



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO
ASTM A36 BAJO LA NORMA API 650, CON ELECTRODOS E6010
MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA SMAW Y ELECTRODOS
E71T1 MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA FCAW”**

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

ALTAMIRANO MACÍAS MARÍA DE LOS ANGELES
maria.altamirano@epn.edu.ec

CALVA MOLINA JAZMÍN ALEXANDRA
jazmin.calva@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. DIEGO MARCELO ESPINOSA CHAUVIN
diego.espinosa@epn.edu.ec

Quito, Julio 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **ALTAMIRANO MACÍAS MARÍA DE LOS ANGELES** y **CALVA MOLINA JAZMÍN ALEXANDRA**, bajo mi supervisión.

ING. DIEGO ESPINOSA CHAUVIN

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotas, **María de los Angeles Altamirano Macías** y **Jazmín Alexandra Calva Molina** 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.

María de los Angeles Altamirano Macias

Jazmín Alexandra Calva Molina

DEDICATORIA

Esta meta se la dedico a los dos seres de luz, mi madre y hermana por todo el amor apoyo y confianza que me han dado, por ser mi motor principal, por enseñarme que no hay nada imposible y que con entereza se puede afrontar la vida.

A mi hijo por ser mi motivación y esperanza que ha hecho maravillosos mis días, porque sé que éste logro será parte de su futuro tanto como su presente.

A mi padre que con sus consejos me ha brindado alivio y consuelo.

Angelita

Se lo dedico a mis amados Padres, Joselito y Mirey

A mi ñaño Jefferson, esto es de los dos, te amo.

A mi eterna guerrera Dra. Mayra Calva (+), no me viste lograrlo, esto va para el cielo.

Jazmín

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Matilde y Ángel, por su cariño, dedicación, apoyo, esfuerzo y guía en todo momento, a mi hermana Aura por brindarme su apoyo, complicidad y comprensión en cada etapa de mi vida.

A José por los momentos vividos y por su colaboración durante el transcurso de la carrera.

A mi compañera de tesis, Jazmín por permitirme realizar el proyecto con ella y por su paciencia durante la realización del mismo.

A mis amigos por estar presentes y brindarme su cariño durante todo este tiempo.

Finalmente, a la Facultad de Ingeniería Mecánica, a sus docentes y personal administrativo por ser parte de mi formación académica.

Angelita

Agradezco primero a Dios y a la Virgencita del Cisne.

A mis padres, por haberme brindado todo su apoyo, su comprensión y toda su paciencia, a mi ñaño, que ha sido mi compañero aquí lejos de casa.

Emilio gracias por acompañarme a lo largo de estos 6 años..... Te amo

A nuestro director de tesis, Ing. Marcelo Espinosa por habernos guiado en este trabajo y por confiar en nosotras, al Ing. Gabriel Velastegui que fue nuestra guía a lo largo de todo este trabajo al igual que el Gran Soldador, muchas gracias por todo su apoyo.

A las familia Alvear Izquierdo por acogerme en mis inicios aquí, y de igual manera a la familia Lomas Montesdeoca, han sido una familia para mi hermano y para mi.

A mis amigas del colegio, gracias por estar siempre para mí, con sus ocurrencias, y sus palabras de apoyo, siempre fueron fundamentales, las amo inmensamente Ingrid, Gemita, Majito y Marse.

A mis amigas que hice a lo largo de la vida Universitaria, siempre fueron leales y verdaderas amigas, Gaby Cantuña, Gaby Bastidas, Jess Defaz

A mi bonita Lizz, no sabes cuan agradecida estoy contigo, gracias por tus consejos, tus palabras de aliento; créeme me hiciste más fuerte, a creer en mí, por eso y mucho más te estoy infinitamente agradecida.

A mi compañera de tesis Angelita, por su colaboración y su ayuda en este trabajo.

A mis amigos que conozco desde prepo, me han acompañado me han brindado su ayuda incondicionalmente, Alexito y Fabián, a mis amigos del 206 gracias por todo.

Andrés López gracias por toda tu ayuda y por brindarme tu amistad incondicional, a ti Juanito Y. gracias por ser un gran amigo, y apoyarnos hasta esta etapa final de la tesis. En fin agradezco a cada persona que se cruzó en mi vida para sumar y ayudarme a ser mejor persona.

Jazmin

INDICE

RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Norma API 650.....	3
1.2. Limitaciones	3
1.3. Requisitos de los materiales a usarse.....	3
1.3.1. Especificación de los electrodos de soldadura.....	4
1.4. Acero Astm A36	4
1.4.1. Temple.....	5
1.4.2. Revenido.....	5
1.4.3. Recocido.....	5
1.4.4. Normalizado.....	5
1.5. Propiedades y Características De Los Aceros.....	6
1.5.1. Propiedades mecánicas.....	6
1.5.2. Resistencia	6
1.5.3. Elasticidad.....	6
1.5.4. Plasticidad.....	7
1.5.6. Tenacidad	7
1.5.7. Dureza	7
1.5.8. Resiliencia.....	7
1.5.9. Fusibilidad.....	8
1.5.10. Soldabilidad	8
1.5.11. Propiedades físicas.....	8
1.5.12. Estructura.....	8
1.5.13. Densidad.....	9
1.5.14. Peso específico.....	10
1.5.15. Punto de fusión	10
1.5.16. Propiedades térmicas.....	10
1.5.17. Conductividad eléctrica	10
1.5.18. Conductividad térmica.....	10
1.5.19. Dilatación	10
1.5.20. Propiedades químicas.....	10
1.6. Ventajas Del Acero A36	11

1.6.1.	Aplicaciones.....	11
1.6.2.	Diagramas de equilibrio.....	11
1.6.3.	Información Que Proporciona El Diagrama De Fase.....	12
1.6.4.	Diagrama De Fases Hierro (Fe) – Carbono (C).....	12
1.7.	Proceso De Soldadura SMAW	14
1.7.1.	Definición:.....	14
1.7.2.	Equipo de soldadura	14
1.7.3.	Ventajas, Limitaciones y Aplicaciones.....	15
1.7.4.	Electrodos.....	17
1.8.	Proceso de Soldadura FCAW	18
1.8.1.	Definición	18
1.8.2.	Equipo.....	18
1.8.3.	Aplicaciones, ventajas y desventajas	19
1.8.4.	Características del electrodo	20
1.8.5.	Clasificación de los electrodos	21
1.8.6.	Características del Proceso.....	21
1.9.	Soldabilidad.....	22
1.9.1.	Soldabilidad metalúrgica	22
1.9.2.	Soldabilidad operativa	22
1.9.3.	Soldabilidad constructiva.....	22
1.9.4.	Parámetros de influencia en la soldabilidad	23
1.10.	Metalurgia de la Soldadura	23
1.10.1.	Características de la Metalurgia	24
2.	METODOLOGÍA.....	25
2.1.	Introducción.....	25
2.2.	Selección del Material Base	25
2.2.1.	Calculo Del Espesor De La Plancha De Pared Del Tanque	26
2.2.2.	Calculo Del Espesor De La Plancha De Fondo Del Tanque	27
2.2.3.	Calculo Del Espesor De La Plancha Del Techo Del Tanque	28
2.3.	Selección del Proceso de Soldadura.....	29
2.4.	Especificaciones del Proceso de Soldadura (WPS)	30
2.5.	Selección del Material de Aporte	30
2.5.1.	Alambre o Material de Aporte para proceso FCAW	31
2.5.2.	Electrodo o Material de Aporte para proceso SMAW	32
2.6.	Análisis de soldabilidad del acero ASTM A36.....	33
2.6.1.	Ensayo de Varestraint.....	33
2.6.2.	Restricciones del Ensayo de Varestraint	33
2.6.3.	Ensayo de Houldcroft.....	34
2.6.4.	Tamaño de las placas	34
2.6.5.	Preparación de las juntas y diseño de la unión	34

2.7. Soldadura de las placas	35
2.7.1. Equipo de soldadura	36
2.8. Ensayos no Destructivos.....	41
2.8.1. Ensayo de Tintas Penetrantes	41
2.8.2. Radiografía Industrial	43
2.9. Preparación de las juntas y diseño de la unión para placas a soldar bajo la norma ASME sección IX.....	46
2.9.1. Soldadura de las placas.....	46
2.9.2. Equipo de Soldadura.....	47
2.10. Ensayos No Destructivos para la calificación de Soldadura.....	48
2.10.1. Ensayo de Tintas Penetrantes	48
2.10.2. Radiografía Industrial	50
2.11. Ensayos Destructivos	51
2.11.1. Maquinado y preparación de las probetas.....	51
2.11.2. Tamaño de probetas ensayadas.....	51
2.12. Criterio de aceptación según la norma ASME sección IX.....	52
2.12.1. Inspección Visual	52
2.12.2. Doblado de raíz y doblado de cara.....	52
2.12.3. Ensayo de Tracción	53
2.12.4. Macrográficas	53
2.12.5. Micrográficas.....	54
2.13. Ensayos de Tracción.....	¡Error! Marcador no definido.
2.14. Ensayos de Doblado	55
2.15. Inspección Metalográfica	56
2.15.1. Preparación de Muestras Metalográficas	57
2.16. Ensayo de dureza	60
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
3.1. Resultados de Inspección Visual.....	62
3.1.1. Ensayo de Varestraint.....	62
3.1.2. Ensayo de Houldcroft.....	64
3.1.3. Placas para la realización de ensayos destructivos.....	66
3.2. Resultados del Ensayo de Tintas Penetrantes	67
3.2.1. Ensayo de Varestraint.....	67
3.2.2. Ensayo de Houldcroft.....	70
3.2.3. Placas para la realización de ensayos destructivos.....	72
3.3. Resultados del Ensayo de Radiografía.....	74
3.3.1. Ensayo de Varestraint.....	74
3.3.2. Ensayo de Houldcroft.....	80

3.3.3.	Placas a Ensayar	84
3.4.	Resultados de Ensayo de Tracción	90
3.4.1.	Carga Máxima Registrada y Resistencia a la Tracción en las Probetas Ensayadas.....	91
3.4.1.	Análisis Comparativo de Tracción	96
3.5.	Resultados del Ensayo de Doblado	98
3.5.1.	Calificación del Ensayo de Doblado para espesor de 8 [mm]	104
3.5.2.	Calificación del Ensayo de Doblado para espesor de 6 [mm]	104
3.6.	Resultados de Ensayo de Dureza	105
3.6.1.	Valores de Dureza obtenidos en las Probetas de 6 [mm]	105
3.6.2.	Valores de Dureza obtenidos en las Probetas de 8 [mm]	105
3.6.3.	Diagramas de Dureza	106
3.7.	Resultados de Macrografías.....	110
3.7.1.	Análisis Comparativo de ZAC.....	111
3.8.	Resultados Micrografías.....	112
3.9.	Discusión de Resultados.....	119
4.	CONCLUSIONES.....	121
	RECOMENDACIONES.....	121
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	123
	ANEXOS	125

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de Fase Hierro-Carbono.....	12
Figura 1.2. Esquema de procesos de soldadura SMAW.....	14
Figura 1.3. Equipo de Soldadura.....	15
Figura 1.4. Partes de Electrodo Revestido.....	17
Figura 1.5. Sistema de Clasificación AWS A5.5 y A5.1.....	17
Figura 1.6. Esquema de los componentes del proceso FCAW.....	18
Figura 1.7. Esquema detallado del arco del proceso de soldadura FCAW.....	19
Figura 1.8. Característica para la especificación para el proceso de soldadura FCAW.....	21
Figura 1.9. Clasificación de Electrodos.....	21
Figura 1.10. Variación del coeficiente de soldabilidad S en función de la concentración de carbono en el acero.....	22
Figura 2.1. Dimensión de las probetas (a) Houldcroft y (b) Varestraint.....	34
Figura 2.2. Esquema de realización del Ensayo de Varestraint.....	35
Figura 2.3. Ángulo de apertura entre placas para soldar.....	35
Figura 2.4. Probeta para el Ensayo Varestraint.....	36
Figura 2.5. Probeta para ensayo de Houldcroft, bisel a 60° acero A36.....	36
Figura 2.6. (a) Equipo de Soldadura FCAW y (b) Equipo de Soldadura SMAW.....	36
Figura 2.7. Preparación para el ensayo de Varestraint.....	37
Figura 2.8. Preparación de la probeta con el peso para realizar el ensayo de Varestraint.....	39
Figura 2.9. Preparación de Probetas para ensayo de Houldcroft.....	40
Figura 2.10. Cordón de Soldadura proceso FCAW. Ensayo Varestraint.....	40
Figura 2.11. Cordón de Soldadura proceso SMAW, Ensayo Houldcroft.....	40
Figura 2.12. Inspección visual a la probeta de Houldcroft.....	41
Figura 2.13. Inspección visual a la probeta de Varestraint.....	41
Figura 2.14. Tintas Penetrantes.....	42
Figura 2.15. Probeta lista después de realizar la limpieza.....	42
Figura 2.16. Aplicación del Líquido Penetrante.....	42
Figura 2.17. Aplicación del Revelador a probetas de Ensayo Varestraint.....	43
Figura 2.18. Aplicación del Revelador a probetas de Ensayo de Houldcroft.....	43
Figura 2.19. Muestra las dimensiones de las probetas de prueba que deben analizarse para calificar un procedimiento de soldadura.....	46
Figura 2.20. Preparación de juntas.....	46
Figura 2.21. Bisel a 60°, acero ASTM A36.....	47
Figura 2.22. Colocación de Respaldos, con separación de 2 [mm].....	47
Figura 2.23. Realización del cordón de soldadura.....	47
Figura 2.24. Cordón de Soldadura SMAW e=8 [mm].....	48
Figura 2.25. Limpieza del cordón.....	48
Figura 2.26. Probeta lista después de realizar la limpieza.....	49
Figura 2.27. Probeta lista para ensayar.....	49
Figura 2.28. Aplicación del Revelador.....	50
Figura 2.29. Tamaño de probeta seleccionada de acuerdo a los requerimientos, para la realización de ensayos.....	52
Figura 2.30. Probeta de Ensayos de Tracción.....	54
Figura 2.31. Probeta de Ensayos de Doblado.....	56
Figura 2.32. Corte de las placas para extracción de las muestras metalográficas.....	57
Figura 2.33. Muestra Metalográfica.....	58
Figura 2.34. Corte de las Probetas.....	58

Figura 2.35. Muestra metalográfica montada.....	58
Figura 2.36. Muestra metalográfica siendo pulida.....	59
Figura 2.37. Ataque químico de las probetas.....	60
Figura 2.38. Durómetro HR-150A.....	61
Figura 2.39. Distribución de las medidas de dureza.....	61
Figura 2.40. Probetas realizadas la prueba de dureza.....	61
Figura 3.1. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta C8-T1.....	93
Figura 3.2. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta C6-T1.....	94
Figura 3.3. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta S8-T1.....	94
Figura 3.4. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta S6-T1.....	94
Figura 3.5. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta F8-T1.....	95
Figura 3.6. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta F6-T1.....	95
Figura 3.7. Análisis Comparativo de Tracción de Probetas de espesor de 6 [mm].....	96
Figura 3.8. Análisis Comparativo de Tracción de Probetas de espesor de 8 [mm].....	97
Figura 3.9. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta S6.....	106
Figura 3.10. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta F6.....	106
Figura 3.11. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta C6.....	107
Figura 3.12. Esquema Comparativo de Durezas de probetas de espesor 6 [mm].....	107
Figura 3.13. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta S8.....	108
Figura 3.14. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta F8.....	108
Figura 3.15. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta C8.....	108
Figura 3.16. Esquema Comparativo de Durezas de probetas de espesor 8 [mm].....	109

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de los Electroodos AWS.....	4
Tabla 1.2. Composición Química del Acero A36.....	5
Tabla 1.3. Propiedades del Acero A36.....	11
Tabla 2.1. Datos de entrada para el cálculo de espesores, usados comúnmente en la industria.....	26
Tabla 2.2. Norma API 650.....	27
Tabla 2.3. Espesor mínimo especificado en la norma API 650, tabla 2.1.....	27
Tabla 2.4. Espesor de placa circular inferior en la norma API 650, tabla 5.1a.....	28
Tabla 2.5. Especificaciones del Proceso de Soldadura FCAW.....	30
Tabla 2.6. Especificaciones del Proceso de Soldadura SMAW.....	30
Tabla 2.7. Información Técnica del electrodo E71T1.....	31
Tabla 2.8. Propiedades Mecánicas del electrodo E71T1.....	31
Tabla 2.9. Parámetros de Soldadura Recomendados del electrodo E71T1.....	32
Tabla 2.10 Información Técnica del electrodo E6010.....	32
Tabla 2.11 Propiedades Mecánicas del electrodo 6010.....	32
Tabla 2.12 Parámetros de Soldadura Recomendados del electrodo E6010.....	32
Tabla 2.13. Identificación de placas y Condiciones de trabajo para el ensayo de Varestraint.....	44
Tabla 2.14. Parámetros usados en el revelado de película para el ensayo de Varestraint.....	44
Tabla 2.15. Identificación de placas y Condiciones de trabajo para el ensayo de Houldcroft.....	45
Tabla 2.16. Parámetros usados en el revelado de película para el ensayo de Houldcroft.....	45
Tabla 2.17. Identificación de Placas para Ensayos de Radiografía.....	50
Tabla 2.18. Condiciones de trabajo para ensayar las placas.....	50
Tabla 2.19. Condiciones de Revelado para placas a ensayar.....	51
Tabla 2.20. Características de probetas a Ensayar.....	54
Tabla 2.21. Identificación y dimensiones de las probetas a ensayar.....	55
Tabla 2.22. Ensayo de Tracción.....	55
Tabla 2.23. Probetas de Doblado Ensayado.....	56
Tabla 2.24. Reactivo de ataque para examen microscópico.....	60
Tabla 3.1. Resultados de Inspección Visual del Ensayo de Varestraint.....	62
Tabla 3.2. Identificación de Discontinuidades.....	64
Tabla 3.3. Resultados de Inspección Visual del Ensayo de Houldcroft.....	64
Tabla 3.4. Identificación de Discontinuidades y Calificación del Ensayo de Houldcroft.....	65
Tabla 3.5. Resultados de Inspección Visual a las placas a Ensayar.....	66
Tabla 3.6. Identificación de Discontinuidades y Calificación de las placas a ensayar.....	66
Tabla 3.7. Resultados de Tintas Penetrantes del Ensayo de Varestraint.....	67
Tabla 3.8. Identificación y calificación de Tintas Penetrantes para Ensayo de Varestraint.....	69
Tabla 3.9. Resultados de Tintas Penetrantes Para Ensayo de Houldcroft.....	70
Tabla 3.10. Identificación y calificación de Tintas Penetrantes para Ensayo de Houldcroft.....	71
Tabla 3.11. Resultados de Tintas Penetrantes Para Placas a Ensayar.....	72
Tabla 3.12. Identificación y calificación de Tintas Penetrantes para placas a ensayar.....	73
Tabla 3.13. Resultado de Radiografía para el Ensayo de Varestraint.....	74
Tabla 3.14. Resultado de Radiografías para el Ensayo de Houldcroft.....	80

Tabla 3.15. Resultado de Radiografías a las placas a ensayar.....	84
Tabla 3.16. Identificación y dimensiones de las probetas de tracción.	90
Tabla 3.17. Resultados de Ensayo de Tracción.	91
Tabla 3.18. Calificación del ensayo de Tracción.	93
Tabla 3.19. Análisis comparativo de las probetas de espesor de 6 [mm].	96
Tabla 3.20. Análisis comparativo de las probetas de espesor de 8 [mm].	97
Tabla 3.21. Resultado de Ensayo de Doblado proceso combinado de espesor 8 [mm]. ..	98
Tabla 3.22. Resultado de Ensayo de Doblado proceso combinado de espesor 6 [mm]. ..	99
Tabla 3.23. Resultado de Ensayo de Doblado proceso SMAW de espesor 8 [mm].	100
Tabla 3.24. Resultado de Ensayo de Doblado proceso SMAW de espesor 6 [mm].	101
Tabla 3.25. Resultado de Ensayo de Doblado proceso FCAW de espesor 8 [mm].	102
Tabla 3.26. Resultado de Ensayo de Doblado proceso FCAW de espesor 6 [mm].	103
Tabla 3.27. Calificación del Ensayo de Doblado para probetas de 8 [mm].	104
Tabla 3.28. Calificación del Ensayo de Doblado para probetas de 6 [mm].	104
Tabla 3.29. Valores de dureza obtenidos en las probetas con espesor de 6 [mm].	105
Tabla 3.30. Valores de dureza obtenidos en las probetas con espesor de 8 [mm].	105
Tabla 3.31. Resultado de Macrografías.	110
Tabla 3.32. Análisis Comparativo de ZAC.....	111
Tabla 3.33. Análisis de Micrografías del Material Base.....	112
Tabla 3.34. Análisis de Micrografías de probeta C8.....	112
Tabla 3.35. Análisis de Micrografías de probeta C6.....	114
Tabla 3.36. Análisis de Micrografías de probeta S8.....	115
Tabla 3.37. Análisis de Micrografías de probeta S6.....	116
Tabla 3.38. Análisis de Micrografías de probeta F8.....	117
Tabla 3.39. Análisis de Micrografías de probeta F6.....	118

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realiza el estudio de los procesos de soldadura FCAW y SMAW con electrodo E71T1, gas de aporte CO₂ y del electrodo E6010 respectivamente, además de la combinación de estos en juntas soldadas de Acero ASTM A 36 en la fabricación de tanques de petróleo. El objetivo de este estudio es determinar las propiedades mecánicas y defectos de las juntas soldadas con cada uno de los procesos de soldadura establecidos para poder comparar y llegar a obtener el mejor proceso de soldadura.

Este trabajo se realizó primeramente obteniendo las probetas bajo la Norma API 650, la cual nos indica las dimensiones de cada una de las juntas de Acero ASTM A 36, para luego proceder a realizar cada uno de los procesos de soldadura con diferente material de aporte respectivamente.

Los ensayos de soldabilidad realizados fueron los ensayos de Varestraint y Houldcroft, mientras que los ensayos mecánicos fueron: tracción, doblez guiado, análisis metalografía y análisis macrografía los cuales se realizaron en los laboratorios de Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

Realizado los ensayos destructivos y comparados cada una de las propiedades mecánicas obtenidas se llegó a determinar el mejor proceso de soldadura, el cual fue el proceso SMAW- FCAW con electrodos E6010 y E71T1, gas protector CO₂.

Se desarrolló un procedimiento de fabricación y de soldadura con cada proceso con electrodo E71T1 con gas protector CO₂ y el E6010 los cuales se respaldan con los WPS (especificaciones del procedimiento de soldadura) y PQR (registro de calificación del procedimiento de soldadura) realizados.

Palabras clave: API 650, SMAW, FCAW, comparación de procesos, ASTM A36.

ABSTRACT

In the present work of investigation is made the study of welding processes FCAW and SMAW with material of contribution E71T1, gas of contribution CO₂ and the electrode E6010, besides the combination of these in welded joints of Steel ASTM A-36 in the manufacture of oil tanks. The objective of this study is to determine the mechanical properties and defects of welded joints with each of the established welding processes in order to compare and get to obtain the best welding process. This work was first performed by obtaining the specimens under the Standard API 650, which tells us the dimensions of each of the Steel ASTM A-36 joints, and then proceed to perform each of the welding processes with different input material respectively. The tests carried out were of traction, guided bending, metallography analysis and macro analysis, which were carried out in the Mechanical laboratories of the National Polytechnic School. Once the destructive tests were carried out and each of the mechanical properties obtained was compared, the best welding process was determined, which was the SMAW-FCAW process with the filler material E6010 and E71T1, protective gas CO₂. A manufacturing and welding process was developed with each process with E71T1 filler material with CO₂ protective gas and E6010 which are backed up with the WPS (welding procedure specifications) and PQR (qualification record of the welding process) made.

Keywords: API 650, SMAW, FCAW, comparative processes, ASTM A-36.

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A36 BAJO LA NORMA API 650, CON ELECTRODOS E6010 MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA SMAW Y ELECTRODOS E71T1 MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA FCAW”

INTRODUCCIÓN

A nivel industrial en Ecuador la fabricación de tanques mediante los procesos de soldadura por FCAW y SMAW son los más utilizados, pero para la mayoría de las empresas suelen combinar estos procesos.

El principal objetivo al fabricar tanques por juntas soldadas es que tengan suficiente resistencia y rigidez, que sean económicas y que puedan montarse de manera práctica, ya que la función principal de estos soporta cargas de presión, vibración y sismos. De esta manera la soldadura es un punto muy importante ya que depende de qué tipo de proceso de soldadura se esté aplicando en la construcción de tanques.

En nuestro país existen varias empresas que se dedican a la fabricación de tanques de almacenamiento, que cuenta con la maquinaria y con mano de obra calificada, pero la mayoría de empresas no posee los estudios que validen sus procedimientos y que garanticen sus productos.

En la Amazonía se está aplicando los distintos tipos de soldadura que se utilizan para la fabricación de tanques de almacenamiento de petróleo, pero existe un desconocimiento de la aplicación de las normas que establecen el estándar y control de calidad de la soldadura, así como también ensayos que se debe aplicar para garantizar el proceso de soldadura adecuado.

Objetivo general

Analizar los parámetros de soldabilidad en tanques de almacenamiento bajo la norma API 650 con los procesos de soldadura SMAW y FCAW

Objetivos específicos

- Obtener un diseño de soldadura acorde a las especificaciones técnicas de la norma API 650
- Establecer la secuencia de proceso y el número de pases necesarios para cada tipo de cordón de soldadura

- Determinar el proceso de soldadura más óptimo de acuerdo a la norma API 650 que cumplan las exigencias de diseño.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Norma API 650

Esta norma trata del diseño y cálculo de tanques de almacenamiento para líquidos que presenta bajas presiones y establece los requisitos mínimos de material, diseño, fabricación, montaje e inspección para tanques de almacenamiento vertical, cilíndrico, sobre suelo, cerrado y abierto, soldados en varios tamaños y capacidades para presiones internas que se aproximan a la presión atmosférica, pero se permite una presión interna más alta cuando se cumplen con requisitos adicionales. Esta norma se aplica solo a los tanques cuyo fondo es uniformemente soportado y a los tanques en servicio no refrigerado que tienen una temperatura máxima de diseño de 93 °C o menos. (API Standard, 2013)

1.2. Limitaciones

Esta norma solo puede usarse para lo que corresponde a techo, fondo y carcasa no para tuberías internas, teniendo en cuenta que se usa para las primeras uniones que corresponde a brida en conexiones bridadas empernadas (cuando no hay otra especificación), a la superficie de sellado para conexiones o accesorios patentados, a la unión roscada en el tubo en una conexión roscada a la carcasa del tanque y a la junta circunferencial en las conexiones de los extremos de soldadura si no está soldada a una brida. (API Standard, 2013)

1.3. Requisitos de los materiales a usarse

Los materiales que se usan en este procedimiento deben cumplir especificaciones tales como:

- No se puede utilizar hierro fundido para partes que deban soportar presión.
- Por la toxicidad y la fragilidad del hidrogeno no se puede usar materiales que contenga cadmio.

De acuerdo a esta norma cada material debe tener la especificación de que cumplen con los requerimientos impuestos, en caso contrario se debe realizar u obtener pruebas fehacientes mediante ensayos normalizados de que tiene requisitos químicos y propiedades mecánicas dentro del rango permisible de una especificación enumerada en esta norma. Los cuales están especificados en la sección 4 y en los anexos L y N de la misma.

1.3.1. Especificación de los electrodos de soldadura.

Los electrodos que se usan para esta norma se utilizan según la resistencia a la tracción mínima inferior a 550 Mpa (80 ksi), la soldadura manual por arco es la más recomendada mediante los electrodos se ajustarán a las series de clasificación E60 y E70 en función de la norma AWS 5.1 estos se ajustaran a los requerimientos de campo y a las especificaciones.

Tabla 1.1. Clasificación de los Electrodo AWS.

