



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA GMAW (GAS METAL ARC WELDING)

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

**EDITH MARÍA TRUJILLO RAMÍREZ**  
edith.trujillo@epn.edu.ec

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

**CO-DIRECTOR: ING. CARLOS WIME DIAZ CAMPOVERDE**  
carlos.dias@epn.edu.ec

QUITO, Agosto 2017



## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **EDITH MARÍA TRUJILLO RAMÍREZ**, bajo nuestra supervisión.

---

ING. DIEGO ESPINOSA  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

ING. CARLOS DÍAZ  
**CO-DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **EDITH MARÍA TRUJILLO RAMÍREZ**, 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.

---

Edith María Trujillo Ramírez

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a una personita que desde el primer momento que la tuve en mis brazos cambio mi vida llenándola de felicidad, para ti Valentina eres mi orgullo y por quien veré siempre, lucharemos juntos y saldremos adelante superando cada prueba que nos ponga la vida.

Para el amor de mi vida Rodrigo, que contigo he sido la persona más feliz de este mundo, he aprendido de sus experiencias, de sus regaños y sobre todo de su sincero amor. Ha sido mi apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto.

## AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme la oportunidad de vivir, de ser mi guía y mi esperanza y ser quien ilumino cada uno de mis pensamientos para lograr este objetivo importante para mi vida.

A mis padres, Manuel y Rocio por darme siempre su apoyo y por enseñarme a luchar en los caminos de la vida sin su apoyo no hubiera podido lograr esta meta.

A la persona más importante de mi vida, Rodrigo que desde que te conocí cambiaste mi vida brindándome: su apoyo incondicional, su amor, su paciencia y mostrándome que nada es fácil eres una gran persona y gracias por nunca dejarme sola.

A mis hermanos Raúl y Byron por mostrarme el lado alegre de la vida y por compartir conmigo sus anécdotas.

A David y Fernanda por su apoyo y colaboración en todo momento.

A todos mis amigos que he conocido en el transcurso de vida académica, ya que con ellos he compartido momentos buenos y malos, pero siempre estuvieron ahí.

Quiero agradecer al director y codirector de este proyecto al Ingeniero Diego Espinosa e Ingeniero Carlos Diaz, que desde un principio fueron quienes depositaron su confianza para la realización de este proyecto y me brindaron todo su apoyo incondicional a lo largo de este proceso ya que sin su apoyo y asesoramiento no se hubiera hecho realidad este proyecto, al Ingeniero Gabriel Velastegui y al Ing. Homero Barragán, quienes muy amablemente me asesoraron siempre con la mejor disposición y compartieron sus conocimientos respondiendo a todas las dudas e inquietudes, han sido parte fundamental en el desarrollo de este proyecto.

Por otro lado, agradezco a la Ingeniera Verónica Sotomayor, quien siempre de la manera más atenta y cordial, facilitó las instalaciones del laboratorio; también quiero agradecer al Ingeniero Jonathan Castro, quien me ayudó con las pruebas de tracción siempre con la mejor disposición, al Sr. Jorge soldador del Laboratorio quien muy amablemente me colaboró; al señor Rene Romero y a los ayudantes de los laboratorios, Georgina, Santiago, Ricardo, Javier y Álvaro, muchas gracias a todos ustedes por la predisposición en la realización de los ensayos.

# ÍNDICE

CERTIFICACIÓN .....	i
DECLARACIÓN .....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo general .....	3
Objetivos específicos.....	3
1. MARCO TEÓRICO .....	4
<b>1.1. Aceros Inoxidables</b> .....	<b>4</b>
1.1.2. Aceros inoxidables austeníticos .....	5
1.1.2.2. Ventajas del acero inoxidable AISI 304.....	7
1.1.2.3. Aplicaciones .....	7
1.1.3. Diagramas de equilibrio .....	8
1.1.3.1. Diagrama hierro (Fe) – cromo (Cr).....	8
1.1.3.2. Diagrama hierro (Fe) – cromo (Cr) – carbono (C) .....	9
1.1.3.3. Diagrama hierro (Fe) – cromo (Cr) – níquel (Ni).....	9
1.1.4. Descripción de los elementos aleantes en los aceros inoxidables .....	10
<b>1.2. Proceso de soldadura GMAW, parámetros</b> .....	<b>11</b>
1.2.1. Definición .....	11
1.2.2. Equipo de soldadura.....	12
1.2.3. Ventajas, limitaciones y aplicaciones.....	13
1.2.3.1. Ventajas .....	13
1.2.3.2. Limitaciones.....	13
1.2.3.3. Aplicaciones .....	13
1.2.4. Modos de transferencia del alambre consumible .....	14
1.2.4.1. Transferencia por arco spray .....	14
1.2.4.2. Transferencia globular .....	15
1.2.4.3. Transferencia cortocircuito.....	16
1.2.4.4. Transferencia arco con corriente pulsada .....	17
1.2.5. Parámetros y variables del proceso.....	18
1.2.5.1. Tensión del arco o voltaje de soldadura.....	19
1.2.5.2. Corriente de soldadura (velocidad de alimentación del electrodo) .....	19
1.2.5.3. Ángulo de inclinación de la torcha y dirección de la soldadura .....	19

1.2.5.4. Polaridad .....	20
1.2.5.5. Extremo libre del electrodo .....	20
1.2.5.6. Velocidad de desplazamiento .....	20
1.2.5.7. Gas de protección.....	21
1.2.5.8. Movimiento de la pistola .....	22
1.2.5.9. Dirección de soldeo .....	22
1.2.6. Discontinuidades de la soldadura en el proceso GMAW.....	22
1.2.6.1. Porosidad .....	22
1.2.6.2. Mordeduras .....	23
1.2.6.3. Salpicaduras.....	24
1.2.6.4. Falta de fusión .....	25
1.2.6.5. Exceso de penetración .....	26
<b>1.3. Soldabilidad .....</b>	<b>27</b>
1.3.1. Tipos de soldabilidad .....	27
1.3.1.1. Soldabilidad metalúrgica.....	27
1.3.1.2. Soldabilidad operativa.....	27
1.3.1.3. Soldabilidad global o constructiva .....	27
1.3.2. Soldabilidad de aceros inoxidable austeníticos.....	27
1.3.3. Factores que actúan en la soldabilidad.....	28
1.3.4. Ensayos de Soldabilidad .....	28
1.3.4.1. Ensayo Houldcroft (Fisuramiento en caliente).....	29
<b>1.4. Metalurgia de la soldadura.....</b>	<b>29</b>
<b>1.5. Diagramas de constitución .....</b>	<b>31</b>
1.5.1. Diagrama de Schaeffler .....	31
1.5.2. Diagrama de Long .....	32
1.5.3. Diagrama de WRC - 1992.....	33
<b>1.6. Zona afectada por el calor (ZAC).....</b>	<b>34</b>
1.6.1. Crecimiento del grano .....	35
1.6.2. Formación de ferrita .....	36
<b>1.7. Problemas durante la soldadura de los aceros inoxidable.....</b>	<b>36</b>
1.7.1. Sensibilización.....	36
1.7.2. Formación de fisuras y el rol de la ferrita .....	36
1.7.3. Fase sigma.....	37
<b>2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>38</b>
<b>2.1. Introducción.....</b>	<b>38</b>
<b>2.2. Selección del material base .....</b>	<b>38</b>

2.2.1. Tamaño de las placas .....	38
<b>2.3. Selección del proceso de soldadura .....</b>	<b>39</b>
<b>2.4. Especificaciones del proceso de soldadura (WPS).....</b>	<b>39</b>
<b>2.5. Selección del material de aporte .....</b>	<b>40</b>
2.5.1. Alambre o material de aporte .....	40
<b>2.6. Aplicación de los diagramas.....</b>	<b>41</b>
2.6.1. Diagrama Schaeffler.....	41
2.6.1.1. Diagrama Schaeffler para el material base .....	42
2.6.2. Diagrama WRC – 92 .....	42
2.6.2.1. Diagrama WRC – 92.....	42
2.6.2.2. Diagrama WRC – 92 para el material base.....	43
2.6.2.3. Material aporte.....	43
<b>2.7. Descripción del gas de protección.....</b>	<b>44</b>
<b>2.8. Preparación de las juntas y diseño de la unión.....</b>	<b>45</b>
2.8.1. Pre calentamiento de las placas .....	45
<b>2.9. Soldadura de las placas .....</b>	<b>46</b>
2.9.1. Equipo de soldadura.....	46
<b>2.10. Cálculo del aporte de calor generado (Heat Input).....</b>	<b>48</b>
<b>2.11. Ensayos No Destructivos para calificación de soldadura .....</b>	<b>49</b>
2.11.1. Inspección visual .....	49
2.11.2. Tintas Penetrantes Fluorescentes .....	50
2.11.3. Radiografía Industrial .....	54
<b>2.12. Ensayos Destructivos .....</b>	<b>57</b>
2.12.1. Maquinado y preparación de las probetas .....	57
2.12.2. Requerimiento del código AISI AWS D1.6.....	57
2.12.2.1. Tamaño de las probetas ensayadas .....	58
2.12.3. Criterio de aceptación según la norma AWS D1.6.....	59
2.12.3.1. Inspección Visual.....	59
2.12.3.2. Doblado de raíz y doblado de cara .....	59
2.12.3.3. Ensayo de Tracción .....	59
2.12.3.4. Macrografías.....	59
2.12.3.5. Micrografías.....	60
2.12.4. Ensayo de Tracción.....	60
2.12.5. Ensayo de Doblado .....	63
2.12.6. Inspección metalográfica .....	67
2.12.6.1. Macrografías .....	70

2.12.6.2. Micrografías.....	70
2.12.7. Ensayo de Dureza.....	71
<b>2.13. Análisis de la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304.....</b>	<b>72</b>
2.13.1. Ensayo de soldabilidad houldcroft .....	72
2.13.2. Ensayos no Destructivos .....	74
2.13.2.1. Inspección Visual.....	74
2.13.2.2. Tintas penetrantes fluorescentes.....	74
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>79</b>
3.1. Resultados del ensayo de tintas penetrantes.....	79
3.2. Resultados del ensayo de radiografía.....	79
3.3. Resultados del ensayo de tracción .....	80
3.4. Resultados del ensayo de doblado .....	84
3.5. Resultados de ensayo de dureza.....	84
3.6. Resultados de macrografías .....	87
3.7. Resultados de micrografías .....	88
3.8. Resultados del ensayo de houldcroft .....	93
3.8.1. Resultados de la inspección de fisuras superficiales .....	93
3.9. Discusión.....	93
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>99</b>
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>100</b>
<b>6. Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>101</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>102</b>
ANEXO I. Welding Procedure Specification (WPS) .....	i
ANEXO II. Ficha técnica del acero inoxidable AISI 304 .....	v
ANEXO III. Ficha técnica del Argón.....	vi
ANEXO IV. Ficha técnica del Alambre sólido para MIG 308L .....	vi
ANEXO V. Tipo de solidificaciones y evolución del acero inoxidable austenítico AISI 304.....	vii
ANEXO VI. Informe técnico del ensayo de Tracción.....	x

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Relación del contenido de Cr y Ni de la clasificación de los aceros inoxidables. .....	4
Figura 1.2. Diagrama de fase Hierro (Fe) - Cromo (Cr).....	8
Figura 1.3. Diagrama Hierro - Cromo.....	9
Figura 1.4. Diagrama Hierro – Cromo – Níquel a temperatura ambiente.....	10
Figura 1.5. Esquema de proceso de soldadura GMAW. ....	11
Figura 1.6. Equipo para proceso de soldadura GMAW. ....	12
Figura 1.7. Transferencia por spray. ....	15
Figura 1.8. Transferencia Globular.....	16
Figura 1.9. Ciclo de transferencia por Cortocircuito.....	17
Figura 1.10. Forma de la corriente de soldeo en Transferencia por Arco Pulsado. ....	18
Figura 1.11. Parámetros para determinar la forma del cordón de soldadura. ....	18
Figura 1.12. Cambio de la forma del cordón con el incremento de la corriente. ....	19
Figura 1.13. Tipos de inclinación de la pistola.....	20
Figura 1.14. Poros generados en soldadura MIG.....	22
Figura 1.15. Poros y cavidades en el cordón de soldadura.....	23
Figura 1.16. Mordedura en soldadura MIG/MAG. ....	24
Figura 1.17. Salpicaduras.....	24
Figura 1.18. Falta de fusión en una soldadura MIG/MAG. ....	25
Figura 1.19. (a) Relación entre la velocidad de avance y el ritmo de fusión en la soldadura MIG. (b) Ángulo recomendado para una soldadura de penetración usando soldadura MIG. (c) Ángulo recomendado para una unión en V en una soldadura MIG/MAG. (d) Ángulo recomendado para una unión en V en una soldadura MIG/MAG. (d) Ángulo recomendado para una unión en I en una soldadura MIG/MAG. ....	26
Figura 1.20. Exceso de penetración en la soldadura MIG.....	26
Figura 1.21. Esquema de la probeta para ensayo Houldcroft.....	29
Figura 1.22. Tipos de solidificación para el diagrama de fase pseudobinario.....	30
Figura 1.23. Diagrama de Schaeffler. ....	32
Figura 1.24. Diagrama De Long.....	33
Figura 1.25. Diagrama WRC – 92 del acero 304.....	34
Figura 1.26. Microestructura transversal de la soldadura de un acero inoxidable 304 endurecido por trabajo. (a) Antes de endurecer por trabajo, (b) metal base, (c) precipitación de carburos en el límite de grano, (d) recristalización, (e) crecimiento de grano enseguida del límite de fusión, (f) zona de fusión.....	35
Figura 1.27. Fase sigma.....	37

