6,23
P2	AWS 5.1 E7018	5,85
P3	AWS 5.1 E6010	5,13
P4	AWS 5.5 E11018	8,05

(Fuente: Propia, 2020)

3.3. Resultado de los ensayos no destructivos

En este apartado se presenta los resultado de los ensayos de inspección visual, tintas penetrantes y radiografías, del acero anti abrasivo.

3.3.1. Inspección Visual

Un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de inspección visual del cordón de soldadura de las cuatro juntas, se ilustra en la Tabla 3.9, el informe completo se encuentra en el Anexo III, entregado por el Laboratorio de Ensayos no Destructivos.

Tabla 3.9. Resultado de inspección visual de los cuatro cupones.

Junta soldada	Discontinuidades detectadas		Descripción	Clasificación según AWS D1.1
	Cara	Raíz		
P1. (E9018)	No	Si	Falta de penetración al inicio de la junta	Aprueba
P2. (E7018)	Si	Si	Poros de 7 mm de diámetro	Aprueba
P3. (E6010)	Si	No	Falta de fusión en el inicio de la junta	Aprueba
P4. (E11018)	Si	Si	Falta de fusión al inicio de la junta.	Aprueba

(Fuente: Propia, 2020)

3.3.2. Tintas penetrantes

Los resultados del ensayo de tintas penetrantes se detallan en el Anexo III, informe completo entregado por el Laboratorio de Ensayos no Destructivos. En la Tabla 3.10, se ilustra los valores obtenidos de las 4 juntas soldadas.

Tabla 3.10. Resultados del ensayo de tintas penetrantes.

Id.	Imágenes.	Observación	Calificación según la AWS D1.1.
2019-R24-LP-10-P1 (E9018)	 <p data-bbox="392 701 852 768">Cara del cordón de soldadura. P1-A</p>	No se observó indicaciones en la Superficie A.	Aceptada
	 <p data-bbox="392 1064 852 1104">Raíz del cordón de soldadura.P1-B</p>	Se observó en P1-B, cinco manchas redondeadas en la base del cordón de soldadura, de 6 mm, 3 mm, 4 mm, 3 mm y 2 mm respectivamente.	
2019-R24-LP-10-P2. (E7018)	 <p data-bbox="392 1442 852 1503">Cara del cordón de soldadura. P2-A</p>	Se observó una mancha redondeada de 7 mm de diámetro en P2-A	Aceptada
	 <p data-bbox="392 1859 852 1899">Raíz del cordón de soldadura.P2-B</p>	Se observó 7 manchas, 1 mancha alargada de 16 mm al inicio de la base del cordón, y 6 manchas redondeadas de 2 mm, 5mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 4 mm y 5,5 mm de diámetro, en P2-B.	

Continuación Tabla 3.10.

Id.	Imágenes.	Observación	Calificación según la AWS D1.1.
2019-R24-LP-10-P3. (E6010)	 <p data-bbox="392 763 852 824">Cara del cordón de soldadura. P3-A</p>	Se observó 7 manchas redondeadas de 6 mm, 5 mm, 4 mm, 4 mm, 3 mm, 3 mm, 4 mm de diámetro en P3-A.	Aceptada
	 <p data-bbox="392 1167 852 1196">Raíz del cordón de soldadura.P3-B</p>	Se observó 3 manchas, una redondeada de 3 mm y dos alargadas de 10 mm y de 18 mm de diámetro	
2019-R24-LP-10-P4. (E11018)	 <p data-bbox="392 1532 852 1592">Cara del cordón de soldadura. P4-A</p>	No se observó indicaciones en P4-A.	Aceptada
	 <p data-bbox="392 1926 852 1955">Raíz del cordón de soldadura.P4-B</p>	Se observó 5 manchas redondeadas de 4 mm, 3 mm, de 3 mm, 6 mm y 4 mm de diámetro, en P4-B.	

(Fuente: Propia, 2020)

En la Tabla 3.11 se detalla un resumen del ensayo de tintas penetrantes de las cuatro juntas soldadas con distintos materiales de aporte en el informe completo se encuentra en el Anexo III, entregado por el Laboratorio de Ensayos no Destructivos

Tabla 3.11 Resultado del ensayo de tintas penetrantes.

Junta soldada	Discontinuidades detectadas		Descripción	Clasificación según AWS D1.1
	Cara	Raíz		
P1. (E9018)	No	Si	Se encuentra indicaciones redondas de 6 mm, 3 mm, 4 mm, 3 mm y 2 mm	Aprueba
P2. (E7018)	Si	Si	En la cara una indicación de 7mm y en la raíz una mancha de 16mm alargada y redondas de diámetro 2 mm, 5 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 4 mm y 5 mm.	Aprueba
P3. (E6010)	Si	No	Se observa manchas redondas tanto en la cara como raíz.	Aprueba
P4. (E11018)	Si	Si	En la raíz indica una mancha redonda.	Aprueba

(Fuente: Propia, 2020)

3.3.3. Radiografías

La información completa del ensayo de radiografía entregado por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos se detalla en el Anexo IV. En la Tabla 3.12, se resume el resultado de las cuatro juntas soldadas.

Tabla 3.12. Discontinuidades detectadas en la inspección radiográfica de las juntas.

Junta soldada	Discontinuidades detectadas	Tomas realizada				Calificación según la AWS D1.1.
		A		B		
		1	2	1	2	
		Distancia desde el extremo izquierdo	Dimensión	Distancia desde el extremo izquierdo	Dimensión	
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
P1.	Inclusión de escoria.	22,00	10,00	64,00	2,00	Aceptada
		17,00	5,00	200,00	2,00	
193,00		2,00				
	Porosidad	62,00	1,00	---	---	
P2.	Penetración excesiva	120,00	22,00	---	---	Rechazada
	Inclusión de escoria	40,00	40,00			
		60,00	60,00	5,00	40,00	
		181,00	40,00			
	Porosidad	---	---	185,00	1,50	
				195,00	3,50	
P3	Fusión incompleta	135,00	15,00	40,00	35,00	Rechazada
	Inclusión de escoria			135,00	10,00	
				157,00	68,00	
		10,00	20,00			
		22,00	18,00			
		46,00	7,00			
		60,00	73,00			
		86,00	24,00	200,00		
142,00	10,00		15,00			
180,00	5,00					
194,00	1,00					
	Porosidad	20,00	3,00	---	---	
	Nido de poros	0,00	15,00	---	---	
P4	Fusión incompleta	0,00	70,00	20,00	47,00	Rechazada
	Inclusión de escoria	92,00	108,00			
		---	---	70,00	12,00	
				97,00	125,00	

(Fuente: Propia, 2020)

3.4. Resultados de los ensayos destructivos

En esta sección se presenta los resultados de: tracción de sección reducida, doblado de cara y raíz, barrido de dureza, micrografías y macrografías realizados sobre las cuatro juntas soldadas.

3.4.1. Ensayo de tracción de las juntas soldadas

La Tabla 3.13, presenta los resultados obtenidos del ensayo de tracción de la sección reducida en las probetas normalizadas, que fueron soldadas con cuatro electrodos distintos (AWS A5.5 Clase E9018-B, AWS A5.5 E7018, AWS A5.1E6010, AWS A5.5E11018). El informe completo entregado por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzo y Vibraciones (LAEV) se detalla en el Anexo V.

Tabla 3.13. Resultados de resistencia obtenido en el ensayo de tracción.

Junta soldada.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia de tracción		Obs.
	[mm]	[mm]	[Lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]	
P1T-1	20,19	5,97	16525,00	73505,00	88,40	609,80	FMB
P1T-2	19,88	6,02	17477,00	77740,00	94,20	649,60	FMB
P2T-1	19,81	5,90	16069,00	71477,00	88,70	611,60	FMB
P2T-2	20,04	5,83	15761,00	10108,00	87,00	600,10	FJS
P3T-1	19,92	5,89	16469,00	73257,00	90,60	624,40	FMB
P3T-2	20,00	5,90	16401,00	72957,00	89,70	618,30	FJS
P4T-1	19,91	6,05	17261,00	76782,00	92,50	637,40	FMB
P4T-2	19,92	5,95	15980,00	71084,00	87,00	599,70	FMB
FMB	Falla material base.						
FJS	Falla en la junta soldada.						

(Fuente: LAEV, 2020)

El resumen del ensayo de tracción de las ocho probetas que se extrajeron de las cuatro placas soldadas con distintos electrodos, se detallan en la Tabla 3.14, su aprobación se realizó en base los criterios de aceptación según el código de la AWS D1.1. En la Figura 3.5, se evidencia la sección donde fallaron las probetas durante el ensayo.

Tabla 3.14. Resumen de tracción en la sección reducida de 16 probetas.

Resumen del ensayo de tracción de las ocho probetas.					
Electrodo	Junta soldada	Carga máxima registrada	Promedio resistencia de tracción	Obs.	Calificación según la AWS D1.1.
		[N]	[MPa]		
E9018	P1T-1	73505	629,70	FMB	Rechaza
	P1T-2	77740		FMB	
E7018	P2T-1	71477	605,85	FMB	Rechaza
	P2T-2	10108		FJS	
E6010	P3T-1	73257	621,35	FMB	Rechaza
	P3T-2	72957		FJS	
E10018	P4T-1	76782	618,55	FMB	Rechaza
	P4T-2	71084		FMB	

(Fuente: Propia, 2020)



Figura 3.5. Probetas luego del ensayo de tracción.

(Fuente: Propia, 2020)

En la Figura 3.6 se compara el valor del esfuerzo máximo del material base con las probetas de las juntas soldadas, P2 y P3, con materiales de aporte que pertenecen a la clase AWS. A5.1 y precalentadas a 115°C y 125°C respectivamente.

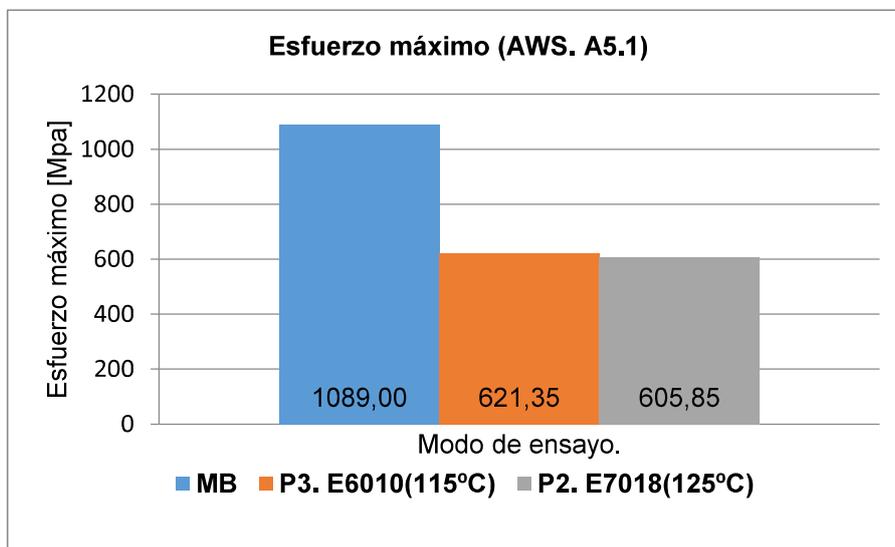


Figura 3.6. Comparación del esfuerzo máximo del material base y las juntas soldadas con electrodos de la clase AWS. A5.1.