YZ	Tipo de Recubrimiento	Tipo de Corriente
10	Celulósicos	DC+
11		AC, DC+
12	Rutílicos	AC, DC-
13		AC, DC-, DC+
15	Bajo hidrógeno (Básico)	DC+
16		AC, DC+
18		AC, DC+
28		AC, DC+
48		AC, DC+

(Espinoza, 2019)

Los materiales son aprobados por el comprador, se debe considerar la compatibilidad química con la junta y materiales de la brida. Además no se requieren juntas de repuesto a menos que se especifique.

1.4. Acero Astm A36

El acero ASTM A36 es un material que por sus buenas características y propiedades se ha convertido en el más usado por la industria ecuatoriana utilizado en la construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, edificaciones remachadas o soldadas. Este acero es el resultado de la composición de diferentes elementos químicos, siendo el más importante y mayor cantidad el hierro convirtiéndose en el soluto y el de menos presencia el carbón, el cual, no supera el 1,2% en peso de la composición, por lo general, alcanza porcentajes entre el 0,2% y el 0,3%, lo que facilita el proceso de moldeo de este acero. (Castro, 2011)

Tabla 1.2. Composición Química del Acero A36.

Elemento Químico	Composición Química
Carbono (C)	0,26 % máx.
Manganeso (Mn)	No hay requisito
Fósforo (P)	0,04% máx.
Azufre (S)	0,05% máx.
Silicio	0,40% máx.
Cobre (Cu) * <i>Cuando se especifique</i>	0,20% min.

(Fuente: Castro 2011)

A los aceros también se los clasifica por el tipo tratamiento térmico que se le realice, este es un proceso de calentamiento, permanencia y enfriamiento a temperaturas y condiciones determinadas, al que se someten los metales con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad. Este proceso no cambia la composición química, pero si cambiar su estructura y, por lo tanto, modificar sus propiedades físicas y mecánicas. Los tratamientos térmicos básicos son:

1.4.1. Temple

Es el tratamiento térmico que consiste en elevar la temperatura del acero, manteniéndolo así por un determinado tiempo, para luego enfriarlo muy rápido con una velocidad crítica (que es la velocidad mínima de enfriamiento) para lograr esto se usan agentes como agua o aceites. Como objetivo este tratamiento aumenta la dureza y la resistencia del acero. (Rodríguez, 2018)

1.4.2. Revenido

Es un proceso que se aplica después de un temple, a temperaturas cercanas a la crítica inferior, este tratamiento conserva dureza y aumenta tenacidad, tendiendo hacia el estado de equilibrio. (Rodríguez, 2018)

1.4.3. Recocido

Este tratamiento consiste en un calentamiento por encima a la temperatura de transformación austenítica, seguida de un enfriamiento lento. Como resultado aumenta la elasticidad y disminuye la dureza eliminando las tensiones internas creadas en el proceso de fabricación. (Rodríguez, 2018)

1.4.4. Normalizado

Es un tratamiento térmico consiste en un calentamiento a una temperatura ligeramente superior a la crítica, luego de una permanencia a dicha temperatura sigue un enfriamiento a temperatura ambiente, con este tratamiento el acero obtiene un grano más refinado, incrementar la solidez del acero y reducir la segregación de los componentes en operaciones de fundición y forja. (Rodríguez, 2018)

1.5. Propiedades y Características De Los Aceros

Todos los materiales poseen propiedades y características inherentes que los diferencian entre sí, entre las principales propiedades se tienen: eléctricas, magnéticas, mecánicas, químicas físicas y térmicas, como ya se mencionó están en función de su composición. (Andres16012008, 2011)

1.5.1. Propiedades mecánicas

En términos de sus propiedades mecánicas, el acero A-36 está diseñado para ser resistente y fuerte. Tiene una resistencia máxima a la tracción de 58,000 a 79.800 libras por pulgada cuadrada (psi) (10.355 a 14.247 kg / cm²). El límite de elasticidad, o la cantidad de presión que se necesita para doblar el acero hasta el punto en que no retorne a su forma original, es de 36.300 psi (6.481 kg / cm²). El alargamiento, o la cantidad de estiramiento del acero es capaz de resistir sin romperse, es del 20%. Las principales propiedades mecánicas del acero:

1.5.2. Resistencia

Es un factor decisivo del acero de responder a eventos extremos. En algunos casos hay cargas no previstas que se aplican a la estructura, pero no son solo un aumento de las cargas consideradas en el cálculo, sino que las estructuras experimentan transiciones inesperadas que llevan a sus elementos al pasar de la compresión a la tracción. La habilidad del acero ayuda a manejar tanto tracción como compresión para mitigar cualquier falla. Adicionalmente las resistencias reales del acero estructural superan las resistencias de diseño, proveyendo así a la resistencia adicional a cargas extremas no previstas

1.5.3. Elasticidad

Es la capacidad de un cuerpo para volver a su forma inicial al dejar de actuar la fuerza que lo deformó. Propiedad de un cuerpo se deforma de manera proporcional a la carga aplicada y recupera su forma original una vez ha cesado la acción de la carga. Un cuerpo se denomina perfectamente elástico si no experimenta deformaciones permanentes, es decir, siempre recupera su figura inicial; por el contrario, un cuerpo se dice que es perfectamente plástico si sufre deformaciones permanentes, de modo que mantiene a lo largo del tiempo la nueva configuración adquirida.

1.5.4. Plasticidad

Es la capacidad de deformación de un metal antes que se rompa; si la deformación se produce por alargamiento se denomina ductilidad y por compresión, se llama maleabilidad.

La elasticidad y la plasticidad coexisten, ya que todos los materiales se caracterizan por un comportamiento elástico, hasta cierto punto, denominado límite elástico (esfuerzo máximo, generalmente expresado en kg/mm², al que puede someterse un material sin que se produzcan deformaciones permanentes), y luego se comportan de forma plástica durante un intervalo determinado hasta la rotura.

1.5.6. Tenacidad

La tenacidad es una cualidad que indica la resistencia a la rotura que tiene un material al absorber la tensión y presión de una carga o impacto repentino. Tiende a mejorar a medida que aumenta la temperatura.

Un material tenaz puede sufrir cierta deformación al absorber un impacto repentino, mientras que un material muy tenaz poseerá una elevada resistencia a la deformación, así como una elevada ductilidad (habilidad para cambiar de forma sin llegar a quebrarse). La cualidad de tenacidad se opone a la de fragilidad.

1.5.7. Dureza

La dureza define la habilidad de un material para resistir una deformación o cambio permanente cuando está expuesto a peso, o resistencia al corte, al arañado u otras formas de abrasión. Por lo general, cuanto más duro es un material mayor es su resistencia

1.5.8. Resiliencia

Mediante la Resiliencia se mide el grado de tenacidad o de ductilidad del acero a una determinada temperatura (generalmente, se establecen valores de resiliencia a temperatura ambiente, a 0°C, o a temperatura de -20°C).

El ensayo que proporciona el dato de la resiliencia del acero consiste en el ensayo de flexión por choque sobre una probeta Charpa, que es una probeta entallada de medidas normalizadas según la UNE 7475-1:1992. Mediante dicho ensayo, la resiliencia, medida en julios (J), se determina a una temperatura prefijada. Frecuentemente, las normas de producto exigen que las probetas absorban una energía de impacto mayor que 27 J a

una temperatura de ensayo prefijada. A dicha temperatura se le denomina entonces T27J. Resistencia a la rotura: Es la resistencia que opone el material a romperse por un esfuerzo mecánico exterior.

1.5.9. Fusibilidad

Es la facilidad de poder dar forma a los metales, fundiéndolos y colocándolos en moldes.

1.5.10. Soldabilidad

Es la facilidad de los metales para que dos piezas en contacto puedan unirse formando un conjunto rígido. Una unión sólida y fuerte es que la soldadura no tenga imperfecciones ni defectos, y debe ser tan resistente como el material base. Un parámetro útil para evaluar la soldabilidad de los aceros es el concepto de CARBONO EQUIVALENTE (CEV), que equipara las soldabilidades relativas de diferentes aleaciones de acero y las compara con las propiedades de un acero al carbono simple.

Entre las propiedades físicas están relacionadas con la estructura, materia, cuerpo, peso, masa, volumen, densidad, peso específico, y su comportamiento ante agentes físicos como la electricidad, magnetismo, calor, sonido, entre otros.

1.5.11. Propiedades físicas

Una propiedad física que tiene una cuenta en la elección del acero es su densidad, que es una medida de la masa por unidad de volumen, o el peso de un receptor dado un primer volumen. El acero A-36 tiene una densidad de 7,85 gramos por centímetro cúbico; en el sistema británico, esto se traduce en 0,284 libras por pulgada cuadrada. Otra propiedad importante es su estructura que dependiendo de las variaciones que existan en ellas está dada sus propiedades, ya que cada estructura se da condiciones de temperatura y porcentaje de carbono diferente, cada estructura otorga una propiedad al acero.

1.5.12. Estructura

Es el orden de las moléculas que varían por el proceso de transformación o fabricación, en ciertos casos se diferencia a simple vista, pero en otros es necesario el uso de un microscopio.

La estructura interna o cristalina de los aceros es un factor fundamental que define el comportamiento de los materiales, esta se clasifica en función del tamaño de grano de

la siguiente forma: ferrita, cementita, perlita, martensita y austenita. (Andres16012008, 2011)

Ferrita: Es una solución sólida del carbono en el hierro alfa. La solubilidad máxima del carbono en la ferrita es de 0,008% C a 20 °C y 0,03% a 723 °C. Su red cristalina FCC y es una solución sólida intersticial. La ferrita es magnética y muy plástica. (Rodríguez, 2018)

Cementita: Es un compuesto químico de hierro y carbono con red cristalina compleja (rómica), dureza muy alta (HB 650-800), lo que la hace bastante frágil, con una temperatura de fusión de 1600 °C, no es estable y en condiciones determinadas se desintegra formando grafito. (Rodríguez, 2018)

Perlita: Es una mezcla mecánica formada por láminas o placas alternadas de ferrita y cementita durante el enfriamiento lento de un acero a temperatura eutéctica, contiene 0,8% de carbono. (Rodríguez, 2018)

Martensita: La martensita es una microestructura monofásica no equilibrada que se produce de la transformación de la austenita sin difusión. La reacción ocurre rápido y a baja temperatura que no hay tiempo para que la difusión del C se produzca.

(Rodríguez, 2018)

Austenita: Solución sólida de carbono en el hierro gamma. La máxima solubilidad del carbono en la austenita es 2,14% a 1147 °C y 0,8% a 723 °C. La red cristalina es FCC. La austenita es una solución sólida intersticial no magnética. Esta fase se encuentra en estado estable solo a temperaturas superiores a 723 °C. Tiene una dureza de (HB 180-200). (Rodríguez, 2018)

1.5.13. Densidad

La densidad es la medida de lo que ocupa un cuerpo en relación con lo que pesa, es decir $\text{densidad} = \text{masa} / \text{volumen}$. La medida de la densidad será definida por kg/L, o Kg/cm³. Por lo tanto, el mismo peso de un cuerpo muy denso ocupará muy poco y un cuerpo poco denso ocupará mucho.

La densidad media del acero es de 7850Kg/m³ o 7,85g/cm³.

A pesar de ser un material relativamente pesado, el acero es muy utilizado en la industria, como pieza estructural, ya que es un material con gran resistencia al impacto o a la fatiga. Otra de las ventajas del acero es su bajo costo. (Andres16012008, 2011)

1.5.14. Peso específico

Es el cociente entre el peso del material y el volumen que ocupa en el espacio.

1.5.15. Punto de fusión

Es un límite en el que las moléculas del material se comienzan a separar y deja de comportarse como sólido.

1.5.16. Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas están relacionadas con los mecanismos de transferencia de calor como son conducción, convección, radiación y son las siguientes:

1.5.17. Conductividad eléctrica

Es la facilidad que presenta un material para dejar pasar a través de él la corriente eléctrica.

1.5.18. Conductividad térmica

Es la facilidad que presenta un material para dejar pasar a través de él una cantidad de calor.

1.5.19. Dilatación

Es el aumento de las dimensiones de un metal al incrementarse la temperatura.

1.5.20. Propiedades químicas

Las propiedades químicas dependen de su composición; pero, de manera general se distinguen dos propiedades que son:

Oxidación: La oxidación se produce cuando se combina el oxígeno del aire y el metal. La oxidación es superficial, produciéndose en la capa más externa del metal y protegiendo a las capas interiores de la llamada oxidación total.

Corrosión: Se considera corrosión a toda acción que ejercen los diversos agentes químicos sobre los metales, primero en la capa superficial y paulatinamente en el resto.

(Andres16012008, 2011)

En la siguiente tabla se recopiló los datos de las propiedades más importantes del acero ASTM A36:

Tabla 1.3. Propiedades del Acero A36.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Densidad	7850	Kg/m ³
Límite de Fluencia	32-36 (250-280)	Ksi (MPa)
Resistencia a la Tensión	58-80 (400-550)	Ksi (MPa)
Módulo de Elasticidad	29000	Ksi
% de elongación mínimo	20 (8")	%
Punto de Fusión	1538	°C

(Andres16012008, 2011)

1.6. Ventajas Del Acero A36

1.6.1. Aplicaciones

Tiene muchas aplicaciones, entre las principales están las tuberías, planchas para hacer perfiles para estructuras, para estas aplicaciones existen un rango de espesores. En la fabricación de tubos de acero se parte de una chapa de acero, que se deforma curvándola hasta llegar a una geometría cilíndrica y soldando dos bordes, esta soldadura se extiende a lo largo del tubo o puede ser helicoidal. Los espesores de tuberías están entre los 3 y 6,2 mm, y están normalizados por la cedula de la tubería, el espesor es independiente del diámetro de la tubería. Las planchas de acero se usan para elaborar perfiles para las estructuras metálicas.

Para estructuras de baja resistencia, tubería soldada, piezas no críticas y que no se expongan a altos esfuerzos de puentes, construcciones y edificios se usa esperores que van entre 2 a 4,5 mm.

Para construcciones metálicas, puentes con espesores entre 5 a 13 mm.

(Andres16012008, 2011)

1.6.2. Diagramas de equilibrio

Los diagramas de equilibrio se pueden utilizar para describir la transformación de fase y la fase estable de los aceros. La mayoría de los diagramas de fase han sido construidos según condiciones de equilibrio, son utilizados para entender y predecir muchos aspectos del comportamiento de los materiales. Los diagramas de fases más utilizados involucran temperatura versus composición. (Rodriguez, 2018)

1.6.3. Información que proporciona el diagrama de fase

- Conocer las fases que están presentes a diferentes composiciones y temperaturas bajo condiciones de equilibrio (enfriamiento lento)
 - Determinar la solubilidad de un elemento respecto a otro.
 - Determinar la temperatura a la cual una aleación enfriada bajo condiciones de equilibrio comienza a solidificar y la temperatura a la cual ocurre la solidificación.
 - Conocer la temperatura a la cual empiezan a fundirse las diferentes fases.
- (Rodríguez, 2018)

1.6.4. Diagrama de fases hierro (Fe) – carbono (C)

El diagrama Hierro (Fe) – Carbono (C) posiblemente sea el más importante de todas las combinaciones binarias. El hierro al formar diversas soluciones con muchos elementos con no metales como el C, N e H forma soluciones intersticiales, mientras que con otros metales la solución es por sustitución.

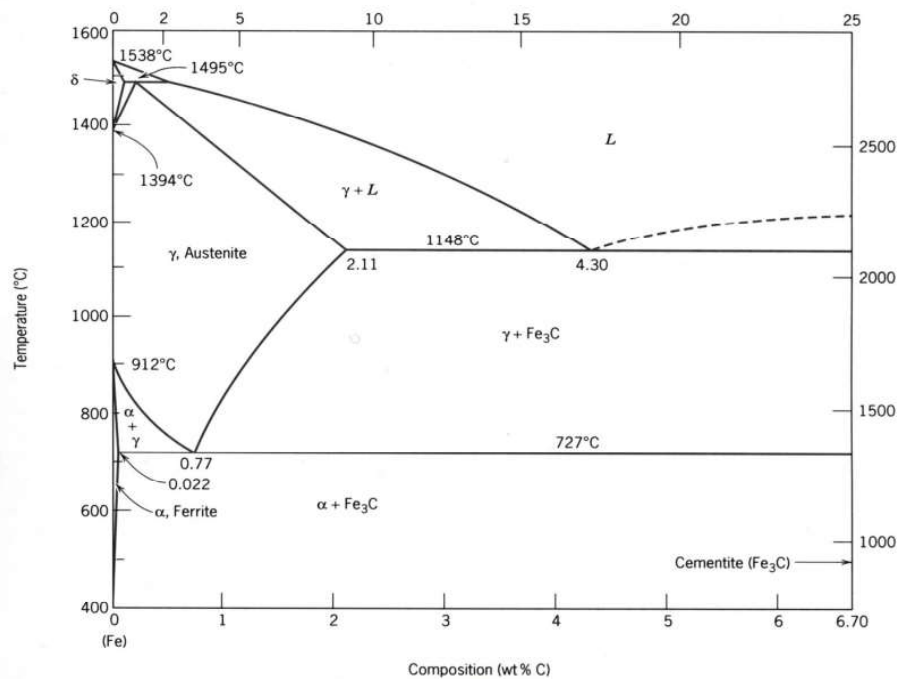


Figura 1.1. Diagrama de Fase Hierro-Carbono.

Fuente: (Balvatin, 2011)

El diagrama de Hierro-Carbono contiene cuatro fases solidas: Ferrita α , austenita γ , cementita y ferrita δ .

α – Ferrita: Solución sólida de C en Fe: En esta fase tiene una estructura de cristal BCC (Cúbica centrada en el cuerpo), y a 0% corresponde a hierro α . El diagrama de fases indica que el carbono es ligeramente soluble en ferrita, ya que la máxima solubilidad sólida de carbono en α ferrita es 0,0218% a 723 °C. La solubilidad de carbono en ferrita α , baja con la disminución de la temperatura, hasta que este alcance 0,008% a 0°C. (Rodríguez, 2018)

γ – Austenita: Solución sólida de C en Fe: Tiene una estructura de cristal FCC (cúbica centrada en las caras), y con mucho mayor solubilidad sólida para el carbono que ferrita α . La solubilidad de carbono en austenita llega a un máximo de 2,11% a 1148 °C y después decrece a 0,8% a 723 °C. Como en el caso de la ferrita α , los átomos de carbono disueltos, pero en mayor grado en el entramado de la FCC. Esta diferencia en la solubilidad sólida de carbono en austenita y ferrita α , es la base del endurecimiento de la mayoría de los aceros. (Rodríguez, 2018)

δ – Ferrita: Solución sólida de C en F: Tiene una estructura cristalina BCC, y su máxima solubilidad de carbono en δ ferrita es de 0,009% a 1495°C. (Rodríguez, 2018)

Fe_3C – Cementita: Es un compuesto intermetálico meta-estable que a temperatura ambiente permanece estable indefinidamente, sin embargo, a temperaturas entre 650 – 700 °C se descompone en α -Fe y C (grafito). (Rodríguez, 2018)

1.7. Proceso De Soldadura SMAW

1.7.1. Definición:

La soldadura por arco de metal protegido es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando. El núcleo del electrodo cubierto consiste en una varilla de metal sólida de material o colado, o bien una varilla fabricada encerrando metal en polvo en una funda metálica. La varilla del núcleo conduce la corriente eléctrica al arco y suministra metal de aporte a la unión.

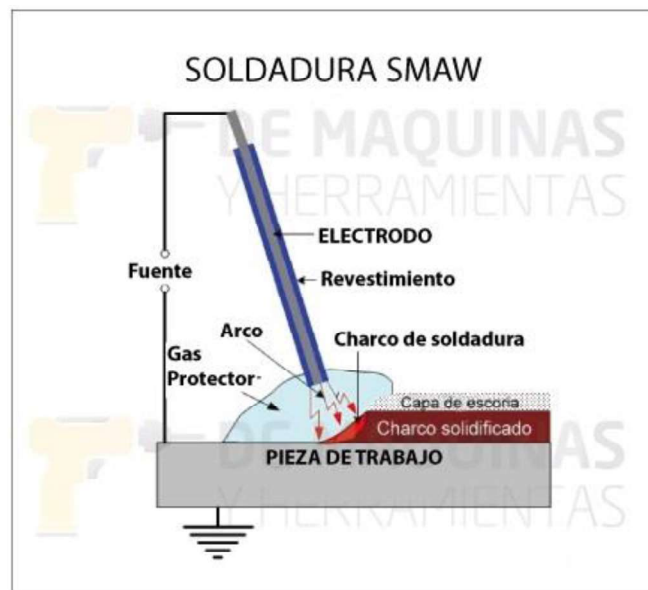


Figura 1.2. Esquema de procesos de soldadura SMAW.
Fuente: (ESAB, 2014)

1.7.2. Equipo de soldadura

El equipo para soldar consta de: fuente de energía, pinza porta-electrodos, conexión a masa y cables de soldeo.

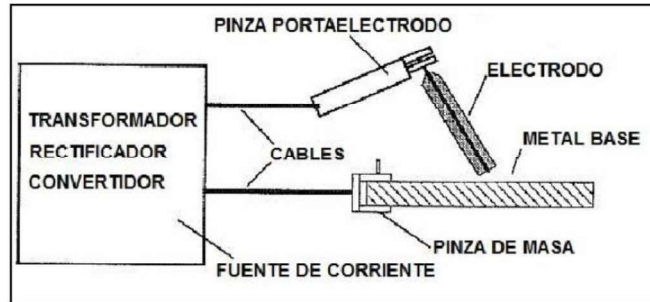


Figura 1.3. Equipo de Soldadura.
Fuente: (ESAB, 2014)

En los equipos las fuentes de potencia se puede utilizar corriente alterna (CA) o bien continua (CC) para la soldadura por arco de metal protegido, dependiendo de la corriente suministrada por la fuente de potencia y del electrodo escogido. El tipo específico de corriente utilizada influye en el rendimiento del electrodo. Los electrodos básicos necesitan mayores tensiones de vacío que los otros tipos de revestimientos.

La pinza porta-electrodos se encarga de conducir la corriente hasta el electrodo y sujetarlo. Las mordazas deben mantenerse en perfecto estado para evitar un sobrecalentamiento que se traduciría en una disminución de la calidad, y dificultaría la ejecución del soldeo. Se debe seleccionar la pinza adecuada al diámetro del electrodo que se va a utilizar.

La conexión de masa de trabajo es un dispositivo que sirve para conectar el cable de pieza de trabajo a esta. Debe producir una conexión fuerte y debe poderse sujetar con rapidez y facilidad a la pieza de trabajo.

Los cables para soldadura sirven para conectar el porta-electrodos y las abrazaderas de tierra a la fuente de potencia; son parte del circuito de soldadura.

1.7.3. Ventajas, Limitaciones y Aplicaciones

1.7.3.1. Ventajas

- Equipo simple, portátil y de bajo costo.
- Aplicable a una amplia variedad de metales, aleaciones, posiciones de soldadura y electrodos.
- Posee tasas de aportación del metal relativamente altas.
- Adecuada para aplicaciones en exteriores ya que el proceso es menos sensible al viento y las corrientes de aire que los procesos de soldadura por arcos protegidos con gas.

- El electrodo recubierto proporciona el metal de aporte y el mecanismo para proteger dicho metal y el metal de soldadura contra una oxidación perjudicial durante la soldadura.
- No se requiere protección con gas auxiliar ni un fundente granular.
- Aplicable a gran variedad de espesores, mayores de 2 mm.

1.7.3.2. Limitaciones

- Necesita remover la escoria y si no se le da una adecuada limpieza entre cordones el cordón puede sufrir una serie de discontinuidades.
- El proceso es discontinuo debido a la longitud limitada de los electrodos.
- Es un proceso lento, debido a la baja tasa de deposición y a la necesidad de retirar la escoria.
- La tasa de deposición es baja, debido a que el electrodo sólo puede consumirse hasta una longitud mínima (unos 5 cm).
- Por tratarse de una soldadura manual, requiere gran pericia por parte del soldador.
- No resulta productivo para espesores mayores de 28 mm.
- No es aplicable a metales de bajo punto de fusión, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos.

1.7.3.3. Aplicaciones

Por razones de mayor productividad, calidad y rentabilidad, el proceso SMAW se ha ido reemplazando gradualmente. Sin embargo, la capacidad del proceso SMAW para lograr soldaduras en zonas de acceso restringido significa que todavía encuentra un uso considerable en ciertas situaciones y aplicaciones.

La construcción pesada, tal como en la industria naval, y la soldadura en campos petroleros se basan en gran medida en el proceso SMAW. Y aunque dicho proceso encuentra una amplia aplicación para soldar prácticamente todos los aceros y muchas de las aleaciones no ferrosas, se utiliza principalmente para unir aceros, tales como aceros suaves de bajo carbono, aceros de baja aleación, aceros de alta resistencia, aceros templados y revenidos, aceros de alta aleación, aceros inoxidables y diversas fundiciones. El proceso SMAW también se utiliza para unir el níquel y sus aleaciones y, en menor grado, el cobre y sus aleaciones, aunque rara vez se utiliza para soldar aluminio.

1.7.4. Electrodo

El elemento fundamental de este proceso es el electrodo, que establece el arco, protege el baño de fusión y que, al consumirse, produce la aportación del material que, unido al material fundido del metal base, va a constituir la soldadura.

El arco produce una temperatura aproximadamente de 3500°C en la punta del electrodo, superior a la necesaria para fundir la mayoría de los metales. El calor funde el metal base y el electrodo revestido, de esta manera se genera una pileta líquida o baño de fusión, que va solidificando a medida que el electrodo se mueve a lo largo de la junta.

En la soldadura de electrodos revestidos el amperaje queda fijado por el diámetro del electrodo y tipo de revestimiento, el voltaje por la longitud del arco.

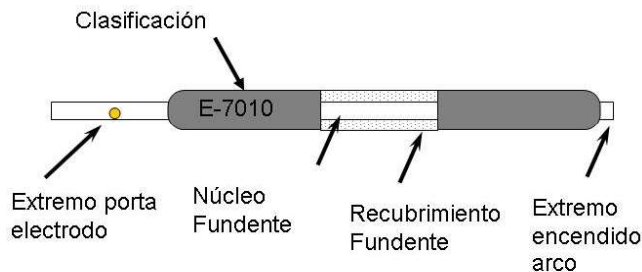


Figura 1.4. Partes de Electrodo Revestido.
Fuente: (ESAB, 2014)

El revestimiento cumple las siguientes funciones: Protección del metal fundido a través de la generación de gas, de la escoria, provee desoxidantes, provee elementos de aleación, facilita el inicio del arco y su estabilidad, determina la forma del cordón y su penetración, establece la posición de soldadura, transmite mayor o menor calor y determina la viscosidad y fusión de la escoria.

Los electrodos recubiertos se clasifican de acuerdo con los requerimientos de especificaciones emitidas por la American Welding Society.



Figura 1.5. Sistema de Clasificación AWS A5.5 y A5.1.
Fuente: (mecanica, 2011)

1.8. Proceso de Soldadura FCAW

1.8.1. Definición

En el proceso de soldadura por arco con electrodo tubular la soldadura radica en la transferencia de calor mediante un arco eléctrico entre un electrodo de aporte consumible continuo y la pieza metálica a soldar. Este proceso suele utilizar protección con un fundente incluido en el electrodo y puede tener o no protección gaseosa adicional.

El proceso FCAW se diferencia de los otros procesos de soldadura debido a que el electrodo tiene incluido ingredientes de fundente rellenando el hueco interno del alambre, por lo tanto, tiene variantes en el proceso de suelda como la protección del arco y el charco de suelda. El cual tiene como objetivo proteger el metal fundido mediante la descomposición y vaporización del núcleo de fundente en el calor y además se resguarda la suelda con la utilización de gas CO₂.

LA suelda por FCAW combina las siguientes características de los diferentes procesos que aportaron para la industrialización de la soldadura:

- La característica de arco manual protegido (SMAW)
- La soldadura MIG
- La soldadura por arco sumergido (SAW)

1.8.2. Equipo

La máquina con la que se realiza este proceso se encuentra en la Figura 1.6.