Figura 2.1. Esquema de medidas de probetas.....	38
Figura 2.2. Alambre ER 308L de 10 [Kg].....	41
Figura 2.3. Ubicación del acero inoxidable 304 en el Diagrama de Schaeffler según el Crequi. y Niequi. calculados en la tabla 2.4 para el material base. ....	42
Figura 2.4. Posibles tipos de solidificación para el acero inoxidable 304.....	43
Figura 2.5. Diagrama WRC para el material aporte ER 308L.....	44
Figura 2.6. Tanque de Argón al 100%. ....	44
Figura 2.7. Ángulo de apertura entre placas para soldadura.....	45
Figura 2.8. Preparación de probetas con esmeril.....	45
Figura 2.9. Bisel de 60° en el acero AISI 304.....	46
Figura 2.10. Equipo de soldadura MIG. ....	46
Figura 2.11. Colocación de respaldos entre las placas. ....	47
Figura 2.12. Realización del cordón de soldadura. ....	47
Figura 2.13. Soldadura GMAW e = 6[mm]. ....	47
Figura 2.14. Cordón de soldadura GMAW e = 3 [mm]. ....	48
Figura 2.15. Limpieza del cordón con el cepillo y grata de inoxidable. ....	48
Figura 2.16. Lente utilizado para determinar discontinuidades.....	49
Figura 2.17. Señalización de posibles defectos en probetas con espesor 3 mm, el (1) transferencia Spray y (2) Transferencia cortocircuito. ....	49
Figura 2.18. Señalización de posibles defectos en probetas con espesor 6 mm, el (1) transferencia Spray y (2) Transferencia cortocircuito. ....	50
Figura 2.19. Tintas fluorescentes. ....	50
Figura 2.20. Secado después de la limpieza en la superficie. ....	50
Figura 2.21. Aplicación de penetrante.....	51
Figura 2.22. Reposo del penetrante.....	51
Figura 2.23. Lavar exceso de penetrante.....	51
Figura 2.24. Remoción del penetrante en el cordón.....	52
Figura 2.25. Dejar secar revelador.....	52
Figura 2.26. Diagrama de operación de la máquina de rayos x, del laboratorio de END..	55
Figura 2.27. Negatoscopio. ....	57
Figura 2.28. Tamaño de la probeta seleccionada para la realización de ensayos.....	58
Figura 2.29. Dimensiones de la probeta para el ensayo de Tensión. ....	60
Figura 2.30. Probeta preparada para ensayo de tracción. ....	61
Figura 2.31. Identificación de cordón de soldadura en junta. ....	61
Figura 2.32. Señalización de cordón en junta soldada. ....	61
Figura 2.33. Colocación de probeta en la maquina universal de ensayos.....	61

Figura 2.34. Dimensiones de la probeta para ensayo de doblado de raíz y doblado de cara.	63
Figura 2.35. Identificación de las probetas para el ensayo de doblado.	64
Figura 2.36. Probeta colocada en la máquina para ensayo de doblado.	64
Figura 2.37. Máquina para desbaste grueso.	67
Figura 2.38. Corte y montaje de juntas soldadas y material base.	68
Figura 2.39. Proceso desbaste fino.	68
Figura 2.40. Pulidora FORZIPOL con paño de 3 micras.	68
Figura 2.41. Secar la probeta de alcohol.	69
Figura 2.42. Observación de acabado para realizar metalografías	69
Figura 2.43. Ataque químico del cordón.	69
Figura 2.44. Probetas para metalografías	70
Figura 2.45. Equipo para hacer macrografías	70
Figura 2.46. Equipo de micrografías	71
Figura 2.47. Durómetro HR - 150 A	71
Figura 2.48. Indentación para dureza	72
Figura 2.49. Dimensiones de las probetas para el ensayo de Houldcroft.	73
Figura 2.50. Obtención de soldadura para ensayo Houldcroft.	73
Figura 2.51. Lente utilizado para determinar discontinuidades.	74
Figura 2.52. Señalización de posibles defectos.	74
Figura 2.53. Tintas fluorescentes.	74
Figura 2.54. Limpieza de superficie.	75
Figura 2.55. Aplicación de penetrante.	75
Figura 2.56. Reposo del penetrante.	75
Figura 2.57. Lavar exceso de penetrante.	76
Figura 2.58. Remoción del penetrante en el cordón.	76
Figura 2.59. Aplicación del revelador en el cordón.	76
Figura 2.60. Dejar secar revelador.	77
Figura 3.1. Radiografía 1 - transferencia por spray.	79
Figura 3.2. Radiografía 2 - transferencia por cortocircuito.	79
Figura 3.3. Radiografía 3 - transferencia por cortocircuito.	80
Figura 3.4. Radiografía 4 - transferencia por spray.	80
Figura 3.5. Curva Esfuerzo vs. % Deformación de la probeta T 1-1.	81
Figura 3.6. Curva Esfuerzo vs. % Deformación de la probeta T 1-2.	81
Figura 3.7. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 2-1.	82
Figura 3.8. Curva Esfuerzo vs. Deformación de probeta T 2-2.	82

Figura 3.9. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 3-1.....	82
Figura 3.10. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 3-2.....	83
Figura 3.11. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 4-1.....	83
Figura 3.12. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 4-2.....	83
Figura 3.13. Grafica de dureza en el cordón de soldadura.....	85
Figura 3.14. Gráfica de dureza en el cordón de soldadura.....	86
Figura 3.15. Gráfica de dureza en el cordón de soldadura.....	86
Figura 3.16. Estructura Widmanstatten.....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Nomenclatura AISI y UNS para los aceros inoxidables. ....	5
Tabla 1.2. Propiedades Químicas del acero AISI 304. ....	6
Tabla 1.3. Propiedades mecánicas del acero AISI 304. ....	7
Tabla 1.4. Propiedades mecánicas del acero AISI 304. ....	7
Tabla 1.5. Efecto del elemento aleante en los aceros inoxidables. ....	10
Tabla 1.6. Tipos de transferencia de acuerdo al diámetro del alambre. ....	14
Tabla 1.7. Corriente de transición. ....	15
Tabla 1.8. Usos y observaciones de algunos gases protectores. ....	21
Tabla 1.9. Tipos de solidificación, reacciones y microestructuras resultantes. ....	31
Tabla 2.1. Modos de transferencia en el proceso de soldadura MIG. ....	39
Tabla 2.2. Composición química del alambre según la norma AWS ....	41
Tabla 2.3. Amperajes recomendados. ....	41
Tabla 2.4. Valores de Crequi. y Niequi. con el Diagrama Schaeffler ....	42
Tabla 2.5. Valores de Crequi. y Niequi. con el Diagrama WRC. ....	43
Tabla 2.6. Valores de Crequi. y Niequi. con el Diagrama WRC. ....	43
Tabla 2.7. Resultados de Calor generado de la soldadura. ....	49
Tabla 2.8. Resultados transferencia por cortocircuito. ....	52
Tabla 2.9. Resultados transferencia por spray. ....	53
Tabla 2.10. Resultados transferencia por spray. ....	53
Tabla 2.11. Resultados transferencia por cortocircuito. ....	54
Tabla 2.12. Espesores para probetas ensayadas. ....	55
Tabla 2.13. Factores de corrección. ....	56
Tabla 2.14. Ensayos requeridos del código AWS D1.6. ....	58
Tabla 2.15. Número de probetas para el ensayo de Tensión. ....	60
Tabla 2.16. Resultados de probetas ensayadas. ....	62
Tabla 2.17. Ensayo de doblado a probetas de espesor 3 mm con transferencia spray. ....	65
Tabla 2.18. Ensayo de doblado a probetas de espesor 3 mm con transferencia cortocircuito. ....	65
Tabla 2.19. Ensayo de doblado a probetas de espesor 6 mm con transferencia cortocircuito. ....	66
Tabla 2.20. Ensayo de doblado a probetas de espesor 6 mm con transferencia spray. ....	66
Tabla 2.21. Dimensiones de las probetas para el ensayo de Houldcroft. ....	72
Tabla 2.22. Resultados probeta de 3 mm. ....	77
Tabla 2.23. Resultados probeta de 6 mm. ....	78

Tabla 3.1. Resultados inspección tintas fluorescentes.....	79
Tabla 3.2. Resultados obtenidos de la inspección radiográfica.....	80
Tabla 3.3. Resistencia a la tracción de probetas.....	81
Tabla 3.4. Resultados de ensayo de doblado.....	84
Tabla 3.5. Dureza de material base.....	84
Tabla 3.6. Dureza cordón de soldadura.....	85
Tabla 3.7. Dureza junta soldada vertical 1.....	85
Tabla 3.8. Dureza junta soldada vertical 2.....	86
Tabla 3.9. Macrografías de probetas.....	87
Tabla 3.10. Micrografía material base.....	88
Tabla 3.11. Micrografías de probeta soldada con transferencia por spray.....	89
Tabla 3.12. Micrografías de probeta soldada con transferencia por cortocircuito.....	90
Tabla 3.13. Micrografías de probeta soldada con transferencia por cortocircuito.....	91
Tabla 3.14. Micrografías de probeta soldada con defecto – transferencia por cortocircuito. .....	92
Tabla 3.15. Micrografías de probeta soldada con transferencia por spray.....	92
Tabla 3.16. Resultados por presencia de fisuras.....	93
Tabla 3.17. Micrografías de toda la junta soldada.....	97
Tabla 3.18. Resultados de los distintos ensayos.....	98

## RESUMEN

El presente documento presenta el estudio de la soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304 desde el punto de vista metalúrgico, relacionando los cambios en la microestructura con las propiedades mecánicas del material. Debido a la variada composición química de los aceros inoxidables austeníticos, se requiere de especiales consideraciones durante la soldadura. En la parte experimental del trabajo se prepararon probetas de distintos espesores para ser soldadas con proceso GMAW utilizando las transferencias por cortocircuito y por spray. Con ello se buscó obtener los mejores parámetros para determinar su soldabilidad y obtener un cordón de calidad. La evaluación de estas probetas se realizó mediante análisis metalográfico, ensayos de tracción, de dureza y doblados de cara y raíz; además de ensayos no destructivos como son tintas penetrantes y radiografía para realizar un control de calidad con la finalidad de encontrar discontinuidades, garantizar el cordón de soldadura y presentar un proceso de soldadura confiable. Finalmente, con los resultados obtenidos se puede determinar que existe una buena soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304 con el proceso GMAW, por lo tanto, al usar el tipo de transferencia por spray se suelda toda clase de espesores; en cambio utilizando la transferencia de cortocircuito se llega a la conclusión que se suelda solo espesores delgados.

**Palabras clave:** acero, austenítico, GMAW, soldabilidad, parámetros, WPS.

## ABSTRACT

The present work presents the study of the AISI 304 austenitic stainless-steel weldability from the metallurgical point of view, related to the changes in the microstructure and the mechanical properties of the material. Due to the varied chemical composition of austenitic stainless steels, special considerations are required during welding. In the experimental part of the work, samples of different thicknesses were prepared to be welded with GMAW process using short circuit and spray transfers. The experimental tests were done to obtain the best parameters to determine its weldability and obtain a high-quality cord. The evaluation of these specimens was made by metallographic analysis, tensile tests, hardness and bending of face and root, as well as non-destructive tests such as penetrating inks and radiography to perform a quality control in order to find discontinuities, guarantee the weld bead and present a reliable welding process. Finally, with the results obtained it is possible to determine the good weldability of the AISI 304 stainless steel with the GMAW process, therefore, when using the spray transfer, all types of thickness are welded. Instead, using the short-circuit transfer it is concluded that only thin thicknesses are able to be weld.

**Keywords:** steel, austenitic, GMAW, weldability, parameters, WPS.

# **“ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO AISI 304 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA GMAW”**

## **INTRODUCCIÓN**

Los aceros inoxidable austeníticos son aleaciones no magnéticas endurecibles por conformado en frío, cuya microestructura está constituida por granos de austenita. Han ocupado un lugar muy importante dentro de los materiales ya que presentan excelentes propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión combinada con su fácil fabricación y soldabilidad frente a los aceros inoxidable ferríticos y martensíticos.

Además, son considerados como materiales soldables sin el riesgo de grietas y con una variada tolerancia a las condiciones de soldadura. La soldadura reduce la resistencia en ambientes agresivos y el calor que se da produce un gradiente de temperatura en el metal base. La resistencia a la corrosión y otras propiedades de los aceros inoxidable se incrementan con una cantidad mayor de cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno, que es lo que afecta los costos de los aceros inoxidable.

El acero inoxidable más usado es el de tipo AISI 304, que contiene el 18% de cromo y el 8% de níquel. Tiene una buena resistencia a la corrosión atmosférica, excelentes propiedades de ductilidad y maleabilidad y presenta una amplia gama de aplicaciones en la industria química, naval, aeronáutica, de transporte y médica.

La soldadura es un proceso de unión de aleaciones metálicas antigua, con una gran rigidez y calidad, para facilitar mejor el proceso de fabricación, disminuir el costo, la seguridad, fiabilidad y la resistencia ante las condiciones de trabajo impuestas. Es necesario tener cuidado durante el proceso de soldadura para minimizar o prevenir cualquier efecto de deterioro que pueda ocurrir y preservar el mismo grado de resistencia a la corrosión y esfuerzo en la zona soldada que es una parte inherente del metal base.

Por lo que hemos planteado trabajar con el proceso de soldadura GMAW ya que es un proceso difundido ampliamente en la industria en sus diferentes modos de transferencia, como lo son: Corto circuito, globular, spray y arco pulsado. La calidad de una unión está determinada por la penetración y el perfil del cordón depositado, los que a su vez son afectados por las variables: corriente, voltaje, velocidad de alimentación de alambre y el gas de protección y además puede trabajar con distintos tipos de materiales como es el caso del acero inoxidable austenítico 304. Esta técnica tiene muchas ventajas, ya que

es de fácil aplicación, su versatilidad, no salpica en exceso, frente a otros procesos su costo de operación es bajo y produce una soldadura de calidad.

Por lo cual este estudio busca definir los parámetros de soldadura involucrados en la soldadura por el proceso GMAW con las transferencias de spray y cortocircuito. Para así lograr una unión de calidad y con un número mínimo de defectos presentes.

Para los aceros inoxidable es necesario hacer un mejor análisis cuando de materiales distintos se trata y en especial aceros inoxidable, este análisis parte del estudio e interpretación del diagrama de Schaeffler, con el cual, partiendo del níquel y el cromo equivalente del material base y de los materiales de aporte, es posible predecir la estructura de aleación metálica de soldadura depositado en una unión de aceros inoxidable.