(Fuente: Propia, 2020)

En la Figura 3.7 se compara el valor del esfuerzo máximo del material base con las probetas de las juntas soldadas, P1 y P4, con material de aporte que pertenecen a la clase AWS. A5.5 y precalentadas a 135°C y 145°C respectivamente.

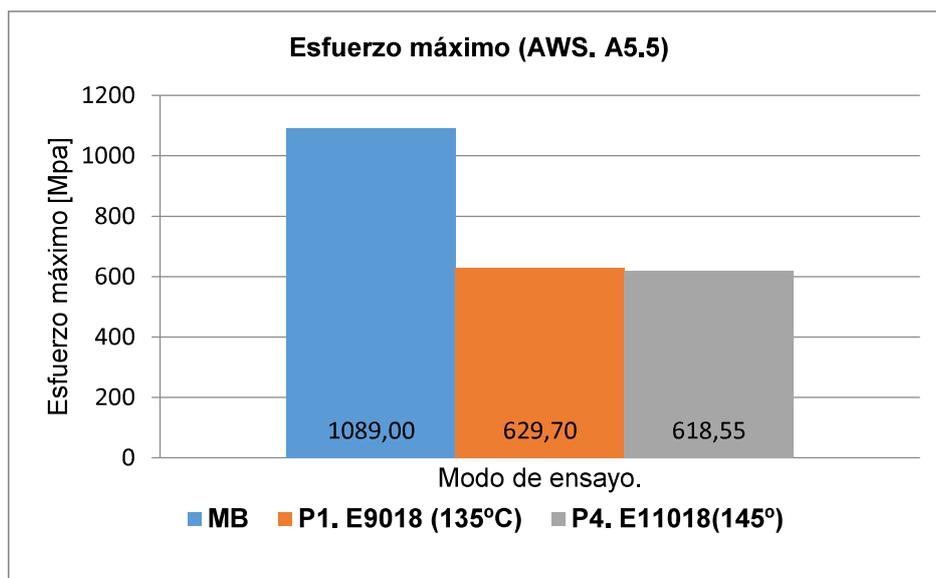


Figura 3.7 Comparación del esfuerzo máximo del material base y las juntas soldada con electrodos de la clase AWS. A5.5.

(Fuente: Propia, 2020)

En la Figura 3.8 se compara el valor del esfuerzo máximo del material base con las juntas soldadas, P1 y P3, con materiales de aporte que pertenecen a la clase AWS. A5.1 y la AWS. A5.5 que fueron precalentadas a 135°C y 115°C respectivamente.

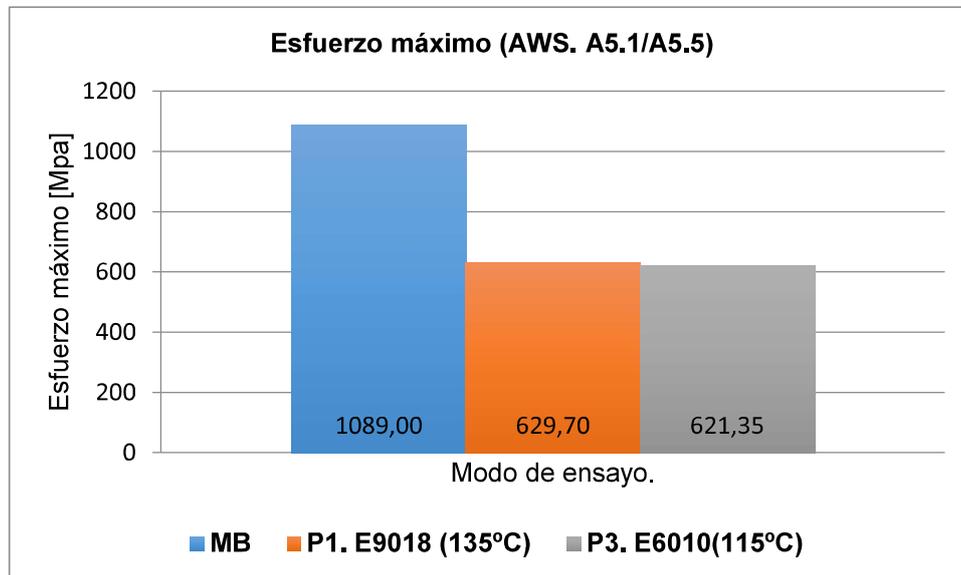


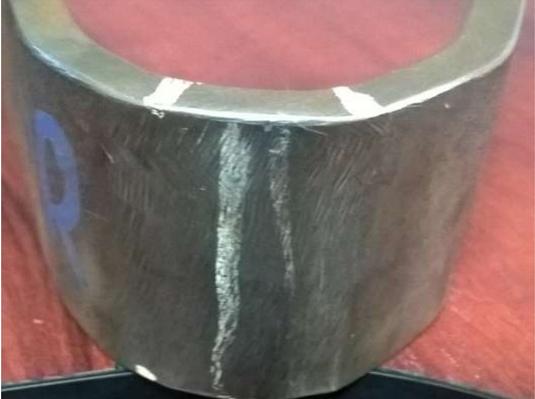
Figura 3.8. Comparación del esfuerzo máximo del material base y las juntas soldada con electrodos de la clase AWS. A5.1/AWS.A5.5.

(Fuente. Apropia, 2020)

3.4.2. Doblado de cara y raíz de la junta soldada

Para el ensayo de doblado de cara y raíz se utilizó 4 juntas soldadas, de donde se obtuvieron cuatro probetas de cada una, dos para doblado de cara y dos para doblado de raíz, dando un total de 16 probetas. Los resultados obtenidos en las muestras se detallan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Resultados obtenido de la junta soldada P1 (E9018).

Probetas		Junta soldada P1. Zona de inspección	Observaciones.
Doblado de cara	P1DC1		Discontinuidad de 2,35 mm en el cordón de soldadura.
	P1DC2		No se observa discontinuidades en el cordón de soldadura.
Doblado de raíz	P1DR1		Pequeñas estrías debido al proceso de doblado.
	P1DR2		No se observa discontinuidades en el cordón de soldadura.

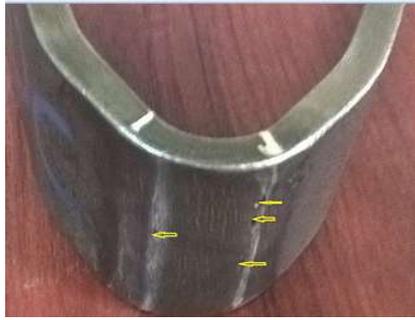
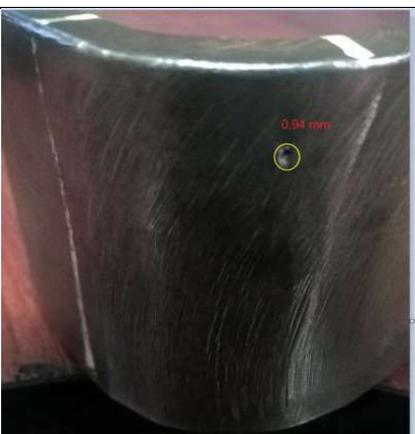
(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 3.16. Resultados obtenido de la junta soldada P2 (E7018).

Probetas		Junta soldada P2. Zona de inspección	Observaciones.
Doblado de cara	P2DC1		Pequeñas estrías debido al proceso de doblado.
	P2DC2		No se observa discontinuidades en el cordón de soldadura.
Doblado de raíz	P2DR1		Pequeñas estrías debido al proceso de doblado.
	P2DR2		Discontinuidad de 0,61 mm en el cordón de soldadura.

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 3.17. Resultados obtenido de la junta soldada P3 (E6060).

Probetas		Junta soldada P3. Zona de inspección	Observaciones.
Doblado de cara	P3DC1		Existen pequeñas estrías debido al proceso de doblado.
	P3DC2		Discontinuidad de 0,94 mm en el cordón de soldadura.
Doblado de raíz	P3DR1		Estrías debido al proceso de doblado.
	P3DR2		Discontinuidad de 0,94 mm en el cordón de soldadura.

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 3.18. Resultados obtenido de la junta soldada P4 (E11018).

Probetas		Junta soldada P4. Zona de inspección	Observaciones.
Doblado de cara	P4DC1		Estrías debido al proceso de doblado.
	P4DC2		Estrías debido al proceso de doblado.
Doblado de raíz	P4DR1		Estrías debido al proceso de doblado.
	P4DR2		Estrías debido al proceso de doblado.

(Fuente: Propia, 2020)

En la Tabla 3.19 se detalla un resumen con dimensiones de las discontinuidades detectadas en el ensayo de doblado de cara y raíz de las 16 muestras ensayadas y el criterio de aprobación.

Tabla 3.19. Resúmenes del ensayo de doblado de cara y raíz.

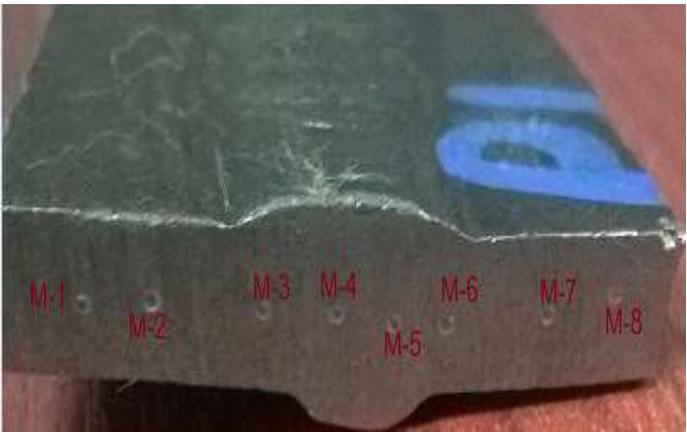
Junta soldada	Probeta	Discontinuidades detectadas	Descripción	Calificación según AWS D1.1.
P1.(E9018)	P1DC1	Si	Discontinuidad de 2,35 mm en el cordón de soldadura.	Aceptada
	P1DC2	No	N/A	
	P1DR1	No	N/A	
	P1DR2	No	N/A	
P2.(E7018)	P2DC1	No	N/A	Aceptada
	P2DC2	No	N/A	
	P2DR1	No	N/A	
	P2DR2	Si	Discontinuidad de 0,61 mm en el cordón de soldadura.	
P3.(E6010)	P3DC1	No	N/A	Aceptada
	P3DC2	No	N/A	
	P3DR1	No	N/A	
	P3DR2	Si	Discontinuidad de 0,94 mm en el cordón de soldadura.	
P4.(E11018)	P4DC1	No	N/A	Aceptada
	P4DC2	No	N/A	
	P4DR1	No	N/A	
	P4DR2	No	N/A	

(Fuente: Propia, 2020)

3.4.3. El ensayo de barrido de dureza

Los resultados de dureza de cada junta soldada se detallan en las tablas 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23. Las zonas de medición de la dureza se realizaron en el material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y material de aporte (MA).