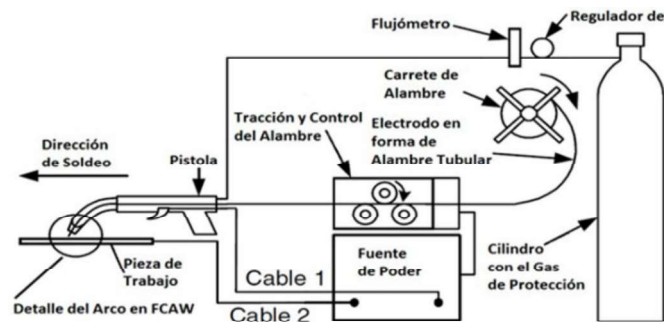


Figura 1.6. Esquema de los componentes del proceso FCAW.
Fuente: (ESAB, www.esab.com.ar, 2011)

La fuente de poder es el elemento que da energía, corriente continua y voltaje constante generalmente.

La unidad de alimentación está conformada por el carrete de alambre, el electrodo en forma de alambre tubular y el sistema de tracción y control del alambre, los cuales son responsables de la alimentación y control de salida del alambre continuamente al arco.

La pistola es la encargada de guiar y energizar al electrodo en forma de alambre.

Gas protector, en el caso de que el alambre no sea auto-prottegido, este gas desaloja el aire alrededor del arco.

La formación del arco voltaico y todos los componentes que pueden verse incluidos en ese punto se encuentran visibles en la Figura 1.7.

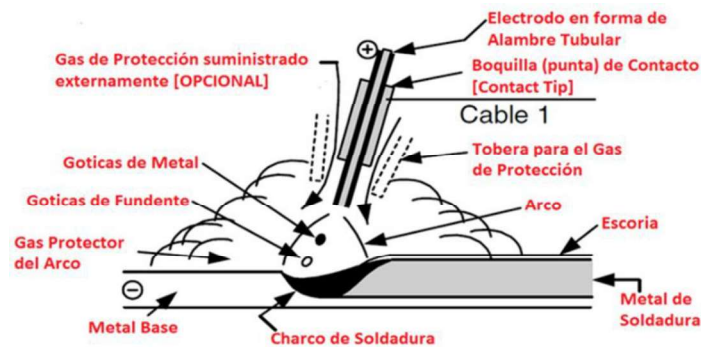


Figura 1.7. Esquema detallado del arco del proceso de soldadura FCAW.
Fuente: (ESAB, www.esab.com.ar, 2011)

1.8.3. Aplicaciones, ventajas y desventajas

1.8.3.1. Aplicaciones principales

Las dos variantes de la soldadura hacen que los parámetros de uso sean en diferentes condiciones, el método auto protegido sirve en aplicaciones que usen la soldadura manual protegida, el método con protección es usado para procesos que unen la soldadura MIG/MAG.

Pero en general el proceso por soldadura tubular tiene amplia aplicación en la fabricación en talleres, construcción en campo y mantenimiento de grades piezas soldadas.

1.8.3.2. Ventajas de la Soldadura FCAW

- Alta calidad y eficiencia del material depositado.
- Excelente acabado del cordón.
- Tipo de soldadura suave y uniforme.

- Alto factor de operatividad.
- Fácil mecanizado.
- Tasa de deposición elevada comparada con el proceso SMAW.
- No requiere limpieza previa minuciosa como en el proceso de GMAW.
- Los perfiles de las soldaduras de filetes horizontales son excelentes.
- Fácil mecanizado por su factor operativo elevado.
- Su arco es visible por lo tanto es fácil de utilizar.
- Los electrodos de auto protección hacen innecesario el equipo para el uso de gas.

1.8.3.3. Desventajas de la Soldadura FCAW

- Produce cubierta de escoria.
- Alambre de electrodo costoso.
- Disposición del espacio para el equipo debe ser correcta y cada elemento debe estar relativamente cerca del punto de soldadura.
- El proceso que requiere barrera gaseosa puede ser ineficiente si hay corrientes de vientos.
- Este proceso se limita a metales ferrosos y a aleaciones con base de níquel.
- Por ser un equipo más complejo, su mantenimiento es mayor comparado con el equipo de SMAW.
- Genera mayor cantidad de humos y vapores.

1.8.4. Características del electrodo

Los alambres tubulares fueron hechos para la soldadura FCAW, en el que consta de agujero en el que contiene fundente de características y funciones parecidas a las del electrodo con revestimiento.

La aplicación de gas de protección puede ser o no aplicada de manera separada, por lo tanto, siendo el caso puede ser por la descomposición de los elementos en el núcleo lo cual son electrodos tubulares auto-protégidos lo cual produce escoria que protege la unión durante el enfriamiento del proceso.

Los electrodos tubulares son hechos en diferentes tamaños estándares de diámetros que conjunto a la composición química del electrodo, por lo que existe dos tipos de electrodos de acuerdo a la concentración de níquel que tiene el electrodo.

Los puntos descritos anteriormente se encuentran descritos y ejemplificados en la Figura 1.9.



Figura 1.8. Características del electrodo para el proceso FCAW..
Fuente: (soldexa, 2015)

1.8.5. Clasificación de los electrodos

De acuerdo con ANSI/AWS A5.20/95 como se indica la figura 1.9

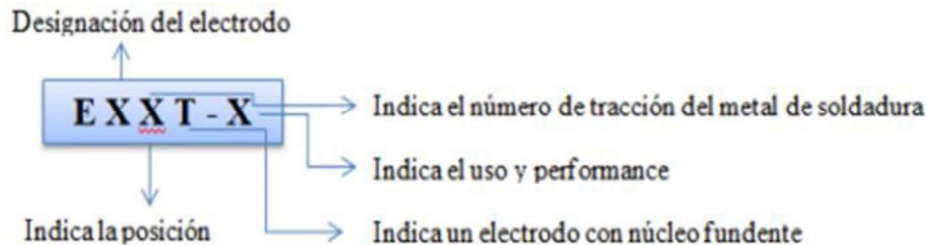


Figura 1.9. Clasificación de Electrodos.
Fuente: (estructuras, 2014)

1.8.6. Características del Proceso

El proceso se caracteriza por tener o no protección gaseosa externa.

Con protección exterior de gas

- Soldaduras suaves y sanas.
- Soldadura con penetración moderada.
- En análisis radiográficos sus propiedades son de fácil estudio.

Sin protección exterior de gas

- Proceso se puede realizar en corriente de aire (campo).
- Alta calidad del material de aporte.
- Moderada penetración.

1.9. Soldabilidad

La soldabilidad es la capacidad de ciertos materiales para ser unidos de forma permanente, estos materiales pueden o no ser de la misma naturaleza.

Tipos de la soldabilidad:

1.9.1. Soldabilidad metalúrgica

Este tipo de soldadura no presenta cambios de la estructura en la zona soldada, hay que tener en cuenta que en aceros aleados e inoxidables austeníticos si pueden presentar una transformación de la microestructura

1.9.2. Soldabilidad operativa

Este tipo de soldadura tiene relación con la parte tecnológica que se utiliza para realizar la unión, por ejemplo, en la soldadura de aceros aleados al cromo suelen formarse óxidos que impiden una buena soldadura por lo que se tiende a realizar una limpieza y utilizar técnicas auxiliares.

1.9.3. Soldabilidad constructiva

Este tipo de soldabilidad tiene que ver con las propiedades físicas del material base, por ejemplo, dilatación y contracción las cuales son responsables de los agrietamientos en la soldadura. Lo que concierne en aplicar tecnología de pre y post- calentamiento.

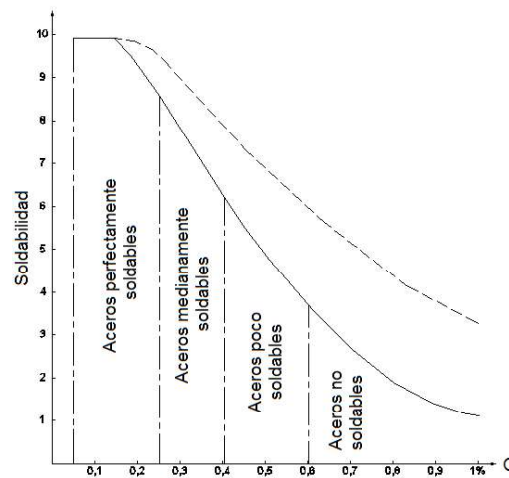


Figura 1.10. Variación del coeficiente de soldabilidad S en función de la concentración de carbono en el acero.

Fuente: (Cortes, 2016)

1.9.4. Parámetros de influencia en la soldabilidad

Para la obtención de una soldadura que pueda cumplir los requisitos técnicos para lo cual ella está diseñada, influyen una serie de factores que deben ser tomados muy en cuenta cuando se realiza, que son:

El material base: debido a que no todos los materiales pueden ser soldados de la misma forma, se debe seleccionar el proceso y utilizar los demás recursos tecnológicos.

Espesor de las placas: de acuerdo a esto se elige el tipo de junta y mejor serie de procesos de soldadura a realizarse

Tipo de junta y de proceso de soldadura: esto dependerá del lugar donde se haga la soldadura y de los materiales a utilizarse.

Elementos aleantes: Son los elementos que determinarán que tipo de proceso de soldadura se elegirá de acuerdo con los componentes que presente el material, con ello se determinará efectividad y eficiencia de la soldadura

Pre calentamiento: Es el proceso que prepara al material base para la unión, el cual consiste en calentar el material a la temperatura que no cambie su estructura

Velocidad de enfriamiento: Es el tiempo que demora en enfriar la unión soldada, esto puede ser al ambiente o controlado

Energía suministrada: Es el amperaje utilizado durante el proceso de soldadura.

1.10. Metalurgia de la Soldadura

La metalurgia de la soldadura se enfoca en el análisis de los procesos de calentamiento, fusión, solidificación y enfriamiento que giran en torno a la soldadura, este proceso es uno de los métodos más usados actualmente para la unión de materiales metálicos, a la vez es el más complejo desde el punto de vista metalúrgico. Prácticamente todos los tipos de fenómenos metalúrgicos ocurren durante la realización de una soldadura:

- Fusión.
- Solidificación.
- Reacciones gas-metal.
- Fenómenos de superficie.
- Reacciones en estado sólido.

Estas reacciones son sumamente rápidas, si las comparamos con lo que sucede en los diferentes procesos metalúrgicos. La estructura de un cordón de soldadura es el resultado de diferentes pasos, los cuales comienzan con las reacciones en estado líquido y terminan con las reacciones en el estado sólido. En el momento en el que comienza la solidificación, se empiezan a formar las diferentes estructuras cristalográficas, después de esto se dan las transformaciones termo mecánicas las cuales solo se pueden realizar en un estado sólido, acabados estos procesos se llega al resultado final.

1.10.1. Características de la Metalurgia

Este apartado se refiere a la estructura que adquiere la zona soldada, al finalizar el procedimiento.

Variables operativas: Métodos de soldadura, condiciones internas como lo son el buen manejo de los materiales o el uso adecuado de estos y condiciones externas como lo son el clima o aspectos que son ajenos al material o al proceso.

Estructura: Formación de cristales en el proceso de solidificación.

Propiedades mecánicas: Las propiedades mecánicas pueden definirse como aquellas que tienen que ver con el comportamiento de un material bajo fuerzas aplicadas. Las propiedades mecánicas se expresan en términos de cantidades que son funciones del esfuerzo o de la deformación o ambas simultáneamente.

2. METODOLOGÍA

2.1. Introducción

Esta sección está orientada en conocer la soldabilidad del acero ASTM A 36, bajo dos diferentes procesos SMAW y FCAW, que son los procesos usados en la elaboración de tanques de almacenamiento. Los ensayos de soldabilidad serán el de Houldcroft y Varestraint. El ensayo de Houldcroft se lo realizará según ASM HandBook Volume VI Welding, Brazing and Soldering se detallan las condiciones generales de los equipos de las transferencias y de materiales que se utilizaran para un correcto proceso. Para el proceso Varestraint nos guiaremos de acuerdo con la norma AWS B4.0M:2000, donde se detallan las condiciones de generales de los equipos, para un correcto proceso. Para los ensayos mecánicos nos basamos en la norma ASME sección IX, donde se detalla cada ensayo.

2.2. Selección del Material Base

El material base será el acero ASTM A 36 debido a que es el más usado en la industria para la construcción de tanques de almacenamiento, como base para el cálculo de espesores tomamos una capacidad de 500 BBL, al igual que las dimensiones del tanque han sido determinadas.

Para el cálculo de la Gravedad Especifica:

$$GE = \frac{141,5}{^{\circ}\text{API} + 131,5} \text{ a } 60 \text{ } ^{\circ}\text{F}$$

$$GE = \frac{141,5}{23 + 131,5}$$

$$GE = 0,91585$$

Calculo de la densidad:

$$\rho = GE * 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho = 0,91585 * 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho = 915,85 \text{ Kg/m}^3$$

Tabla 2.1. Datos de entrada para el cálculo de espesores, usados comúnmente en la industria.

Acero	ASTM A36		
Diámetro Nominal	D	373.3	cm
Altura Total	H	731.5	cm
Nivel del Líquido	Hd	706.3	cm
Densidad del Fluido	G	915,85	
Dimensiones de la plancha	h1	244	Cm
	b	1200	cm
Densidad del material	P	7850	kg/m ³
Esfuerzo de fluencia para diseño	σy	1631,54	kg/cm ²
Mínimo Esfuerzo de Fluencia	Fby	250	Mpa
Gravedad específica fluido	γ	0,91585	
Volumen del Tanque	VT	80.06	m3
Tolerancia por corrosión	CA	0.16	cm
Grado Api del Crudo Ecuatoriano	API	23	°

Fuente (API Standard, 2013)

2.2.1. Cálculo Del Espesor De La Plancha De Pared Del Tanque

Espesor por condiciones de diseño:

$$t_d = \frac{0,0005D(H - 30,48)G}{\sigma_y} + CA$$

$$t_d = \frac{0,0005 * 373,3(731,5 - 30,48)}{1631,54} + 0,16$$

$$t_d = 0,24 \text{ cm}$$

Cálculo para el 2do anillo:

$$t_d = \frac{0,0005 * 373,3(487,5 - 30,48)}{1631,54} + 0,16$$

$$t_d = 0.21 \text{ cm}$$

Calculo para el 3er anillo:

$$t_d = \frac{0.0005 * 373.3(243.5 - 30.48)}{1631.54} + 0.16$$

$$t_d = 0.18 \text{ cm}$$

API 650 5.6.1.1 Recomienda:

Tabla 2.2. Norma API 650.

Diámetro Nominal en Metros	Espesor mínimo en milímetros
< 15.24	4.76
15.24 < 36.576	6.35
36.576 < 60.96	7.93
> 60.96	9.52

Fuente: (API Standard, 2013)

Para el diseño se ha considerado una plancha de espesor **e = 6mm** para los anillos del cuerpo del tanque.

2.2.2. Calculo Del Espesor De La Plancha De Fondo Del Tanque

$$Sh = \frac{0,0005D(H - 30,48)}{t} G$$

$$Sh = \frac{0,0005 * 373,3(731,5 - 30,48) * 0,91585}{0,476}$$

$$Sh = 251,75 \text{ Kg/m}^2$$

Tabla 2.3. Espesor mínimo especificado en la norma API 650.

Espesor Mínimo (mm) del Primer Anillo del Cuerpo	Esfuerzo Calculado para Prueba Hidrostática en el Primer Anillo del Cuerpo (Kg/cm ²)			
	<1989	<2109	<2320	<2530
t < 19.05	6.35	6.35	7.14	8.73
09.05 < 25.4	6.35	7.14	9.52	11.11
25.4 < 31.75	6.35	8.73	11.91	14.28
31.75 < 38.10	7.93	11.11	14.28	17.46
38.10 < 44.45	8.73	12.7	15.87	19.05

Fuente: (API Standard, 2013)

Entonces el espesor mínimo debe ser de 6,35 mm

$$St = \frac{4,9D(Hd - 0,3)}{t}$$

$$St = \frac{4,9 * 373,3(706,3 - 0,3)}{6,35}$$

$$St = 19,71 \text{ Mpa}$$

Según tabla 2.4 la presión hidrostática ≤ 190 Mpa, el espesor es de 6 [mm] para el fondo del tanque, para espesores del primer cuerpo del tanque menores a 19 [mm].

Tabla 2.4. Espesor de placa circular inferior en la norma API 650, tabla 5.1a.

ESPESOR DE CAPA DE LA PRIMERA RUTA DE PROTECCION [mm]	TENSION MAXIMA DE LA PRIMERA RUTA DE PROTECCION [Mpa]			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 40$	8	11	14	17
$40 < t \leq 45$	9	13	16	19

Fuente: (API Standard, 2013)

$$tf = 6\text{mm} + CA$$

$$tf = 6 + 1,6 \text{ mm}$$

$$tf = 7,6 \text{ mm}$$

El fondo del tanque se ha considerado un espesor de **8 [mm]** de espesor.

2.2.3. Calculo Del Espesor De La Plancha Del Techo Del Tanque

API 650 Apartado V.7.2.1: El espesor requerido para el techo del tanque se determinará por la siguiente expresión; se debe tener en cuenta que también se debe cumplir con lo especificado en la norma por el apartado 5.10.5.1:

$$T_r = \frac{83 * D}{\text{sen } \theta} \sqrt{\frac{Pr}{1,72 * E}}$$

Los techos cónicos auto soportados tendrán como máximo una pendiente de 9:12 (37°), y como mínimo 2:12 (9.5°), con respecto a la horizontal.

$$\theta = 9,72 \text{ mm}$$

$$Pr = \text{Presión Atmosférica} = 101.325 \text{ KPa}$$

$$E = \text{Módulo de elasticidad del material} = EA - 36 = 200 \text{ GPa} = 200 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$T_r = \frac{83 * 3,73}{\text{sen } 9,72} \sqrt{\frac{101325}{1,72 * 200 \times 10^9}}$$

$$T_r = 0,98 \text{ mm}$$

Según API 650, en el apartado 5.10.5.1, el espesor mínimo no debe ser menor a 5 [mm] y máximo 13 [mm], para lo cual se adoptará un espesor de **e = 6 [mm]**.

Por lo tanto, el espesor del material base será de 6 [mm] y 8 [mm].

2.3. Selección del Proceso de Soldadura

Los tanques y sus accesorios estructurales se soldarán mediante el proceso por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), o el proceso de soldadura con gas inerte (MIG), o soldadura por gas inerte de Tungsteno (TIG), soldadura por oxigas, o el proceso de soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW), o soldadura por arco sumergido, un electrodo o un proceso de electro-gas utilizando un equipo adecuado. (Norma API 650, Sección 7.2 Detalles de Soldadura, pagina 7-1)

Debido a que la industria ecuatoriana usa como proceso de fabricación los procesos FCAW y SMAW, son los que usaremos para este documento.

Tabla 2.5. Especificaciones del Proceso de Soldadura FCAW.

Características	FCAW
Espesores	6 – 8 [mm]
Posición	Plana
Diámetro de Alambre	1.2 [mm]
Corriente de Soldadura	122.5 [A]
Voltaje	18 [V]
Protección de Gas	CO2

Fuente: (Propia)

Tabla 2.6. Especificaciones del Proceso de Soldadura SMAW.

Características	SMAW
Espesores	6 – 8 [mm]
Posición	Plana
Diámetro de Alambre	1/8
Corriente de Soldadura	77 [A]
Voltaje	27.2 [V]
Protección de Gas	No

Fuente: (Propia)

2.4. Especificaciones del Proceso de Soldadura (WPS)

La especificación de cada proceso de soldadura es un establecimientos de los parámetros adaptas a cada proceso de soldadura, que permiten al soldador realizar el proceso de forma ordenada y bien especificada, con la finalidad de obtener mejores resultados en la soldadura.

Los parámetros incluidos en el WPS serán adjuntados al ANEXO, y han sido seleccionados de acuerdo al material de aporte escogido y buscando las condiciones óptimas para poder realizar los diferentes tipos de ensayo de soldabilidad.

2.5. Selección del Material de Aporte

Para el soldado de materiales con un esfuerzo mínimo a la tensión menor de 58000 Kg/cm^2 , los electrodos de arco manual deben estar hechos de materiales cuya clasificación sea AWS: E-60XX y E70XX. (Norma API 650, Sección 4.8 Electrodos de Soldadura, página 45)

2.5.1. Alambre o Material de Aporte para proceso FCAW

El alambre de aporte debe ser compatible con el metal base y brindar depósitos resistentes al agrietamiento, que sean iguales o mejores para el metal base en condiciones a la resistencia mecánica, tenacidad y corrosión. El alambre seleccionado para el proceso FCAW es E71T-1 INDURA, ya que también es el usado en la industria ecuatoriana.

- Alambre tubular con protección gaseosa externa para aceros al carbono.
- Protección gaseosa 100% CO₂.

ASME IIC SFA 5.20 /AWS A5.20 - E 71T-1C / E 491T-1C

2.5.1.1. Características:

- Está diseñado para soldar aceros de alta resistencia.
- Posee un amplio rango de parámetros de operación, bajos niveles de salpicaduras y fácil remoción de escoria, lo que permite minimizar la operación de limpieza después de soldar.
- Están diseñados para simple o multipasada. Se caracterizan por alta velocidad de deposición, calidad radiográfica, baja pérdida por salpicadura y cordón plano a levemente convexo.

2.5.1.2. Aplicaciones

- Dentro de sus aplicaciones es muy usado para la soldadura de fabricación y reparación en astilleros, tanques de almacenamiento, fabricaciones estructurales (vigas, tolvas, tubos, tanques, etc.), tendidos de tuberías (piping), minería y equipos de movimiento de tierra en general, etc.

Tabla 2.7. Información Técnica del electrodo E71T1.

Análisis Típico del metal depositado (% en peso)					
Gas	C	Mn	Si	P	S
CO ₂	0,05	1,37	0,37	0,018	0,005

Fuente: (INDURA, 2016)

Tabla 2.8. Propiedades Mecánicas del electrodo E71T1.

Propiedades Mecánicas Típicas del Metal Depositado				
Gas	Esf. Fluencia en 0,2% MPa	Esf. Máx. de Tracción MPa	Elongación (L=4d), %	E. Absorbida Ch-v
CO ₂	493	574	26	80J a -20°C

Fuente: (INDURA, 2016)

Tabla 2.9. Parámetros de Soldadura Recomendados del electrodo E71T1.

Parámetros de Soldadura y Datos		
Diámetro, mm	1,2	1,6
Intensidad de corriente, A	140 - 320	200 - 380
Voltaje, Volts	22 - 35	25 - 36
Stickout, mm	15 - 25	15 - 25

Fuente: (INDURA, 2016)

2.5.2. Electrodo o Material de Aporte para proceso SMAW

El electrodo de aporte debe ser compatible con el metal base y brindar depósitos resistentes al agrietamiento, que sean iguales o mejores para el metal base en condiciones a la resistencia mecánica, tenacidad y corrosión. El alambre seleccionado para el proceso SMAW es E6010, ya que también es el usado en la industria ecuatoriana.

- Electrodo revestido para aceros al carbono
- Revestimiento celulósico sódico
- Toda posición
- Corriente continua. Electrodo positivo
- Revestimiento rojo

ASME IIC SFA 5.1/AWS A5.1 - E 6010 / E 4310 / E 6010

2.5.2.1. Características y Aplicaciones

- Electrodo de alta penetración para aplicaciones industriales
- Soldadura de raíz para tuberías
- Baja sensibilidad a la porosidad

Tabla 2.10 Información Técnica del electrodo E6010

Análisis Típico del metal depositado (% en peso)							
C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %
0,10	0,55	0,22	0,014	0,008	0,015	0,025	0,010

Fuente: (INDURA, 2016)

Tabla 2.11 Propiedades Mecánicas del electrodo 6010

Propiedades Mecánicas Típicas del Metal Depositado				
Gas	Esf. Fluencia en 0,2% Mpa	Esf. Máx. de Tracción Mpa	Elongación (L=4d), %	E. Absorbida Ch-v
CO2	410	490	25	37J a -30°C

Fuente: (INDURA, 2016)

Tabla 2.12 Parámetros de Soldadura Recomendados del electrodo E6010

Propiedades Mecánicas Típicas del Metal Depositado				
Diámetro, mm	2,4	3,2	4,0	4,8
Longitud, mm	300	350	350	350
Int. De Corr. A	60 - 90	80 - 110	110 - 160	150 - 190

N° elect/Kg	74	34	24	17
-------------	----	----	----	----

Fuente: (INDURA, 2016)

2.6. Análisis de soldabilidad del acero ASTM A36

Para realizar los respectivos ensayos, los más adecuados de acuerdo al espesor del material y a los procesos usados hemos seleccionado el Ensayo de Varestraint y el ensayo de Houldcroft.

2.6.1. Ensayo de Varestraint

La prueba Varestraint se utiliza para evaluar la soldabilidad del metal base y determinar la influencia de las variables de soldadura en el fisuramiento en caliente del metal base. Se proporciona un medio para aumentar las deformaciones de contracción convencionales para simular las grandes deformaciones de contracción que se encuentran en las soldaduras de producción altamente restringidas.

Se aplicable a:

- Calificación de materiales y procedimientos de soldadura.
- Control de calidad de fabricación.
- Investigación y desarrollo.

(AWS B4.0M:2000, 2000)

2.6.2. Restricciones del Ensayo de Varestraint

El uso de esta prueba está restringido de la siguiente manera:

- Esta prueba se utiliza para metales base en el rango de espesor de 6 mm a 13 mm. Una variación de esta prueba, llamada prueba mini-Varestraint, se utiliza para el metal base en el rango de espesor de 3 mm a 6 mm.
- Se requiere equipo especializado para la prueba (ver Figura 2.2) y el examen de la muestra.
- La soldadura generalmente se realiza mediante el proceso de soldadura con arco de tungsteno con gas mecanizado para minimizar las variables en los parámetros de soldadura y los resultados de las pruebas.
- Las muestras se analizan en condiciones de laboratorio. El examen de especímenes en el taller o en el campo puede no ser práctico.

(AWS B4.0M:2000, 2000)

2.6.3. Ensayo de Houldcroft

Es un ensayo de penetración completa más utilizado en la evaluación de la soldabilidad. La preparación de las probetas para el ensayo de Houldcroft es un proceso más complejo ya que necesita de la realización de ranuras a distancias específicas en las placas, con su respectivo bisel.

2.6.4. Tamaño de las placas

Para nuestros análisis contamos con dos tipos de placas, tanto para el ensayo de Vareststraint como para el ensayo de Houldcroft, tanto para espesores de 6 [mm] como para espesores de 8 [mm].

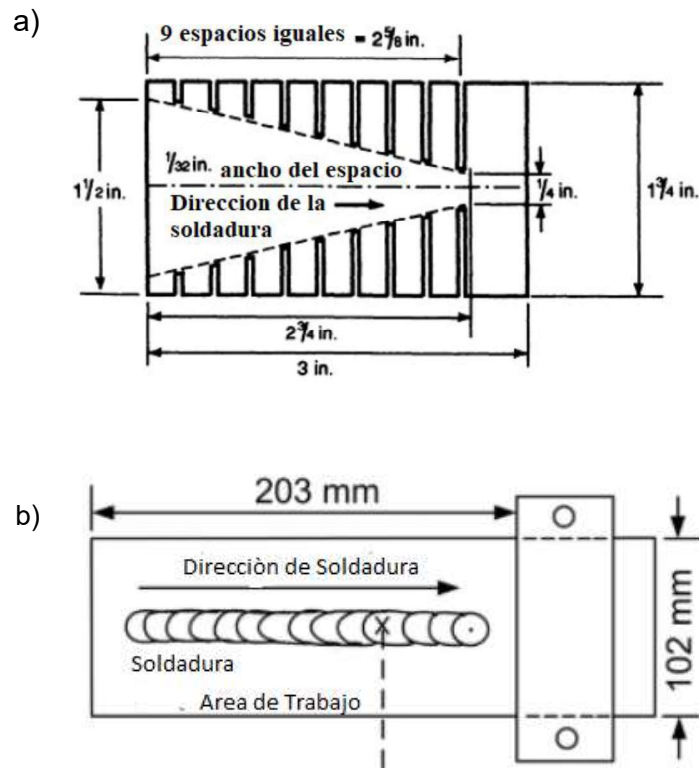


Figura 2.1. Dimensión de las probetas (a) Houldcroft y (b) Vareststraint.