Hay muchas consideraciones metalúrgicas a tener en cuenta cuando se procesa el acero inoxidable AISI 304, este tiene un menor punto de fusión para lo cual como principio básico se necesita menos energía para una misma velocidad de soldadura, una pequeña alteración en la composición, en la solidificación y en el tratamiento térmico pueden tener un impacto significativo sobre la microestructura final y las propiedades del acero.

La presente experimentación se enfoca en la detección de defectos superficiales en las juntas soldadas del acero inoxidable AISI 304, mediante ensayos no destructivos los cuales no afectan la estructura ni la composición de las probetas soldadas, sino que tiene la finalidad de determinar la fiabilidad del cordón soldado y su calidad. También se requiere de ensayos destructivos los cuales no dañan las probetas, sino que se permite conocer las propiedades mecánicas y físicas; estos ensayos sirven para la calificación del procedimiento de soldadura, la calificación del soldador, la inspección de muestreo de la soldadura, investigación y el análisis de fallas.

Este tipo de estudio servirá como una fuente de referencia para contribuir con el desarrollo de nuevas técnicas, aplicaciones y métodos en cuanto a la soldabilidad de aceros inoxidable.

## **Objetivo general**

Analizar la soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304 por el proceso de soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding).

## **Objetivos específicos**

- Determinar la soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante el ensayo de Houldcroft.
- Establecer los parámetros óptimos para obtener una penetración máxima en el proceso GMAW.
- Diferenciar los distintos tipos de transferencia que presenta el proceso GMAW, comparando cada uno de ellos y escogiendo el que presente mejores características y propiedades.
- Analizar los resultados obtenidos con cada uno de los ensayos no destructivos y destructivos para tener un cordón de calidad.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones específicamente compuestas de carbono (C), hierro (Fe), cromo (Cr) y otros compuestos que ayudan a mejorar algunas propiedades de ductilidad, resistencia a la fluencia y al impacto, corrosión, etc. Y estos son el níquel (Ni), titanio (Ti), cobre (Cu), azufre (S), manganeso (Mn), niobio (Nb) y molibdeno (Mo). Son también conocidos como inoxidables porque en presencia de oxígeno forman una película superficial de óxido rica en cromo que protege al metal de la corrosión e que impide que las superficies se rayen.

La principal característica que tienen es su alta resistencia a la corrosión. La resistencia se produce debido a la formación rápida de una capa de óxido de cromo o capa pasiva en la superficie del acero, presentando las siguientes características: es fina, invisible, estable, densa y principalmente protege al acero de medios corrosivos. (Mangonon, 2001)

Existen cinco grupos de aceros inoxidables que se clasifican de acuerdo a su estructura cristalina:

- Ferríticos
- Austeníticos
- Martensíticos
- Endurecidos por precipitación o Precipitation Hardening (PH)
- Dúplex

En la Figura 1.1. Se muestra la relación entre el contenido de Cromo (Cr) y níquel (Ni) en la clasificación de los aceros inoxidables.

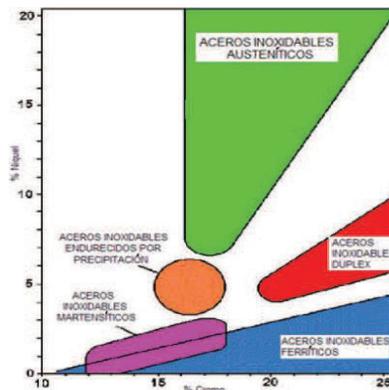


Figura 1.1. Relación del contenido de Cr y Ni de la clasificación de los aceros inoxidables.

*Fuente:* (Ibarra, Núñez & Huerta E., 2010)

### 1.1.1. Especificación de los aceros inoxidable con el sistema AISI

Para los aceros inoxidable se usa el sistema AISI (American Iron and Steel Institute), que usa un código de tres dígitos, algunas ocasiones seguido de una o más letras. El primer dígito nos indica la clase del acero, como, por ejemplo:

- Serie **2xx** y **3xx** aceros austeníticos
- Serie **4xx** aceros ferríticos y martensíticos

El segundo y tercer dígito no están relacionados a la composición ni sigue una secuencia. Las letras de sufijo pueden indicar la presencia de un elemento adicional o indicar una característica especial. (Tabla 1.1.)

Tabla 1.1. Nomenclatura AISI y UNS para los aceros inoxidable.

Sufijo AISI	Sufijo UNS	Descripción
xxxL	xxx01	Bajo Carbono < 0.03% evita SCC
xxxS	xxx08	Bajo Carbono (C) < 0.08%
xxxN	xxx51	Nitrógeno adicionado presta mayor resistencia
xxxLN	xxx53	Bajo Carbono (C) < 0.03% + Nitrógeno (N) agregado
xxxF	xxx20	Mayor azufre (S) y fosforo (P) mejor mecanizado
xxxSe	xxx23	Selenio (Se) mejora mecanizado
xxxB	xxx15	Silicio (Si) adicionado evita descamado
xxxH	xxx09	Mayor contenido de Carbono (C)
xxxCu	xxx30	Cobre (Cu) adicionado

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

Para los elementos aleantes en la designación de los aceros se utiliza los siguientes términos: **L** indica bajo Carbono, **N** indica Nitrógeno, **Se** indica Selenio, **H** indica mayor cantidad de Carbono para alta temperatura. Las letras del sufijo llevan asociadas un par de dígitos; terminales en el correspondiente número UNS.

Hay una gran cantidad de aceros inoxidable que no se encuentran en el sistema AISI como los endurecidos por precipitación (PH) y los aceros dúplex. A este grupo se los designa con nombres propios o solo con el UNS.

### 1.1.2. Aceros Inoxidable austeníticos

Son aleaciones que presentan series AISI 200-300, por lo general estos están formados de cromo (Cr), manganeso de hierro y níquel (Ni). La estructura cristalina de estos aceros es cúbica centrada en las caras (FCC), la cual permite mayor solubilidad del carbono y del nitrógeno.

Presentan una excelente resistencia a la corrosión, tenacidad y resistencia mecánica, no son magnéticos, pero si son susceptibles al agrietamiento por esfuerzo-corrosión, son dúctiles y se pueden formar muy fácilmente. Estos aceros se endurecen mediante el trabajo en frío.

Los aceros inoxidable austeníticos son por lo general muy costosos frente a los otros aceros inoxidable, debido a que presentan un mayor contenido de aleantes, pero a su vez es una excelente inversión ya que tienen grandes ventajas como lo es la soldabilidad y la fácil formación.

Tienen una amplia variedad de aplicaciones como son: artículos de cocina, herramientas médicas, construcción soldada, equipo ligero de transporte, partes de intercambiadores de calor y hornos, componentes para ambientes químicos severos. (Kalpakjian, 2008)

### 1.1.2.1. Características del acero inoxidable austenítico AISI 304

Este acero pertenece al grupo de los aceros inoxidable austeníticos de la serie 300, es muy versátil y uno de los más usados. El acero AISI 304 cuyo contenido es de cromo (Cr), níquel (Ni) y un bajo contenido de carbono; tiene una buena resistencia a la corrosión y excelentes propiedades para el conformado y el soldado.

Tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas. Presenta excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925°C. No se recomienda para uso continuo entre 425 - 860°C, pero se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango.

Se lo puede trabajar en frío como por ejemplo en técnicas de cilindrado, doblado, embutición profunda, rolado y de corte. Este acero no puede ser endurecido por tratamiento térmico. (Sumitec, 2017)

Tabla 1.2. Propiedades Químicas del acero AISI 304.

Grado (máx.)	Porcentaje %						
	C	Cr	Ni	Si	Mn	S	P
AISI 304	0,08	18-20	8-12	1	2	0,03	0,04

Fuente: (ASTM, 2016)

Tabla 1.3. Propiedades mecánicas del acero AISI 304.

PROPIEDADES MECÁNICAS					
Grado	Resistencia a la Tracción (MPa)	Elongación (% en 50 [mm])	Límite de Fluencia (MPa)	Dureza Brinell (Máx.)	Propiedades para trabajo en frío
AISI 304	485	40	170	201	Muy Buena

Fuente: (ASTM, 2016)

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas del acero AISI 304.

Grado	PROPIEDADES FÍSICAS	
	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad [lb/in <sup>3</sup> ]
AISI 304	7,8	0,28

Fuente: (ASTM, 2016)

### 1.1.2.2. Ventajas del acero inoxidable AISI 304

- Se lo puede limpiar fácilmente
- Acabados superficiales y formas variadas
- Baja rugosidad superficial
- Alta resistencia a la corrosión
- Presenta una gran durabilidad
- Relación costo-beneficio favorable
- Facilidad de fabricación
- Alta resistencia con bajo peso
- Es un material reciclable
- Bajo costo de mantenimiento
- Facilidad de conformado y de unión
- Buena apariencia y soldabilidad
- Amplio rango de propiedades mecánicas
- Resistencia a variaciones de temperatura (Ferneto, 2017)

### 1.1.2.3. Aplicaciones

Existe una gran variedad de aplicaciones como son: enfriadores de leche, cubiertos y utensilios de cocina, tarjas, canales, equipo y aplicaciones en electrodomésticos, intercambiadores de calor, los equipos para procesamiento de alimentos, contenedores de productos químicos, tanques para almacenamiento de vinos y cervezas, partes para extintores de fuego, partes para almacenes de algunas bebidas carbonatadas, coches de ferrocarril, cubiertos de hornos comerciales y filtros de agua, evaporadores, y barriles. (Sumitec, 2017)

### 1.1.3. Diagramas de equilibrio

Los diagramas de equilibrio se pueden utilizar para describir la transformación de fase y la fase estable en los aceros inoxidables. Los diagramas de fase se usan para predecir la evolución de la microestructura que se desarrolla en la soldadura debido a que los aceros inoxidables metal base y material de aporte conforman hasta 10 elementos aleantes que no es muy fácil localizarlos en los diagramas de fase estándar.

#### 1.1.3.1. Diagrama hierro (Fe) – cromo (Cr)

El diagrama de fase hierro (Fe) – cromo (Cr) que se muestra en la Figura 1.2 es el punto de partida para describir la estabilidad de la fase del acero inoxidable, en este diagrama existe una solubilidad completa de cromo en hierro a temperaturas elevadas y una solidificación de las aleaciones Hierro (Fe) – Cromo (Cr) en forma de ferrita.

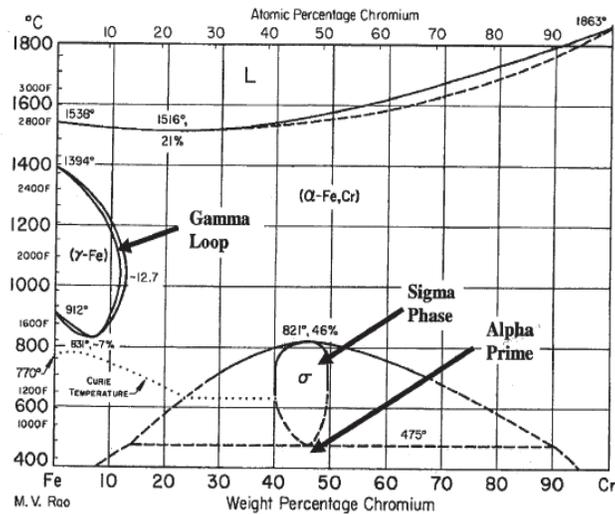


Figura 1.2. Diagrama de fase Hierro (Fe) - Cromo (Cr).

Fuente: (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

El intervalo de solidificación es muy estrecho. A concentraciones bajas de Cr existe un lapso de austenita en los intervalos de temperatura de 912° C a 1394° C. A las aleaciones con contenido de Cr mayor al 12,7% en peso solo presentaran ferrita a temperaturas elevadas.

Mientras que si se tiene contenido de cromo menor al 12% en peso presentara completamente austenita a temperaturas dentro del bucle gamma. Un rápido enfriamiento de austenita puede convertirse en martensita.

A temperaturas bajas el diagrama de fase es también llamado fase sigma, presentando rangos de temperatura de 600°C a 800°C donde requieren una gran cantidad de tiempo para su formación, esta fase es frágil y dura. (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

### 1.1.3.2. Diagrama hierro (Fe) – cromo (Cr) – carbono (C)

La unión de carbono al sistema hierro (Fe) - cromo (Cr) altera y complica significativamente la fase de equilibrio, porque el carbono es promotor de austenita y este se expandirá en la curva gamma y se logra que la austenita sea estable a temperaturas elevadas y con altos contenidos de cromo (Cr).

En la Figura 1.3., se puede observar el diagrama de equilibrio del sistema Fe-Cr con un contenido de carbono (C) del 0.1%. Cuando se produce un calentamiento en una aleación del 11,5% Cr y 0.1% C, la estructura ferrítica produce un cambio de fase donde llega al límite de ferrita más austenita, produciendo la formación de la estructura austenítica y siguiendo con el calentamiento toda la aleación pasa a ser austenítica. En el caso de un enfriamiento rápido permitirá a la austenita transformarse en martensita. (Istrati, 1961)

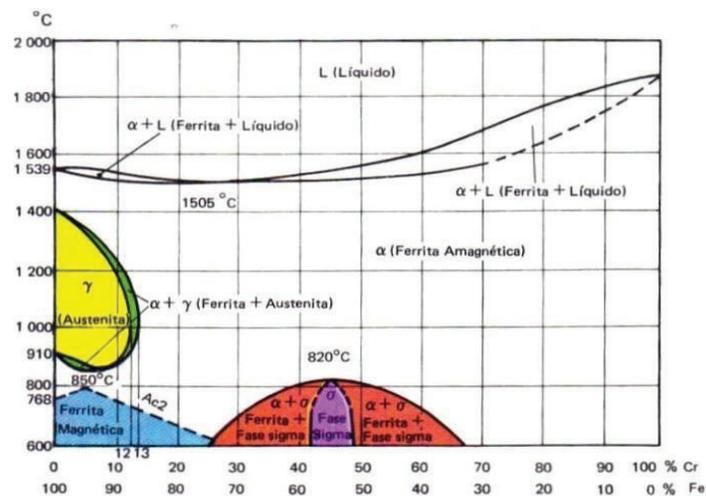


Figura 1.3. Diagrama Hierro - Cromo

Fuente: (Inchaurza, 1981)

### 1.1.3.3. Diagrama hierro (Fe) – cromo (Cr) – níquel (Ni)

La influencia del níquel incrementa el campo de la estabilidad de la austenita y una disminución en la temperatura la que ocurre la transformación de la ferrita – austenita. La Figura 1.4. Indica la formación de las diferentes estructuras a la temperatura ambiente teniendo como contenido el hierro (Fe), cromo (Cr) y níquel (Ni).