Tabla 3.20. Resultado de barrido de dureza de la muestra P1.

Muestra D-P1(E9018)			Imagen.
No	Dureza [HRB]	Zona	
M-1	90,00	MB	
M-2	87,00	MB	
M-3	89,00	ZAC	
M-4	89,00	MA	
M-5	88,50	MA	
M-6	90,50	ZAC	
M-7	86,00	MB	
M-8	88,00	MB	

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 3.21. Resultado de barrido de dureza de la muestra P2.

Muestra D-P2 (E7018)			Imagen.
No	Dureza [HRB]	Zona	
M-1	91,00	MB	
M-2	89,00	MB	
M-3	84,00	ZAC	
M-4	82,00	MA	
M-5	82,50	MA	
M-6	88,00	ZAC	
M-7	91,00	MB	
M-8	92,00	MB	

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 3.22. Resultado de barrido de dureza de la muestra P3.

Muestra D-P3 (E6010)			Imagen.
No	Dureza [HRB]	Zona	
M-1	93,00	MB	
M-2	88,00	MB	
M-3	87,50	ZAC	
M-4	82,00	MA	
M-5	83,00	MA	
M-6	85,00	ZAC	
M-7	90,00	MB	
M-8	91,00	MB	

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 3.23. Resultado de barrido de dureza de la muestra P4.

Muestra D-P4 (E11018)			Imagen.
No	Dureza [HRB]	Zona	
M-1	93,00	MB	
M-2	86,00	MB	
M-3	90,00	ZAC	
M-4	88,00	MA	
M-5	89,00	MA	
M-6	91,00	ZAC	
M-7	88,00	MB	
M-8	92,00	MB	

(Fuente: Propia, 2020)

En la Tabla 3.24 se detalla el resumen del barrido de dureza en las zonas del material base (MB), en la zona afectada por el calor (ZAC) y en la zona del material de aporte (MA). Se realiza la comparación de las cuatro muestras para conocer cuál de ellas presenta un comportamiento homogéneo respecto a la dureza inicial del metal base, (Figura 3.9).

Tabla 3.24. Resumen de barrido de dureza en las diferentes zonas.

Muestras	MB	ZAC	MA
P1 (E9018)	87,75	89,75	88,75
P2 (E7018)	90,75	86,00	82,25
P3 (6010)	90,50	86,25	82,50
P4 (E11018)	92,00	90,50	88,50

(Fuente: Propia, 2020)

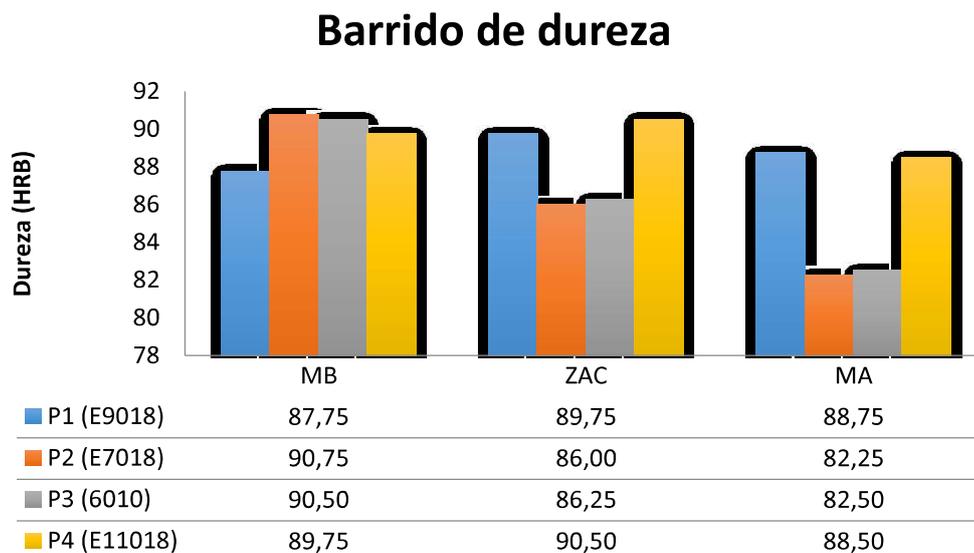


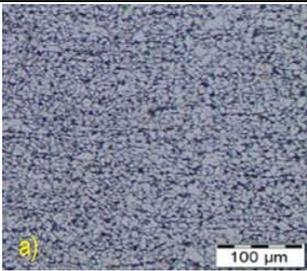
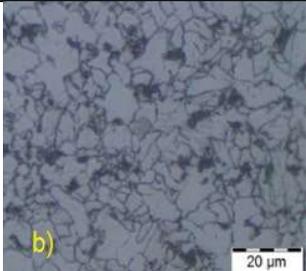
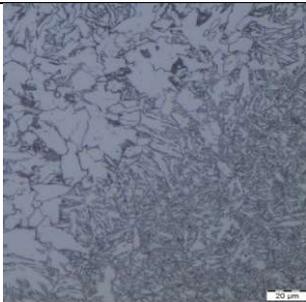
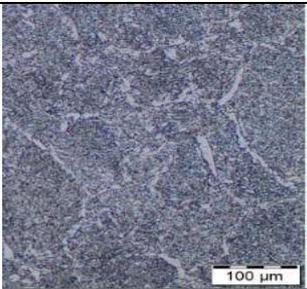
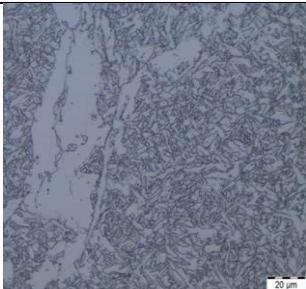
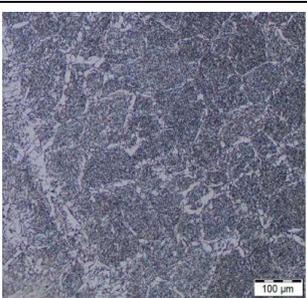
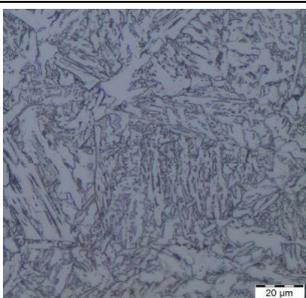
Figura 3.9. Cuadro comparativo de las durezas según la zona estudiada.

(Fuente: Propia, 2020)

3.5. Resultados de micrografía

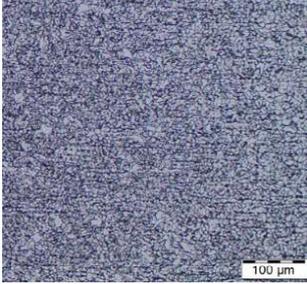
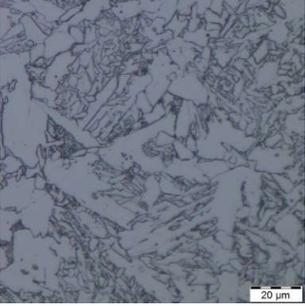
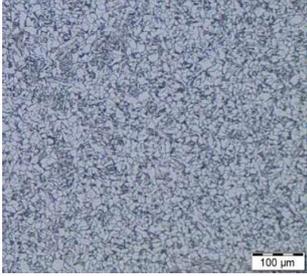
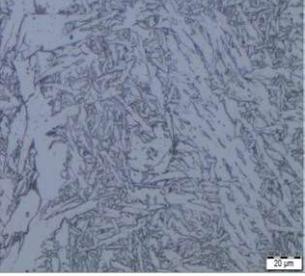
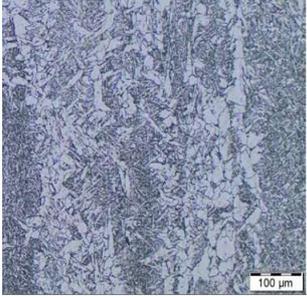
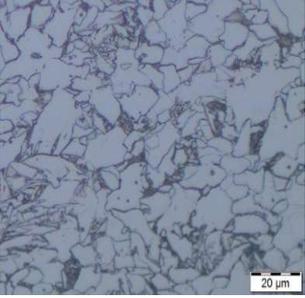
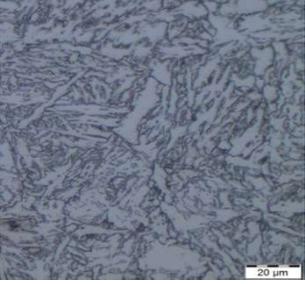
En las Tablas 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28 se muestran la microestructura de cada una de las juntas soldadas con distintos materiales de aporte en diferentes zonas.

Tabla 3.25. Análisis de micrografía de la muestra P1.

Id.	Muestra P1 (E9018).	
Material base (MB)		
	En la micrografía con un aumento de 500x se observa una microestructura de placas martensita.	
Interface		
	En la micrografía con un aumento de 500X presenta una microestructura de martensita y perlita con retención de austenita.	
Material de aporte (MA)		
	En micrografía con aumento de 500X se observa una microestructura martensita con perlita.	
Zona afectada por el calor (ZAC)		
	En la micrografía con un aumento de 500X se observa una microestructura de martensita ferrita.	

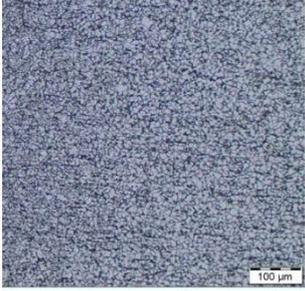
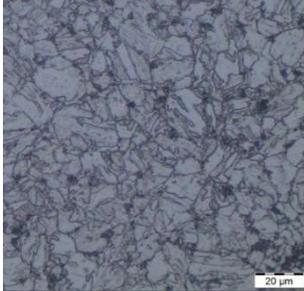
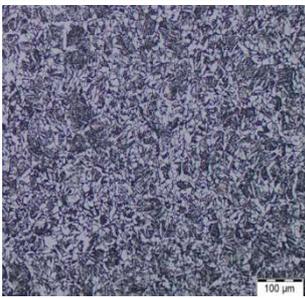
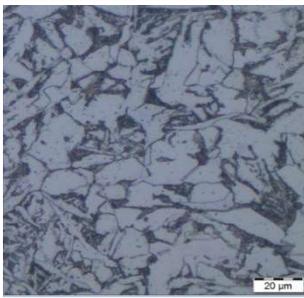
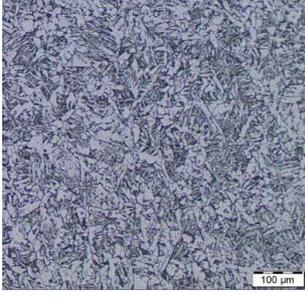
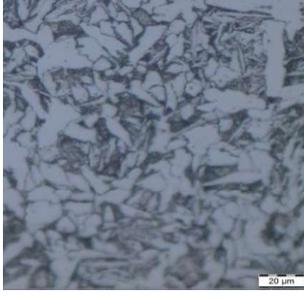
(Fuente: Propia; 2020)

Tabla 3.26. Análisis de micrografía de la muestra P2.