Fuente: (ASM, Handbook Vol 6, Welding, brazin and Soldering, 1993)

2.6.5. Preparación de las juntas y diseño de la unión

Las placas fueron cortadas según especifica el código AWS B4.0, se realiza la limpieza de probetas.

Para el ensayo de Varestraint no es necesario una preparación de juntas, ya que el procedimiento según la norma específica no es necesario preparación ya que simplemente son placas de 200 mm por 50 mm, como muestra la figura 2.3.

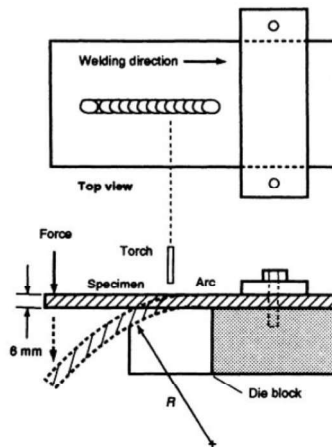


Figura 2.2. Esquema de realización del Ensayo de Varestraint.
Fuente: (AWS B4.0M:2000, 2000)

Para el ensayo de Houldcroft es necesario la preparación de las placas, ya que, para este ensayo de fisuración, necesita un ranurado como especifica el HandBook, y además de un bisel un ángulo de 60° en las placas tanto de 6 y 8 [mm] para lograr mejor penetración. La figura muestra la sección transversal de las placas a ser soldadas. Con una separación de 3 [mm].

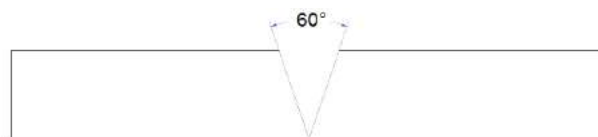


Figura 2.3. Ángulo de apertura entre placas para soldar.
Fuente: Propia

2.7. Soldadura de las placas

A continuación, se menciona las consideraciones a tomar en cuenta al momento de realizar la soldadura.

Primero es la elaboración del WPS, este es un documento que ayuda a la mejor elaboración del cordón de soldadura, en este documento se detalla las directrices que debe seguir el soldador para un buen proceso.



Figura 2.4. Probeta para el Ensayo Varestraint.
Fuente: Propia



Figura 2.5. Probeta para ensayo de Houldcroft, bisel a 60° acero A36.
Fuente: Propia

Se coloca las placas en posición 1G para la soldadura del material base

2.7.1. Equipo de soldadura

Para los dos ensayos se realizó dos procesos SMAW y FCAW, a continuación, se muestra los equipos usados.



(a)



(b)

Figura 2.6. (a) Equipo de Soldadura FCAW y (b) Equipo de Soldadura SMAW.
Fuente: Propia

Para el ensayo de Varestraint no se necesita preparación del material base.



Figura 2.7. Preparación para el ensayo de Varestraint.
Fuente: Propia

El Varestraint consiste en poner una viga (probeta) en voladizo la misma que estará sometida a una fuerza en su extremo libre, según la norma AWS.B4.0-200 Standar Methods For Mechanical Testing of Weld, indica la siguiente formula que es función de la geometría del acero y del dado donde se asienta. Para calcular el porcentaje de elongación y así poder calcular la fuerza necesaria para deformar el acero.

$$e = \frac{t}{(2R + t)} \times 100$$

e= Porcentaje de elongación

t= Espesor de la placa

R= Radio de apoyo en ensayo Varestraint

El cálculo de la fuerza necesaria para que el material fluya se parte de la ecuación de HOOKE para esfuerzo de vigas.

$$\sigma_x = E\epsilon_x = \frac{E_y}{\rho} = -Eky$$

σ = Esfuerzo

E= Módulo de Elasticidad

e= Porcentaje de elongación.

Una vez calculado el esfuerzo se procede con el cálculo de la fuerza con la teoría de mecánica de materiales.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ = Esfuerzo

F= Fuerza

A= Área

Cálculos Para probeta de 6 [mm]:

Porcentaje de elongación:

$$e = \frac{t}{(2R + t)} \times 100$$

$$e = \frac{6}{(2(100) + 6)} \times 100$$

$$e = 2,91\%$$

Calculo intensidad de esfuerzo:

$$\sigma = E * e = 450 \text{Mpa} * 0,0291$$

$$\sigma = 13,095 \text{Mpa}$$

Se utiliza módulo de Elasticidad $E = 450 \text{Mpa}$ por no tener una variación considerable entre tipos de acero estructurales al carbono.

Cálculo de la fuerza:

$$F = \sigma * A = 13,095 \text{Mpa} * 0,0004 \text{m}^2$$

$$F = 6,548 \text{KN}$$

Peso al extremo de la probeta:

$$F = 6,548 \text{Kg}$$

Cálculos Para probeta de 8 [mm]:

Porcentaje de elongación

$$e = \frac{t}{(2R + t)} \times 100$$

$$e = \frac{6}{(2(100) + 8)} \times 100$$

$$e = 3,85\%$$

Calculo intensidad de esfuerzo:

$$\sigma = E * e = 450\text{Mpa} * 0,0385$$

$$\sigma = 17,325 \text{ Mpa}$$

Se utiliza módulo de Elasticidad $E = 450 \text{ Mpa}$ por no tener una variación considerable entre tipos de acero estructurales al carbono.

Cálculo de la fuerza:

$$F = \sigma * A = 17,325 \text{ Mpa} * 0,0004 \text{ m}^2$$

$$F = 8,663 \text{ KN}$$

Peso al extremo de la probeta:

$$P = 8,663 \text{ Kg}$$



Figura 2.8. Preparación de la probeta con el peso para realizar el ensayo de Varestaint.
Fuente: (Propia)

Para el ensayo de Houldcroft se realiza una ranuración de 2 [mm] de distancia, y con biselado de 60°. Se sueldan platinas al inicio y final de las placas, teniendo en cuenta una separación de 3 [mm].



Figura 2.9. Preparación de Probetas para ensayo de Houldcroft.
Fuente: (Propia)

A continuación, se muestra cómo se realizó la soldadura, y como quedaron los cordones para el ensayo Varestraint.



Figura 2.10. Cordón de Soldadura proceso FCAW. Ensayo Varestraint.
Fuente: (Propia)



Figura 2.11. Cordón de Soldadura proceso SMAW, Ensayo Houldcroft.
Fuente: (Propia)

2.8. Ensayos no Destructivos

Para realizar los respectivos ensayos a las probetas, debe realizar la respectiva identificación e inspección visual.



Figura 2.12. Inspección visual a la probeta de Houldcroft.
Fuente: Propia



Figura 2.13. Inspección visual a la probeta de Varestaint.
Fuente: Propia

2.8.1. Ensayo de Tintas Penetrantes

Para realizar la inspección de tintas penetrantes nos basamos a la norma ASTM E-165, A continuación, se muestra los productos que se utilizan como es penetrante, removedor y revelador.



Figura 2.14. Tintas Penetrantes.
Fuente: (Propia)

Se realiza la limpieza de la superficie del cordón con un paño y con thinner de manera uniforme, para retirar cualquier resto que pueda afectar el ensayo.



Figura 2.15. Probeta lista después de realizar la limpieza.
Fuente: (Propia)

Aplicar el líquido penetrante, y dejar reposar por alrededor de 10 min, para que el líquido se impregne bien, y sean visibles los defectos.



Figura 2.16. Aplicación del Líquido Penetrante.
Fuente: (Propia)

Remover el líquido penetrante, con un trapo libre de suciedades, que puedan adherirse al cordón, limpiar de manera uniforme retirando todo el exceso posible.

Por el ultimo aplicamos el revelador que sirve de absorbente del penetrante que se encuentre en las discontinuidades, formando indicadores de color rojo en este caso, hay que esperar alrededor de 10 min para que sean visibles los defectos.



Figura 2.17. Aplicación del Revelador a probetas de Ensayo Vareststraint.
Fuente: (Propia)



Figura 2.18. Aplicación del Revelador a probetas de Ensayo de Houldcroft.
Fuente: (Propia)

Condiciones de Trabajo:

- Procedimiento: Basado en ASTM E 165, Tipo II método A
- Limpieza: Con solvente
- Tiempo del Penetrante: 10 minutos
- Tiempo del Revelador: 5 minutos
- Norma de Aceptación: AWS D1.1

2.8.2. Radiografía Industrial

Después de realizar la inspección por tintas penetrantes se procede a realizar la inspección por radiografía, ya que la anterior inspección es superficial y no se pueden distinguir defectos internos.

Para realizar la toma de la radiografía es necesario calcular el tiempo de exposición, por lo que se toma en cuenta el espesor de la placa y la altura del cordón.

Condiciones de trabajo para las probetas ensayadas, usando como norma de referencia ASTM E94.

Tabla 2.13. Identificación de placas y Condiciones de trabajo para el ensayo de Varestraint.

ENSAYO DE VARESTRAINT						
Proceso y Espesor de cada placa				Identificación		
FCAW – 6 mm				2019-R05-RX13-001 – J1		
FCAW – 8 mm				2019-R05-RX13-002 – J2		
FCAW – 6 mm				2019-R05-RX13-003 – J3		
SMAW – 8 mm				2019-R05-RX13-004 – J4		
SMAW – 6 mm				2019-R05-RX13-005 – J5		
FCAW – 8 mm				2019-R05-RX13-006 – J6		
FCAW – 6 mm				2019-R05-RX13-007 – J7		
SMAW – 8 mm				2019-R05-RX13-008 – J8		
SMAW – 6 mm				2019-R05-RX13-009 – J9		
Condiciones de Trabajo						
Placa	Tomas	Kv	mA	Tiempo de Exposición	Distancia de Fuente	Técnica Utilizada
J1	1	140	5	1 min 9 s	55 cm	SPSI
J2	1	140	5	1 min 0 s	55 cm	SPSI
J3	1	140	5	0 min 55 s	55 cm	SPSI
J4	1	140	5	1 min 0 s	55 cm	SPSI
J5	1	140	5	1 min 3 s	55 cm	SPSI
J6	1	140	5	1 min 3 s	55 cm	SPSI
J7	1	140	5	0 min 55 s	55 cm	SPSI
J8	1	140	5	1 min 6 s	55 cm	SPSI
J9	1	140	5	0 min 55 s	55 cm	SPSI

Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

SPSI: Simple Pared Simple Imagen

Observación: IQI Tipo 1B

Tabla 2.14. Parámetros usados en el revelado de película para el ensayo de Varestraint.

Temp. Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 5 min	T. Parada: 2 min	T. Fijado: 10 min
Baño de Parada: 10 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min

Probetas de Ensayo de Varestraint

Proceso: FCAW Espesor: 6 [mm] J1



Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

Tabla 2.15. Identificación de placas y Condiciones de trabajo para el ensayo de Houldcroft.

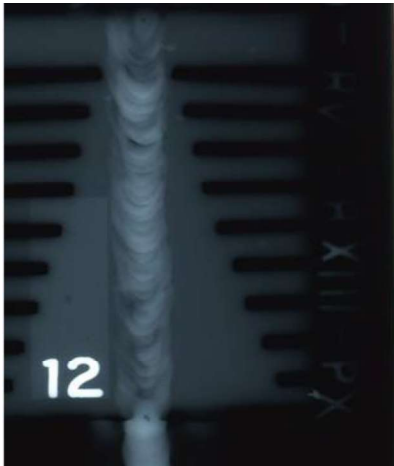

ENSAYO DE HOULDCROFT						
Proceso y Espesor de cada placa				Identificación		
SMAW – 8 mm				2019-R05-RX13-0010 – A1		
SMAW – 6 mm				2019-R05-RX13-0011 – A2		
FCAW – 8 mm				2019-R05-RX13-0012 – A3		
FCAW – 6 mm				2019-R05-RX13-0013 – A4		
SMAW - FCAW – 8 mm				2019-R05-RX13-0014 – A5		
SMAW - FCAW – 6 mm				2019-R05-RX13-0015 – A6		
Condiciones de Trabajo						
Placa	Tomas	Kv	mA	Tiempo de Exposición	Distancia de Fuente	Técnica Utilizada
A1	1	140	5	1 min 00 s	55 cm	SPSI
A2	1	120	5	1 min 03 s	55 cm	SPSI
A3	1	140	5	1 min 01 s	55 cm	SPSI
A4	1	120	5	1 min 03 s	55 cm	SPSI
A5	1	140	5	1 min 06 s	55 cm	SPSI
A6	1	120	5	1 min 06 s	55 cm	SPSI

Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

SPSI: Simple Pared Simple Imagen

Observación: IQI Tipo 1B

Tabla 2.16. Parámetros usados en el revelado de película para el ensayo de Houldcroft.

Temp. Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 5 min	T. Parada: 2 min	T. Fijado: 10 min
Baño de Parada: 10 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min
Probetas de Ensayo de Houldcroft			
Proceso SMAW e=8 [mm]		Proceso FCAW e=6 [mm]	
			

Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

2.9. Preparación de las juntas y diseño de la unión para placas a soldar bajo la norma ASME sección IX.

Para la elaboración de estas placas, las dimensiones consideradas son de acuerdo con la norma ASME sección IX.

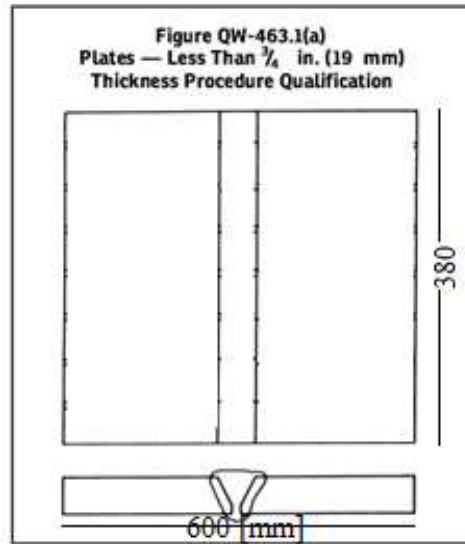


Figura 2.19. Muestra las dimensiones de las probetas de prueba que deben analizarse para calificar un procedimiento de soldadura.

Fuente: (ASME, 2017)



Figura 2.20. Preparación de juntas.

Fuente: (Propia)

2.9.1. Soldadura de las placas

Primero se realiza la elaboración del WPS, que tiene todas las directrices a seguir para realizar la soldadura, para una elaboración correcta del cordón de soldadura.



Figura 2.21. Bisel a 60°, acero ASTM A36.
Fuente: (Propia)

2.9.2. Equipo de Soldadura

Para los dos ensayos se realizó dos procesos SMAW y FCAW, los mismos usados para los ensayos de soldabilidad.

Para evitar la deformación del cordón de soldadura, y las placas debido al calor, se soldó en la base unas platinas, para mantener la distancia correcta entre placa y placa.



Figura 2.22. Colocación de Respaldos, con separación de 2 [mm].
Fuente: (Propia)

A continuación, se muestra, la realización del cordón de soldadura.



Figura 2.23. Realización del cordón de soldadura.
Fuente: (Propia)



Figura 2.24. Cordón de Soldadura SMAW e=8 [mm].
Fuente: (Propia)

Una vez obtenido el cordón de soldadura se deben enfriar las placas a temperatura ambiente. Después del enfriamiento se procede a la respectiva limpieza, para remover impurezas que puedan aparecer en la superficie del cordón.



Figura 2.25. Limpieza del cordón.
Fuente: (Propia)

2.10. Ensayos No Destructivos para la calificación de Soldadura

2.10.1. Ensayo de Tintas Penetrantes

Para realizar la inspección de tintas penetrantes nos basamos a la norma ASTM E-165, A continuación, se muestra los productos que se utilizan como es penetrante, removedor y revelador.

Se realiza la limpieza de la superficie del cordón con un paño y con thinner de manera uniforme, para retirar cualquier resto que pueda afectar el ensayo.



Figura 2.26. Probeta lista después de realizar la limpieza.
Fuente: (Propia)

Para una mejor inspección se realiza la toma de foto con un flexómetro, que nos ayudara a la ubicación de defectos en el cordón.



Figura 2.27. Probeta lista para ensayar.
Fuente: (Propia)

Aplicar el líquido penetrante, y dejar reposar por alrededor de 10 min, para que sean visibles los defectos.

Remover el líquido penetrante, con un trapo libre de suciedades, que puedan adherirse al cordón, limpiar de manera uniforme retirando todo el exceso posible.

Por el último aplicamos el revelador que sirve de absorbente del penetrante que se encuentre en las discontinuidades, formando indicadores de color rojo en este caso, hay que esperar alrededor de 15 min para que sean visibles los defectos.



Figura 2.28. Aplicación del Revelador.
Fuente: (Propia)

2.10.2. Radiografía Industrial

Después de realizar la inspección por tintas penetrantes se procede a realizar la inspección por radiografía, ya que la anterior inspección es superficial y no se pueden distinguir defectos internos, por eso es necesario realizar la inspección radiográfica.

Para realizar la toma de la radiografía es necesario calcular el tiempo de exposición, por lo que se toma en cuenta el espesor de la placa y la altura del cordón.

Condiciones de trabajo para las probetas ensayadas, usando como norma de referencia ASTM E94.

Tabla 2.17. Identificación de Placas para Ensayos de Radiografía.

Proceso y Espesor de cada placa	Identificación
SMAW – FCAW – 8mm	2019-R08-RX15-003 - C8
SMAW – FCAW – 6mm	2019-R08-RX15-006 – C6
SMAW – 8mm	2019-R08-RX15-004 - S8
SMAW – 6mm	2019-R08-RX15-001 - S6
FCAW 8mm	2019-R08-RX15-005 - F8
FCAW – 6mm	2019-R08-RX15-002 - F6

Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

Tabla 2.18. Condiciones de trabajo para ensayar las placas.

Condiciones de Trabajo						
Placa	Tomas	Kv	mA	Tiempo de Exposición	Distancia de Fuente	Técnica Utilizada
C8	2	140	5	1 min 57 s	55 cm	SPSI
C6	2	140	5	1 min 4 s	55 cm	SPSI
S8	2	140	5	2 min 19 s	55 cm	SPSI
S6	2	140	5	1 min 2 s	55 cm	SPSI
F8	2	140	5	2 min 19 s	55 cm	SPSI
F6	2	140	5	1 min 7 s	55 cm	SPSI

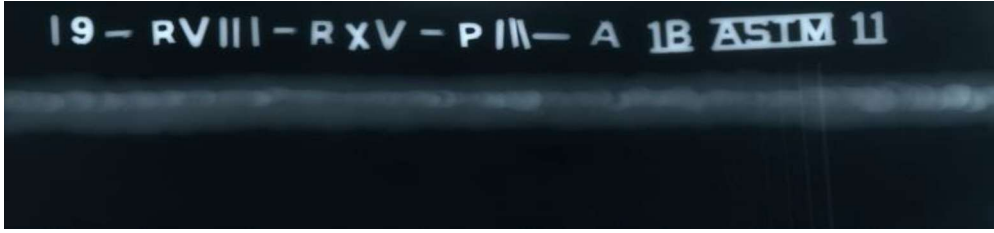

Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

SPSI: Simple Pared Simple Imagen

Observación: IQI Tipo 1B

Para realizar el revelado se realizó el siguiente procedimiento en la película:

Tabla 2.19. Condiciones de Revelado para placas a ensayar.

Temp. Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 5 min	T. Parada: 2 min	T. Fijado: 10 min
Baño de Parada: 10 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min
Probeta	Tipo de Transferencia	Identificación Radiográfica	Toma
C8	SMAW-FCAW	2019-R08-RX15-003	A
			
C8	SMAW-FCAW	2019-R08-RX15-003	B
			

Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

2.11. Ensayos Destructivos

2.11.1. Maquinado y preparación de las probetas

Para cumplir con lo estipulado en los WPS, se procede a la elaboración de las probetas para realizar los ensayos de doblado de cara, doblado de raíz y tracción.

Para la elaboración de las probetas nos basamos en ASME sección IX

2.11.2. Tamaño de probetas ensayadas.

Para la obtención de las probetas el cordón de soldadura debe tener las medidas específicas para poder realizar los ensayos requeridos.

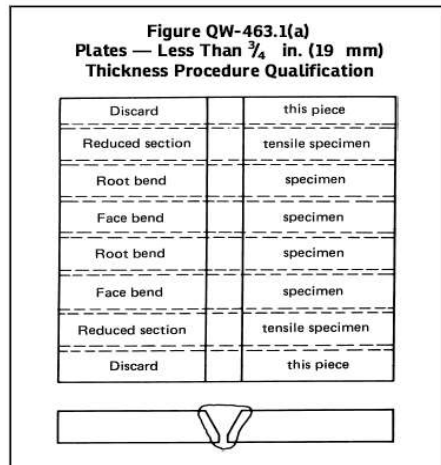


Figura 2.29. Tamaño de probeta seleccionada de acuerdo a los requerimientos, para la realización de ensayos.

Fuente: (Propia)

2.12. Criterio de aceptación según la norma ASME sección IX.

2.12.1. Inspección Visual

Las probetas de ensayo no deben mostrar grietas, penetración incompleta en la unión y fusión completa del metal de soldadura y el metal base.

2.12.2. Doblado de raíz y doblado de cara

Para realizar este ensayo las superficies convexas de las probetas dobladas deben ser examinadas visualmente, en busca de defectos. Para la aceptación deben cumplir los siguientes requisitos:

- La soldadura y la zona afectada por el calor de una muestra transversal de soldadura deben estar completamente dentro de la parte doblada de la muestra después de la prueba.
- Las muestras de flexión guiada no deben tener discontinuidad abierta en la soldadura o en la zona afectada por el calor que exceda de 1/8 pulgadas (3 mm), medida en cualquier dirección en la superficie convexa de la muestra después de la flexión.
- Las discontinuidades abiertas que ocurren en las esquinas de la muestra durante la prueba no se considerarán a menos que haya evidencia definitiva que resulta de la falta de fusión, inclusiones de escoria u otras discontinuidades internas.
- Para el revestimiento de soldadura resistente a la corrosión, no se permitirá ninguna discontinuidad abierta que exceda 1/16 pulgadas (1,5 mm), medida en

cualquier dirección, en el revestimiento, y ninguna discontinuidad abierta que exceda 1/8 pulgadas (3 mm) se permitirá a lo largo de la interfaz de soldadura aproximada.

(ASME, 2017)

2.12.3. Ensayo de Tracción

Es un ensayo utilizado para determinar la resistencia a la tracción de la soldadura. Para realizar el ensayo se debe tomar las dimensiones de espesor y ancho de sección reducida de la probeta. Para la aceptación deben cumplir los siguientes requisitos:

Los valores mínimos para la calificación del procedimiento se proporcionan bajo el encabezado de la columna "Tracción mínima especificada, ksi" de la Tabla QW / QB-422. Para pasar la prueba de tensión, la muestra debe tener una resistencia a la tracción que no sea inferior a:

- La resistencia a la tracción mínima especificada del metal base; o
- La resistencia a la tensión mínima especificada del más débil de los dos, si se utilizan metales base de diferentes resistencias a la tracción mínimas; o
- La resistencia a la tracción mínima especificada del metal de soldadura cuando la sección aplicable prevé el uso de metal de soldadura que tenga una resistencia a la temperatura ambiente más baja que la del metal base.
- Si la probeta se rompe en el metal base fuera de la soldadura o la interfaz de la soldadura, se aceptará que la prueba cumple con los requisitos, siempre que la resistencia no sea más del 5% por debajo de la resistencia a la tensión mínima especificada del metal base.

(ASME, 2017)

2.12.4. Macrografías

Una cara de cada sección transversal de las cinco muestras de prueba en la Figura 2.29, debe ser suavizada y grabada con un grabador adecuado para dar una definición clara al metal de soldadura y la zona afectada por el calor.

El examen de las secciones transversales debe incluir solo un lado de la probeta de prueba en el área donde la placa o tubería se divide en secciones, es decir, no se deben usar caras adyacentes en el corte. Para pasar la prueba:

- El examen visual de las secciones transversales del metal de soldadura y la zona afectada por el calor deberá mostrar una fusión completa y la ausencia de grietas.

2.12.5. Micrografías.

La evaluación micro estructural se realizará de acuerdo con los requisitos de ASTM E3 en un mínimo de tres secciones transversales, una desde la parte superior, central e inferior de un tercio del cupón de prueba.

Las muestras deben ser pulidas, grabadas, y deben estar libres de grietas y no deben mostrar un enlace incompleto o porosidad en o adyacentes a las líneas de enlace. El tamaño de cada muestra debe ser el que se puede montar y pulir para permitir el examen con un microscopio óptico con un aumento de 50 a 100 aumentos. (ASME, 2017)

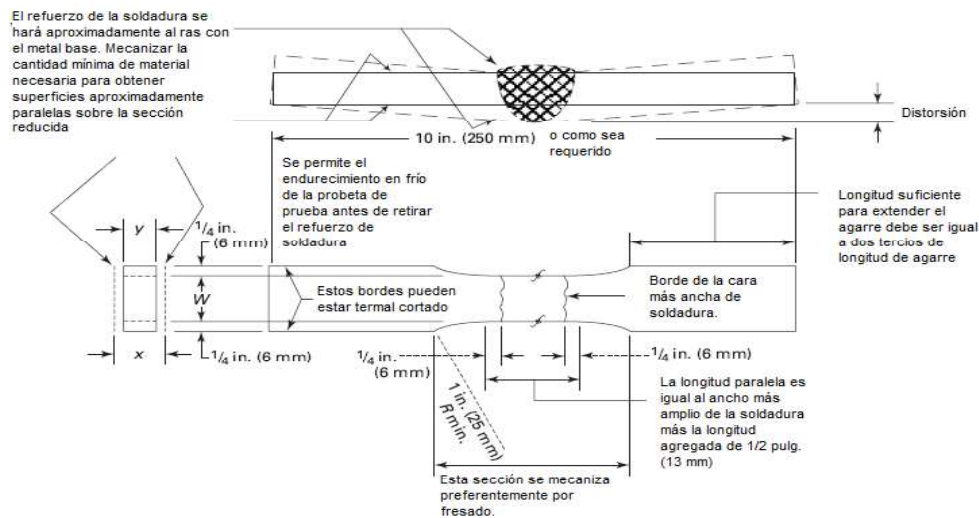


Figura 2.30. Probeta de Ensayos de Tracción.
Fuente: (ASME, 2017)

Se analizan 12 probetas soldadas, 4 probetas soldadas por proceso SMAW, 4 probetas soldadas por proceso FCAW, 4 probetas soldadas por proceso combinado.

Tabla 2.20. Características de probetas a Ensayar.

MATERIAL	ESPESOR [mm]	PROCESO	Nº PLACAS
ASTM A36	6	SMAW	2
	8	SMAW	2
	6	FCAW	2
	8	FCAW	2
	6	SMAW-FCAW	2
	8	SMAW-FCAW	2

Fuente: (Propia)

Una vez tomadas las medidas de la sección reducida, se procede a realizar el proceso.



Tabla 2.21. Identificación y dimensiones de las probetas a ensayar.

Identificación	Proceso	Ancho	Espesor	Espesor Promedio
		[mm]	[mm]	[mm]
C8-T1	SMAW-FCAW	19,36	8,06	8,06
C8-T2	SMAW-FCAW	19,73	8,03	8,03
C6-T1	SMAW-FCAW	20,10	6,03	6,03
C6-T2	SMAW-FCAW	19,87	5,98	5,98
S8-T1	SMAW	19,89	8,04	8,04
S8-T2	SMAW	19,90	8,07	8,07
S6-T1	SMAW	20,05	6,00	6,00
S6-T2	SMAW	20,06	5,96	5,96
F8-T1	FCAW	19,83	8,01	8,01
F8-T2	FCAW	19,85	8,02	8,02
F6-T1	FCAW	20,08	5,98	5,98
F6-T2	FCAW	20,01	5,97	5,97

Fuente: (Propia)

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción se muestran en la siguiente tabla. El informe técnico del ensayo es otorgado por el laboratorio de Análisis de Esfuerzos de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Tabla 2.22. Ensayo de Tracción.