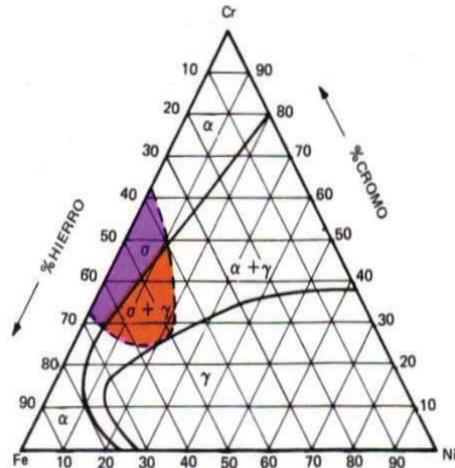


Figura 1.4. Diagrama Hierro – Cromo – Níquel a temperatura ambiente.

Fuente: (Inchaurza, 1981)

La fase sigma en los aceros inoxidable se da por la presencia de la ferrita manteniéndose a un largo tiempo y a temperaturas comprendidas entre los 600 – 900 °C convirtiéndose en un compuesto intermetálico de Fe y Cr. En esta fase se produce una pérdida de ductilidad provocando grietas muy finas. Este diagrama ternario es muy utilizado en los aceros inoxidable comerciales principalmente en los que están compuestos por un 75% de hierro (Fe), 18% de cromo (Cr) y 8% de níquel (Ni). (Mesa, 2017)

#### 1.1.4. Descripción de los elementos aleantes en los aceros inoxidable

Los elementos de aleación de los aceros inoxidable tienen una característica principal y es de proporcionar excelentes propiedades mecánicas y hacerlos más resistentes a la corrosión. A continuación, se muestra en la Tabla 1.5. El efecto de cada elemento aleante en los aceros inoxidable.

Tabla 1.5. Efecto del elemento aleante en los aceros inoxidable.

ELEMENTO	CARACTERÍSTICA
Cromo (Cr)	Principal responsable de la resistencia a la corrosión y de la formación de la película de óxido, formador de ferrita y carburo.
Níquel (Ni)	Formador de austenita, genera una mayor adherencia a los óxidos a alta temperatura, incrementa la resistencia contra los ácidos minerales, aumenta la capacidad a ser soldado, reduce la conductividad del calor.

Molibdeno (Mo)	Aumenta la resistencia contra los iones de cloruro, mejora la resistencia a temperaturas elevadas y al creep, formador de ferrita y carburo.
Cobre (Cu)	Proporciona resistencia al ácido sulfúrico y es un endurecedor por precipitación con ayuda del titanio y aluminio.
Manganeso (Mn)	Formador de austenita, mezclado con el azufre (S) aumenta la solubilidad del nitrógeno (N), se lo usa para compensar los bajos contenidos de Ni por sus semejantes características, mejora la ductilidad en caliente, actúa como desoxidante.
Azufre (S)	Mejora la resistencia, formador de la austenita, mejora la mecanización.
Titanio (Ti)	Estabiliza los carburos y previene la formación de carburos de cromo, favorece el endurecimiento por precipitación.
Niobio (Nb)	Ayuda en el endurecimiento por precipitación, estabilizador de carburos, evita la corrosión intergranular.
Aluminio (Al)	Desoxidante, mejora el endurecimiento por precipitación.
Carbono (C)	Formador de carburos, generador de resistencia, estabilizador fuerte de la austenita, incrementa la resistencia mecánica y reduce la resistencia a la corrosión intergranular.

Fuente: (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

## 1.2. Proceso de soldadura GMAW, parámetros

### 1.2.1. Definición

El proceso de soldadura GMAW (GAS METAL ARC WELDING) es conocido como “Soldadura por arco metálico con gas protector”, donde se produce la unión de los metales por medio de una fusión a través del arco voltaico establecido entre un electrodo metálico continuo y el charco de metal base como se muestra en la Figura 1.5.

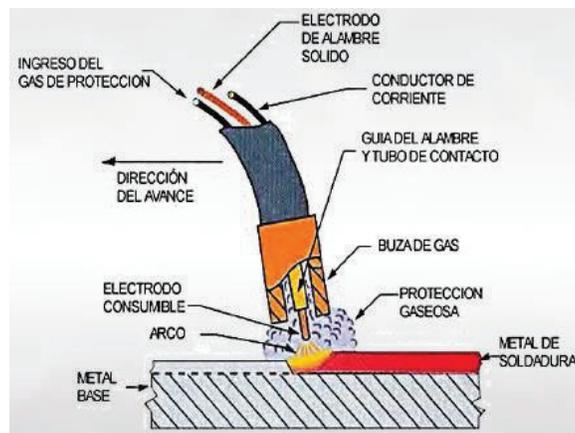


Figura 1.5. Esquema de proceso de soldadura GMAW.

Fuente: (Lincoln, 2016)



### **1.2.3. Ventajas, limitaciones y aplicaciones**

#### **1.2.3.1. Ventajas**

- Es el único proceso de soldadura con arco eléctrico y electrodo consumible que puede soldar todos los metales y aleaciones.
- Es un proceso fácil de aprender
- El proceso GMAW no tiene restricción para el tamaño de electrodo.
- Se puede soldar en todas las posiciones dependiendo del modo de transferencia.
- Se logran tasas de deposición altas.
- No necesitan la remoción de escoria ya que es un proceso limpio.
- Mejor calidad, mucho más rápido y uniones soldadas consistentes.
- Mejor aprovechamiento de metal aporte en un mayor factor de operación, lo que quiere de sus costos son beneficiosos.
- Presentan distorsiones muy pequeñas en las piezas de trabajo.
- Se pueden realizar soldaduras largas sin parar sin que existan empalmes entre cordones.
- Se tiene velocidades de soldadura y de deposición elevadas lo que permite un incremento de productividad.
- Es un proceso que puede ser automatizado.
- Se puede utilizar corrientes bajas para soldar metales finos.

#### **1.2.3.2. Limitaciones**

- El equipo de soldeo es más costoso, complejo y menos transportable.
- No es recomendable soldar en lugres con poco acceso.
- La protección de arco es muy sensible a las corrientes de aire.
- Puede provocar una gran cantidad de salpicaduras si no se opera en las condiciones deseadas.
- La soldadura debe protegerse del viento y corrientes de aire que pueden arrastrar el gas protección. Lo que hace que se utilice el proceso en lugares cerrados.

#### **1.2.3.3. Aplicaciones**

Entre sus aplicaciones se tiene la fabricación de recipientes a presión, tuberías industriales, industria automotriz y aeroespacial, instalaciones de energía nuclear, líneas de transmisión, equipo pesado, incluyendo la fabricación y construcción de productos y

bienes de acero al carbono, acero inoxidable y algunas aleaciones no ferrosas. (Lincoln, 2016)

### 1.2.4. Modos de transferencia del alambre consumible

La transferencia del metal de aporte del electrodo por medio del arco hacia la pileta de fusión se da por cuatro modos:

- Spray (lluvia de pequeñas gotas finas)
- Globular
- Cortocircuito
- Arco con corriente pulsada.

Dependiendo del tipo de transferencia se determinan algunos parámetros operacionales entre los más importantes están: el nivel de corriente y su polaridad, voltaje, diámetro del alambre-electrodo y su composición química, y la composición del gas protector.

En la Tabla 1.6. Se puede verificar un rango para determinar el tipo de transferencia en base al diámetro del electrodo, voltaje y corriente.

Tabla 1.6. Tipos de transferencia de acuerdo al diámetro del alambre.

Ø del Electrodo [mm]	Globular		Spray		Cortocircuito	
	A	V	A	V	A	V
0.8	110/150	18/22	140/180	23/28	50/130	14/18
1	130/200	18/24	180/250	24/30	70/160	16/19
1.2	170/250	19/26	220/320	25/32	120/200	17/20
1.6	200/300	22/28	260/390	26/32	150/200	18/21

Fuente: (Eyheralde, 2016)

#### 1.2.4.1. Transferencia por arco spray

Es un tipo de transferencia que se realiza desde el extremo del alambre al baño fundido en forma de una corriente axial de finas gotas. Para que se pueda realizar este tipo de transferencia es necesario que la corriente mínima de soldadura sea igual o superior a la corriente de transición.

La Tabla 1.7. Muestra valores comunes de corriente de transición para algunos metales de aporte y en especial para aceros inoxidables, con algunos gases de protección. La corriente de transición depende del diámetro del alambre y del gas de protección. Trabaja a altos voltajes (24 – 40 [V]) y altas intensidades (150 – 500 [A]), los gases inertes favorecen a este proceso, con este tipo de transferencia se tiene grandes tasas de deposición, necesita el uso de corriente directa y polaridad invertida.

Tabla 1.7. Corriente de transición.

TIPO DE ELECTRODO	DIÁMETRO DEL ELECTRODO		GAS DE PROTECCIÓN	CORRIENTE PARA ARCO EN TRANSFERENCIA SPRAY
	Pulgadas [in]	Milímetros [mm]	%	Amperios
Acero Inoxidable	0.035	0.89	99 [Ar] - 1 [O]	170
Acero Inoxidable	0.045	1.1	99 [Ar] - 1 [O]	225
Acero Inoxidable	0.062	1.6	99 [Ar] - 1 [O]	285

Fuente: (Eyheralde, 2016)

Se caracteriza por un ruido similar a un soplido constante. La apariencia del cordón terminado es excelente ya está libre de chisporroteo, requiere de poco de limpieza posterior a la soldadura.

Se aplica en cualquier tipo de material base, pero tiene algunas excepciones que son no se aplica en espesores muy finos ya que su corriente de soldeo es muy alta, se limita a soldaduras de filete, ranuras de unión en posición plana y filetes en posición horizontal debido a lo fluido. (Eyheralde, 2016)

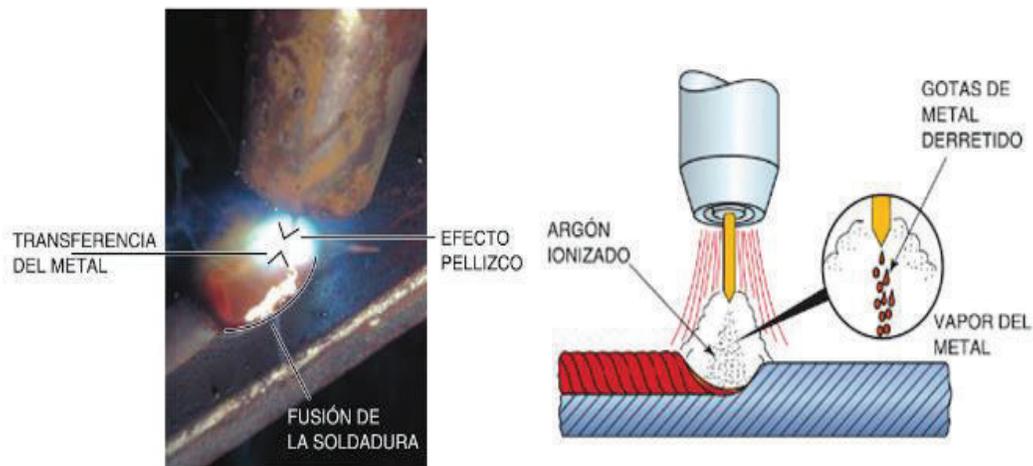


Figura 1.7. Transferencia por spray.

Fuente: (Larry, 2015)

#### 1.2.4.2. Transferencia globular

La transferencia globular se caracteriza por la formación de una gran gota de metal fundido al extremo del alambre, que puede tener un diámetro mayor al diámetro del electrodo y de forma irregular, dando origen a una alta penetración. Utiliza voltajes bajos (20 – 35 [V]) e intensidades altas (70 – 255 [A]) y su equipo es de bajo costo.

Se caracteriza por un arco errático produciendo un chisporroteo excesivo, es menos estable que la transferencia por corto circuito, trabaja con todos los tipos de gases de protección, requiere el empleo de corriente directa y polaridad invertida.

Se la utiliza para soldar metales base de espesores de 1.2 [mm] en adelante, usa por lo regular la posición plana y de filetes horizontales. (Eyheralde, 2016)

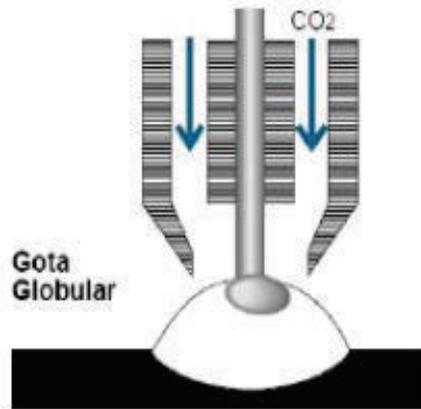


Figura 1.8. Transferencia Globular.

Fuente: (Minilo, 2017)

### 1.2.4.3. Transferencia cortocircuito

La transferencia por cortocircuito se produce por el contacto del alambre con el metal depositado y no existe transferencia metálica a través del arco. Este tipo de transferencia se obtiene cuando el voltaje, input térmico y la intensidad son bajos, utilizada para el soldeo en posición vertical, espesores delgados o cuando la separación es excesiva. Esta se encuentra oscilando valores de voltaje 16 – 22 [V] e intensidad 50 – 150 [A].

Trabaja con una polaridad invertida, produciendo que se produzca una penetración poco profunda y una pequeña distorsión del metal base, esta transferencia es apropiada para el llenado de aberturas de raíz grande.