Id.	Muestra P2 (E7018).	
Material base (MB)		
	<p>En la micrografía con un aumento de 500X se observa una microestructura que está constituida de martensita de forma de listones.</p>	
Interface		
	<p>En la micrografía con un aumento de 500X se observa una microestructura que está formada de martensita listón y perlita.</p>	
Material de aporte (MA)		
	<p>En la micrografía con un aumento de 500X se observa una microestructura que está constituida de materiales y ferrita Widmanstätten.</p>	
Zona afectada por el calor (ZAC)		
	<p>En la micrografía con un aumento de 500X se observa una microestructura a combinación martensita y ferrita.</p>	

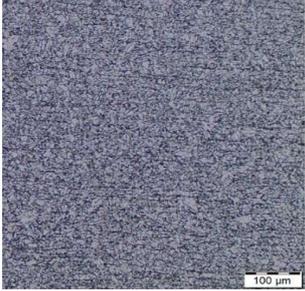
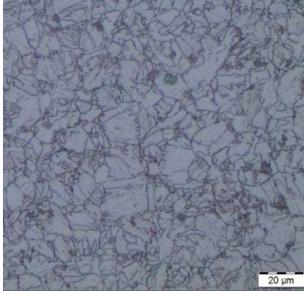
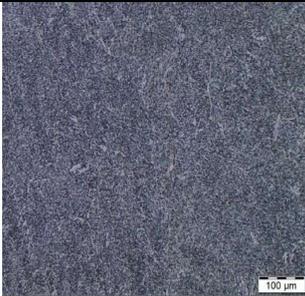
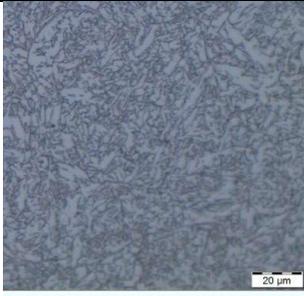
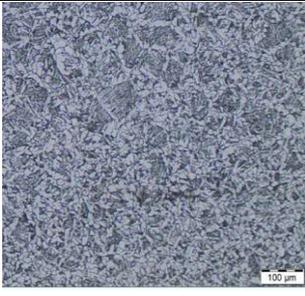
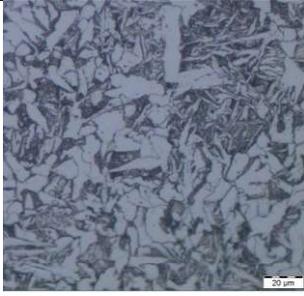
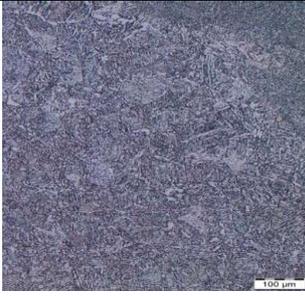
(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 3.27. Análisis de micrografía de la muestra P 3.

Id.	Muestra P3 (E6010).	
Material base (MB)		
	<p>La micrografía con un aumento de 500X tiene una microestructura martensita revenida y bainita.</p>	
Interface		
	<p>En la micrografía con un aumento de 500X presenta una microestructura de martensita revenida con precipitados de bainita y ferrita.</p>	
Material de aporte (MA)		
	<p>En la micrografía con un aumento de 500X presenta una microestructura combinada de ferrita columnar y perlita irregular.</p>	
Zona afectada por el calor (ZAC)		
	<p>La micrografía con un aumento de 500X cuya microestructura es de martensita y ferrita.</p>	

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 3.28. Análisis de micrografía de la muestra P4.

Id.	Muestra P4 (E11010).	
Material base (MB)		
	<p>La micrografía con un aumento de 500X tiene una microestructura de martensita revenida y bainita.</p>	
Interface		
	<p>La micrografía del interface con aumento de 500X cuya microestructura es martensita envejecida y bainita.</p>	
Material de aporte (MA)		
	<p>La micrografía con un aumento de 500X presenta una microestructura combinada de martensita de listón y ferrita.</p>	
Zona afectada por el calor (ZAC)		
	<p>En micrografía con un aumento de 500X se observa una microestructura combinada de martensita revenida y ferrita.</p>	

(Fuente: Propia, 2020)

3.5.1. Resultados de macrografía de las muestras soldadas

Las macrografías realizadas a las cuatro muestras en las que se puede apreciar el número de pases, la sobremonta, altura de raíz en el cordón de soldadura en [mm], el área de la zona afectada por el calor (ZAC) [mm^2], y el área del material de aporte (MA) [mm^2], se detallan en las Figuras 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13. La Tabla 3.29, muestra un resumen del ensayo.

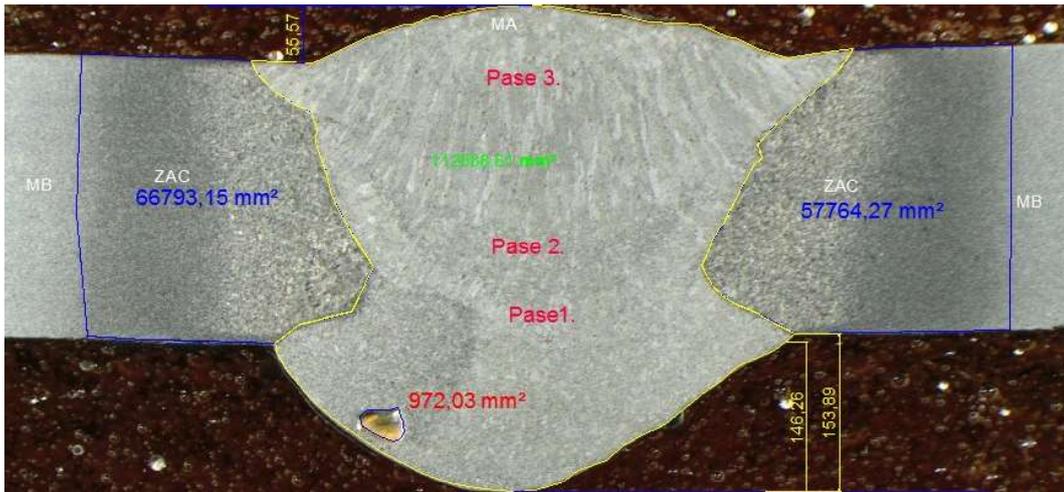


Figura 3.10. Macrografía de la muestra P1 (E9018).

(Fuente: Propia, 2020)

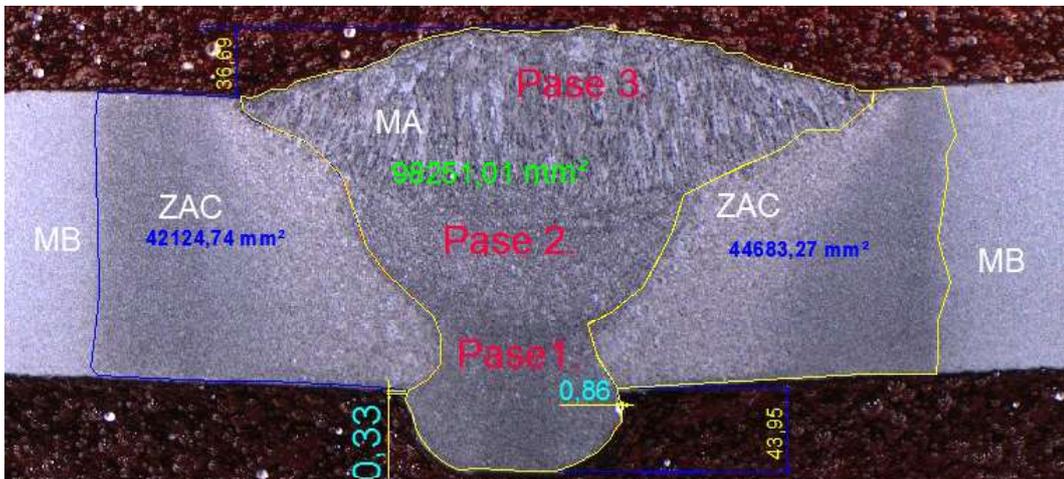


Figura 3.11. Macrografía de la muestra P2 (E7018).

(Fuente: Propia, 2020)

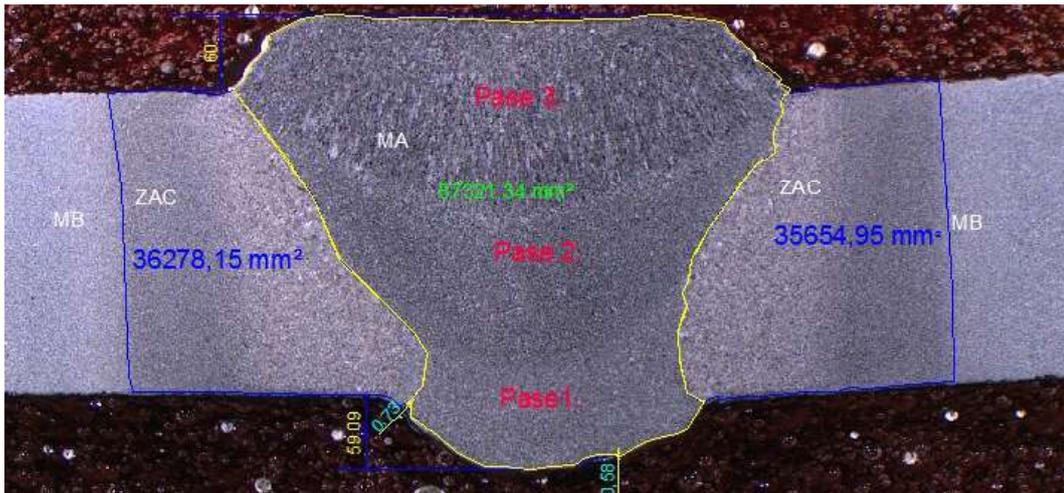


Figura 3.12. Macrografía de la muestra P3 (E6010).

(Fuente: Propia, 2020)

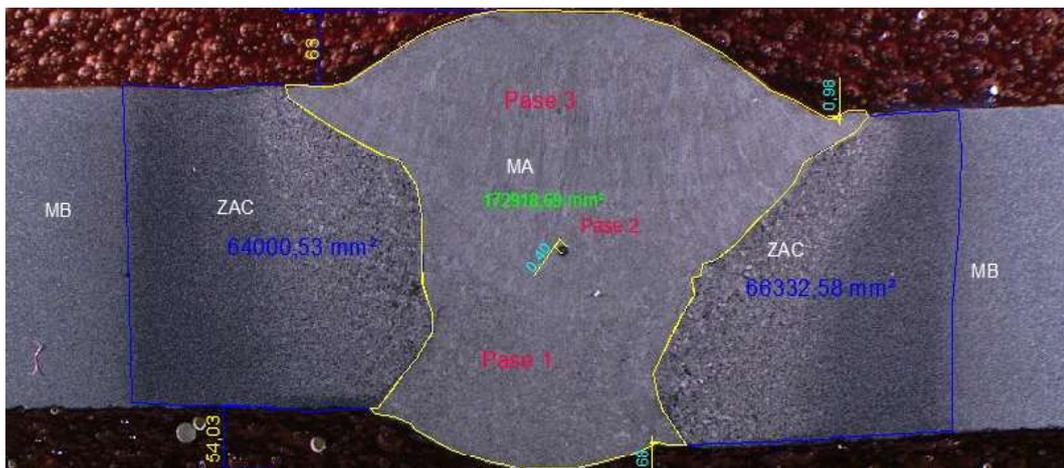


Figura 3.13. Macrografía de la muestra P4 (E11018).