Probeta	Tipo de Transferencia	Carga máxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Obs.
		Lbf.	N	ksi	Mpa	
C8-T1	SMAW-FCAW	16810	74773	69,3	479,2	FMB
						
C6-T1	SMAW-FCAW	11856	52740	63,1	435,1	FMB
						

Fuente: (Propia)

2.13. Ensayos de Doblado

El ensayo de doblado se lo justifica de acuerdo a la norma ASME Sección IX, además con el ensayo se puede conocer la ductilidad y el grado de rigidez. Las muestras de prueba de ensayo de doblado deben prepararse cortando la placa o tubería de prueba para formar muestras de sección transversal aproximadamente rectangular. Las

superficies cortadas se designarán a los lados de la muestra. Las otras dos superficies se llamarán las superficies de la cara y la raíz, la superficie de la cara tiene el mayor ancho de soldadura.

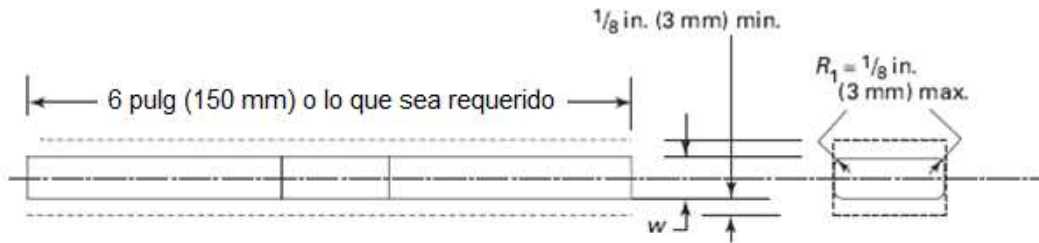


Figura 2.31. Probeta de Ensayos de Doblado.
Fuente: (ASME, 2017)

El número de probetas que son sometidas al ensayo se establece en el código, por placa 2 de doblado de raíz y 2 doblado de cara. Se utilizan 24 probetas.

Tabla 2.23. Probetas de Doblado Ensayado.

Probetas Ensayo de Doblado Proceso Combinado e= 8 [mm]	
Doblado de Cara	Ensayo de Raíz
	

Fuente: (Propia)

2.14. Inspección Metalográfica

El ensayo metalográfico es el estudio que permite el análisis micro-estructural de los elementos metálicos y sus aleaciones.

Este tipo de ensayo inicia con una inspección visual de la superficie, al cual se denomina macrografía del cual se extraen datos sobre los procesos sufridos por el material, es decir, se puede determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc., además de comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, de forja, rechupes, porosidades, deficiencia de aporte, etc.

El análisis micrográfico, es un modo más avanzado para la observación con una ampliación de la vista de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para

observar las características microscópicas de la estructura (microestructura) y el tamaño de grano. Este tipo de estudio permite evaluar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal, debido a que los mismos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso.

En este estudio, el ensayo, nos permite verificar las transformaciones metalográficas en la zona afectada por el calor (ZAC). En las metalografías se observa las estructuras en la junta, hay que recalcar que las estructuras son bastantes similares entre sí, esto es debido a la naturaleza de los materiales de aporte analizados

2.15.1. Preparación de Muestras Metalográficas

La preparación de las muestras metalográficas, para ensayos metalográficos se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma ASME sección VII.

El principal objetivo de los ensayos metalográficos es revelar los componentes y estructura de los metales y material de aporte, por lo tanto se presenta el procedimiento a seguir para la preparación de muestras metalográficas.

- Selección de las muestras metalográficas.- las muestras deben ser representativas para el examen, por lo que la sección transversal para materiales trabajados en caliente es la ubicación de la muestra metalográfica a estudiar las variaciones de la estructura del centro de la superficie, distribución de impurezas no metálicas a través de la sección, grado de deformación plástica mostrando la distorsión del grano, calidad alcanzada sin tratamiento térmico.



Figura 2.32. Corte de las placas para extracción de las muestras metalográficas.

Fuente: (Propia)

- Tamaño de las muestras metalográficas: las muestras deben ser pulidas para el ensayo metalográfico, en general las probetas suelen tener una medida de 12 a 25 mm si es rectangular o cuadrada y para las probetas redondas suele ser de 12 a 25 mm de diámetro, mientras que su altura no debe ser mayor a lo necesario para su manejo.



Figura 2.33. Muestra Metalográfica.
Fuente: (Propia)

- Corte de las muestras metalográficas.- este proceso debe realizarse con especial cuidado para minimizar la alteración de la estructura del metal.
- Para este proceso se utilizó un disco abrasivo de corte con enfriamiento de agua, debido a que este producirá una superficie a menudo lisa, para un devastado fino. Hay que tener en cuenta que en este corte tiene influencia el grado de dureza del metal; por lo que es esencial utilizar un lubricante o refrigerante para evitar alteraciones en la microestructura.



Figura 2.34. Corte de las Probetas.
Fuente: (Propia)

- Montaje de muestras.- hay casos en el que montar las muestras antes del lijado y pulido, permite un mejor manejo de las piezas, por lo que se realiza de manera manual o mecánicamente, en resinas plásticas. Como se muestras en la figura.



Figura 2.35. Muestra metalográfica montada.
Fuente: (Propia)

- Lijado y pulido: al realizar estos procedimientos, se debe tener una secuencia de lijado y luego pulido, pero la mayor diferencia se dará en el pulido final. El lijado, esta parte se da en dos fases, áspera y fina.
- Lijado áspero: se da con lija gruesa (200), rectificar y quitar. Rectifica una irregularidad o daño en la superficie cortada. Quita cantidades importantes para alcanzar un plano deseado, la desproporcionalidad y otras discontinuidades de la superficie

- Lijado fino: por consiguiente a lo anterior las muestras se lijan con papel abrasivo más fino utilizando agua como lubricante y como limpieza de los residuos abrasivos, lo tanto en este paso la muestra también debe moverse de un lado a otro como lo realiza la máquina.
- Pulido la última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una cubierta con agua con un paño especial cargado con partículas abrasivas, además se le agrega alúmina para que la disponibilidad abrasiva sea satisfactoria, pero para aumentar el efecto de pulido al final se colocó pasta de diamante.



Figura 2.36. Muestra metalográfica siendo pulida.
Fuente: (Propia)

Cuando la superficie tenga la apariencia de espejo y que no se observe manchas o rayas mediante una lupa se procede a lavarlas con agua y limpiarlas con alcohol etílico para después realizar un secado de la superficie.

Se realiza la inspección macrográfica y luego se procede al ataque químico

- Ataque: el fin de este proceso químico es hacer visible las características estructurales del metal o aleación. Esto se da con la ayuda de un reactivo apropiado para el metal a analizar y la estructura específica que se desea observar.

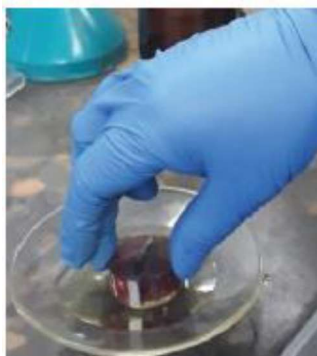


Figura 2.37. Ataque químico de las probetas.
Fuente: (Propia)

Tabla 2.24. Reactivo de ataque para examen microscópico.

REACTIVO	COMPOSICION	USOS
Ácido nítrico (Nital)	Ácido nítrico blanco 1-5 [ml] Alcohol metílico o etílico (98%) Alcohol amílico 100 [ml].	En aceros al carbón: a) para oscurecer perlita y dar contraste entre colonias de perlita b) para revelar fronteras de perlita c) para diferenciar la ferrita de martensita.
Ácido pícrico (Picral)	Ácido pícrico 4 [g], Etil o alcohol de metilo (95%) 100 [ml]	Para todos los grados de aceros al carbón recocidos, normalizados, templados y revenidos, esferoidizados, austenizados. Para todos los aceros de baja aleación atacados por este reactivo.
Cloruro férrico y ácido hidroc্লórico	Cloruro férrico 5 [g] Ácido hidroc্লórico 50 [ml] Agua 100[ml]	Aceros auténticos al níquel y aceros inoxidables.

Fuente: (AVNER, 1988)

Después de todo el proceso descrito, las probetas son llevadas al microscopio metalográfico para el análisis de la estructura del material, para lo que se realiza en tomas de 20X, 100X y de 500X

2.15. Ensayo de dureza

Este ensayo permite evaluar las propiedades del material como su ductilidad y resistencia al desgaste, y de ser necesario también ayuda a determinar si el material es adecuado. Para ello se usa el durómetro que en las escala de dureza de rockwell (HR-B) en el material base y el material de aporte



Figura 2.38. Durómetro HR-150A.
Fuente: (Propia)

Se realiza la penetración o indentación en las muestras a lo largo de las misma permitiendo ver la deformación que tienen a lo largo de la toma de medidas de 11 indentaciones con una separación aproximada de 1.5 [mm].

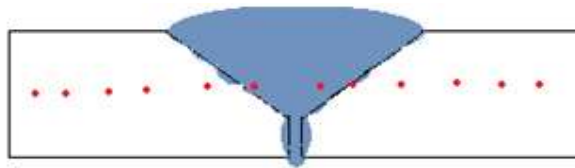


Figura 2.39. Distribución de las medidas de dureza
Fuente: (Propia)






Figura 2.40. Probetas realizadas la prueba de dureza.
Fuente: (Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de Inspección Visual

3.1.1. Ensayo de Varestraint

Tabla 3.1. Resultados de Inspección Visual del Ensayo de Varestraint.

Probetas de Ensayo de Varestraint		
Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	J1
		
Proceso: FCAW	Espesor: 8 [mm]	J2
		
Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	J3
		
Proceso: SMAW	Espesor: 8 [mm]	J4



Proceso: SMAW

Espesor: 6 [mm]

J5



Proceso: FCAW

Espesor: 8 [mm]

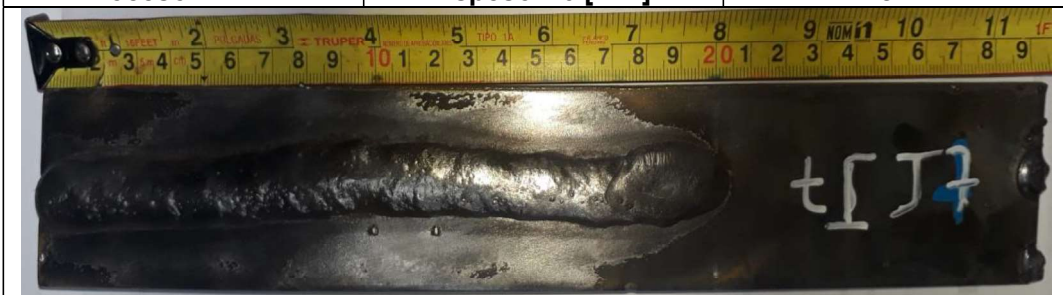
J6



Proceso: FCAW

Espesor: 6 [mm]

J7



Proceso: SMAW

Espesor: 8 [mm]

J8



Proceso: SMAW

Espesor: 6 [mm]

J9



Fuente: (Propia)

Tabla 3.2. Identificación de Discontinuidades.

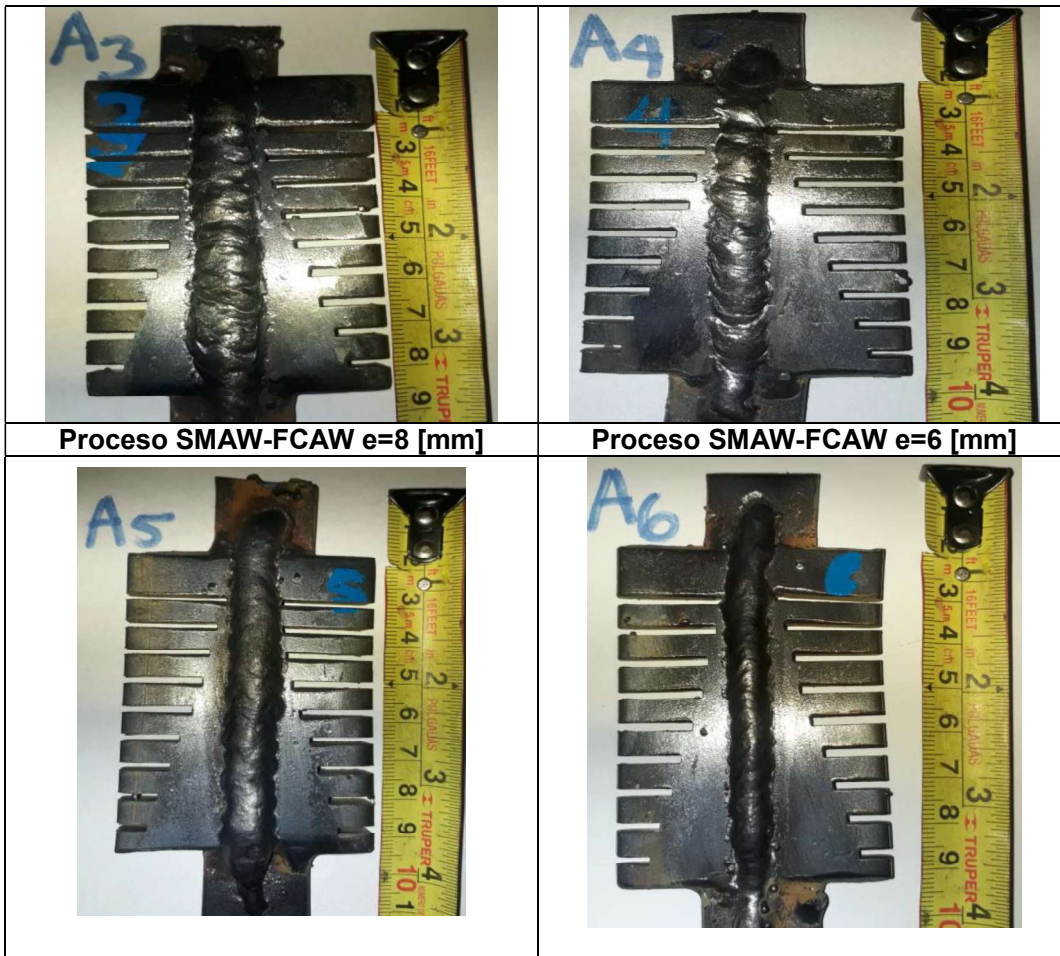
Identificación	Discontinuidades	Calificación
J1	No se observan indicaciones	Aprueba
J2	No se observan indicaciones	Aprueba
J3	Se observan salpicaduras en el material base, en la parte central del cordón de soldadura	Aprueba
J4	Se observan nidos de poros en los bordes del cordón de soldadura	Aprueba
J5	Se observan nidos de poros en los bordes del cordón de soldadura	Aprueba
J6	Se observan salpicaduras en el material base	Aprueba
J7	No se observan indicaciones	Aprueba
J8	No se observan indicaciones	Aprueba
J9	Se observan salpicaduras en el material base	Aprueba

Fuente: (Propia)

3.1.2. Ensayo de Houldcroft

Tabla 3.3. Resultados de Inspección Visual del Ensayo de Houldcroft.

Probetas de Ensayo de Houldcroft	
Proceso SMAW e=8 [mm]	Proceso SMAW e=6 [mm]
Proceso FCAW e=8 [mm]	Proceso FCAW e=6 [mm]



Proceso SMAW-FCAW e=8 [mm]

Proceso SMAW-FCAW e=6 [mm]

Fuente: (Propia)





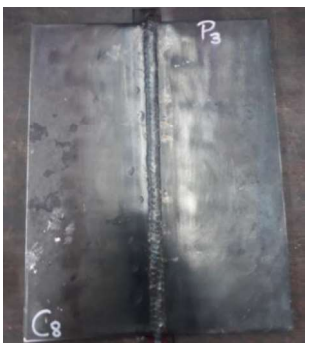

Tabla 3.4. Identificación de Discontinuidades y Calificación del Ensayo de Houldcroft.

Identificación	Discontinuidades	Calificación
A1	No se observan indicaciones	Aprueba
A2	No se observan indicaciones	Aprueba
A3	No se observan indicaciones	Aprueba
A4	No se observan indicaciones	Aprueba
A5	No se observan indicaciones	Aprueba
A6	No se observan indicaciones	Aprueba

Fuente: (Propia)

3.1.3. Placas para la realización de ensayos destructivos

Tabla 3.5. Resultados de Inspección Visual a las placas a Ensayar.

Placas para la realización de ensayos destructivos	
Proceso SMAW e=8 [mm]	Proceso SMAW e=6 [mm]
	
Proceso FCAW e=8 [mm]	Proceso FCAW e=6 [mm]
	
Proceso SMAW-FCAW e=8 [mm]	Proceso SMAW-FCAW e=6 [mm]
	

Fuente: (Propia)

Tabla 3.6. Identificación de Discontinuidades y Calificación de las placas a ensayar.

Identificación	Discontinuidades	Calificación
P1	Se observa una indicación redondeada de 5 mm de diámetro.	Aprueba
P2	No se observan indicaciones	Aprueba
P3	No se observan indicaciones	Aprueba
P4	No se observan indicaciones	Aprueba
P5	No se observan indicaciones	Aprueba
P6	No se observan indicaciones	Aprueba




Fuente: (Propia)





3.2. Resultados del Ensayo de Tintas Penetrantes



3.2.1. Ensayo de Varestraint

A continuación, se detalla después de cada imagen la discontinuidad presente en la probeta.

Tabla 3.7. Resultados de Tintas Penetrantes del Ensayo de Varestraint.

Probetas de Ensayo de Varestraint		
2019-R3-RX3-LP2-P1		
Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	J1
		
Observaciones: No se observan indicaciones		
2019-R3-RX3-LP2-P2		
Proceso: FCAW	Espesor: 8 [mm]	J2
		
Observaciones: No se observan indicaciones		
2019-R3-RX3-LP2-P3		
Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	J3
		
Observaciones: Se observan salpicaduras en el material base, en la parte central del cordón de soldadura		

2019-R3-RX3-LP2-P4		
Proceso: SMAW	Espesor: 8 [mm]	J4
		
Observaciones: Se observan nidos de poros en los bordes del cordón de soldadura		
2019-R3-RX3-LP2-P5		
Proceso: SMAW	Espesor: 6 [mm]	J5
		
Observaciones: Se observan nidos de poros en los bordes del cordón de soldadura		
2019-R3-RX3-LP2-P6		
Proceso: FCAW	Espesor: 8 [mm]	J6
		
Observaciones: No se observan indicaciones en el cordón de soldadura, se observan salpicaduras en el material base.		
2019-R3-RX3-LP2-P7		
Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	J7
		

Observaciones: No se observan indicaciones		
2019-R3-RX3-LP2-P8		
Proceso: SMAW	Espesor: 8 [mm]	J8
		
Observaciones: No se observan indicaciones		
2019-R3-RX3-LP2-P9		
Proceso: SMAW	Espesor: 6 [mm]	J9
		
Observaciones: Se observa una mancha redonda de 4 mm y salpicaduras en el cordón de soldadura y en el material base.		

Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

Tabla 3.8. Identificación y calificación de Tintas Penetrantes para Ensayo de Varestraint.




Identificación	Calificación
2019-R3-RX3-LP2-P1	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P2	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P3	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P4	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P5	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P6	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P7	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P8	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P9	Aprueba

Fuente: (Propia)

3.2.2. Ensayo de Houldcroft

Tabla 3.9. Resultados de Tintas Penetrantes Para Ensayo de Houldcroft.

Probetas de Ensayo de Houldcroft		
2019-R3-RX3-LP2-P10		
Proceso: SMAW	Espesor: 8 [mm]	A1
		
Observaciones: No se observan indicaciones		
2019-R3-RX3-LP2-P11		
Proceso: SMAW	Espesor: 6 [mm]	A2
		
Observaciones: Se observan una indicación redondeada de 6 mm.		
2019-R3-RX3-LP2-P12		
Proceso: FCAW	Espesor: 8 [mm]	A3
		
Observaciones: No se observan indicaciones		

2019-R3-RX3-LP2-P13		
Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	A4
		
Observaciones: No se observan indicaciones		
2019-R3-RX3-LP2-P14		
Proceso: SMAW-FCAW	Espesor: 8 [mm]	A5
		
Observaciones: Se observan 3 indicaciones redondeadas de 8, 2, 5 mm de diámetro.		
2019-R3-RX3-LP2-P15		
Proceso: FCAW-SMAW	Espesor: 6 [mm]	A6
		
Observaciones: No se observan indicaciones		

Fuente: (Lab. De Ensayos no Destructivos)

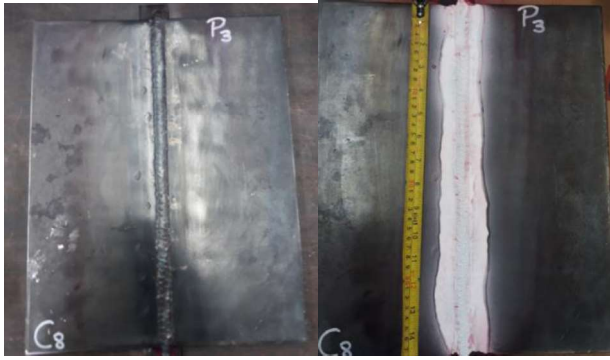

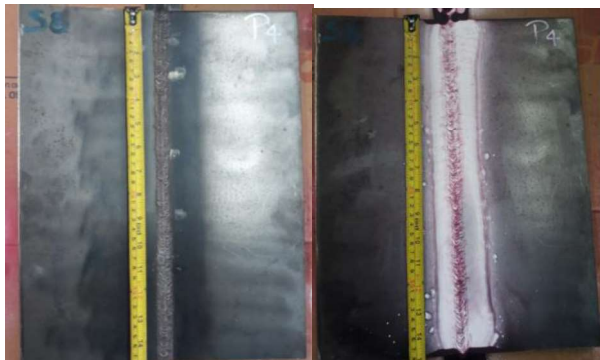
Tabla 3.10. Identificación y calificación de Tintas Penetrantes para Ensayo de Houldcroft.




Identificación	Calificación
2019-R3-RX3-LP2-P10	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P11	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P12	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P13	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P14	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P15	Aprueba

Fuente: (Propia)

3.2.3. Placas para la realización de ensayos destructivos

Tabla 3.11. Resultados de Tintas Penetrantes Para Placas a Ensayar.

Placas de Ensayo		
Proceso: SMAW-FCAW	Espesor: 8 [mm]	C8
2019-R3-RX3-LP2-P16		
		
Observaciones: No se observan indicaciones		
Proceso: SMAW-FCAW	Espesor: 6 [mm]	C6
2019-R3-RX3-LP2-P17		
		
Observaciones: No se observan indicaciones		
Proceso: SMAW	Espesor: 8 [mm]	S8
2019-R3-RX3-LP2-P18		
		
Observaciones: No se observan indicaciones		

Proceso: SMAW	Espesor: 6 [mm]	S6
2019-R3-RX3-LP2-P19		
		
Observaciones: Se observa una indicación redondeada de 5 mm de diámetro.		
Proceso: FCAW	Espesor: 8 [mm]	F8
2019-R3-RX3-LP2-P20		
		
Observaciones: Se observa una indicación redondeada de 2 mm de diámetro.		
Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	F6
2019-R3-RX3-LP2-P21		
		
Observaciones: No se observan indicaciones		

Fuente: (Lab. Ensayos no destructivos)

Tabla 3.12. Identificación y calificación de Tintas Penetrantes para placas a ensayar.


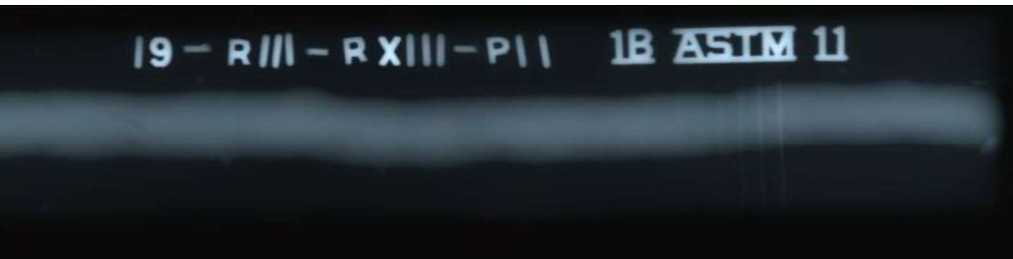
Identificación	Calificación
2019-R3-RX3-LP2-P16	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P17	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P18	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P19	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P20	Aprueba
2019-R3-RX3-LP2-P21	Aprueba

Fuente: (Propia)

3.3. Resultados del Ensayo de Radiografía

3.3.1. Ensayo de Varestraint

Tabla 3.13. Resultado de Radiografía para el Ensayo de Varestraint.

Temperatura Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 5 min	T. Parada: 2 min	T. Fijado: 10 min
Baño de Parada: 10 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min
Probetas de Ensayo de Varestraint			
2019-R05-RX3-001			
			
Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	J1	
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]	
Falta de Penetración	---	---	
Fusión Incompleta	---	---	
Penetración excesiva	---	---	
Inclusiones de Escoria	---	---	
Porosidad	---	---	
Grietas	---	---	
Mordeduras	---	---	
Escoria Alargada	---	---	
Otros:	---	---	
Falta de Penetración	---	---	
Fusión Incompleta	---	---	
Salpicadura	35	2	
	64	2	
	97	1	
	138	1.5	
	145	1	
	150	1	
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.			
2019-R05-RX3-002			
			

Proceso: FCAW	Espesor: 8 [mm]	J2
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	138	2
	172	2
	176	2
	210	1

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

2019-R05-RX3-003



Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	J3
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	68	2
	83	9
Porosidad	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	113	2
	118	2
	91	1
	50	1
	186	1
	184	2
198	1	

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

2019-R05-RX3-004



Proceso: SMAW	Espesor: 8 [mm]	J4
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	40	20
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	85 182	15 12
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	---	---
Concavidad Interna	---	---

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

2019-R05-RX3-005



Proceso: SMAW	Espesor: 6 [mm]	J5
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	185	12
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	119	<1
	121	<1
	124	<1
	127	<1
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---

Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	---	---
Concavidad Interna	185	12
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		

2019-R05-RX3-006




Proceso: FCAW	Espesor: 8 [mm]	J6
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	10 25	10 2
Concavidad Interna	---	---

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

2019-R05-RX3-007



Proceso: FCAW	Espesor: 6 [mm]	J7
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---

Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	181	4
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	---	---
Concavidad Interna	---	---
Porosidad tipo gusano	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		
2019-R05-RX3-008		
		
Proceso: SMAW	Espesor: 8 [mm]	J8
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	---	---
Concavidad Interna	---	---
Porosidad tipo gusano	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		
2019-R05-RX3-009		






Proceso: SMAW	Espesor: 6 [mm]	J9
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta		
Salpicadura	156	3
	146	1
	166	2
	168	2
	178	1
	182	1
	189	2
	188	2
	218	1
219	1	
226	2	
Concavidad Interna	---	---
Porosidad tipo gusano	35	12
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		



Fuente: (Lab. Ensayo no Destructivos)


3.3.2. Ensayo de Houldcroft

Tabla 3.14. Resultado de Radiografías para el Ensayo de Houldcroft.