Posee parámetros fundamentales para una soldadura exitosa, entre el diámetro del electrodo que va desde 0,6 a 1,2 mm, el tipo de gas de protección usado al 100%  $CO_2$ , o una mezcla de 75-80% de Argón, más 25-20% de  $CO_2$  y dentro de los problemas que podemos decir que tiene los altos niveles de salpicaduras y una falta de fusión de la junta en especial en juntas de grandes espesores, en la práctica los gases que contienen argón aumentan la frecuencia de cortocircuitos y reducen el tamaño de las gotas líquidas

además es fácil escuchar si se tiene un modo de transferencia por circuito a través del ruido que produce. (Lincoln, 2016)

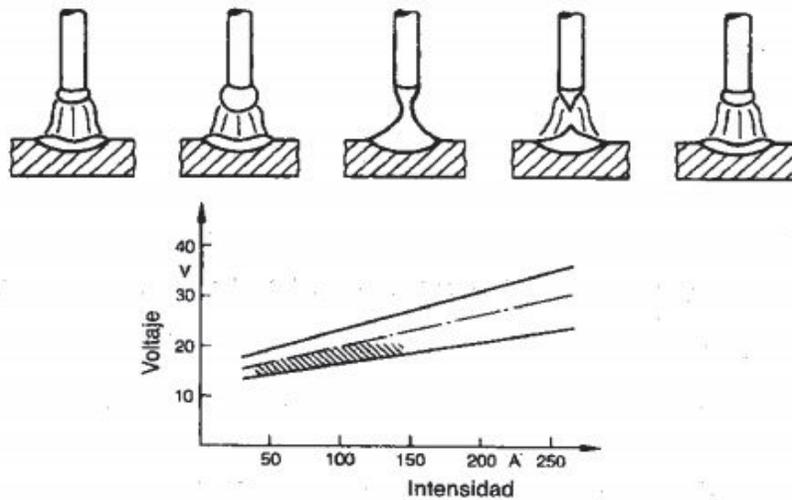


Figura 1.9. Ciclo de transferencia por Cortocircuito.

Fuente: (Lincoln, 2016)

#### 1.2.4.4. Transferencia arco con corriente pulsada

La transferencia por arco pulsado es una transferencia del tipo spray, que se da por pulsos a intervalos espaciados de manera regular. Este tipo se obtiene cuando se utiliza una corriente pulsada, que es la formación de una corriente de baja intensidad (es constante) llamada corriente de base o de fondo y un conjunto de pulsos de alta intensidad conocida como corriente de pico.

La ventaja fundamental de este método es la reducción de calor aplicado, lo que permite la posibilidad de soldar todos los espesores, obtener menores deformaciones y soldar en todas las posiciones. Además, se pueden utilizar diámetros de alambre mayores y se reducen las proyecciones.

Las mayores desventajas son: el elevado costo del equipo, la dificultad de establecer los parámetros adecuados de soldeo debido al gran número de datos que hay que introducir y que sólo se pueden utilizar mezclas con bajo contenido en CO<sub>2</sub> (máximo un 18%).

Actualmente las fuentes de soldeo de corriente pulsada son de tipo sinérgico, lo que significa que el soldador sólo tiene que regular la velocidad de avance del alambre y los datos sobre el material de aportación, el gas de protección y el diámetro del electrodo.

A partir de estos datos la fuente de corriente ajusta automáticamente los parámetros de soldeo idóneos.

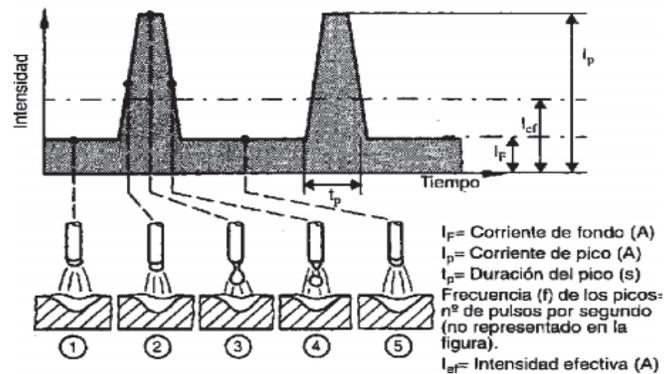


Figura 1.10. Forma de la corriente de soldeo en Transferencia por Arco Pulsado.

Fuente: (Lincoln, 2016)

### 1.2.5. Parámetros y variables del proceso

Son aquellas variables que pueden modificar, alterar la configuración o forma del cordón depositado, las características del arco eléctrico y la calidad de la soldadura. Y estas son:

- Tensión
- Ángulo de inclinación de la pistola
- Velocidad de alimentación (corriente de soldadura)
- Polaridad
- Extremo libre del electrodo o "stick-out"
- Velocidad de desplazamiento
- Gas de protección
- Movimiento de la pistola
- Dirección de soldeo

Además, dichos parámetros influyen directamente en la geometría, penetración y calidad del cordón de soldadura.

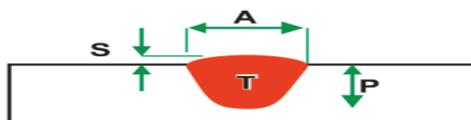


Figura 1.11. Parámetros para determinar la forma del cordón de soldadura.

Fuente: (Eyheralde., 2017)

Dónde: **A** es el ancho del cordón, **P** indica la penetración, **S** la sobremonta del cordón, **T** es el tamaño del cordón. Estas variables no son independientes ya que el cambio de una de ellas produce o el cambio de alguna otra.

### 1.2.5.1. Tensión del arco o voltaje de soldadura

Es un parámetro regulable en la fuente de energía, o es la distancia desde la unidad de alimentación del electrodo, esta se mide en voltios [V]. Se transmite de forma regular, por tanto, cuanto mayor es la longitud de arco mayor es la tensión del arco. Cuando hay un incremento de voltaje el ancho del cordón es mayor, la sobremonta, la penetración es menor y la tensión permanece constante.

### 1.2.5.2. Corriente de soldadura (velocidad de alimentación del electrodo)

Esta no cambia directamente, sino que la variamos con el regulador de velocidad. Cuando tenemos una velocidad alta tenemos mayor corriente, mayor sobremonta, mayor penetración, mayor tamaño de cordón.

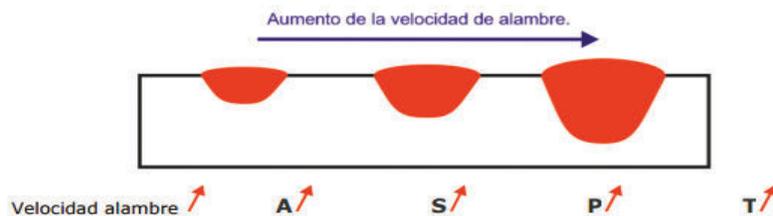


Figura 1.12. Cambio de la forma del cordón con el incremento de la corriente.

Fuente: (Eyheralde., 2017)

### 1.2.5.3. Ángulo de inclinación de la torcha y dirección de la soldadura

Para obtener una buena protección del gas, el ángulo de trabajo no debe ser mayor de 10 a 20° respecto a la vertical. Un ángulo de trabajo muy pequeño favorece la formación de mordeduras, mientras que un ángulo de trabajo grande puede ser causa de falta de fusión. Cuando se utiliza la técnica de soldeo hacia delante disminuye la penetración y el cordón se hace más ancho y plano. (Lincoln, 2016)

La dirección de la soldadura también forma parte del cordón de soldadura, puesto que se tiene diferentes resultados entre el ángulo de arrastre o empuje, ya que cada uno prioriza un parámetro específico de la forma del cordón; por ejemplo, un ángulo de arrastre en contraparte prioriza la penetración del cordón mientras que un ángulo de empuje permite un aumento en el ancho del cordón de soldadura. (Eyheralde., 2017)

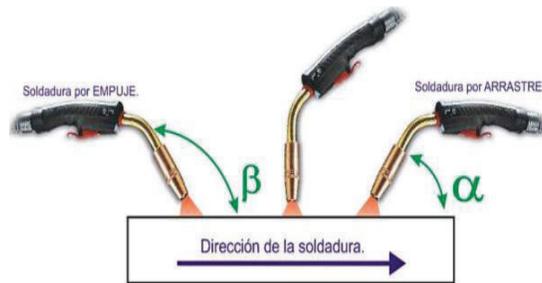


Figura 1.13. Tipos de inclinación de la pistola.

Fuente: (Eyheralde., 2017)

#### 1.2.5.4. Polaridad

Esta se utiliza para definir la conexión eléctrica de la pistola con relación a los polos de una fuente de alimentación de corriente continua.

La corriente alterna genera arcos inestables y con tendencia a extinguirse, por lo que no es recomendable utilizarla. Para la mayoría de aplicaciones con el proceso GMAW se utiliza la polaridad inversa (DC+), se conecta el electrodo al polo (+) y la pieza al polo (-), obteniendo arcos más estables, con buena transferencia de metal aporte, gran penetración, un cordón de soldadura con excelentes características y pocas proyecciones.

Sin embargo, la polaridad directa (DC-), casi no se utiliza porque, aunque la tasa de deposición y el número de salpicaduras es mayor solo se obtienen en transferencias globulares. (Lincoln, 2016)

#### 1.2.5.5. Extremo libre del electrodo

Es el extremo libre del alambre, es decir la distancia desde el tubo de contacto hasta el extremo del alambre. Este parámetro es importante en el proceso de soldeo, en especial para la protección del baño de fusión.

Cuando aumenta la longitud de extensión, la penetración es menor, se produce una falta de protección del gas y aumentan las proyecciones, provocando como consecuencia la aparición de defectos en el cordón. Si esta longitud es muy corta, la penetración es mayor, hay menos proyecciones y puede ocurrir que impida la visibilidad del baño de fusión.

#### 1.2.5.6. Velocidad de desplazamiento

Es la velocidad de avance de la pistola, es decir la velocidad con la que se desplaza la pistola a lo largo de la unión. Si el resto de parámetros permanecen constantes, cuanto

más baja sea la velocidad de desplazamiento, mayor será la penetración en la soldadura.

Una pistola puede sobrecalentarse si se realiza una soldadura con una baja velocidad de desplazamiento y una alta intensidad [A]. Una alta velocidad de desplazamiento producirá soldaduras muy irregulares.

### 1.2.5.7. Gas de protección

Los gases protectores deben tener la especificación “Welding Grade” (“grado para soldadura”). De esta manera se consigue un nivel específico de pureza y el contenido de humedad. Los grados de la presión de gas dependen del tipo de gas empleado, del metal a soldar, de la posición de soldar, velocidad de avance y de las corrientes de aire.

La principal causa de utilizar el gas de protección es proteger el metal fundido con gases de la atmosfera. Para seleccionar el tipo de gas a utilizar se deben considerar varios aspectos como el metal a soldar, la posición de soldar, el tipo de transferencia y característica del arco, la penetración, ancho y la forma del cordón, la velocidad de avance, tendencia del socavado y el costo del gas. La Tabla 1.8. muestra algunos gases con sus características de acuerdo a la norma AWS.

Tabla 1.8. Usos y observaciones de algunos gases protectores.

GAS PROTECTOR	CARACTERÍSTICAS	COMPOSICIÓN QUÍMICA
Argón (Ar)	Suelda diversos metales, excepto aceros.	Inerte
Helio (He)	Para soldar aleaciones de Al y Cu. Buena penetración y mínima porosidad.	Inerte
Ar y He (20-80% a 50-50%)	Aleaciones de Al y Cu para reducir la porosidad. El arco es más suave y estable.	Inerte
Ar y Cl (Cl en trazas)	Aleación de Al. Reduce porosidad.	Inerte
Nitrógeno ( $N_2$ )	Usado en Cu, arco potente.	Reductor
Ar – 25 a 30% $N_2$	Para Cu, su arco es muy potente y trabaja de manera más suave.	Reductor
Ar – 1 a 2 % $O_2$	Usado para aceros de baja aleación y aceros inoxidable. Necesita de electrodo desoxidado.	Oxidante
Ar – 3 a 5 % $O_2$	Aceros aleados, al carbono e inoxidable.	Oxidante
Ar – 20 a 30 % $CO_2$	Se usa con transferencia en cortocircuito.	Oxidante
Ar – 5 % $O_2$ - 15 % $CO_2$	Gran variedad de aceros. Necesita de alambre desoxidado.	Oxidante
$CO_2$	Aceros al carbono de baja aleación.	Oxidante

Fuente: (Anónimo, 2015)

#### **1.2.5.8. Movimiento de la pistola**

En función del material y el espesor a soldar puede ser conveniente aplicar cierto movimiento a la punta de la boquilla. Un movimiento “lineal” es recomendable en los espesores finos para evitar un calentamiento excesivo. Otros tipos de movimiento como el “pendular” en varias pasadas, produce cordones anchos con gran penetración. El movimiento “circular” produce cordones anchos de baja penetración.

#### **1.2.5.9. Dirección de soldeo**

La dirección de soldeo también se la conoce como “soldeo hacia delante” cuando la pistola se dirige en el mismo sentido que el avance de soldeo, en este caso disminuye la penetración y el cordón se hace más ancho y plano, por lo que se recomienda para espesores pequeños. Y en el “soldeo hacia atrás” la pistola se dirige en sentido contrario al de avance de la soldadura, obteniéndose peor aspecto del cordón, una mayor penetración y una deposición en exceso del material.

### **1.2.6. Discontinuidades de la soldadura en el proceso GMAW**

Las discontinuidades son interrupciones en la estructura cristalina típica de una junta soldada y se caracteriza por una falta de homogeneidad en las propiedades metalúrgicas, mecánicas. Se puede determinar que algunas veces una discontinuidad es un defecto, donde por definición un defecto es una condición que debe ser corregida o removida. Existen normas y códigos de aceptación que son utilizados cuando se ha identificado una discontinuidad con ello la considerarán aceptable cuando tiene una confiabilidad en la soldadura.

#### **1.2.6.1. Porosidad**

Son cavidades que se forman en el metal depositado provocadas por el gas atrapado durante la solidificación o en un depósito de rocío térmico, es generalmente esférica, pero podría ser alargada. La porosidad se encuentra en el interior del cordón y para detectarlo es necesario un ensayo radiográfico.

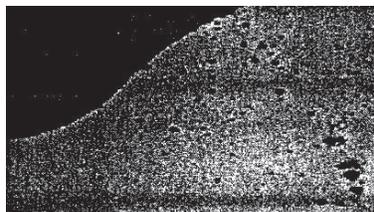


Figura 1.14. Poros generados en soldadura MIG.