(Fuente: Propia, 2020)

Tabla 3.29. Resumen del análisis del ensayo de macrografías.

Muestra	Sobremonta		Medición de discontinuidades [mm]	Área de (MA) [mm ²]	Área total de la ZAC [mm ²]	Calificación según el AWS D1.1.
	Cara [mm]	Raíz [mm]				
P1. (E9018)	55,75	7,63	Un poro con 972, 03 de área.	112888,61	124557,42	Rechazada

Continuación Tabla 3.29.

Muestra	Sobremonta		Medición de discontinuidades	Área de (MA)	Área total de la ZAC	Calificación según el AWS D1.1.
	Cara [mm]	Raíz [mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ²]	
P2. (E7018)	36,69	43,95	Socavaciones de 0,86 y 0,33	98251,01	86808,05	Rechazada
P3. (E6010)	60,00	59,09	Socavaciones de 0,58 y de 0,73	87321,34	71933,10	Rechazada
P4. (E11018)	63,00	54,03	Socavaciones de 0,68 0,40 0,98	172918,69	130333,11	Rechazada

(Fuente: Propia, 2020)

3.6. Discusión de resultados

En este apartado se discuten los resultados de los ensayos de: caracterización del material base, temperatura de precalentamiento y ensayos no destructivos y destructivos realizados a las probetas obtenidas de las cuatro juntas soldadas.

3.6.1. Material base

El material base se adquirió en el mercado ecuatoriano y sus características y propiedades físicas fueron determinadas por medio de análisis químico y físico concluyendo que cumple con las especificaciones técnicas de acuerdo a la norma ASTM A572. En la Tabla 3.1, se observa que el material base cumple con lo especificado por el fabricante en referente a su composición química, además los resultados obtenidos por el análisis químico muestra la presencia de elementos que no se encuentran presentes en el informe presentes del Anexo I.

Por otro lado, las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción del material base se encuentra en el rango que estipula el fabricante. El material base tiene una microestructura martensítica revenida, estructura característica de aceros resistentes a la abrasión.

3.6.2. Temperatura de precalentamiento

La temperatura de precalentamiento se calculó mediante el método de Saferine, considerando los valores de la composición química del fabricante y los valores reales del

material base (Tabla 3.1) y el espesor, el valor de temperatura de precalentamiento real (Tabla 2.4) y la comparación de carbono equivalente químico, carbono total y temperatura de precalentamiento sugerida por el fabricante. Se obtiene un promedio para validar la temperatura que se usa en este trabajo, en función de la composición química del material base que se encuentra en el rango indicado por el fabricante, es así que el valor de temperatura de precalentamiento obtenida con los valores reales es un 56% de la temperatura propuesta por el fabricante en base a la composición química del material base y su espesor.

3.6.3. Inspección visual y tintas penetrantes

El ensayo de inspección visual muestra que las juntas P1, P2, P3 y P4 presentan discontinuidades que no interfieren en la obtención de las probetas para los ensayos realizados, debido a que se encuentra en zonas que serán desechadas, todas las juntas fueron aceptadas en base a los criterios del código de soldadura ASW D1.1, (Tablas 3.9 y 3.11).

3.6.4. Radiografías

El ensayo radiográfico para la junta soldada P1 muestra discontinuidades en zonas que serán rechazadas y discontinuidades que no superan los límites requeridos de aceptación que se detallan en Tabla 2.14, (apartado 2.8.3). Las placas soldadas P2, P3 y P4 presentan fallas de penetración excesiva, inclusión de escorias porosidades y fusión incompleta que superan los criterios de aceptación de AWS D1.1, por lo que no son aceptadas cabe indicar que lo mencionado se ilustra en la Tabla 3.11 donde se analizan los resultados de todas las juntas soldadas; las imágenes se adjuntan pueden observar en el Anexo IV, correspondiente al informe entregado por Laboratorio de Ensayos no Destructivo.

3.6.5. Ensayo de tracción de la sección reducida

En base a los criterios de la AWS D1.1 las juntas P1, P2, P3 P4 no fueron aceptadas ya que sus valores de resistencia a la tracción no son iguales o mayores a la mínima resistencia propuesta por el fabricante del material base; lo mencionado se encuentra en la Tabla 3.14. El informe completo entregado por Laboratorio de Análisis de Esfuerzo y Vibraciones (LAEV).

3.6.6. Ensayo de doblado de cara y raíz

Al realizar el ensayo de doblado de cara y raíz en la junta soldada P4 no se presenta ningún tipo de discontinuidades superficiales, sin embargo debido al proceso aparecen pequeñas estrías. En lo referente a cada una de las probetas de las juntas P1, P2 y P3 se observan discontinuidades que no sobrepasan los 3 mm. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente y los criterios de aceptación citados en la sección 2.9.2.1 se aceptaron los resultados obtenidos en dicho ensayo.

3.6.7. Ensayo de dureza

Todas las muestras presentan un mayor valor en el material base (MB) seguido por la zona afectada por el calor (ZAC) y finalmente por el material de aporte (MA), como se observa en la Figura 3.9.

3.6.8. Micrografías

Las metalografías obtenidas en las muestra de la junta soldada con electrodo E9018 presentas cuatro zonas de análisis. En la zona correspondiente al material base (MB) se observa una estructura característica de aceros duros que es de tipo martensita de forma de listones, mientras que en la zona del interfaz su estructura es una mezcla de martensita y perlita retenida en escoria (observada a 500X). La zona afectada por el calor (ZAC) presenta una microestructura martensita ferrítica y finalmente en la zona del material de aporte se observa una microestructura martensitica en forma de placas y ferrita.

Las tres muestras restantes presentan microestructuras semejantes en las zonas mencionadas, (Tablas 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28).

3.6.9. Macrografías

El análisis de las macrografías en las muestras P1, P2, P3 y P4 presentan valores de socavamientos que superan el límite de 1[mm] y los valores de la sobremonta de cara y raíz exceden los mencionados en la Tabla 2.25.

3.6.10. Parámetros de soldadura

Para cada una de las juntas se varió la temperatura de precalentamiento, tipo de electrodos, amperaje, voltaje y velocidad de avance como se observa en las Tabas 3.5, 3.6 y 3.7; se debe recordar que uno de los objetivos es determinar el procedimiento adecuado para soldar aceros de alta resistencia mediante el proceso SMAW.

Hay que mencionar que cuando se suelda con un material de aporte que pertenezcan a la clase de AWS.A5.1, se tienen velocidades de avances mayores que implican que existe menor entrega de calor (Q_e), en tanto que si el material de aporte pertenece a la clase AWS.A5.5 el calor entregado (Q_e) aumenta debido a que la velocidad de avance es menor.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los requerimientos considerados en este trabajo no fueron los óptimos para formular un procedimiento de soldadura debido a que las propiedades mecánicas obtenidas están por debajo de las planteadas por el fabricante.
- Al considerar los electrodos que pertenecen a las clases AWS A5.1E7018 y AWS A5.5E11018 se tiene variaciones en amperaje del 7%, voltaje del 9%, velocidad de avance 66% y un calor entregado 27% con una variación de temperatura de precalentamiento de 10% en el primer pase de soldadura.
- El electrodo E9018 al trabajar en rangos más pequeños de amperaje y voltaje generó un 50% de velocidad de avance cuando se usó variables máximas y además transmitió un 4% menos de calor al material base durante el proceso de soldadura.
- La temperatura de precalentamiento aplicada a P1 soldada con E9018 es de 145°C, es la más cercana a la establecida en los parámetros del fabricante, con la cual se obtienen un 4% mayor en dureza en la zona afectada por el calor.
- La resistencia a la tracción en la junta soldada con el material de aporte E9018 es 2% mayor a la resistencia en la junta soldada con electrodo E6010, la diferencia de esta propiedad no es significativa debido a que el electrodo de mayor resistencia transmite más calor al material base y lo convierte en un metal frágil.
- El proceso de soldadura SMAW es un proceso manual por lo que los resultados obtenidos estarán en función de las habilidades del soldador
- Las juntas soldadas presentaron una maleabilidad adecuada bajo el ensayo de doblado de cara y raíz que se acepta bajo el código de la AWS D1.1.

4.2. Recomendaciones

- La soldabilidad del acero de alta resistencia es restringida por lo que se recomienda electrodos que posean características similares a este tipo de aceros y tener bajos contenidos de carbono.
- La temperatura de precalentamiento debe ser la estipulada por el fabricante para trabajos futuros.
- Los trabajos futuros podrán realizarse con otro tipo de electrodos para verificar las propiedades mecánicas, así como también proceso de soldadura semiautomático.

Referencias Bibliográficas

- [1] AG, T. S. (2010). *XAR® wear-resistant steels*. XAR®, 1-32.
- [2] American Welding Society. (2015). *Código de soldadura estructural Acero*. AWS D1.1/ D1.1 M:2015, 1-650.
- [3] Arévalo, J. L. (2018). *Soldadura y su Inspección*. Pereira: UTP.
- [4] CAYA, A. O. (2014). "Determinacion de la Temperatura de. Arequipa – Perú.
- [5] CENAMI. (1998). *División de Metrología de Fuerza y Presión*. Obtenido de Escalas de Dureza de los Materiales Ingemecánica:<https://www.cenam.mx/FYP/Dureza/TRAZABILIDAD%20Y%20UNIFICACION%20C3%93N%20DE%20LAS%20ESCALAS%20DE%20DUREZA%20EN%20M%20C3%89XICO.pdf>
- [6] Influencia de los Aleantes en los Aceros. (2015). *Bilbaina de Tratamientos*, 10-25.
- [7] M, E. R. (Martes de Enero de 2013). *Elementos aleantes del acero y mejoras obtenidas con la aleación*. Obtenido de Elementos aleantes del acero y mejoras obtenidas con la aleación: <https://es.scribd.com/doc/116435391/Elementos-aleantes-del-acero-y-mejoras-obtenidas-con-la-aleacion>
- [8] Marilú, C. C. (2008). *Calderón Celis Julia Marilú*. Lima.
- [9] Marilú, C. C. (s.f.). *Tesis Digitales UNMSM*. Obtenido de Tesis Digitales UNMSM: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/calderon_cj/Cap1.pdf
- [10] Mauricio Ibarra Echeverria, E. N. (2010). *Sistema Electroodos y Consumibles para Acero Inoxidable*. Santiago, Chile: 2M Impresores Ltda.
- [11] SANDOVAL, &. G. (2019). *Estudio del Comportamiento de la Soldadura en una*. Quito: E.P.N.
- [12] spanish carbon . (2000). *E6010 AWS A5.1 Clase E6010 E6013 AWS A5.1 Clase* Obtenido de spanish carbon 027.pdf: <https://weldingwire.com/Images/Interior/documentlibrary/spanish%20carbon%20027.pdf>
- [13] STEPHANIA, H. A. (Quito, abril 2019). *Análisis de la Soldabilidad y Propiedades Mecánicas*. Quito, Ecuador.
- [14] Universidad Tecnológica de Pereira. (2018). *Soldadura y su Inpeccion*. Pereira: UTP.
- [15] Villar, C. M. (2009). *Aceros Especiales Antiabrasión*. *Metal Actual*, 20-26.
- [16] Washington, L. L. (2018). *Estudio Comparativo de la Soldadura del Hierro Fundido Nodular, Soldado con Material de Aporte para Acero Inoxidable AWS e 112-16 y para Hierro Nodular AWS e Nife - ci, Mediante el Proceso SMAW*. Quito: EPN.
- [17] XAR® 400. (Junio de 2014). *Acero estructural anti abrasivo especial*. Obtenido de ThyssenKrupp Steel Europe: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/es/aceros/aceros-antiabrasivos/xar/>

Anexos

ANEXO I. ENSAYO DE ESPECTROMETRÍA



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. María Verónica Sotomayor

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 10 de septiembre del 2019

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor/Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Muestra de material metálico

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta de material metálico.