Temperatura Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 5 min	T. Parada: 2 min	T. Fijado: 10 min
Baño de Parada: 10 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min
Probetas de Ensayo de Houldcroft			
2019-R05-RX3-010			
			
Proceso: SMAW	Espesor: 8 [mm]	J10	
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]	
Falta de Penetración	---	---	
Fusión Incompleta	---	---	
Penetración excesiva	---	---	
Inclusiones de Escoria	---	---	
Porosidad	---	---	
Grietas	---	---	
Mordeduras	---	---	
Escoria Alargada	---	---	
Falta de Penetración	---	---	
Fusión Incompleta	---	---	
Salpicadura	---	---	
Concavidad Interna	35	2	
	64	2	
	97	1	
	138	1.5	
	145	1	
	150	1	
Porosidad de Gusano	---	---	
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.			
2019-R05-RX3-011			
			

Proceso: SMAW	Espesor: 6 [mm]	J11
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	112	1,5
Porosidad	37	1
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	---	---
Concavidad Interna	43	4
	46	6
	60	7
	92	4
	100	5
	108	2
Porosidad de Gusano	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		
2019-R05-RX3-012		
		
Proceso: FCAW	Espesor: 8 [mm]	J12
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	
Fusión Incompleta	---	
Penetración excesiva	---	
Inclusiones de Escoria	---	
Porosidad	---	
Grietas	---	
Mordeduras	42	20
	72	1
	42	10
	57	1
Escoria Alargada	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	---	---
Concavidad Interna	---	---



Porosidad de Gusano	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		
2019-R05-RX3-013		
		
Proceso: SMAW	Espesor: 6 [mm]	J13
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	185	12
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	119	<1
	121	<1
	124	<1
	127	<1
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	---	---
Concavidad Interna	50	15
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		
2019-R05-RX3-014		
		
Proceso: SMAW - FCAW	Espesor: 8 [mm]	J14
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---

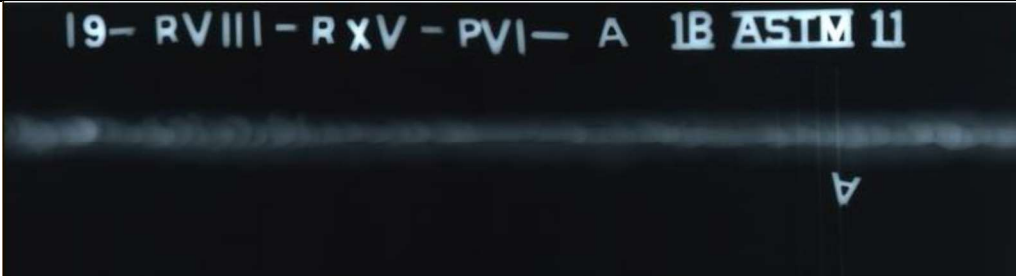

Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	10 25	10 2
Concavidad Interna	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		
2019-R05-RX3-015		
		
Proceso: SMAW -FCAW	Espesor: 6 [mm]	J15
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Otros:	---	---
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Salpicadura	---	---
Concavidad Interna	---	---
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		

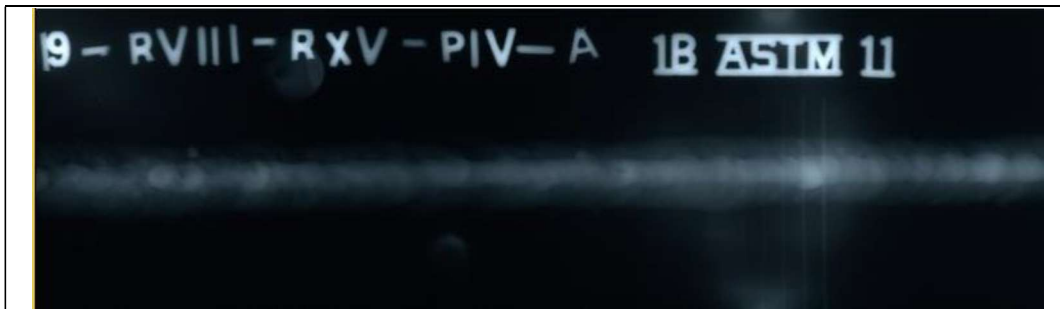
Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

3.3.3. Placas a Ensayar

Tabla 3.15. Resultado de Radiografías a las placas a ensayar.

Temperatura Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 5 min	T. Parada: 2 min	T. Fijado: 10 min
Baño de Parada: 10 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min
Probeta	Tipo de Transferencia	Identificación Radiográfica	Toma
C8	SMAW-FCAW	2019-R08-RX15-003	A
			
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]	
Falta de Penetración	134	1,5	
Fusión Incompleta	---	---	
Penetración excesiva	65 196	33 20	
Inclusiones de Escoria	---	---	
Porosidad	---	---	
Grietas	---	---	
Mordeduras	---	---	
Escoria Alargada	---	---	
Salpicadura	---	---	
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.			
C8	SMAW-FCAW	2019-R08-RX15-003	B
			
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]	
Falta de Penetración	210	1	
Fusión Incompleta	---	---	
Penetración excesiva	28 153	52 17	
Inclusiones de Escoria	---	---	
Porosidad	---	---	
Nido de Poros	---	---	
Grietas	---	---	
Mordeduras	---	---	
Escoria Alargada	---	---	
Salpicadura	76 106 116	1 1,5 2	
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.			

C6	SMAW-FCAW	2019-R08-RX15-006	A
			
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]	
Falta de Penetración	29	5	
	110	18	
Fusión Incompleta	---	---	
Penetración excesiva	24	4	
Inclusiones de Escoria	---	---	
Porosidad	---	---	
Grietas	110	0,6	
Mordeduras	134	4	
Escoria Alargada	---	---	
Salpicadura	38	3,8	
	70	2	
	154	1,2	
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.			
C6	SMAW-FCAW	2019-R08-RX15-006	B
			
Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]	
Falta de Penetración	29	5	
	110	18	
Fusión Incompleta	---	---	
Penetración excesiva	24	4	
Inclusiones de Escoria	---	---	
Porosidad	---	---	
Grietas	110	0,6	
Mordeduras	134	4	
Escoria Alargada	---	---	
Salpicadura	38	3,8	
	70	2	
	154	1,2	
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.			
S8	SMAW	2019-R08-RX15-004	A



Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	90	3
	102	2
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	172	4,5
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	134	2,5
Nido de Poros	---	---
Grietas	43	3
Mordeduras	19	2
Escoria Alargada	---	---
Salpicadura	---	---

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.



Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	25	20
	134	30
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	19	4
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Nido de Poros	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Salpicadura	23	2
	42	2
	52	2
	120	1,5

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

S8	SMAW	2019-R08-RX15-004	B
-----------	-------------	--------------------------	----------

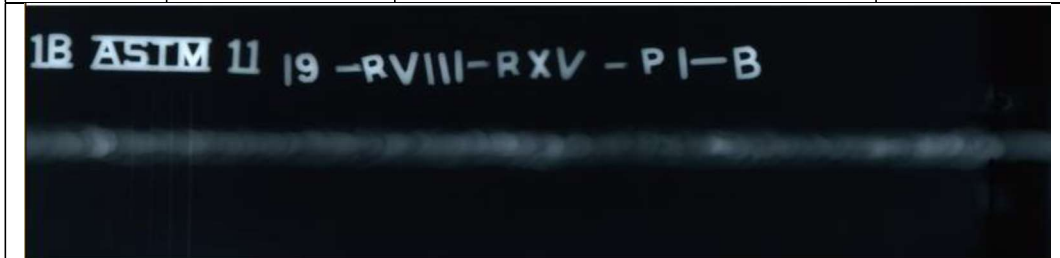
S6	SMAW	2019-R08-RX15-001	A
-----------	-------------	--------------------------	----------



Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	185	4
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	44	1
Nido de Poros	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	50 84 90	50 1,5 1,5
Escoria Alargada	---	---
Salpicadura	---	---

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

S6	SMAW	2019-R08-RX15-001	B
-----------	-------------	--------------------------	----------



Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	12	30
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	15	4
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Nido de Poros	---	---
Grietas	145 190	2,5 3
Mordeduras	---	---
Escoria Alargada	---	---
Salpicadura	---	---

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

F8	FCAW	2019-R08-RX15-005	A
-----------	-------------	--------------------------	----------



Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	17	6
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	180	10
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	12	6
Mordeduras	189 206	3 2
Escoria Alargada	---	---
Salpicadura	---	---
Falta de Penetración	17	6

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

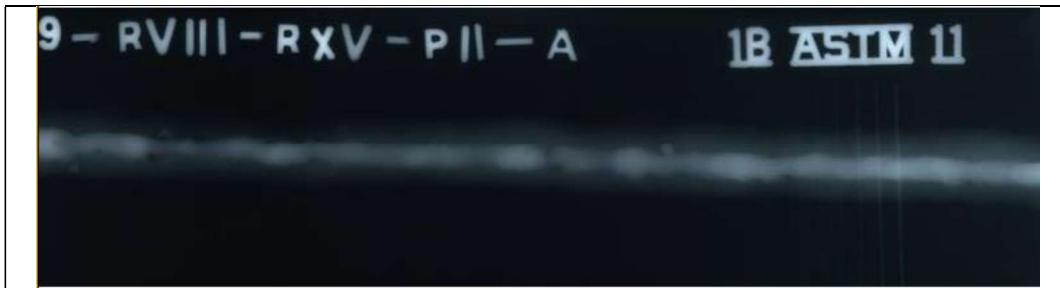
F8	FCAW	2019-R08-RX15-005	B
-----------	-------------	--------------------------	----------



Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	80	20
	112	12
	155	4
	183	4
Fusión Incompleta	110	10
Penetración excesiva	30	5
	165	10
	196	5
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	34	4
	52	2
	84	0,5
	98	0,5
	100	7
	206	2,5
Escoria Alargada	---	---
Salpicadura	---	---
Falta de Penetración	80	20
	112	12
	155	4
	183	4

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

F6	FCAW	2019-R08-RX15-002	A
-----------	-------------	--------------------------	----------



Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	---	---
Fusión Incompleta	122	2
	174	1,2
	214	1,3
Penetración excesiva	--	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Nido de Poros	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	21	0,5
	27	0,5
	37	0,5
	48	1,2
	74	1
Escoria Alargada	---	---
Salpicadura	20	2
	40	2,5
	146	3

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

F6	FCAW	2019-R08-RX15-002	B

Discontinuidades	X [mm]	Dim. [mm]
Falta de Penetración	126	4
	203	3
	214	218
Fusión Incompleta	---	---
Penetración excesiva	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---
Porosidad	---	---
Nido de Poros	---	---
Grietas	---	---
Mordeduras	18	1
	82	3
	105	2
	110	4
	126	2

	151	6
	178	6
Escoria Alargada	---	---
Salpicadura	80	3
	148	2
	205	4
	208	3
Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.		

Fuente: (Lab. Ensayos no Destructivos)

3.4. Resultados de Ensayo de Tracción

Se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de tracción, y la curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de las probetas ensayadas.






Tabla 3.16. Identificación y dimensiones de las probetas de tracción.

Identificación	Proceso	Ancho	Espesor
		[mm]	[mm]
C8-T1	SMAW-FCAW	19,36	8,06
C8-T2	SMAW-FCAW	19,73	8,03
C6-T1	SMAW-FCAW	20,10	6,03
C6-T2	SMAW-FCAW	19,87	5,98
S8-T1	SMAW	19,89	8,04
S8-T2	SMAW	19,90	8,07
S6-T1	SMAW	20,05	6,00
S6-T2	SMAW	20,06	5,96
F8-T1	FCAW	19,83	8,01
F8-T2	FCAW	19,85	8,02
F6-T1	FCAW	20,08	5,98
F6-T2	FCAW	20,01	5,97

Fuente: (Propia)

3.4.1. Carga Máxima Registrada y Resistencia a la Tracción en las Probetas Ensayadas

Tabla 3.17. Resultados de Ensayo de Tracción.

Probeta	Tipo de Transferencia	Carga máxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Obs.
		Lbf	N	ksi	Mpa	
C8-T1	SMAW-FCAW	16810	74773	69,3	479,2	FMB
						
C8-T2	SMAW-FCAW	17111	76114	69,7	480,4	FMB
						
C6-T1	SMAW-FCAW	11856	52740	63,1	435,1	FMB
						
C6-T2	SMAW-FCAW	11758	52301	63,9	440,5	FMB
						
S8-T1	SMAW	16998	75611	68,6	472,8	FMB
						
S8-T2	SMAW	16845	74921	67,7	466,6	FMB



S6-T1	SMAW	11663	51881	62,5	431,3	FMB
-------	------	-------	-------	------	-------	-----



S6-T2	SMAW	11620	51690	62,7	432,3	FMB
-------	------	-------	-------	------	-------	-----



F8-T1	FCAW	16532	73539	67,1	463,0	FMB
-------	------	-------	-------	------	-------	-----



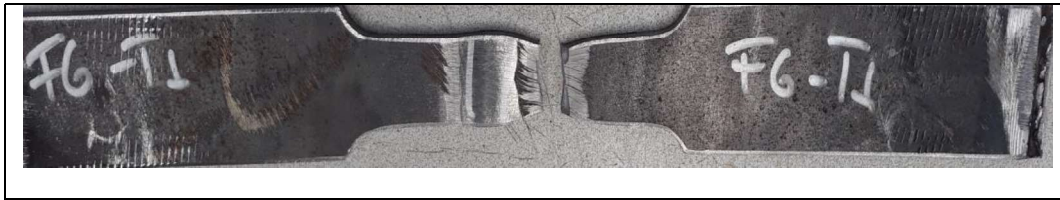
F8-T2	FCAW	16465	73239	66,7	460,1	FMB
-------	------	-------	-------	------	-------	-----



F6-T1	FCAW	11655	51844	62,6	431,8	FMB
-------	------	-------	-------	------	-------	-----



F6-T2	FCAW	11663	51879	63,0	434,3	FMB
-------	------	-------	-------	------	-------	-----



Fuente: (Lab. De vibraciones y esfuerzos)

Tabla 3.18. Calificación del ensayo de Tracción.

Probeta	Carga máxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Obs.	Calificación
	Lbf	N	ksi	Mpa		
C8-T1	16810	74773	69,3	479,2	FMB	Aprueba
C8-T2	17111	76114	69,7	480,4	FMB	Aprueba
C6-T1	11856	52740	63,1	435,1	FMB	Aprueba
C6-T2	11758	52301	63,9	440,5	FMB	Aprueba
S8-T1	16998	75611	68,6	472,8	FMB	Aprueba
S8-T2	16845	74921	67,7	466,6	FMB	Aprueba
S6-T1	11663	51881	62,5	431,3	FMB	Aprueba
S6-T2	11620	51690	62,7	432,3	FMB	Aprueba
F8-T1	16532	73539	67,1	463,0	FMB	Aprueba
F8-T2	16465	73239	66,7	460,1	FMB	Aprueba
F6-T1	11655	51844	62,6	431,8	FMB	Aprueba
F6 T2	11663	51879	63,0	434,3	FMB	Aprueba

Fuente: (Lab. De vibraciones y esfuerzos)

- FMB: Falla material base

Graficas Esfuerzo vs Deformación de cada probeta.

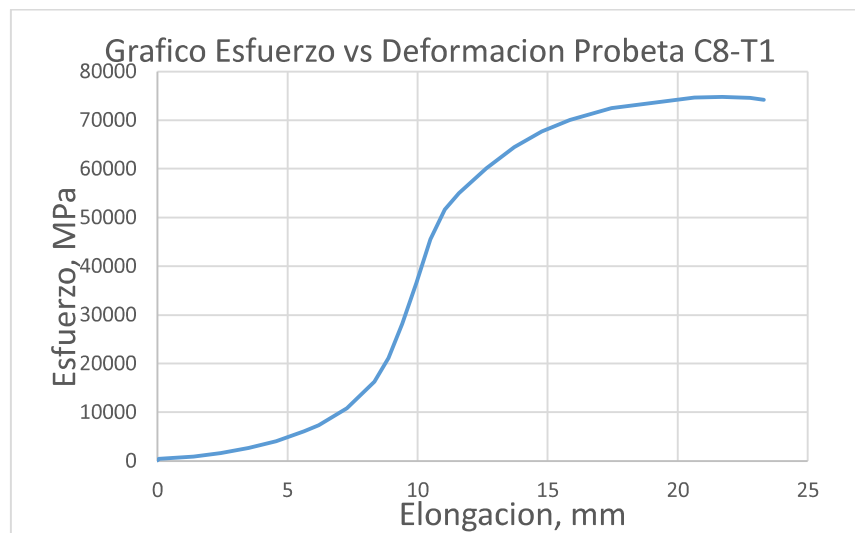


Figura 3.1. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta C8-T1.

Fuente: (Propia)

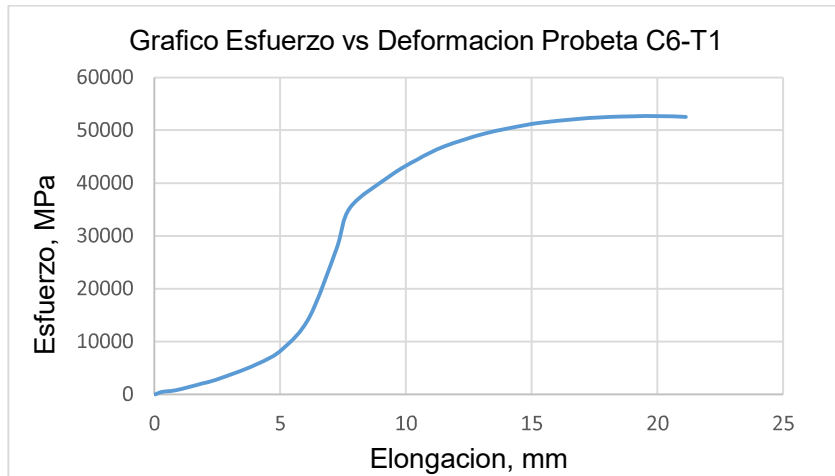


Figura 3.2. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta C6-T1.
Fuente: (Propia)

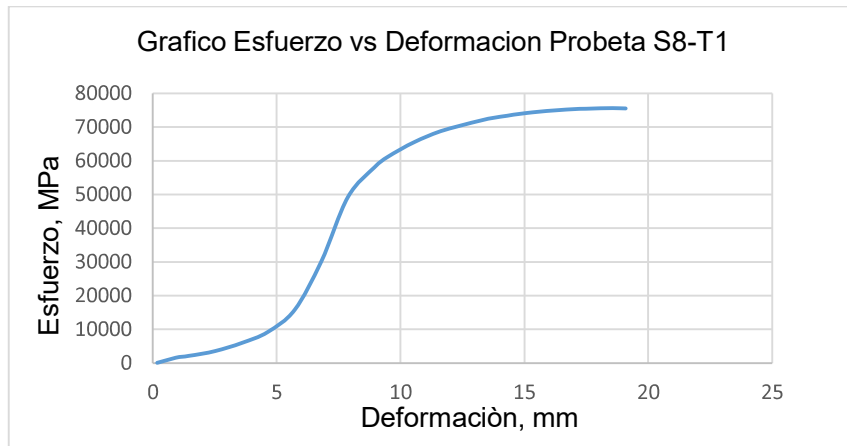


Figura 3.3. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta S8-T1.
Fuente: (Propia)

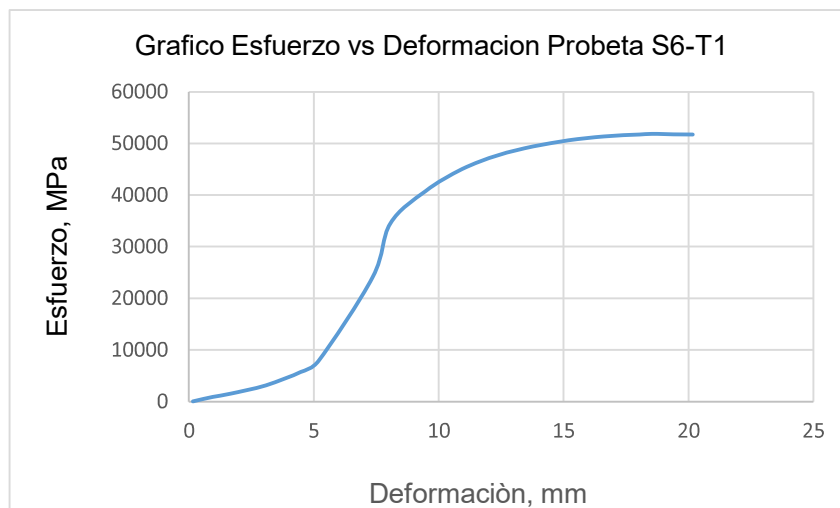


Figura 3.4. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta S6-T1.
Fuente: (Propia)

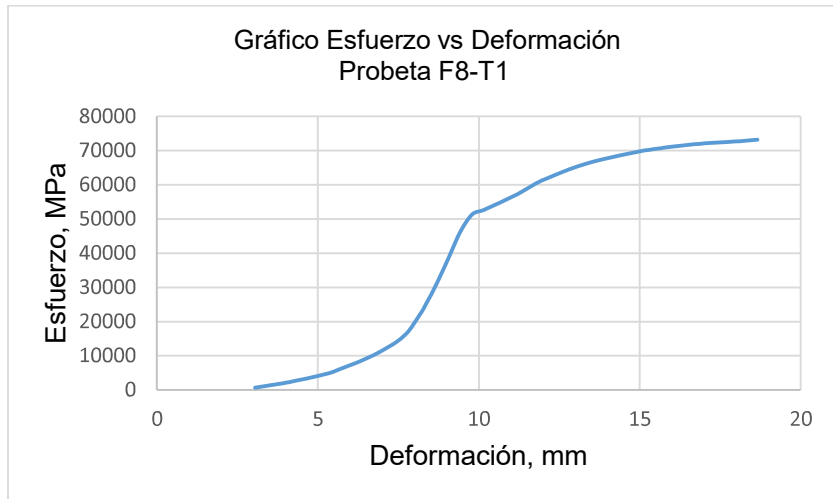


Figura 3.5. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta F8-T1.
Fuente: (Propia)

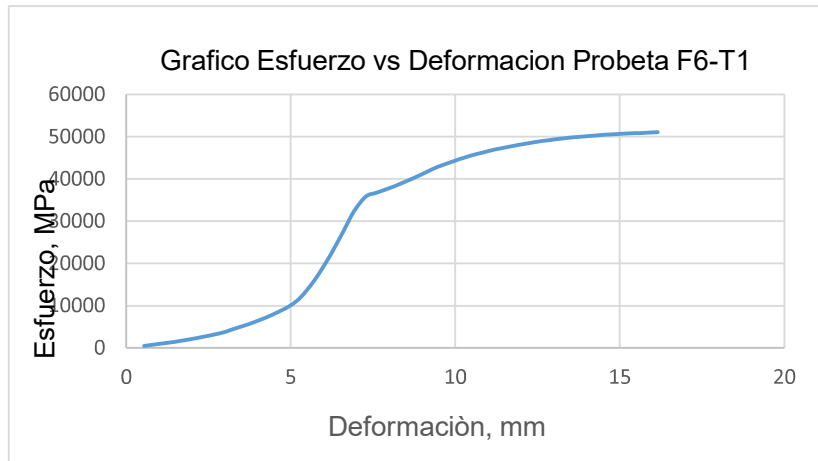


Figura 3.6. Grafica Esfuerzo vs Deformación, Probeta F6-T1.
Fuente: (Propia)

3.4.1. Análisis Comparativo de Tracción

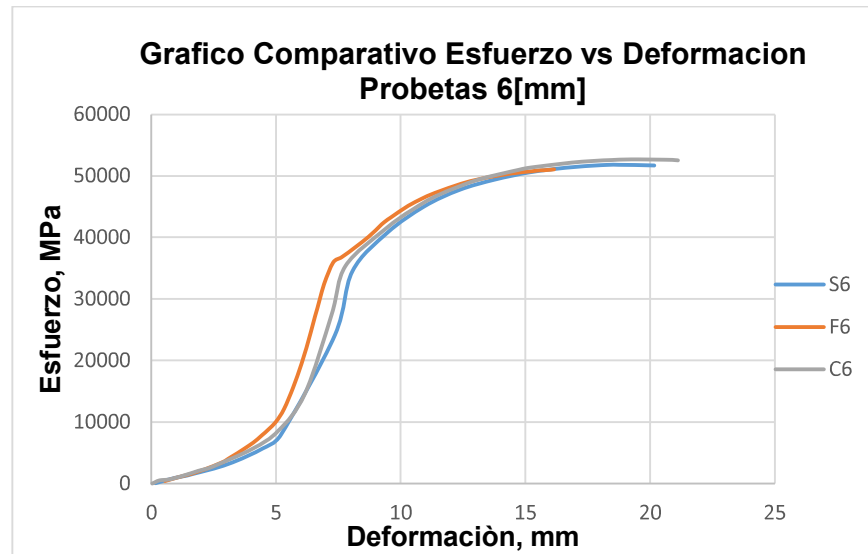


Figura 3.7. Análisis Comparativo de Tracción de Probetas de espesor de 6 [mm].
Fuente: (Propia)

Tabla 3.19. Análisis comparativo de las probetas de espesor de 6 [mm].

Probeta	Carga máxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Obs.	Calificación
	Lbf	N	ksi	Mpa		
S6-T1	16998	75611	68,6	472,8	FMB	Aprueba
S6-T2	16845	74921	67,7	466,6	FMB	Aprueba
F6-T1	16532	73539	67,1	463,0	FMB	Aprueba
F6-T2	16465	73239	66,7	460,1	FMB	Aprueba
C6-T1	16810	74773	69,3	479,2	FMB	Aprueba
C6-T2	17111	76114	69,7	480,4	FMB	Aprueba

Fuente: (Propia)

De acuerdo a los análisis comparativos para las probetas de 6 [mm], la zona de rotura se presenta en el material base en todas las probetas la mayor resistencia a la tracción existe en la probeta soldada con los dos procesos, con pase de raíz con proceso SMAW y los pases posteriores con proceso FCAW, las probetas que menor resistencia presentaron fueron las soldadas por proceso FCAW.

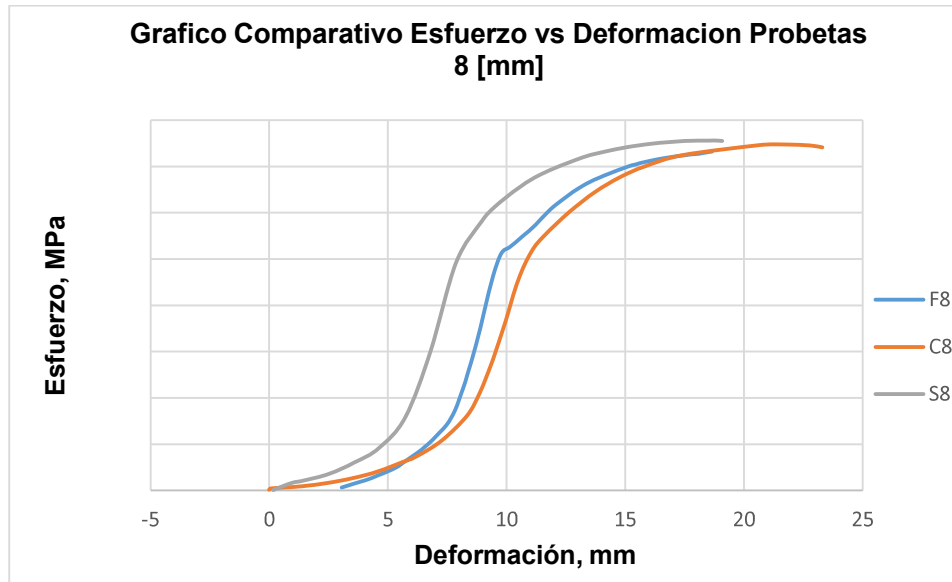


Figura 3.8. Análisis Comparativo de Tracción de Probetas de espesor de 8 [mm].
Fuente: (Propia)

Tabla 3.20. Análisis comparativo de las probetas de espesor de 8 [mm].





Probeta	Carga máxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Obs.	Calificación
	Lbf	N	ksi	Mpa		
S8-T1	11663	51881	62,5	431,3	FMB	Aprueba
S8-T2	11620	51690	62,7	432,3	FMB	Aprueba
F8-T1	11655	51844	62,6	431,8	FMB	Aprueba
F8-T2	11663	51879	63,0	434,3	FMB	Aprueba
C8-T1	11856	52740	63,1	435,1	FMB	Aprueba
C8-T2	11758	52301	63,9	440,5	FMB	Aprueba

Fuente: (Propia)

De acuerdo a los análisis comparativos para las probetas de 8 [mm], la zona de rotura se presenta en el material base en todas las probetas la mayor resistencia a la tracción existe en la probeta soldada con los dos procesos, con pase de raíz con proceso SMAW y los pases posteriores con proceso FCAW, las probetas que menor resistencia presentaron fueron las soldadas por proceso SMAW



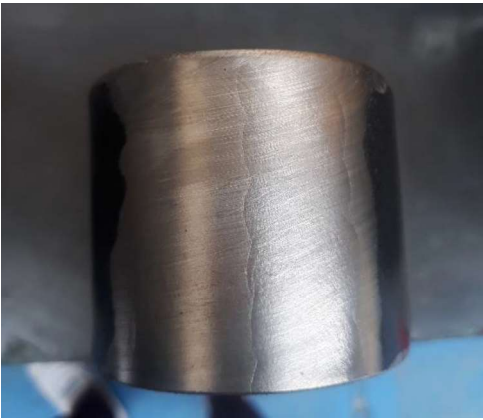

3.5. Resultados del Ensayo de Doblado

Tabla 3.21. Resultado de Ensayo de Doblado proceso combinado de espesor 8 [mm].