Fuente: (Recalde, 2017)

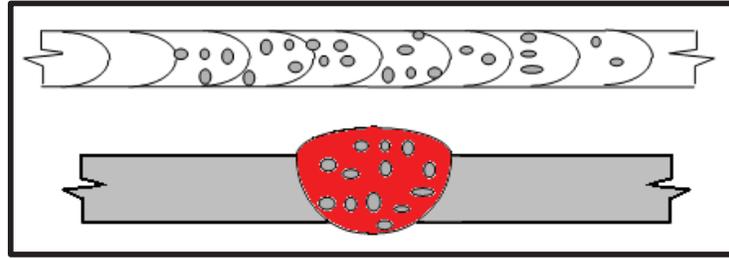


Figura 1.15. Poros y cavidades en el cordón de soldadura.

Fuente: (Caldera, 2017)

#### Causas

- Presencia de humedad, aceite, grasa suciedad o pintura en las juntas.
- Impurezas en la superficie del alambre de aportación.
- Protección de gas incompleta causada por un insuficiente caudal de gas o presión, o un exceso del caudal de gas, que inyectará aire.
- Intensidad excesiva.
- Mala técnica operaria: soldar con el arco demasiado largo o con un ángulo de desplazamiento largo.

#### Medidas

- Una correcta limpieza en el área de unión antes de soldar.
- El control de la longitud del arco eléctrico.
- Controlar el caudal de gas y comprobar que los conductos y conexiones ajusten correctamente para eliminar presiones eventuales.

#### 1.2.6.2. Mordeduras

Es una falta de metal en forma de surco de longitud variable en cualquier parte de los bordes del cordón de soldadura. A su vez es un defecto que puede ser aceptado cuando cuyas mordeduras sean poco profundas normalmente inferiores a 0,5 mm. Si causa una profunda transición entre el cordón de soldadura y el material base, no suele aprobarse.

#### Causas

- Excesivo voltaje en el arco en relación con la corriente.
- Una posición errónea en el ángulo o posición de la pistola.
- La velocidad de avance es demasiado alta.
- El alambre tiene un diámetro muy grande.

## Medidas

- Disminuir el voltaje.
- Corregir la posición de la pistola.
- Disminuir la velocidad de avance.

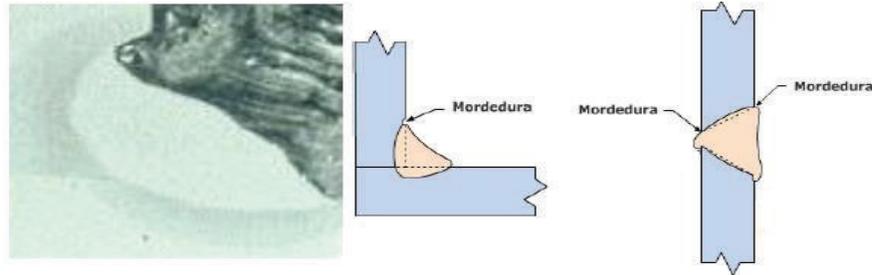


Figura 1.16. Mordedura en soldadura MIG/MAG.

Fuente: (Cadenas, 2012)

### 1.2.6.3. Salpicaduras

Son diminutas gotas o glóbulos de metal de aporte despedidas del arco durante la soldadura y adheridos a la superficie del metal base, o a la zona fundida ya solidificada. Es inevitable producir cierto grado de salpicaduras, no suelen originar grietas, no afectan la resistencia del cordón, pero producen un aspecto estético indeseable. En la Figura 1.17 se pueden observar las salpicaduras. Para controlar las salpicaduras se debe:

- Bajar la corriente.
- Asegurar que la polaridad es la indicada de acuerdo con el electrodo usado.
- Bajar la longitud del arco.
- Cambiar el ángulo del electrodo.
- Escuchar con atención las explosiones o ruido del arco.
- Verificar que el electrodo no esté húmedo.
- Evitar la cantidad excesiva de gases liberados al enfriar rápidamente.

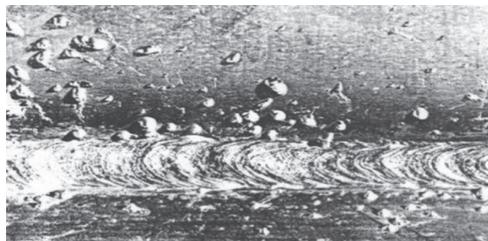


Figura 1.17. Salpicaduras

Fuente: (López, 2017)

#### 1.2.6.4. Falta de fusión

Es una coalescencia incompleta de alguna porción entre el metal depositado y el metal base. Es casi siempre visible debido a que a menudo la raíz de la soldadura no queda correctamente rellena

Es un defecto grave y en muchas ocasiones no se acepta. La falta de fusión usualmente es alargada en la dirección de la soldadura, con bordes agudos o redondeados, dependiendo de las condiciones de formación. Generalmente son producidas por la falta de temperatura suficiente para fundir el metal base o el cordón anterior ya sólido. La falta de fusión se puede producir en la raíz, en el bisel.

Los factores con más influencia en la falta de fusión son:

- La posición de la soldadura y el ángulo de la pistola.
- La falta técnica del soldador.
- Una velocidad excesiva de pasada.
- Un incremento en el voltaje produce: un arco más largo y un cordón más ancho.
- Un incremento en la corriente produce: un arco más corto, más alto y más ancho, e incrementa la tasa de fusión y penetración.

Para evitar la falta de fusión un aumento de corriente debe ser compensado con un incremento de la velocidad de avance. Si la velocidad de avance se incrementa, manteniendo constante la corriente, el calor aplicado será muy bajo y alcanzará el punto cuando las caras de la junta aún no estén fundidas. Esto también producirá una falta de fusión. La falta de fusión puede ocurrir en cualquier posición si la soldadura MIG/MAG se efectúa de forma errónea.



Figura 1.18. Falta de fusión en una soldadura MIG/MAG.

Fuente: (Recalde, 2017)

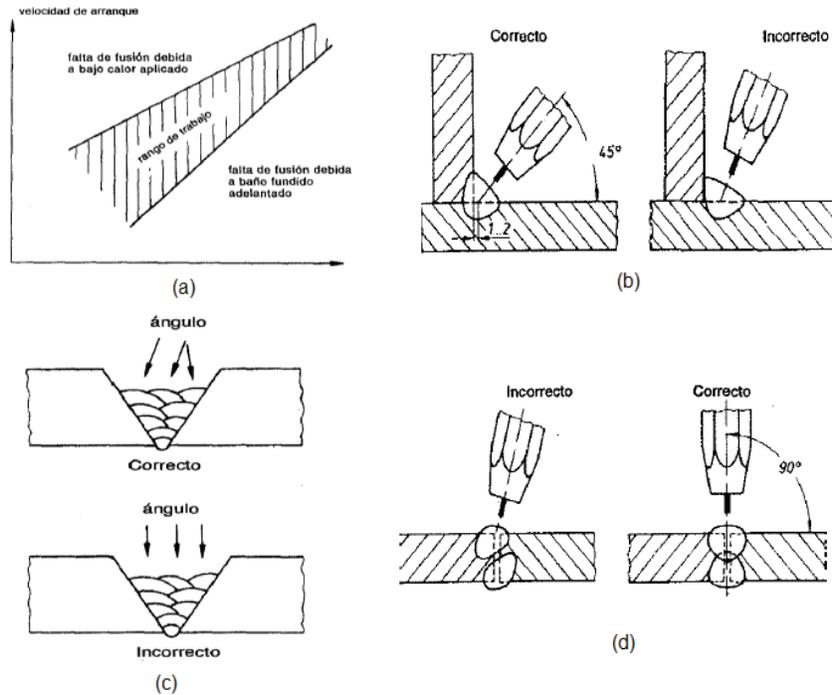


Figura 1.19. (a) Relación entre la velocidad de avance y el ritmo de fusión en la soldadura MIG. (b) Ángulo recomendado para una soldadura de penetración usando soldadura MIG. (c) Ángulo recomendado para una unión en V en una soldadura MIG/MAG. (d) Ángulo recomendado para una unión en I en una soldadura MIG/MAG.

Fuente: (Recalde, 2017)

### 1.2.6.5. Exceso de penetración

Es un exceso de metal depositado en la raíz de la soldadura, esto ocurre cuando se suelda por un solo lado. El exceso de penetración debe ser generalmente de 1 a 2 mm no debe sobrepasar los 3 mm según el código AWS D1.6.

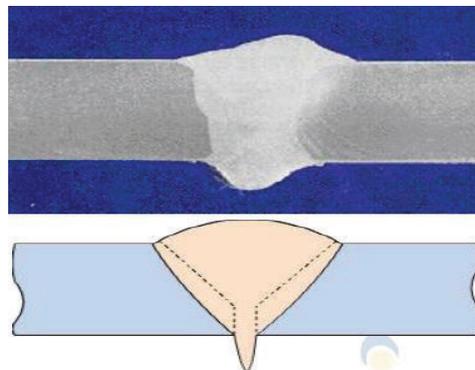


Figura 1.20. Exceso de penetración en la soldadura MIG.

Fuente: (Recalde, 2017)

### **1.3. Soldabilidad**

La soldabilidad es la capacidad de los materiales para ser unidos de manera duradera, mediante los procesos de soldadura, sin alterar transformaciones estructurales, deformaciones o tensiones que puedan provocar problemas.

Según la American Welding Society (AWS), “la soldabilidad es la capacidad de un material a ser soldado bajo las condiciones impuestas de fabricación en una específica estructura apropiada y desempeñarse satisfactoriamente en el servicio previsto.” (Messler, 2008)

#### **1.3.1. Tipos de soldabilidad**

##### **1.3.1.1. Soldabilidad metalúrgica**

Se refiere a no presentar los cambios estructurales en la unión soldada o variaciones en las propiedades físico – químicas durante el proceso de soldadura.

##### **1.3.1.2. Soldabilidad operativa**

Establece el estudio de las distintas actividades realizadas en cuestiones tecnológicas y de ejecución de las uniones soldadas durante el proceso de la soldadura.

##### **1.3.1.3. Soldabilidad global o constructiva**

Generalmente analiza las propiedades del conjunto soldado y su orientación al agrietamiento. Estudia el antes, durante y el después del conjunto soldado. Aquí influyen las propiedades físicas del material base como lo es la contracción y la dilatación que afectan las tensiones y deformaciones, las cuales provocan el agrietamiento de la unión soldada.

#### **1.3.2. Soldabilidad de aceros inoxidables austeníticos**

Los aceros inoxidables son aquellos que presentan mejores propiedades para ser soldados, debido a que no presentan ningún problema en los procesos de soldadura por haz de electrones, por rayo láser, por arco, o por procesos de fricción y resistencia.

La soldabilidad es muy buena por lo que realizar incorrectamente el proceso de soldadura puede llegar a presentar problemas, así como en el cordón de soldadura y metal base, mencionando algunos como: fragilización, fisuración en caliente y la sensibilización o pérdida de resistencia a la corrosión intergranular. (Bencomo, 2009)

### **1.3.3. Factores que actúan en la soldabilidad**

Los factores que intervienen en el estudio de soldabilidad son los siguientes:

- Tipo de material base, espesor
- Secuencia del proceso de soldadura
- Influencia de elementos aleantes
- Tipo de junta y proceso de soldadura
- Temperatura de precalentamiento del material
- Energía suministrada
- Velocidad de enfriamiento

Los parámetros mencionados tienen que ser tomados correctamente para obtener una soldadura de excelente calidad. Pueden existir otros factores que afecten la soldabilidad por ejemplo la alineación o predisposición del material, el índice de fluidez y las condiciones de trabajo.

### **1.3.4. Ensayos de Soldabilidad**

Los ensayos de soldabilidad permiten evaluar las distintas características del cordón de soldadura o material base con la finalidad de conocer el alcance del proceso. Estos ensayos son hechos por investigaciones específicas, algunos ensayos no se encuentran reglamentados o normados por entidades oficiales.

Los ensayos permiten conocer diferentes aspectos como lo es el material aporte y material base, a su vez permite realizar comparaciones válidas para determinar procesos o procedimientos de soldadura.

Todos los ensayos proveen información cualitativa que es utilizada para clasificar los materiales, condiciones térmicas de los materiales, procesos, procedimientos. Ningún ensayo de soldabilidad da información cuantitativa como límites de fluencia de una aleación específica cuando es ensayada bajo tracción o como la resistencia al cizallamiento. (ASM Metal Handbook Volume 09, 1992)

Los ensayos de soldabilidad se pueden clasificar en dos categorías:

1. Ensayos directos de soldabilidad: ensayo Houldcroft, ensayo de Finger, ensayo de Battelle, ensayo de restricción de Lehigh, ensayo de Desgarre, ensayo Varestraint, ensayo Murex, ensayo de restricción y cerradura, ensayo de filete circular de la armada, ensayo de ranura circular y ranura circular segmentada, ensayo de parche

circular de la armada, ensayo Sigmajig, ensayo de implante, ensayo de ranura Lehigh, ensayo Vinkier, ensayo RPI de deformación incrementada, ensayo de severidad térmica controlada, ensayo de cuña, ensayo cruciforme y ensayo Tekken,

2. Ensayos indirectos de soldabilidad: ensayo de ranura espiral, ensayo en simuladores Gleeble, ensayo de decantación por impulso.