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA.

La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta	Identificación Gráfica
MUESTRA METÁLICA	Sample M1	





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. Método: Fe 140 Fe Tool Steels

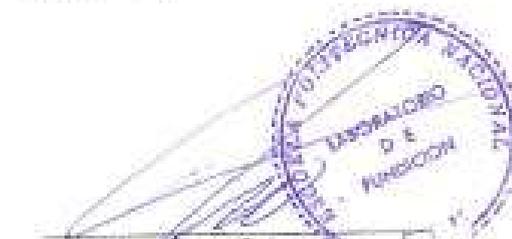
4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 4 mediciones en distintos puntos del espécimen y finalmente se promedió su valor.

		Muestra M1
Elemento		Valor [%]
Carbono	[C]	0,150
Silicio	[Si]	0,461
Manganeso	[Mn]	0,981
Fósforo	[P]	0,020
Cromo	[Cr]	0,311
Moibdeno	[Mo]	0,022
Niquel	[Ni]	0,009
Cobre	[Cu]	0,022
Hierro	[Fe]	97,98
Total		99,99


Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable


Ing. Oscar Solomayón

Jefe del Laboratorio de Fundición.



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

Bruker Analysis Report



Sample: M1

Analysis Time: 28.08.2019 15:44:28

Method: Fe 140

∅	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
	0,150	0,461	0,991	0,020	0,0073
∅	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Co [%]
	0,311	0,022	0,039	0,022	0,0099
∅	V [%]	W [%]	Fe [%]		
	<0,0030	<0,020	97,98		



ANEXO II. ENSAYO DE TRACCIÓN MATERIAL BASE



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

FO1-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M19.135

Quito, 31 de octubre de 2019

Solicitado por: M.Sc. Verónica Sotomayor
Persona de contacto: José Caípe
Teléfono: 0987360650
Correo: jose.caípe01@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 29/10/2019
Fecha de ejecución: 29/10/2019

ORDEN DE TRABAJO Nº: N/A

1. MUESTRAS: Dos (2) probetas metálicas para ensayo de tracción.
2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO DE ALTA ALEACIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA SMAW.

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

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Id. cliente	Id. del LAEV
T-1	M19.135.01
T-2	M19.135.02

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $25,0 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $34,6 \pm 1,6\%$



Dirección: Av. Mesa Corrales e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)

Teléfono: 022376300 ext. 3715, 3716

Correo: laev@epn.edu.ec

4. ENSAYO DE TRACCIÓN

En la tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas.

Tabla 2. Resultados del ensayo de tracción.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M19.135.01	16,05	6,04	23 695	105 401	155,4	1 071	157,7	1 087	11,4
M19.135.02	15,48	6,08	23 092	102 718	153,1	1 056	158,3	1 091	13,1

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firmas:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargos:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		



ANEXO III. ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES

REPORTE DE INSPECCIÓN POR LIQUIDOS PENETRANTES ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEPARTAMENTO DE MATERIALES	
DATOS GENERALES	
Cliente: Hugo Ceipe, estudiantes de titulación	Reporte N°: LABEND-EPN-2019-R24-LP-10
Fecha: 23/04/2019	Lugar: Quito-Ecuador
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Descripción: 2019-R24-LP-10-001: de acero soldada de L: 400 mm y Dext: 120 mm y E:6 mm. 2019-R24-LP-10-002: de acero soldada de L: 400 mm y Dext: 120 mm y E:6 mm. 2019-R24-LP-10-003: de acero soldada de L: 400 mm y Dext: 120 mm y E:6 mm. 2019-R24-LP-10-004: de acero soldada de L: 400 mm y Dext: 120 mm y E:6 mm.	Identificación: 2019-R004-LP-10-001 2019-R004-LP-10-002 2019-R004-LP-10-003 2019-R004-LP-10-004
Material: Acero HSLA	Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material
ESQUEMA DE LA PIEZA	
2019-R24-LP-10-001	2019-R24-LP-10-002
	
2019-R24-LP-10-003	2019-R24-LP-10-004
	

MATERIALES Y EQUIPOS			
Líquidos:			
Limpiador / removedor: Met-L-check E-59A		Emulsificador: N/A	
Penetrante: Met-L-check VP-30		Revelador: Met-L-check D-70	
Accesorios: N/A			
CONDICIONES DE TRABAJO			
Procedimiento: Basado en ASTM E 165, Tipo-II método A		Limpieza: Con Agua	
Tiempos:			
Penetrante: 12 minutos	Emulsificador: N/A	Revelador: 5 minutos	
Luz de observación: Visible (sobre los 1000 lux)		Tiempo:	
Normas de Aceptación / Rechazo: AWS D1.1			
RESULTADOS			
IDENTIFICACIÓN	IMAGEN		OBSERVACIONES
2018-R24-LP-10-P1	 <p>P1-A</p>		No se observó indicaciones en la Superficie A.
	 <p>P1-B</p>		Se observó en P1-B cinco manchas redondeadas en la base del cordón de soldadura, de 6 mm, 3 mm, 4 mm, 3 mm y 2 mm respectivamente.

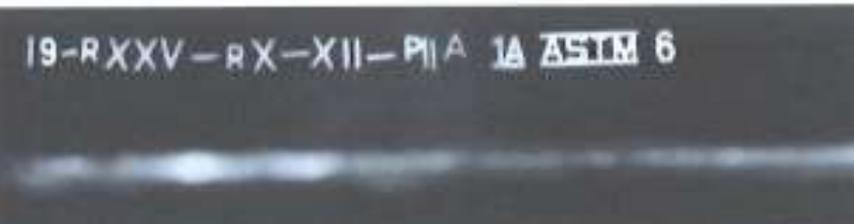
<p>2019-R24-LP-10-P2</p>	 <p>P2-A</p>	<p>Se observó una mancha redondeada de 7 mm de diámetro en P2-A.</p>
<p>2019-R24-LP-10-P3</p>	 <p>P2-B</p>	<p>Se observó 7 manchas, 1 mancha alargada de 18 mm al inicio de la base del cordón, y 6 manchas redondeadas de 2 mm, 5mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 4 mm y 5,5 mm de diámetro, en P2-B.</p>
<p>2019-R24-LP-10-P3</p>	 <p>P3-A</p>	<p>Se observó 7 manchas redondeadas de 6mm, 5 mm, 4 mm, 4 mm, 3 mm, 3 mm, 4 mm de diámetro en P3-A.</p>
<p>2019-R24-LP-10-P3</p>	 <p>P3-B</p>	<p>Se observó 3 manchas, una redondeada de 3 mm y dos alargadas de 10 mm y de 18 mm de diámetro.</p>

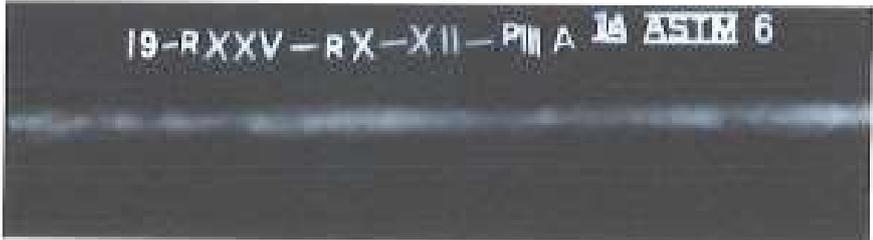
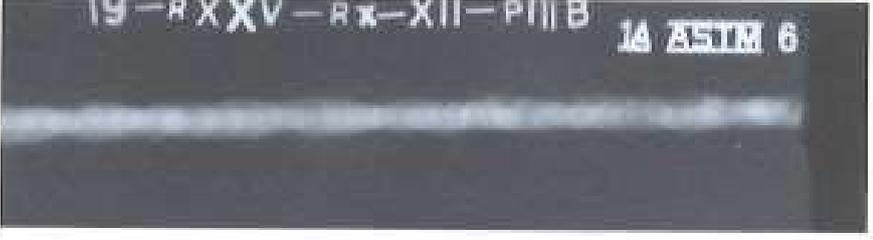
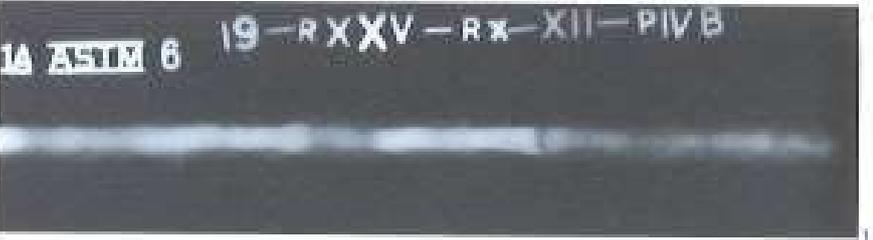
[Handwritten signature]
Página 3 de 4

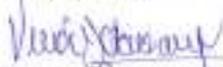
<p>2019-R24-LP-10-P4</p>	<div style="text-align: center;">  <p>P4-A</p>  <p>P4-B</p> </div>	<p>No se observó indicaciones en P4-A.</p> <p>Se observó 5 manchas redondeadas de 4 mm, 3 mm, de 3 mm, 6 mm y 4 mm de diámetro, en P4-B.</p>
<p>OPERADOR: Santiago Camacho</p> <p style="text-align: center;">Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END</p> <p>Firma:  Ing. Santiago Camacho ASISTENTE DE ENSAYOS LAB-END ASNT NIVEL II EN LÍQUIDOS PENETRANTES</p> <p>Firma:  Ing. Verónica Rodríguez JEFE LAB-END ASNT NIVEL II EN LÍQUIDOS PENETRANTES</p> <p>Fecha: 03/09/2019</p> <div style="text-align: center;">  </div>		<p style="text-align: center;">Cliente</p> <p>Firma: </p> <p>Hugo Calpe Estudiante de titulación.</p> <p>Fecha: 03/09/2019</p>