Probetas Ensayo de Doblado Proceso Combinado e= 8 [mm]	
Doblado de Cara	Ensayo de Raíz
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	Se observa una discontinuidad de 2,16 mm en el borde del cordón de soldadura





Fuente: (Lab. De Vibraciones y Esfuerzos)

Tabla 3.22. Resultado de Ensayo de Doblado proceso combinado de espesor 6 [mm].

Probetas Ensayo de Doblado Proceso Combinado e= 6 [mm]	
Doblado de Cara	Ensayo de Raíz
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	Se observa una discontinuidad de 2,31 mm en el cordón de soldadura.
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	Se observa una discontinuidad de 4,22 mm en el borde del cordón de soldadura.





Fuente: (Lab. De Vibraciones y Esfuerzos)

Tabla 3.23. Resultado de Ensayo de Doblado proceso SMAW de espesor 8 [mm].

Probetas Ensayo de Doblado Proceso SMAW e= 8 [mm]	
Doblado de Cara	Ensayo de Raíz
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	Se observa una discontinuidad de 1,55 mm en el cordón de soldadura.
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	Se observa una discontinuidad de 4,22 mm en el borde del cordón de soldadura.





Fuente: (Lab. De Vibraciones y Esfuerzos)

Tabla 3.24. Resultado de Ensayo de Doblado proceso SMAW de espesor 6 [mm].

Probetas Ensayo de Doblado Proceso SMAW e= 6 [mm]	
Doblado de Cara	Ensayo de Raíz
	
<p>No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.</p>	<p>No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.</p>
	
<p>No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.</p>	<p>No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.</p>

Fuente: (Lab. De Vibraciones y Esfuerzos)

Tabla 3.25. Resultado de Ensayo de Doblado proceso FCAW de espesor 8 [mm].

Probetas Ensayo de Doblado Proceso FCAW e= 8 [mm]	
Doblado de Cara	Ensayo de Raíz
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	Se observa una discontinuidad de 3,19 mm en el cordón de soldadura.
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	Se observan discontinuidades de 1,94 y 0,86 mm en el cordón de soldadura.

Fuente: (Lab. De Vibraciones y Esfuerzos)

Tabla 3.26. Resultado de Ensayo de Doblado proceso FCAW de espesor 6 [mm].

Probetas Ensayo de Doblado Proceso FCAW e= 6 [mm]	
Doblado de Cara	Ensayo de Raíz
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.
	
No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura.	Se observan discontinuidades de 0,89 y 0,81 mm en el cordón de soldadura.

Fuente: (Lab. De Vibraciones y Esfuerzos)

3.5.1. Calificación del Ensayo de Doblado para espesor de 8 [mm]

Tabla 3.27. Calificación del Ensayo de Doblado para probetas de 8 [mm].

Id.	Doblado		Discontinuidades		Observaciones / Discontinuidades	Calificación
	Cara	Raíz	Fisuras	Otras		
C8	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
C8	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
C8		X	SI	NO	Presenta una fisura 2,16 mm en el borde del cordón.	Aprueba
C8		X	NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
S8	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
S8	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
S8		X	SI	NO	Presenta una fisura 1,55 mm en el borde del cordón	Aprueba
S8		X	NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
F8	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
F8	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
F8		X	SI	NO	Presenta una fisura 3,19 mm en el cordón.	No Aprueba
F8		X	SI	NO	Presenta de 1,94 y 0,86 mm en el cordón.	Aprueba

Fuente: (Propia)

De acuerdo al código ASME Sección IX especifica que se rechaza una probeta cuando existe fisuras mayores a 6 [mm] en el borde y fisuras mayores a 3 [mm] en el cordón, en los ensayos de doblado de cara para las probetas de 8 [mm] de espesor, en ninguna probeta mostro discontinuidad, por lo que aprueban. Mientras que en el ensayo de doblado de raíz existen probetas que mostraron alguna discontinuidad en el caso de las probetas soldadas con proceso SMAW – FCAW y SMAW sus discontinuidades son aceptadas por la norma, mientras que la probeta soldada con proceso FCAW se rechaza ya que sobrepasa los límites de tolerancia.

3.5.2. Calificación del Ensayo de Doblado para espesor de 6 [mm]

Tabla 3.28. Calificación del Ensayo de Doblado para probetas de 6 [mm].

Id.	Doblado		Discontinuidades		Observaciones / Discontinuidades	Calificación
	Cara	Raíz	Fisuras	Otras		
C6	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
C6	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
C6		X	SI	NO	Presenta una fisura 2,31 mm en el cordón.	Aprueba
C6		X	SI	NO	Presenta una fisura 4,22 mm en el borde del cordón	Aprueba
S6	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
S6	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
S6		X	NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
S6		X	NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
F6	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
F6	X		NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba

F6		X	NO	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
F6		X	SI	NO	Presenta fisuras de 0,89 y 0,81 mm en el cordón.	Aprueba

Fuente: (Propia)

Mientras que las probetas de 6 [mm] de espesor en los ensayos de doblado de cara, ninguna probeta mostro discontinuidad, en el ensayo de doblado de raíz existen probetas que mostraron alguna discontinuidad en el caso de las probetas soldadas con proceso SMAW – FCAW y FCAW sus discontinuidades son aceptadas por la norma.

3.6. Resultados de Ensayo de Dureza

3.6.1. Valores de Dureza obtenidos en las Probetas de 6 [mm]

Tabla 3.29. Valores de dureza obtenidos en las probetas con espesor de 6 [mm].

PROBETA C6		PROBETA S6		PROBETA F6	
DUREZA [RB]	DISTANCIA [mm]	DUREZA [RB]	DISTANCIA [mm]	DUREZA [RB]	DISTANCIA [mm]
68	1,2	72	2,56	71	2,88
72	3,74	75	4,82	70	5,3
72	6,96	72	6,15	70	9,12
73	10,58	71	10,64	76	12,64
73	13,62	73	12,7	84	15,8
81	16,62	84	15,56	83	18,58
87	19	84	18	80	21,84
86	21,73	76	20,62	72	24,62
73	24,58	73	23,44	70	28,24
71	27,38	69	26	71	31,26
69	31,22	72	28,62		
		71	32,8		

Fuente: (Propia)

3.6.2. Valores de Dureza obtenidos en las Probetas de 8 [mm]

Tabla 3.30. Valores de dureza obtenidos en las probetas con espesor de 8 [mm].

PROBETA C8		PROBETA S8		PROBETA F8	
DUREZA [RB]	DISTANCIA [mm]	DUREZA [RB]	DISTANCIA [mm]	DUREZA [RB]	DISTANCIA [mm]
75	2,8	60	0,78	68	1
78	4,62	74	4	73	4,1
76	6	73	5,9	72	5,3
81	10,98	74	9,72	76	9,84
84	14	79	13,1	82	12,46
86	17,4	91	16,32	86	14,86
78	20,7	89	20,2	86	18,3
78	24,72	80	22,36	79	21,92
78	26,74	76	27,46	78	24,62
78	29,68	78	31	73	29,5
76	33,54	73	33,12	73	33,14

3.6.3. Diagramas de Dureza



Figura 3.9. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta S6.
Fuente: (Propia)

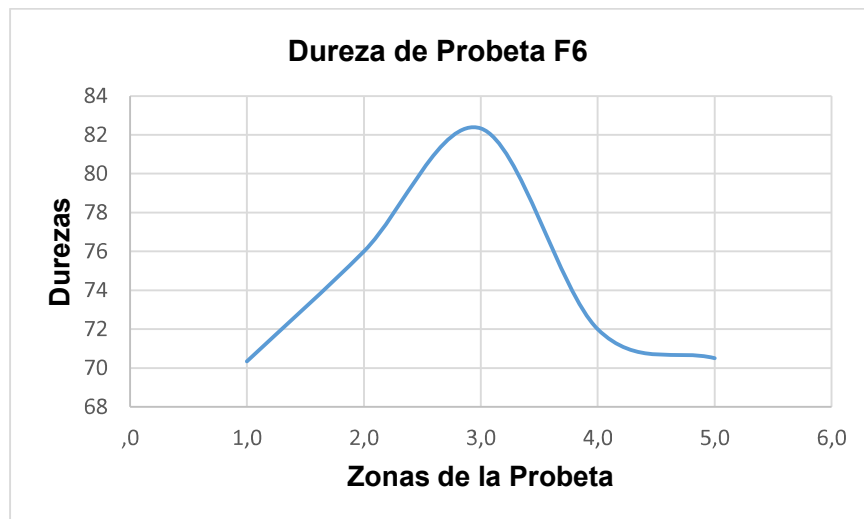


Figura 3.10. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta F6.
Fuente: (Propia)

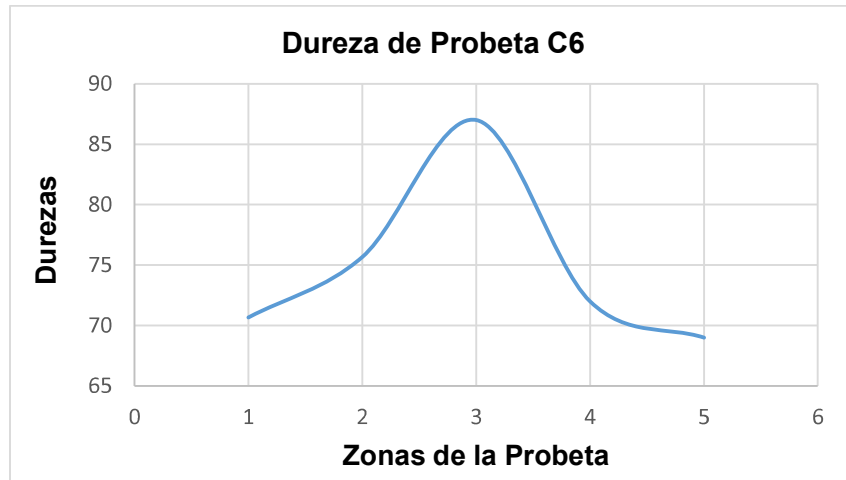


Figura 3.11. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta C6.
Fuente: (Propia)

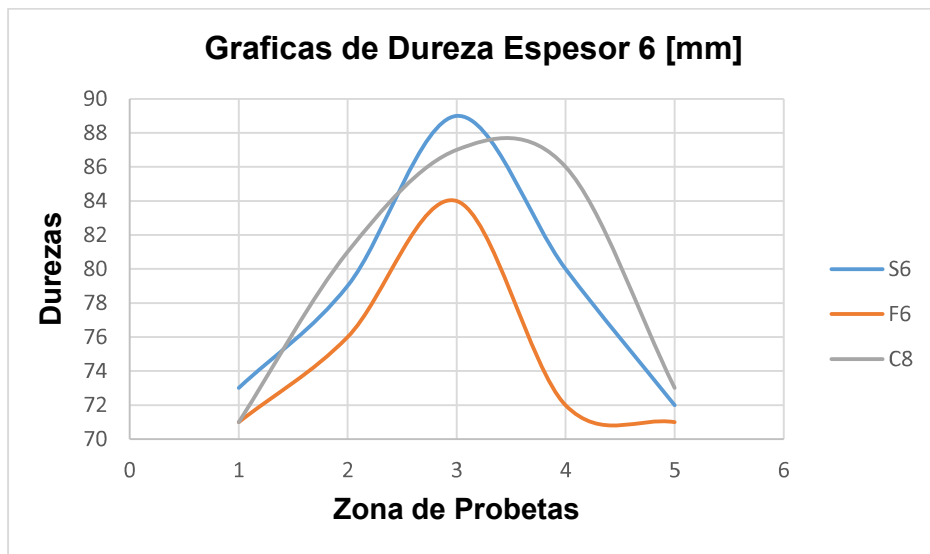


Figura 3.12. Esquema Comparativo de Durezas de probetas de espesor 6 [mm].
Fuente: (Propia)

De acuerdo a la gráfica comparativa de durezas de la probeta de espesor de 6 [mm], la mayor dureza en el ZAC existe en la probeta soldada con proceso SMAW – FCAW mientras que la que presenta menor dureza fue la soldada por proceso FCAW. La mayor dureza en la zona del material de aporte existe en la probeta soldada por proceso SMAW, mientras que la que presenta menor dureza es la probeta soldada por proceso FCAW.

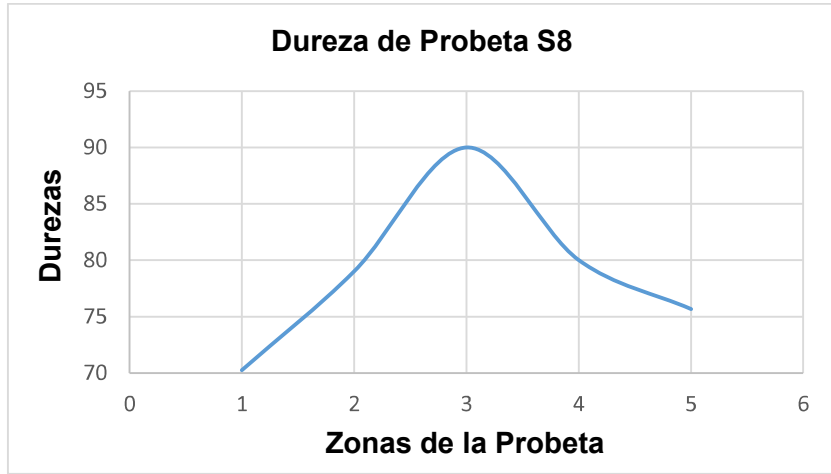


Figura 3.13. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta S8.
Fuente: (Propia)

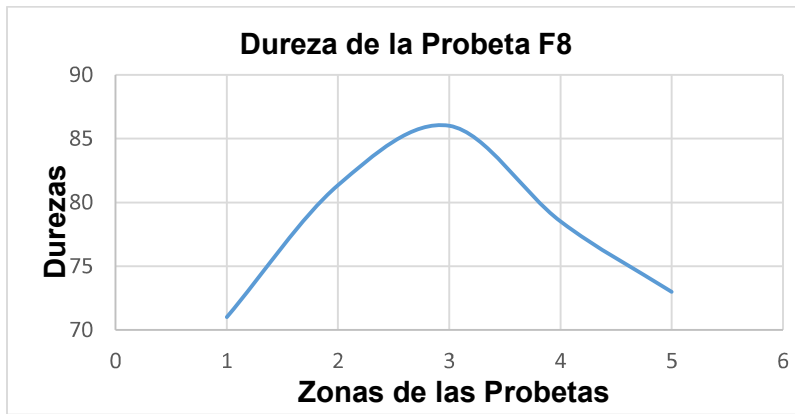


Figura 3.14. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta F8.
Fuente: (Propia)

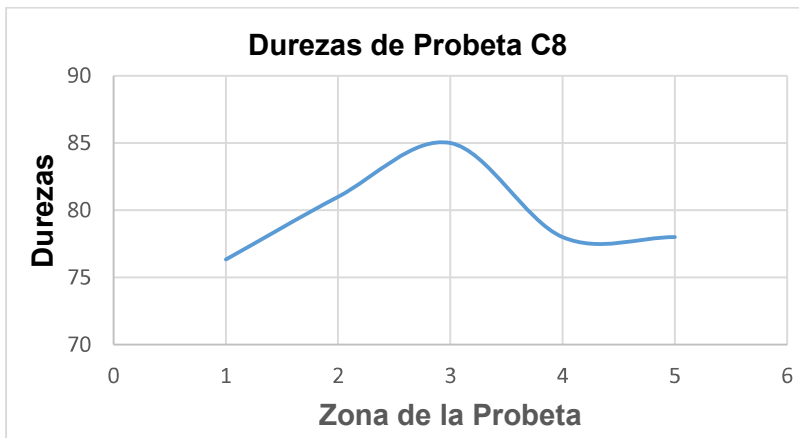


Figura 3.15. Esquema de dureza en la zona transversal de la probeta C8.
Fuente: (Propia)

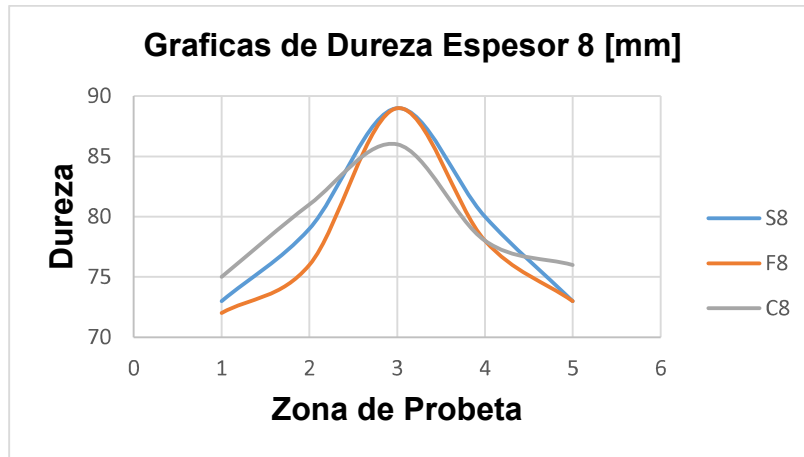
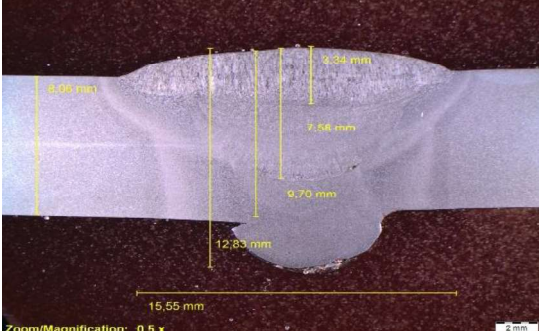
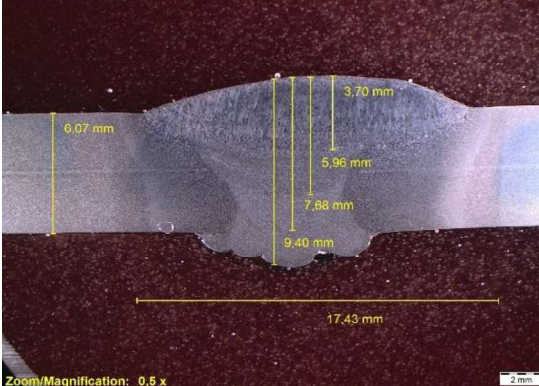
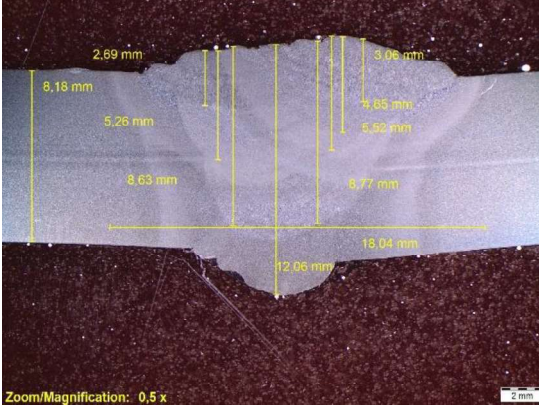
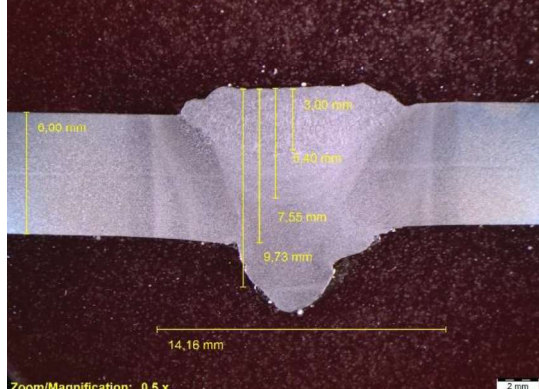


Figura 3.16. Esquema Comparativo de Durezas de probetas de espesor 8 [mm].
Fuente: (Propia)

De acuerdo a la gráfica comparativa de durezas de la probeta de espesor de 8 [mm], la mayor dureza en el ZAC existe en la probeta soldada con proceso SMAW – FCAW mientras que la que presenta menor dureza fue la soldada por proceso FCAW. La mayor dureza en la zona del material de aporte existe en la probeta soldada por proceso SMAW, mientras que la que presenta menor dureza es la probeta soldada por proceso SMAW - FCAW.

3.7. Resultados de Macrografías

Tabla 3.31. Resultado de Macrografías.

Id.	Macrografía	Observaciones
C8	 <p>Zoom/Magnification: 0,5 x</p>	<p>La ZAC: 15,55 mm La raíz: 3,13 mm Sobremonta - Raíz: 12,83</p>
C6	 <p>Zoom/Magnification: 0,5 x</p>	<p>La ZAC: 17,43 mm La raíz: 1,72 mm Sobremonta - Raíz: 9,40 mm</p>
S8	 <p>Zoom/Magnification: 0,5 x</p>	<p>La ZAC: 18,04 mm La raíz: 2,7 mm Sobremonta - Raíz: 9,40 mm</p>
S6	 <p>Zoom/Magnification: 0,5 x</p>	<p>La ZAC: 14,016 mm La raíz: 4,98 mm Sobremonta - Raíz: 12,53 mm</p>

F8		<p>La ZAC: 21,98 mm La raíz: 4,23 mm Sobremonta - Raíz: 13,93 mm</p>
F6		<p>La ZAC: 21,96 mm La raíz: 3,54 mm Sobremonta - Raíz: 11,29 mm</p>

Fuente: (Propia)

3.7.1. Análisis Comparativo de ZAC

Tabla 3.32. Análisis Comparativo de ZAC.

Probeta	ZAC	Probeta	ZAC
S8	18,04 mm	S6	14,016 mm
F8	21,98 mm	F6	21,96 mm
C8	15,55 mm	C6	17,43 mm

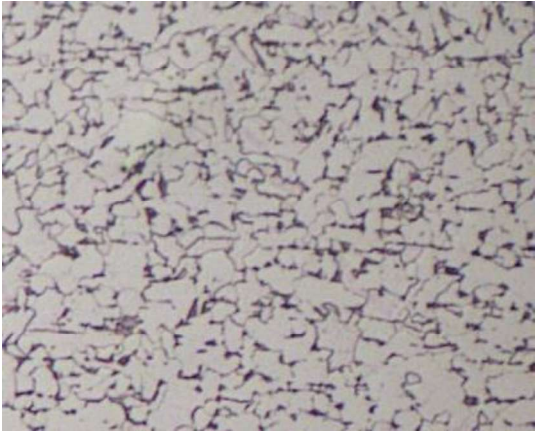
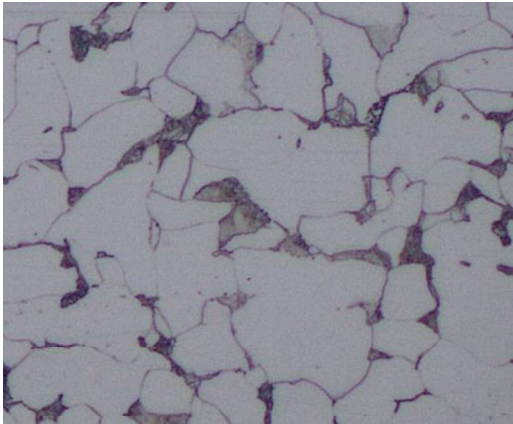
De acuerdo a las macrográficas de las probetas de espesor de 8 [mm], la probeta con una mayor zona afectada por el calor es la probeta soldada con proceso FCAW, mientras la probeta con menor zona afectada por calor es la soldada por proceso SMAW – FCAW.

Mientras que las macrográficas de las probetas de espesor de 6 [mm], la probeta con una mayor zona afectada por el calor es la probeta soldada con proceso FCAW, mientras la probeta con menor zona afectada por calor es la soldada por proceso SMAW.

3.8. Resultados Micrografías

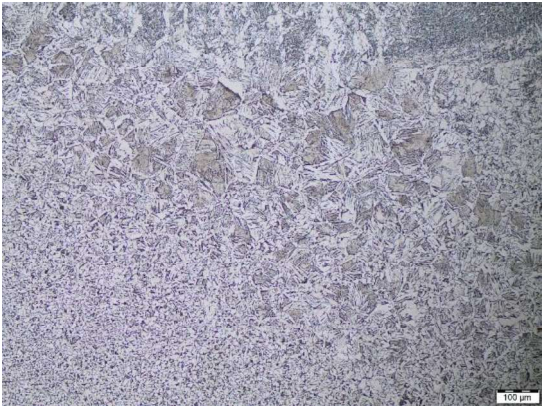
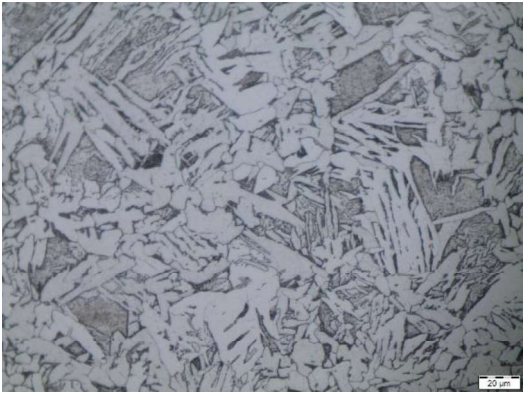
En la siguiente tabla muestra el material base con imágenes aumentadas 100x y 500x




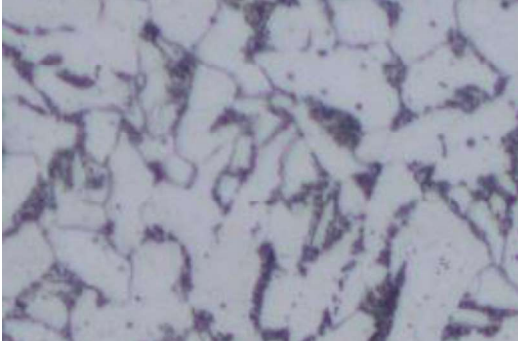
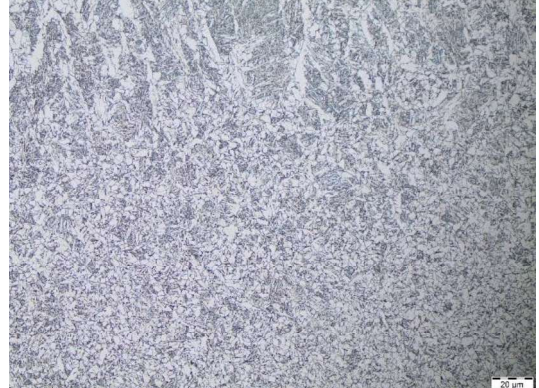
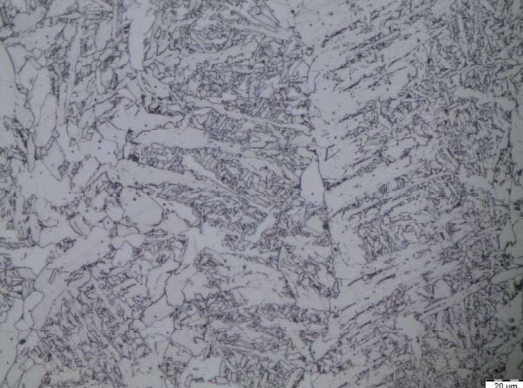
Tabla 3.33. Análisis de Micrografías del Material Base.



Material Base	
	
<p>Microestructura del Acero ASTM A36 con ataque químico, 100X, presenta perlita en matriz ferrítica.</p>	<p>Microestructura del Acero ASTM A36 con ataque químico, 500X, presenta perlita en matriz ferrítica. con inclusiones no metálicas</p>

Fuente: (Propia)

Tabla 3.34. Análisis de Micrografías de probeta C8.