#### 1.3.4.1. Ensayo Houldcroft (Fisuramiento en caliente)

Es aquel ensayo de susceptibilidad al fisuramiento o agrietamiento en la solidificación que se aprecia en las juntas soldadas, fue desarrollado para evaluar el fisuramiento de las láminas de acero. Para este ensayo la soldadura se realiza en el borde de la lámina que tiene un precorte a través de ranuras, las ranuras son acomodadas en dirección perpendicular al cordón de soldadura y están separadas en espacios iguales. se deposita un cordón de soldadura de penetración completa a lo largo de la muestra, la longitud de las principales fisuras en varias muestras es utilizada como medida de la sensibilidad al agrietamiento. (Messler, 2008)

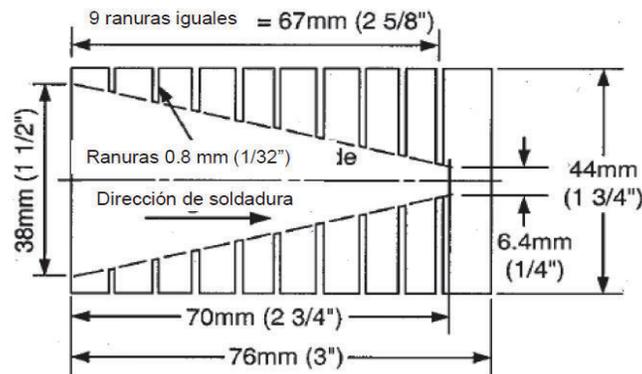


Figura 1.21. Esquema de la probeta para ensayo Houldcroft.

Fuente: (Kou, 2003)

## 1.4. Metalurgia de la soldadura

La microestructura en la zona de fusión de los aceros inoxidable austenítico depende de dos factores que son el comportamiento de la solidificación y las transformaciones subsecuentes en estado sólido. Los aceros inoxidable austeníticos pueden solidificarse como ferrita primaria o austenita primaria dependiendo de la composición específica.

### 1.4.1. Evolución de la microestructura en la zona de fusión

La microsegregación es un fenómeno que se produce durante la soldadura y no se puede evitar. Este fenómeno provoca un cambio en las fases resultantes de la solidificación y además altera sus composiciones.

La microsegregación de los elementos principales (Cromo [Cr], Níquel [Ni]) en los aceros inoxidables soldados, se han investigado teniendo en cuenta los diferentes modos de solidificación se puede comentar que en los aceros con modo de solidificación austenítico, las regiones interdendríticas están ligeramente enriquecidas en cromo y níquel.

Existen 4 posibles solidificaciones y transformaciones en el estado sólido para la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos que se muestra en la Tabla 1.9. y tienen relación con el diagrama de fase Fe – Cr – Ni en la Figura 1.22. En la Figura se muestra las solidificaciones tipo A y AF que están asociadas con la solidificación de la austenita primaria, razón por la que la austenita es la primera fase que se forma durante la solidificación. Las solidificaciones de tipo FA y F tienen ferrita delta como fase primaria, debido a la inestabilidad de la ferrita a bajas temperaturas.

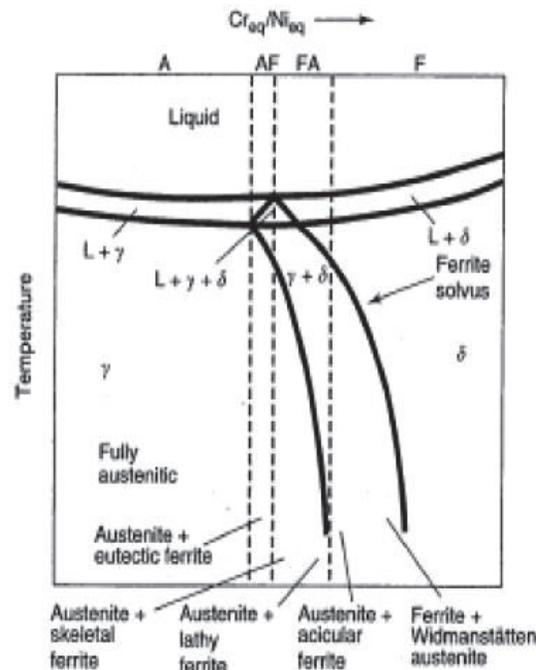


Figura 1.22. Tipos de solidificación para el diagrama de fase pseudobinario.

Fuente: (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

Tabla 1.9. Tipos de solidificación, reacciones y microestructuras resultantes.

Tipo de Solidificación	Reacción	Microestructura
Austenita (A)	$L \rightarrow L + A \rightarrow A$	Completamente austenítico, buena definición de la estructura solidificada.
Austenita – Ferrita (AF)	$L \rightarrow L + A \rightarrow L + A + (A + F)_{eut} \rightarrow A + F_{eut}$	Ferrita en las fronteras de las dendritas.
Ferrita – Austenita (FA)	$L \rightarrow L + F \rightarrow L + F + (F + A)_{per/eut} \rightarrow F + A$	Ferrita columnar resultado de la transformación ferrita a austenita.
Ferrita (F)	$L \rightarrow L + F \rightarrow F \rightarrow F + A$	Ferrita acicular o una matriz ferrítica con austenita en el límite de grano y placas al lado de Widmanstätten.

Fuente: (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

El acero inoxidable austenítico AISI 304 por lo general sufre solidificaciones de tipo AF y FA. Este tipo de solidificaciones y evolución se describen en el ANEXO IV.

## 1.5. Diagramas de constitución

El uso de los diagramas de constitución permite predecir el comportamiento de la soldadura de los aceros inoxidables. Se conoce que el estudio está enfocado a los efectos de la composición en la microestructura de la soldadura.

### 1.5.1. Diagrama de Schaeffler

El uso del diagrama permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición y predice la estructura del metal de soldadura obtenido.

El diagrama de Schaeffler permite incrementar la capacidad de pronosticar cuantitativamente la microestructura del metal soldado, principalmente en la región de dos fases ferrita delta y austenita. (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

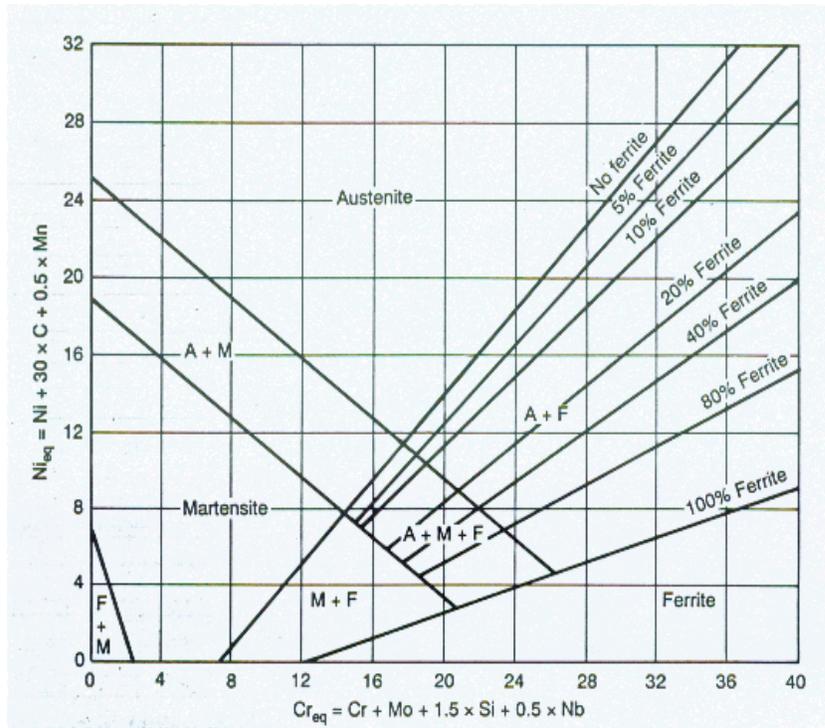


Figura 1.23. Diagrama de Schaeffler.

Fuente: (British stainless steel association, 2017)

El diagrama muestra el dominio de las fases martensítica, austenítica y ferrítica propias de los aceros inoxidable cuando estos son enfriados a las velocidades de soldadura.

Utilizando las relaciones equivalentes del diagrama de Schaeffler (Cromo y Níquel equivalente) está dada por el porcentaje en peso de los elementos de aleación, Seferian desarrollo una expresión para calcular la cantidad de ferrita delta presente en el metal de soldadura de los aceros inoxidable austeníticos

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Cb \quad (1.1)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0,5 Mn + 30 C \quad (1.2)$$

$$Ferrita_{Delta} = 3(Cr_{eq} - 0,93Ni_{eq} - 0,67) \quad (1.3)$$

### 1.5.2. Diagrama de Long

El diagrama De Long es una variación del diagrama de Schaeffler, para la determinación de la ferrita en el proceso de soldadura. De Long incluyo Nitrógeno en níquel equivalente. Este diagrama no es recomendado para soldaduras tratadas térmicamente y materiales base afectados por el calor.

La Figura 1.24. muestra los niveles de ferrita en las bandas, tanto como porcentajes basados en determinaciones metalográficas y el número de la ferrita (FN). Los valores del FN se fundamentan en mediciones magnéticas, las cuales son posibles debido a que la ferrita delta tiene una estructura BCC y la austenita no. (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

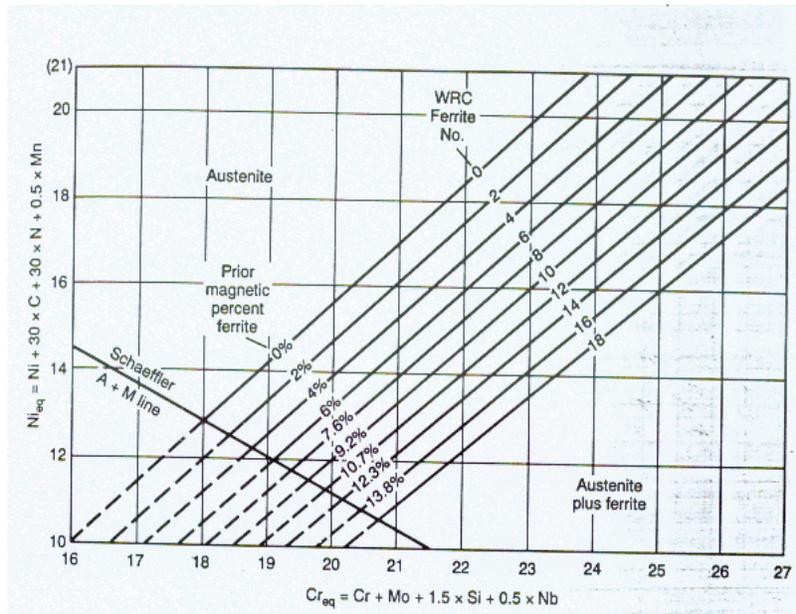


Figura 1.24. Diagrama De Long.

Fuente: (British stainless steel association, 2017)

Las unidades FN no se relacionan directamente al porcentaje de la ferrita, sin embargo, con valores menores a 10 tendrán un porcentaje de ferrita similar.

El subcomité de investigación de la soldadura en el año 1973 adoptó en FN como el medidor de la cantidad de la ferrita y los métodos de calibración que están especificados en la norma AWS A4.2 e ISO 8249.

### 1.5.3. Diagrama de WRC - 1992

El diagrama de WRC-1992 nos proporciona información sobre las propiedades de la soldadura de los distintos tipos de microestructura, en función de lo que los elementos de aleación que contienen. El cromo equivalente se calcula mediante el porcentaje en peso de elementos estabilizadores de ferrita y níquel equivalente se calcula mediante el porcentaje en peso de elementos de estabilización de austenita.

Otra forma de calcular es utilizando las siguientes formulas:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,7Nb \quad (1.4)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35 C + 20 N + 0,25 Cu \quad (1.5)$$

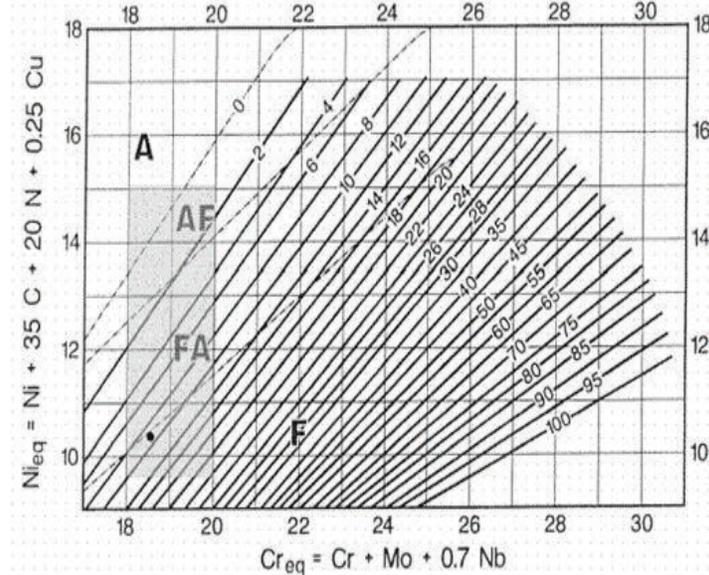


Figura 1.25. Diagrama WRC – 92 del acero 304.

Fuente: ( D. J Kotecki and T. A. Siewert, May 1992)

El diagrama de WRC es aceptado hoy en día como una versión mejorada de la Schaeffler o el diagrama de Long.

## 1.6. Zona afectada por el calor (ZAC)

La zona afectada por el calor en los aceros austeníticos depende de la composición y la microestructura del metal base. El material algunas veces puede verse afectado durante el proceso de soldadura, ya que esta zona se calienta y se enfría, en algunos casos esta zona se vuelve frágil y puede presentar grietas, mientras en otros casos puede perder su dureza.

Describiremos algunas reacciones metalúrgicas que pueden ocurrir en la ZAC de las aleaciones austeníticas:

La zona afectada por el calor muestra un considerado crecimiento de grano siendo evidente que los granos más grandes están más próximos a la zona de fusión del material base.

El control de las propiedades de la zona afectada por el calor puede ser realizado con la aplicación de tratamientos térmicos después de la soldadura, en otros casos se puede dar un cambio en las variables de soldadura.

El tamaño de la ZAC depende de algunos factores como: el proceso de soldadura, potencia efectiva, espesor del material, metal de aporte, diseño de la junta, velocidad de enfriamiento, etc.

La Figura 1.26. muestra el crecimiento de grano severo de la zona afectada por el calor dando lugar a granos gruesos en la zona de fusión debido al crecimiento epitaxial. La microestructura del mismo material antes de endurecer por trabajo, se puede ver en las figuras siguientes donde se incluyen para comparación (Figura 1.26. a). La recrystalización (Figura 1.26. d) y el crecimiento del grano (Figura 1.26. e) son evidentes en el ZAC.