ANEXO IV. ENSAYOS DE RADIOGRAFÍAS

REPORTE DE INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEPARTAMENTO DE MATERIALES			
Información General			
Cliente: Hugo Ceipe, Estudiantes titulación		Reporte N°: LABEND-EPN-2019-R12-RX7	
Fecha de Inspección: 14 de mayo de 2019		Lugar: Quito – EPN	
Identificación de la Pílea			
Descripción: 2019-R-12-RX7-01: de acero soldada de L: 400 mm y Dext: 120 mm y E:6 mm. 2019-R-12-RX7-02: de acero soldada de L: 400 mm y Dext: 120 mm y E:6 mm. 2019-R-12-RX7-03: de acero soldada de L: 400 mm y Dext: 120 mm y E:6 mm. 2019-R-12-RX7-04: de acero soldada de L: 400 mm y Dext: 120 mm y E:6 mm.		Identificación: 2019-R012-RX07-001 2019-R012-RX07-002 2019-R012-RX07-003 2019-R012-RX07-004	
Material: Acero ASTM A572 GRADO 50		Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material	
Componente(s) a Inspeccionar			
2019-R012-RX01-001		2019-R012-RX01-002	
2019-R012-RX01-003		2019-R012-RX01-004	
Equipos y Materiales			
Equipo de RX			
Marca: Bahographe	Modelo: BF 200/10	Kv: 200 kV	mA: 10 mA
Película			
Marca: Structuris		Tipo: II – D7	

Condiciones de Trabajo			
Normas de Referencia: ASTM E 94			
Pieza: 2019-R12-RX07-001			
Tomas: 2	Kv: 140 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 0s	Distancia a la Fuente: 54 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo 18			
Pieza: 2019-R12-RX07-002			
Tomas: 2	Kv: 140 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 0s	Distancia a la Fuente: 54 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo 18			
Pieza: 2019-R12-RX07-003			
Tomas: 2	Kv: 140 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 0s	Distancia a la Fuente: 54 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo 18			
Pieza: 2019-R12-RX07-004			
Tomas: 2	Kv: 140 kV	mA: 5 mA	
Tiempo de Exp: 1 min 0s	Distancia a la Fuente: 54 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen	
Observaciones: IQI Tipo 18			
Procesamiento de Película			
Temp. Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 5 min	T. Pared: 2 min	T. Fijado: 10 min
Baño de Parada: 10 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min
Imágenes Radiográficas			
TOMA 1 2019-R12-RX7-001-A			
TOMA 1 2019-R12-RX7-001-B			
TOMA 1 2019-R12-RX7-002-A			

<p>TOMA 1 2019-R01-RX7-003-B</p>	
<p>TOMA 1 2019-R12-RX7-003-A</p>	
<p>TOMA 1 2019-R01-RX7-003-B</p>	
<p>TOMA 1 2019-R12-RX7-004-A</p>	
<p>TOMA 1 2019-R01-RX7-004-B</p>	

Interpretación Radiográfica								
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades							
	TOMA 1 2019-R12-RX7-001-A		TOMA 1 2019-R12-RX7-001-B		TOMA 1 2019-R12-RX7-001-A		TOMA 1 2019-R12-RX7-001-B	
	X (mm)	Dis. (mm)	X (mm)	Dis. (mm)	X (mm)	Dis. (mm)	X (mm)	Dis. (mm)
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	---	---
Fusión Incompleta	---	---	---	---	---	---	---	---
Penetración excesiva	---	---	---	---	120	23	---	---
Inclusiones de Escoria	22	10	64	2	40	40	---	---
	17	5	200	2	60	60	5	40
	193	2	---	---	181	40	---	---
Porosidad	62	1	---	---	---	---	185	1,5
							195	3,5
Nido de poros	---	---	---	---	---	---	---	---
Grietas	---	---	---	---	---	---	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.								
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades							
	TOMA 1 2019-R12-RX7-003-A		TOMA 1 2019-R12-RX7-003-B		TOMA 1 2019-R12-RX7-004-A		TOMA 1 2019-R12-RX7-004-B	
	X (mm)	Dis. (mm)	X (mm)	Dis. (mm)	X (mm)	Dis. (mm)	X (mm)	Dis. (mm)
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	---	---
Fusión Incompleta	136	15	40	35	0	78	20	47
			135	10	92	148		
			157	68				
Penetración excesiva	---	---	---	---	---	---	---	---
Inclusiones de Escoria	10	20	---	---	---	---	---	---
	22	18	---	---	---	---	---	---
	46	7	---	---	---	---	---	---
	60	73	200	15	---	---	70	12
	86	24	---	---	---	---	97	125
	142	10	---	---	---	---	---	---
	180	5	---	---	---	---	---	---
194	1	---	---	---	---	---	---	
Salpicadura	---	---	---	---	---	---	---	---
Porosidad	20	3	---	---	---	---	---	---
Nido de poros	0	15	---	---	---	---	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.								
Laboratorio de E.N.D. Firma:  Elaborado por: Ing. Santiago Carnecho, ASNT Nivel II en Radiografía Limitada a la Interpretación, Asistente de Ensayos LAB-END Firma:  Revisado por: Ing. Verónica Sosomayor, Jefe de Laboratorio de Ensayos No Destructivos Fecha: 06 de septiembre de 2019					Cliente Firma:  Nombre: Hugo Caipo Cargo: Estudiante titulación FIM Correo: hugo.caipo@epn.edu.ec Fecha: 06/09/2019			

ANEXO V. ENSAYO DE TRACCIÓN DE CADA JUNTA



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M19.106

Quito, 8 de agosto de 2019

Solicitado por: M.Sc. Verónica Sotomayor
Persona de contacto: José Calpe
Teléfono: 0987360650
Correo: jose.calpe01@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 06/08/2019
Fecha de ejecución: 07/08/2019

ORDEN DE TRABAJO Nº: N/A

1. MUESTRAS: Ocho (8) probetas de junta soldada para ensayo de tracción, dieciséis (16) probetas para ensayo de doblado y cuatro (4) probetas para barrido de dureza.
2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO DE ALTA ALEACIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA SMAW.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayada:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Ensayo	Id. cliente	Id. del LAEV
Tracción	P1T-1	M19.106.01
	P1T-2	M19.106.02
	P2T-1	M19.106.03
	P2T-2	M19.106.04
	P3T-1	M19.106.05
	P3T-2	M19.106.06
	P4T-1	M19.106.07
	P4T-2	M19.106.08
Doblado	P1DC1	M19.106.09
	P1DC2	M19.106.10



Dirección: Av. Meno Coamallo e Isabel la Católica Esquina [Escuela Politécnica Nacional]
Teléfono: 002976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec

Tabla 1. Identificación de las muestras (continuación).

Ensayo	Id. cliente	Id. del LAEV
Doblado	P1DR1	M19.106.11
	P1DR2	M19.106.12
	P2DC1	M19.106.13
	P2DC2	M19.106.14
	P2DR1	M19.106.15
	P2DR2	M19.106.16
	P3DC1	M19.106.17
	P3DC2	M19.106.18
	P3DR1	M19.106.19
	P3DR2	M19.106.20
	P4DC1	M19.106.21
	P4DC2	M19.106.22
	P4DR1	M19.106.23
	P4DR2	M19.106.24
Dureza	D-P1	M19.106.25
	D-P2	M19.106.26
	D-P3	M19.106.27
	D-P4	M19.106.28

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $23,4 \pm 3,6^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $28,4 \pm 6,2\%$

4. ENSAYO DE TRACCION EN JUNTA SOLDADA

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de tracción.

Tabla 2. Resistencia a la tracción obtenida en el ensayo.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M19.106.01	20,19	5,97	16 525	73 505	88,4	609,8	FMB
M19.106.02	19,88	6,02	17 477	77 740	94,2	649,6	FMB
M19.106.03	19,81	5,90	16 069	71 477	88,7	611,6	FMB
M19.106.04	20,04	5,83	15 761	70 108	87,0	600,1	FJS
M19.106.05	19,92	5,89	16 469	73 257	90,6	624,4	FMB
M19.106.06	20,00	5,90	16 401	72 957	89,7	618,3	FJS
M19.106.07	19,91	6,05	17 261	76 782	92,5	637,4	FMB
M19.106.08	19,92	5,95	15 980	71 084	87,0	599,7	FMB

* FJS = Falla en la junta soldada

* FMB = Falla en el material base



Dirección: Av. Mesa Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 021996300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.cu



En las tablas 3 y 4 se presenta los resultados del ensayo de doblado de cara y raíz de las muestras con identificación P1.

Tabla 3. Resultados del ensayo de doblado de cara a las muestras P1.

Identificación	Observaciones
M19.106.09	Se observa una discontinuidad de 2,35 mm en el cordón de soldadura.
M19.106.10	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.

Tabla 4. Resultados del ensayo de doblado de raíz a las muestras P1.

Identificación	Observaciones
M19.106.11	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.
M19.106.12	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.

En las tablas 5 y 6 se presenta los resultados del ensayo de doblado de cara y raíz de las muestras con identificación P2.

Tabla 5. Resultados del ensayo de doblado de cara a las muestras P2.

Identificación	Observaciones
M19.106.13	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.
M19.106.14	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.

Tabla 6. Resultados del ensayo de doblado de raíz a las muestras P2.

Identificación	Observaciones
M19.106.15	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.
M19.106.16	Se observa una discontinuidad de 0,61 mm en el cordón de soldadura.

En las tablas 7 y 8 se presenta los resultados del ensayo de doblado de cara y raíz de las muestras con identificación P3.

Tabla 7. Resultados del ensayo de doblado de cara a las muestras P3.

Identificación	Observaciones
M19.106.17	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.
M19.106.18	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.

Tabla 8. Resultados del ensayo de doblado de raíz a las muestras P3.

Identificación	Observaciones
M19.106.19	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.
M19.106.20	Se observa una discontinuidad de 0,94 mm en el cordón de soldadura.



Dirección Av. Mina Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 002976000 ext. 3715, 3716
Correo: lavy@epn.edu.ec



En las tablas 9 y 10 se presenta los resultados del ensayo de doblado de cara y raíz de las muestras con identificación P4.

Tabla 9. Resultados del ensayo de doblado de cara a las muestras P4.

Identificación	Observaciones
M19.106.21	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.
M19.106.22	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.

Tabla 10. Resultados del ensayo de doblado de raíz a las muestras P4.

Identificación	Observaciones
M19.106.23	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.
M19.106.24	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.

6. ENSAYO DE BARIADO DE DUREZA

En la figura 1 se presenta un esquema donde se muestra la zona donde se realizó la medición.