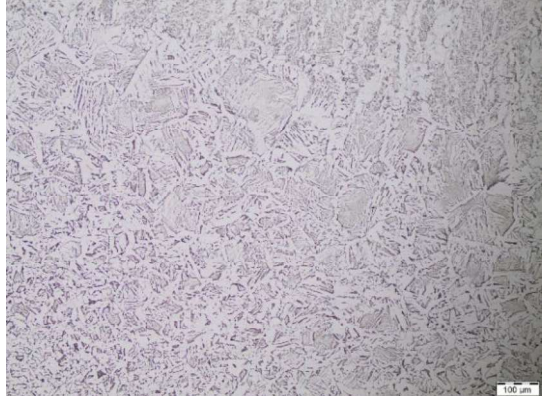
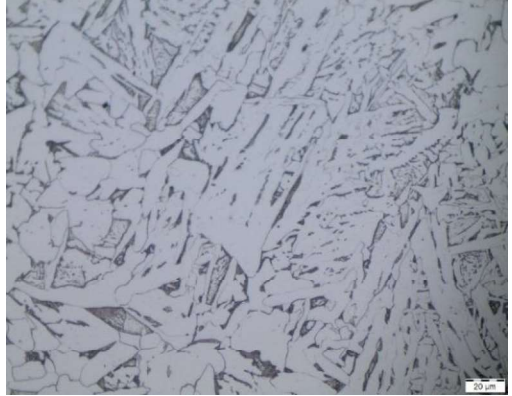
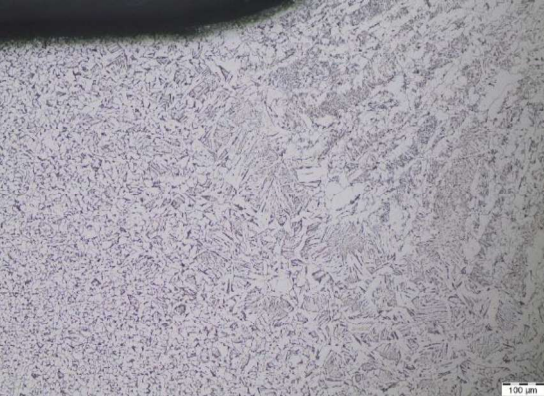

Probeta C8	
	
<p>Micrografía ZAC con ataque químico, 100X, presenta ferrita acicular, reticular y equiaxial</p>	<p>Micrografía ZAC con ataque químico, 500X, presenta ferrita acicular, reticular y equiaxial.</p>


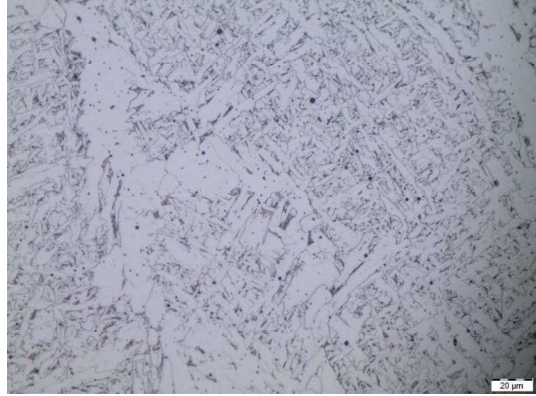
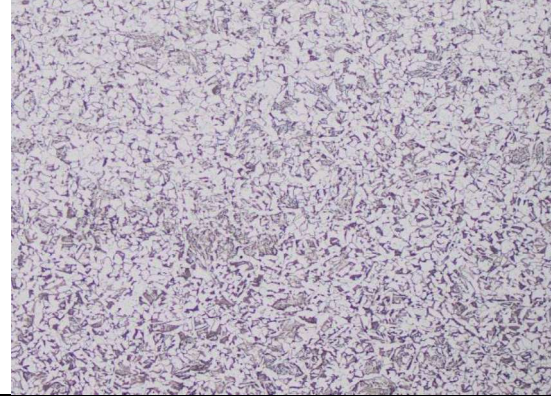
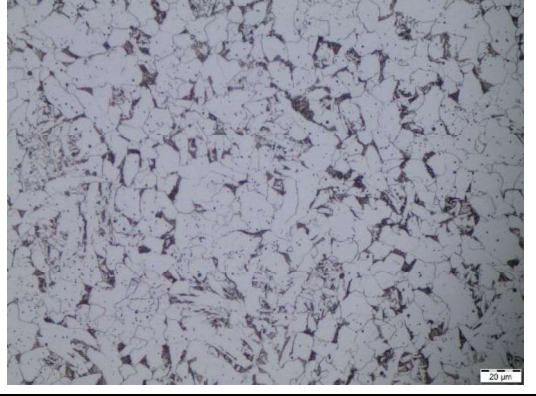
	
<p>Micrografía de la interfaz entre material base y de aporte con ataque químico, 100X, se observan tres fases con el cambio de microestructura. Fusión del material base con el material de aporte.</p>	<p>Micrografía de la interpase entre material aporte 1 y de aporte 2 con ataque químico, 100X, presenta microestructuras ferríticas y perlíticas.</p>
	
<p>Micrografía de la raíz con ataque químico, 100X, presenta ferrita acicular con perlita.</p>	<p>Micrografía de la raíz con ataque químico, 500X, presenta ferrita acicular con perlita e inclusiones no metálicas.</p>
	
<p>Micrografía del material de aporte 1 con ataque químico, matriz ferrítica con microestructura perlítica, 100X</p>	<p>Micrografía del material de aporte 1 con ataque químico, ferrita acicular y reticular con perlita 500X</p>

	
Micrografía del material de aporte 2 con ataque químico, ferrita acicular y reticular. 100X	Micrografía del material de aporte 2 con ataque químico, ferrita acicular y reticular, con perlita esferoidal, 500X

Fuente: (Propia)



Tabla 3.35. Análisis de Micrografías de probeta C6.

Probeta C6	
	
Micrografía ZAC con ataque químico, 100X, presenta ferrita acicular con vainita.	Micrografía ZAC con ataque químico, 500X, presenta ferrita acicular con vainita.
	
Micrografía de la interfaz entre material base y de aporte con ataque químico, 100X, se observan tres fases con el cambio de microestructura. Fusión del material base con el material de aporte.	Micrografía de la interfase entre material aporte 1 y de aporte 2 con ataque químico, 100X, presenta microestructuras ferríticas y perlíticas.

	
Micrografía del material de aporte 1 con ataque químico, estructura perlítica, 100X	Micrografía del material de aporte 1 con ataque químico, estructura perlítica 500X
	
Micrografía del material de aporte 2 con ataque químico, estructura ferrítica con perlita 100X	Micrografía del material de aporte 2 con ataque químico, estructura ferrítica con perlita 500X

Fuente: (Propia)

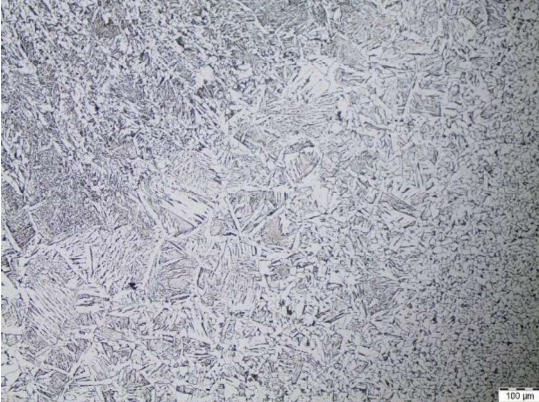
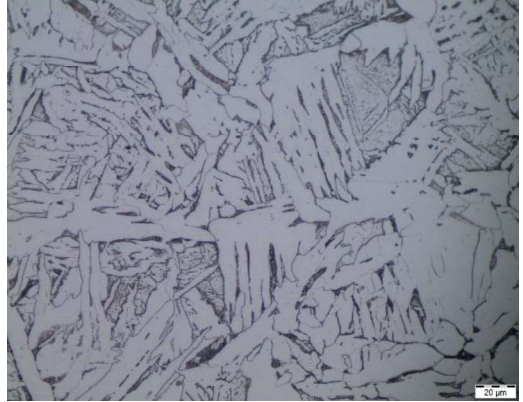
Tabla 3.36. Análisis de Micrografías de probeta S8.

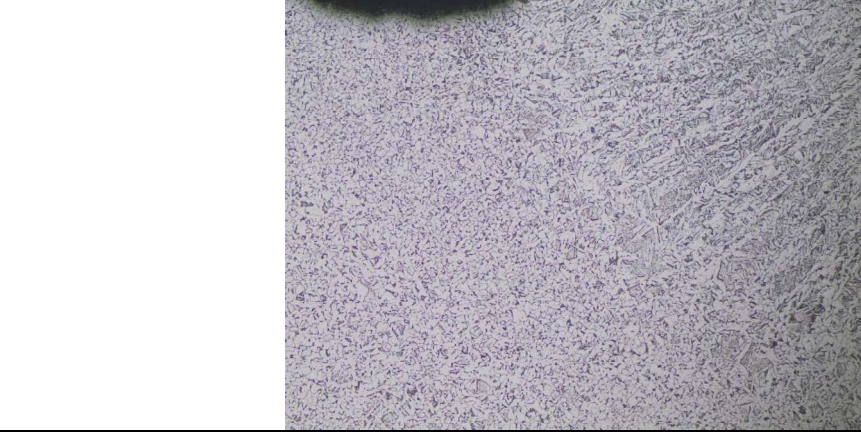
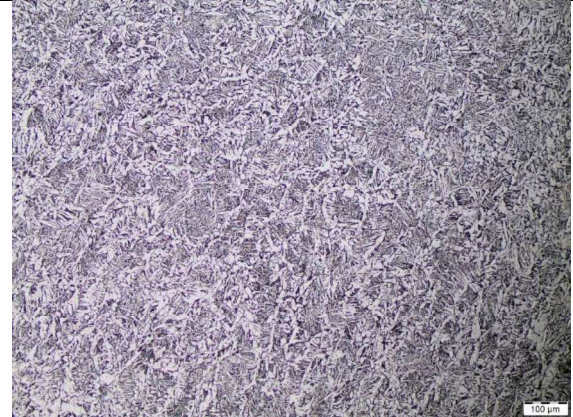

Probeta S8	
	
Micrografía ZAC con ataque químico, existe ferrita acicular con perlita fina acicular, 100X	Micrografía ZAC con ataque químico, presenta ferrita acicular con perlita fina acicular, 500X

	
Micrografía de la interfaz entre material base y de aporte con ataque químico, presenta ferrita acicular, 100X	
	
Micrografía del material de aporte con ataque químico, presenta ferrita acicular con perlita fina esferoidal, 100X	Micrografía del material de aporte con ataque químico, presenta ferrita acicular con perlita fina esferoidal, 500X

Fuente: (Propia)


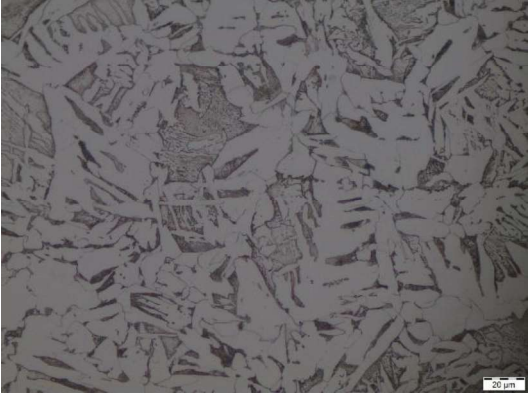
Tabla 3.37. Análisis de Micrografías de probeta S6.

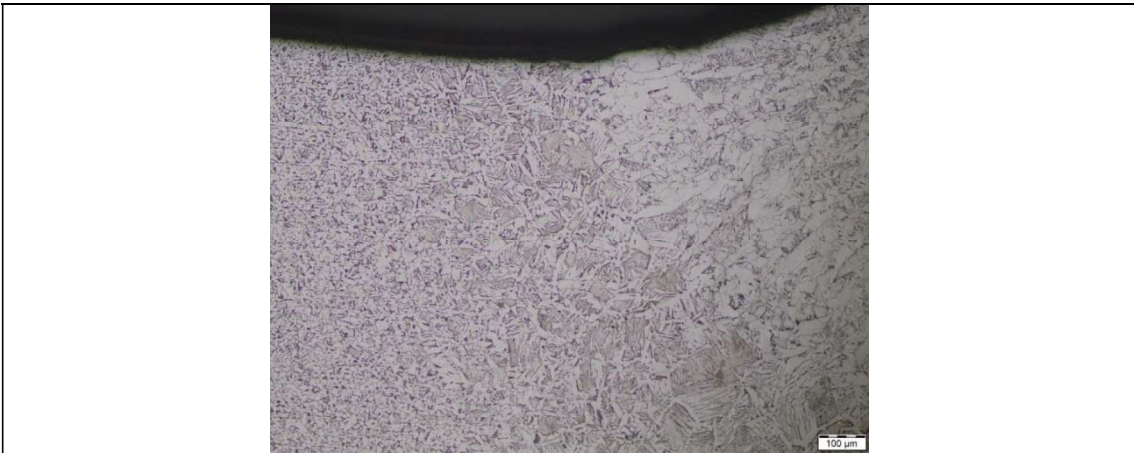
Probeta S6	
	
Micrografía ZAC con ataque químico, existe una buena fusión. Existe ferrita acicular con perlita fina acicular 100X	Micrografía ZAC con ataque químico, presenta ferrita acicular con perlita fina acicular 500X

	
Micrografía de la interfaz entre material base y de aporte con ataque químico, presenta ferrita acicular, 100X	
	
Micrografía del material de aporte con ataque químico, presenta ferrita acicular con perlita fina esferoidal 100X	Micrografía del material de aporte con ataque químico presenta ferrita acicular con perlita fina esferoidal 500X

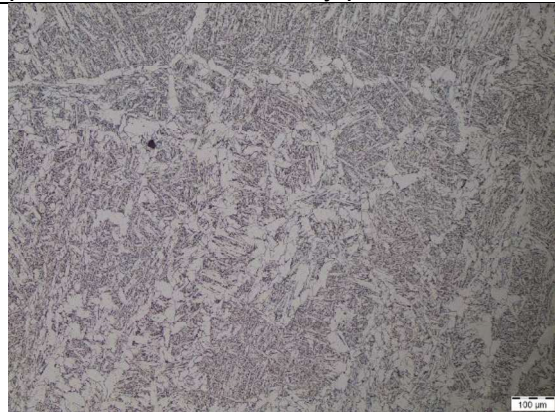
Fuente: (Propia)

Tabla 3.38. Análisis de Micrografías de probeta F8.

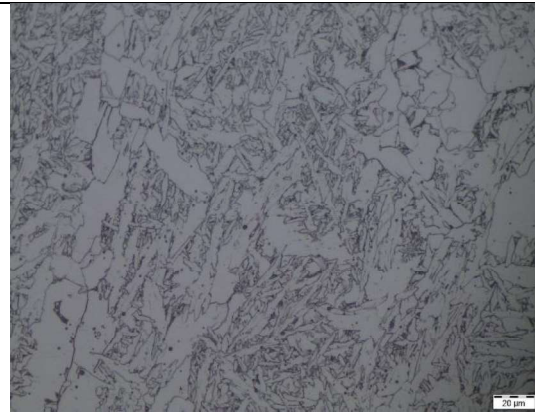
Probeta F8	
	
Micrografía ZAC con ataque químico, ferrita acicular con perlita fina acicular 100X	Micrografía ZAC con ataque químico, ferrita acicular con perlita fina acicular ,500X



Micrografía de la interfaz entre material base y de aporte con ataque químico, presenta ferrita acicular y presenta inclusiones no metálicas. 100X



Micrografía del material de aporte con ataque químico, presenta ferrita acicular y reticular con perlita fina, 100X

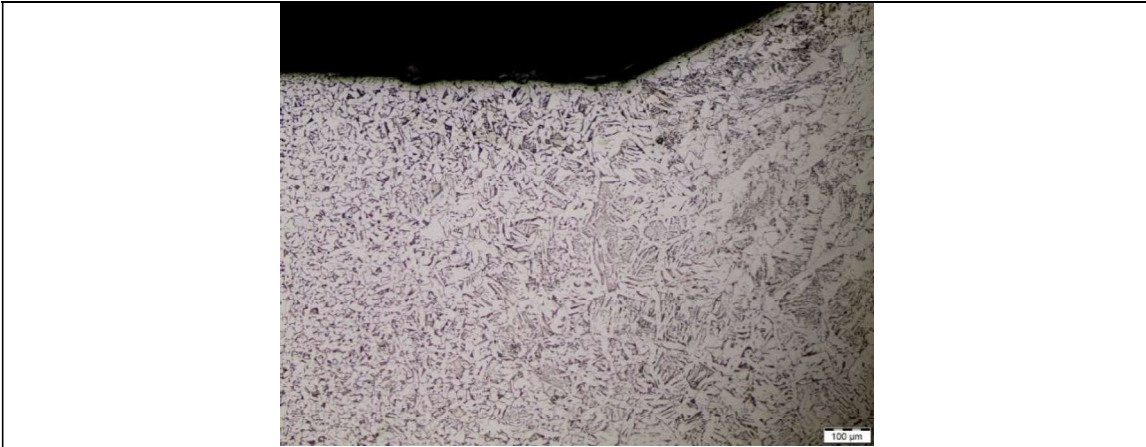


Micrografía del material de aporte con ataque químico, presenta ferrita acicular y reticular con perlita fina 500X

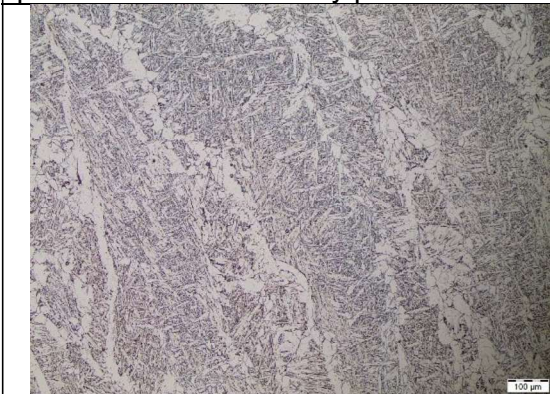
Fuente: (Propia)

Tabla 3.39. Análisis de Micrografías de probeta F6.

Probeta F6	
Micrografía ZAC con ataque químico, ferrita acicular con perlita fina esferoidal, 100X	Micrografía ZAC con ataque químico, ferrita acicular con perlita fina esferoidal, 500X



Micrografía de la interfaz entre material base y de aporte con ataque químico, presenta ferrita acicular y presenta inclusiones no metálicas 100X



Micrografía del material de aporte con ataque químico, ferrita acicular con perlita fina esferoidal, 100X



Micrografía del material de aporte con ataque químico, ferrita acicular con perlita fina esferoidal, 500X

Fuente: (Propia)

3.9. Discusión de Resultados

Analizando las probetas soldadas por procesos SMAW, FCAW y SMAW – FCAW para espesores de 6 y 8 [mm], en los ensayos de soldabilidad de Varestraint y Houldcroft por inspección visual, tintas permanentes y radiografía no presenta fisuras, lo que determina una buena soldabilidad para el acero ASTM A36 para el uso de tanques de almacenamiento, para los procesos realizados.

Como se muestran en los resultados de los ensayos de líquidos penetrantes y radiografía para las placas de ensayos no destructivos, están dentro de los parámetros requeridos por lo que la soldadura se aprueba, porque no afectara los ensayos posteriores, ya que para seleccionar las probetas lo realizamos evitando zonas que exista discontinuidades.

Para los ensayos de tracción muestra una alta resistencia mecánica al proceso combinado de SMAW y FCAW para espesor de 6 [mm] cuyos valores son 69.3 y 69.7 [ksi], lo que están dentro del límite de resistencia del material base que es de 58 – 80 [ksi], lo cual es aceptable y la probeta que presentó menor resistencia fue la probeta soldada por proceso FCAW cuyos valores fueron de 67.1 y 66.7 [ksi], que también está dentro de los valores aceptados.

Mientras que para espesor de 8 [mm] cuyos valores son 63.9 y 63.1 [ksi], lo que están dentro del límite de resistencia del material base que es de 58 – 80 [ksi], lo cual es aceptable y la probeta que presentó menor resistencia fue la probeta soldada por proceso FCAW cuyos valores fueron de 62.5 y 66.7 [ksi], que también está dentro de los valores aceptados.

En los ensayos de doblado de cara, las probetas de espesor de 6 [mm], no existieron discontinuidades para ningún proceso realizado. Mientras que para los ensayos de raíz se mostraron discontinuidades para el proceso combinado SMAW – FCAW y proceso FCAW, las 2 probetas soldadas por proceso combinado mostraron discontinuidades 2,31 y de 4,22 [mm] en el cordón lo que la norma permite es de 6 [mm] por lo que se aprueban, mientras que por el proceso FCAW una probeta presentó discontinuidades en el cordón de 0,89 y 0,81 [mm] por lo que aprueba.

Los ensayos de doblado de cara para las probetas de espesor de 8 [mm], tampoco existieron discontinuidades para ningún proceso realizado. Mientras que para los ensayos de raíz se mostraron discontinuidades, para el proceso combinado SMAW – FCAW, una probeta soldada mostró una discontinuidad de 2,16 [mm] por lo que se aprueba, mientras que por el proceso FCAW una probeta presentó discontinuidad en el cordón de 1,55 [mm] en el borde del cordón, lo que la norma permite 3 [mm], por lo que aprueba y para el proceso FCAW y para el proceso SMAW una probeta mostró discontinuidad de 3,19 [mm] en el cordón, por lo que aprueba.

Para los ensayos de dureza para la probeta de 6 [mm] en el ZAC la que mayor dureza obtuvo fue la soldada por proceso combinado SMAW – FCAW, mientras que la mayor dureza en el material de aporte fue por el proceso SMAW.

Para los ensayos de dureza para la probeta de 8 [mm] en el ZAC la que mayor dureza obtuvo fue la soldada por proceso combinado SMAW – FCAW, mientras que la mayor dureza en el material de aporte fue por el proceso SMAW.

4. Conclusiones

- En el presente trabajo se cumple con los objetivos propuestos.
- Para los procesos de soldadura realizados se seleccionó al material de aporte en base a la normativa API 650 tomando como criterio de selección el tiempo de producción.
- Se utilizó diseño de juntas en V con un ángulo de 60°, para obtener un mejor depósito y fusión entre el material base y el material de aporte.
- La técnica de soldadura SMAW-FCAW presenta mayores beneficios en cuanto al tiempo de producción, siendo más rápido con 23,02% con respecto a la soldadura SMAW, para la soldadura de tanques de almacenamiento de crudo.
- Con los ensayos de Soldabilidad de fisuración en caliente se comprobó que el material base es apto para la fabricación de tanques de almacenamiento, al no presentar fisuramiento.
- Los diferentes procesos de soldadura utilizados en este estudio no presentan diferencias destacables en cuanto a sus propiedades mecánicas.
- Se descartó el proceso de soldadura FCAW en el análisis comparativo debido a presentar una baja calidad del cordón de soldadura, al no tener una fuente de corriente estable al realizar el proceso. Teniendo como consecuencia una falta de penetración.
- Los pases de raíz realizados con el proceso de soldadura SMAW presentaron mayor calidad en el ensayo de doblado de raíz para la calificación de soldadura.
- El proceso de soldadura FCAW presenta mayor zona afectada por el calor debido a los altos niveles de amperaje y voltaje, utilizados en el proceso.

Recomendaciones

- Para la producción en serie de tanques de almacenamiento se recomienda realizar con proceso combinado SMAW-FCAW, ya que el pase de raíz sería con proceso SMAW que da buena penetración, y seguidos de pases por proceso FCAW ya que el electrodo usado tiene una alta velocidad de deposición, por lo que para

fabricación de tanques ayuda en reducción de tiempos por ser un proceso semiautomático.

- No se recomienda el uso de proceso FCAW como pase de raíz, ya que no presenta buena penetración y para lograrlo toca usar altos amperajes, por lo que se vio afectada por una ZAC más grande con respecto a las otras probetas con diferentes procesos.
- De acuerdo a los ensayos de tracción, el proceso menos recomendado se presenta en el proceso FCAW debido a que presenta mejor resistencia. Y en los ensayos de doblado de raíz las dos probetas soldadas por procesos FCAW presentaron más discontinuidades, por lo que no se recomienda este proceso para realizar pases de raíz en la soldadura.
- Es necesario que al realizar la soldadura mediante el proceso por FCAW se necesite una fuente de poder estable, debido a que las variaciones de corriente afectan de manera directa a la calidad del cordón.
- Realizar la limpieza después de cada pase, evite que exista impurezas, tales como, inclusiones de escoria.
- Es necesario realizar ensayos no destructivos como el Test de Tintas Penetrantes, en la producción de Tanques de Almacenamiento, puesto que da mayor seguridad para el proceso de fabricación.
- Al realizar los ensayos metalográficos las superficies de las probetas deben estar bien pulidas y ser atacadas con el o los reactivos correctos.
- Al realizar la preparación de las probetas, es decir, los cortes es necesario tomar en cuenta que no se debe recalentar la superficie, debido a que esto podría variar las propiedades mecánicas del material y por ende cambiar la microestructura del material afectando los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Andres16012008. (5 de Noviembre de 2011). *SCRIBD*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/71690317/ACERO-A36>
- API Standard, 6. (2013). *Welded Tanks for Oil Storage*. American Petroleum Institute.
- ASM, A. S. (1992). *Handbook Vol 9, Metallography and Microstructure*.
- ASM, A. S. (1993). *Handbook Vol 6, Welding, brazin and Soldering*.
- ASME, A. S. (2017). *ASME section IX, Qualification Standard Welding, Brazin and Fusing Procedures; Welders, Brazers and Welding, bracings and fusing operators*.
- AVNER. (1988). *Introduccion a la Metalurgia Fisica*. Sidney: McGraw-Hill.
- AWS B4.0M:2000. (2000). Standard Methods for Mechanical Testing of Weld.
- Balvatin. (2011). <http://www.dicis.ugto.mx>. Obtenido de Diagrama Hierro Carbono: <http://www.dicis.ugto.mx/profesores/balvatin/documentos/Ciencia%20de%20Materiales%20para%20Ingenieria%20Mecanica/Unidad%20II%20-%205%20Diagrama%20Hierro-Carbon.pdf>
- Castro, P. H. (20 de Diciembre de 2011). *SCRIBD*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/76137596/Acero-AI-Carbono-Estructural-ASTM-A36>
- Cortes, M. (11 de septiembre de 2016). *es.scrib.com*. Obtenido de Soldabilidad-de-Los-Materiales: <https://es.scribd.com/document/323574219/Soldabilidad-de-Los-Materiales-pdf>
- ESAB, C. D. (junio de 2011). *www.esab.com.ar*. Obtenido de proceso-soldadura-fcaw-alambre-tubular-relleno-de-fundente-definiciones-del-proceso: <https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-fcaw-alambre-tubular-relleno-de-fundente-definiciones-del-proceso.cfm>
- ESAB, C. D. (2014). *www.esab.com.ar*. Obtenido de proceso-soldadura-smaw: <https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-smaw.cfm>
- estructuras, S. y. (2014). *soldadurasyestructuras.com*. Obtenido de <http://soldadurayestructuras.com/proceso-fcaw.html>
- INDURA. (2016). <http://www.indura.com.ec>. Obtenido de Catalogo de eletrodos indura: <http://www.indura.com.ec/Descargar/Cat%C3%A1logo%20de%20Procesos%20de%20Productos?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fec%2Fbiblioteca%2F4e4aa7f687694565bb3b902988d2a15e.pdf>
- mecanica, I. (2011). *ingemecanica.com*. Obtenido de tutorial semana electrodo esmaw: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn47.html>
- Rodriguez, P. P. (2018). *Introduccion a los Tratamientos termicos*. Quito, Ecuador: PDF.

- soldexa. (2015). *www.soldexa.com.pe*. Obtenido de alambres tubulares e71t1:
https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/products/consumables/alambres_tubulares/upload/exatub_e71t-1.pdf

ANEXOS