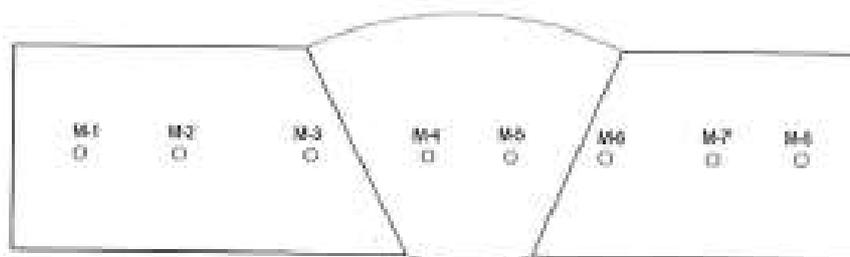


Figura1. Medición de dureza en las probetas entregadas.

En la tabla 11 se presentan los resultados del ensayo de dureza realizado a las probetas proporcionadas por el cliente.

Tabla 11. Medición de dureza en escala Rockwell B.

Mediciones en escala Rockwell B								
Ptos. de Medición	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
M19.106.25	90	87	89	89	88,5	90,5	86	88
M19.106.26	91	89	84	82	82,5	88	91	92
M19.106.27	93	88	87,5	82	83	85	90	91
M19.106.28	93	86	90	88	89	91	86	92



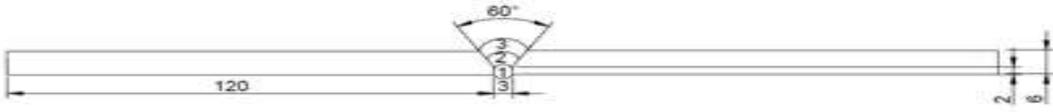
Dirección: Av. Montalvo y Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		



ANEXO VI. WPS PLACA 1

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)				
						
Nombre de la Empresa:	E.P.N.	WPS	No. Identificación: Probeta N° P1.			
PQR N°:	Probeta P1.	Fecha:	13/05/2019			
NORMA:	AWS D1.1	Realizado	Hugo Caipe			
JUNTA SOLDAD		POSICION DE SOLDADURA				
Tipo de junta:	A tope	Posición :	1G			
Abertura de raíz:	3 [mm]	Progresion:	Recta			
Talón:	2 [mm]	Pases:	3			
Angulo de ranura:	30°	PRECALENTAMIENTO				
Placa de respaldo:	Si	No	✓			
Preparar bisel :	Si	✓	No			
		Temperatura Tp:	135°C			
		Temperatura entre pases:	155°C			
			154°C			
MATERIAL DE BASE		TECNICA DE SOLDADURA				
Especificaciones	400HB	Proceso:	SMAW			
Espesor	8 [mm]	Tipo de soldadura:	Manual			
MATERIAL DE APORTE		Soldadura a:	Un lado			
Proceso:	SMAW	Cordon de respaldo:	No			
Diámetro:	3,2[mm]	Pase:	Múltiple			
Denominación AWS:	E9018	Transferencia:	Arco			
A5.5:		Nota:				
Marca:						
Amperaje	90-140	Voltaje	70-110			
						
VARIABLES DE OPERACION						
N°	Metal de aporte	Corriente [A]	Voltaje [V]	Velocidad [mm/min]	Tipo de corriente	Tecnica de soldadura
1	E9018	74	20,30	39,90	DC+	Oscilante
2	E9018	110	21,93	19,82	DC+	Oscilante
3	E9018	121	24	79,84	DC+	Oscilante

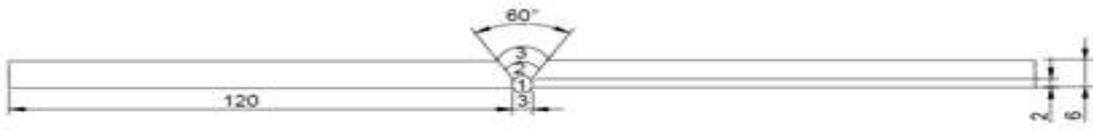
ANEXO VII. WPS PLACA 2

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)				
Nombre de la Empresa:	E.P.N.	WPS	No. Identificación: Probeta N° P2.			
PQR N°:	Probeta P2.	Fecha:	13/05/2019			
NORMA:	AWS D1.1	Realizado	Hugo Caípe			
JUNTA SOLDAD		POSICION DE SOLDADURA				
Tipo de junta:	A tope	Posición :	1G			
Abertura de raíz:	3 [mm]	Progresión:	Recta			
Talón:	2 [mm]	Pases:	3			
Angulo de ranura:	30°	PRECALENTAMIENTO				
Placa de respaldo:	Si	No	✓			
Preparar bisel:	Si	✓	No			
		Temperatura Tp:	125°C			
		Temperatura entre pases:	137°C			
			148°C			
MATERIAL DE BASE		TECNICA DE SOLDADURA				
Especificaciones	400HB	Proceso:	SMAW			
Espesor	6 [mm]	Tipo de soldadura:	Manual			
MATERIAL DE APORTE		Soldadura a:	Un lado			
Proceso:	SMAW	Cordón de respaldo:	No			
Diámetro:	3.2[mm]	Pase:	Múltiple			
Denominación AWS, A5.1:	E7018	Transferencia:	Arco			
Marca:		Nota:				
Amperaje	80-145	Voltaje	70-110			
VARIABLES DE OPERACION						
Nº	Metal de aporte	Corriente [A]	Voltaje [V]	Velocidad [mm/min]	Tipo de corriente	Técnica de soldadura
1	E7018	79	19,17	79,59	DC+	Oscilante
2	E7018	110	21,16	79,76	DC+	Oscilante
3	E7018	126	23	59,76	DC+	Oscilante

ANEXO VIII. WPS PLACA 3

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)				
Nombre de la Empresa:	E.P.N.	WPS	No. Identificación: Probeta N° P3.			
PQR N°:	Probeta P3.	Fecha:	13/05/2019			
NORMA:	AWS D1.1	Realizado	Hugo Caípe			
JUNTA SOLDAD		POSICION DE SOLDADURA				
Tipo de junta:	A tope	Posición :	1G			
Abertura de raíz:	3 [mm]	Progresión:	Recta			
Talón:	2 [mm]	Pases:	3			
Angulo de ranura:	30°	PRECALENTAMIENTO				
Placa de respaldo:	Si	No	✓			
Preparar bisel:	Si	✓	No			
MATERIAL DE BASE		TECNICA DE SOLDADURA				
Especificaciones	400HB	Proceso:	SMAW			
Espesor	6 [mm]	Tipo de soldadura:	Manual			
MATERIAL DE APORTE		Soldadura a:	Un lado			
Proceso:	SMAW	Cordón de respaldo:	No			
Diámetro:	3,2[mm]	Pase:	Múltiple			
Denominación AWS. A5.1:	E6010	Transferencia:	Arco			
Marca:		Nota:				
Amperaje	80-120	Voltaje	70-110			
VARIABLES DE OPERACION						
N°	Metal de aporte	Corriente [A]	Voltaje [V]	Velocidad [mm/min]	Tipo de corriente	Técnica de soldadura
1	E6010	45	22,12	39,95	DC+	Oscilante
2	E6010	80	29	119,92	DC+	Oscilante
3	E6010	145	23	79,71	DC+	Oscilante

ANEXO IX. WPS PLACA 4

 ESCUELA POLITECNICA NACIONAL						
ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)						
Nombre de la Empresa:	E.P.N.	WPS	No. Identificación: Probeta N° P4.			
PQR N°:	Probeta P4.	Fecha:	13/05/2019			
NORMA:	AWS D1.1	Realizado	Hugo Caipe			
JUNTA SOLDAD		POSICION DE SOLDADURA				
Tipo de junta:	A tope	Posición :	1G			
Abertura de raíz:	3 [mm]	Progresión:	Recta			
Talón:	2 [mm]	Pases:	3			
Angulo de ranura:	30°	PRECALENTAMIENTO				
Placa de respaldo:	Si	No	<input checked="" type="checkbox"/>			
Preparar bisel:	Si	No	<input checked="" type="checkbox"/>			
		Temperatura Tp:	145°C			
		Temperatura entre pases:	165°C 190°C			
MATERIAL DE BASE		TECNICA DE SOLDADURA				
Especificaciones	400HB	Proceso:	SMAW			
Espesor	6 [mm]	Tipo de soldadura:	Manual			
MATERIAL DE APORTE		Soldadura a:	Un lado			
Proceso:	SMAW	Cordón de respaldo:	No			
Diámetro:	3,2[mm]	Pase:	Múltiple			
Denominación AWS. A5.5:	E11018	Transferencia:	Arco			
Marca:		Nota:				
Amperaje	90-140	Voltaje	80-120			
						
VARIABLES DE OPERACION						
N°	Metal de aporte	Corriente [A]	Voltaje [V]	Velocidad [mm/min]	Tipo de corriente	Técnica de soldadura
1	E11018	85	21,05	47,89	DC+	Oscilante
2	E11018	95	22,4	47,97	DC+	Oscilante
3	E11018	107	24	47,84	DC+	Oscilante

ANEXO X. CATÁLOGO DEL MATERIAL BASE

PLANCHA ANTI-ABRASIVA



Especificaciones Generales:

Calidad:	Plancha aleada
Dureza:	400 HB y 500 HB
Espesores:	En 400 HB de 5mm a 30mm En 500 HB de 12mm a 25mm
Dimensiones:	2000 x 6000

* Cortes según medidas específicas (cortes se realizan de acuerdo a la disponibilidad del producto)

Descripción:

- Mayor resistencia a la corrosión que otros aceros al carbono.
- Disponible en presentación de Acero Negro, dureza 400HB y 500HB.
- Formato estándar de 2000 x 6000 mm.
- Útil para elementos de movimiento de tierra, minerales y materiales abrasivos tales como talvas de volquetes, cucharas de máquinas cargadoras, etc.

Aplicaciones:

Para elementos de movimiento de tierra, minerales y materiales abrasivos tales como las talvas de volquetes, cucharas de máquinas cargadoras, elementos de máquinas trituradoras, chancadoras y prensas de chatarra. También para construcciones soldadas que requieren alta resistencia y buena dureza a baja temperatura.

Para realizar trabajos de soldadura en la misma se recomienda utilizar procesos bajo en hidrógeno, los electrodos deben estar completamente secos, la plancha libre de grasa o aceites. Precalear a 150 - 200°, remover la escoria entre cada cordón de soldadura. Se recomienda electrodos UTP 6020 UTP65.

En caso de requerir corte por oxiacetileno no presenta dificultades, en espesores de hasta 25mm se debe precalear a 60°C y en caso de espesores mayores se debe precalear a 150°C.

COMPOSICIÓN QUÍMICA (Max)

DUREZA	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
400 HB	0,26	0,55	1,6	0,4	0,02	0,004
500 HB	0,36	0,55	1,6	0,8	0,02	0,004

PROPIEDADES MECÁNICAS (Max)

	Resistencia Mecánica	Esfuerzo de Fluencia
DUREZA	N/mm ²	N/mm ²
400 HB	1316	1103
500 HB	1449	1449

DUREZA	ESPEORES (mm)
400 HB	5,6, 10, 12, 19, 20
500 HB	12, 25