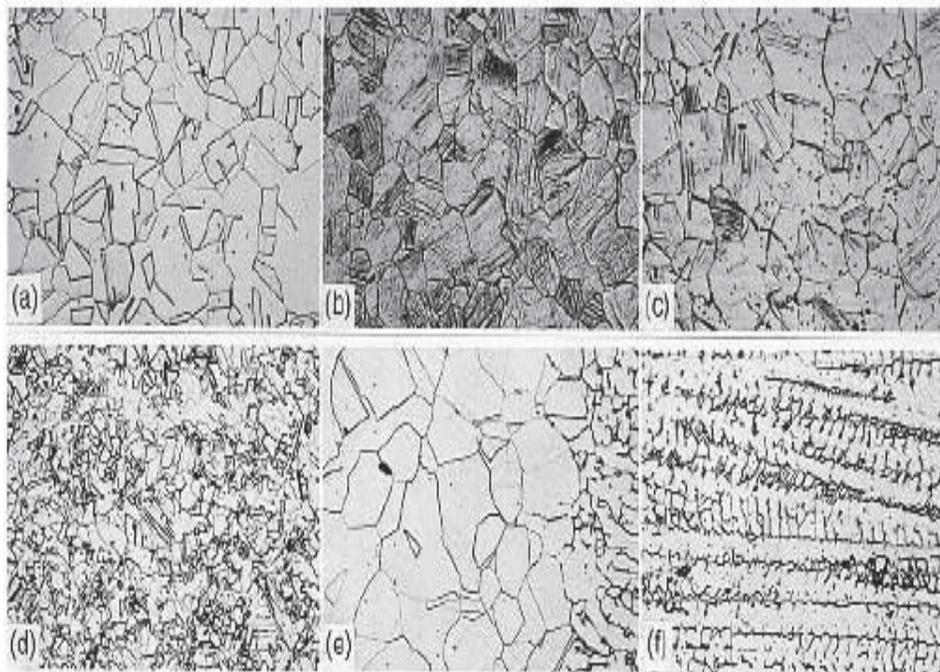


Figura 1.26. Microestructura transversal de la soldadura de un acero inoxidable 304 endurecido por trabajo. (a) Antes de endurecer por trabajo, (b) metal base, (c) precipitación de carburos en el límite de grano, (d) recrystalización, (e) crecimiento de grano enseguida del límite de fusión, (f) zona de fusión.

Fuente: (ASM Metal Handbook Volume 09, 1992)

### 1.6.1. Crecimiento del grano

El crecimiento de grano es restringido ya que los aceros inoxidables austeníticos son soldados en su condición recocida o laminada en caliente al menos que la energía de soldadura sea muy alta. Cuando estos son trabajados en frío los aceros se recrystalizarán y luego se dará el crecimiento de grano.

### **1.6.2. Formación de ferrita**

La formación de ferrita se produce a mayores relaciones de  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ , a lo largo de la ZAC en el límite de grano prohibirá el crecimiento de grano y también minimiza la susceptibilidad al agrietamiento. El grado de formación de la ferrita es por lo general bajo, ya que la transformación de austenita a ferrita es relativamente inactiva y el ciclo térmico en la ZAC es bastante rápido.

## **1.7. Problemas durante la soldadura de los aceros inoxidable**

Existen tres grandes problemas y estos son los de sensibilización, formación de fisuras y el rol de ferrita y la fase sigma.

### **1.7.1. Sensibilización**

Es la precipitación del cromo en el área adyacente al borde del grano, provoca una cantidad insuficiente de cromo para que se mantenga la protección necesaria de la película de óxido. La soldadura de estos aceros produce áreas adyacentes al cordón que alcanzan las temperaturas antedichas, debido a ello estos aceros se sensibilizan en dos bandas paralelas al cordón de soldadura levemente alejadas de éste.

### **1.7.2. Formación de fisuras y el rol de la ferrita**

La formación de fisuras de solidificación se da bajo condiciones de uniones extremas, produciendo las fisuras alrededor de la soldadura. Una cantidad pequeña de ferrita, alrededor de un 2 a 5%, liberará a la soldadura de las fisuras de solidificación. La ferrita aumenta el tamaño de grano, lo cual reduce la concentración de segregaciones en impurezas dañinas, que permanecen dentro de los límites y propicia la nucleación de fisuras.

La presencia de pequeñas cantidades de ferrita provee un número de soluciones, evita la fisuración en caliente, mejora la resistencia mecánica y en algunas ocasiones la resistencia a la corrosión. La cantidad de ferrita no debe ser mayor de 12 - 15% debido a que ella, en el diagrama Fe-Cr, se transforma en fase sigma, aumentando los riesgos de fisuración, así como también disminuye la resistencia a la corrosión. ( Ramón Cortes, P., Jaime Villanueva A., Ernesto Ponce L., 2004.)

### 1.7.3. Fase sigma

La fase sigma es un compuesto intermetálico de hierro (Fe) – cromo (Cr) duro y frágil, que puede ser removido mediante un calentamiento a la temperatura de 1010°C, en donde éste se disolverá, como muestra la Figura 1.27. Estos son los pequeños trazos rectos y negros que se encuentran en forma desordenada. Además, se observa una grieta que cruza la micrografía por el centro.

La formación de esta fase, se produce a trabajos de altas temperaturas 590°C a 930°C, o a la fabricación de piezas que requieren tener un tratamiento térmico de alivio de tensiones, reduciendo notablemente su ductilidad. A temperaturas de 730°C, la fase sigma se puede formar rápidamente, pero cuando se tiene temperaturas a bajas es necesario un mayor tiempo para su formación. Una variación en la composición, cambiará la velocidad de formación de esta fase y la temperatura a la cual se inicia.

( Ramón Cortes, P., Jaime Villanueva A., Ernesto Ponce L., 2004.)



Figura 1.27. Fase sigma

Fuente: ( Ramón Cortes, P., Jaime Villanueva A., Ernesto Ponce L., 2004.)

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1. Introducción

Esta sección estará orientada a conocer la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 con el proceso de soldadura GMAW, para lo cual se realizará el ensayo de soldabilidad de Houldcroft según el ASM Handbook Volume 06 Welding, Brazing and Soldering, se detallarán las condiciones generales de los equipos, diferencias entre las transferencias de cortocircuito y spray y los materiales que se utilizarán para tener un correcto proceso. Luego se procederá a la calificación del proceso de soldadura el cual será evaluado con el código ANSI/AWS D1.6, analizando el comportamiento mecánico con los ensayos de tracción y doblado de cara y raíz; además se utilizará la ayuda de ensayos no destructivos para determinar la fiabilidad de la unión soldada y evaluar la calidad del cordón. Finalmente, se analizará la estructura del material, con un estudio metalográfico en el acero AISI 304, en donde se observarán los cambios en la estructura del material debido al proceso de soldadura.

### 2.2. Selección del material base

El material utilizado será el acero inoxidable austenítico AISI 304 con espesores de 3 y 6 [mm], el cual es usado en aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte. Se ha escogido este tipo de material debido a la extensa gama de aplicaciones industriales que existen en el mercado, con la finalidad de crear procesos o procedimientos que especifiquen la manera correcta de hacer uniones usando el proceso de soldadura.

#### 2.2.1. Tamaño de las placas

El tamaño de las placas es de 250 x 300 [mm] cuyos espesores son de 3 y 6 [mm], donde se tendrá cuatro placas debido a que se utiliza 2 para transferencia en spray y 2 para cortocircuito.

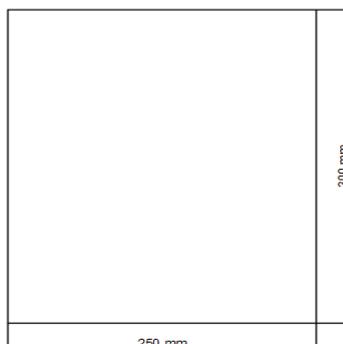


Figura 2.1. Esquema de medidas de probetas

Fuente: Propia

## 2.3. Selección del proceso de soldadura

Considerando que el acero inoxidable es soldado con la mayoría de procesos, se permite experimentar con el proceso GMAW ya que es un proceso que tiene excelentes características de facilidad y de presentación.

Se busca tener los parámetros de soldadura para la experimentación del acero inoxidable AISI 304. A su vez se trabaja con los dos tipos de transferencia que se menciona a continuación en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Modos de transferencia en el proceso de soldadura MIG.

Características	Spray	Corto circuito
Espesores	3 – 6 [mm]	3 – 6 [mm]
Posición	Plana	Plana
Velocidad relativa de deposición	La más alta	La más alta
Diámetro del alambre	0.9 [mm]	0.9 [mm]
Corriente de soldadura	150 – 500 [A]	50 – 225 [A]
Voltaje	24 – 40 [V]	14 – 22 [V]
Protección del gas	100% Ar	100% Ar

Fuente: (Propia)

## 2.4. Especificaciones del proceso de soldadura (WPS)

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

Los parámetros incluidos en los WPS que se adjuntan en el ANEXO I han sido cuidadosamente seleccionados de acuerdo al material de aporte seleccionado y buscando las condiciones óptimas para realizar los distintos tipos de transferencias, de tal modo que la soldadura no presente ninguna dificultad y cumpla con las normas requeridas para que cumpla con una soldadura de calidad.

## 2.5. Selección del material de aporte

### 2.5.1. Alambre o material de aporte

El alambre de aporte deberá ser compatible con el metal base y brindar los depósitos resistentes al agrietamiento que sean iguales o mejores que el metal base en condiciones a la resistencia mecánica, tenacidad y corrosión. Por lo que alambre seleccionado es el ER 308L de LINCOLN ELECTRIC a continuación, se describen sus características.

Alambre de aporte por la AWS ER 308L o Alambre MIG 308L

#### Descripción

El alambre 308L está diseñado para cumplir los requisitos de los aceros inoxidable que utilizan procesos de soldadura con gas inerte MIG. Brinda un análisis químico equilibrado por lo que se presentan buenas propiedades del metal depositado y propiedades mecánicas, además se caracteriza por producir un arco estable de transferencia spray y cortocircuito cuyo depósito es de excelente forma y apariencia.

#### Características principales

- Es un electrodo para aceros inoxidable austeníticos
- Tiene un revestimiento rutílico color blanco, que permite soldar con corriente alterna o corriente continua.
- Se puede soldar en todas las posiciones (plano, horizontal, vertical, sobrecabeza).
- La escoria se desprende fácilmente por lo que se puede tener una muy buena reanudación de arco se recomienda usarlo en soldadura intermitente.
- El contenido máximo de 0,04% de carbono según normas AWS, evita la formación de carburos y la precipitación de ellos en los bordes de grano, dando así una excelente protección contra la corrosión intergranular.

#### Aplicaciones típicas

- Aceros inoxidable 304, 304L, 308, 308L, 321 y 347.
- Equipos y estanques de proceso, Bombas, intercambiadores de calor
- Almacenamiento de productos alimenticios y químicos

## Información técnica

Tabla 2.2. Composición química del alambre según la norma AWS

Característica	Detalle Porcentual [%]
Composición química del metal depositado	C 0.02; Mn 1.90; Si 0.038; P 0,025; S 0,01; Cr 19.8; Ni 9.8; Mo 0,19.

Fuente: (Propia)

## Propiedades mecánicas

- Resistencia a la tracción 570 MPa
- Elongación en 50[mm]: 44%
- Energía absorbida 90J a 0° C

## Amperajes recomendados

Tabla 2.3. Amperajes recomendados.

Diámetro [mm]	Amperaje		Voltaje [V]
	mín.	máx.	
0.9	125	300	18-32

Fuente: (Propia)



Figura 2.2. Alambre ER 308L de 10 [Kg].

Fuente: (Propia)

## 2.6. Aplicación de los diagramas

### 2.6.1. Diagrama Schaeffler

Como se mencionó anteriormente, el diagrama de Schaeffler nos ayuda a predecir la solidificación del metal soldado en función a los aleantes químicos, además del contenido de ferrita de acuerdo a su composición. Para determinar los valores del

material base en el diagrama es necesario calcular el  $Cr_{equi.}$  y  $Ni_{equi.}$ . Con el uso respectivo de sus ecuaciones mencionadas en el capítulo uno, los valores calculados se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Valores de  $Cr_{equi.}$  y  $Ni_{equi.}$  con el Diagrama Schaeffler

Material		AISI 304
$Cr_{equi.}$	Máx.	21.14
	Mín.	19.14
$Ni_{equi.}$	Máx.	13.9
	Mín.	9.9

Fuente: (Propia)

### 2.6.1.1. Diagrama Schaeffler para el material base

Los aceros inoxidable se solidifican del modo AF, donde lo que se solidifica primero es la austenita y lo que está presente en la microestructura es la ferrita de tipo intercelular, la morfología que se tiene en la solidificación es celular dendrítico. Con ello no se produce el agrietamiento.

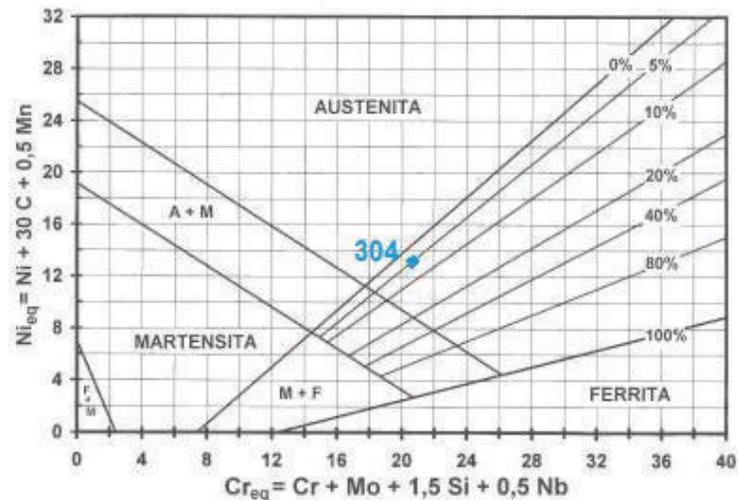


Figura 2.3. Ubicación del acero inoxidable 304 en el Diagrama de Schaeffler según el  $Cr_{equi.}$  y  $Ni_{equi.}$  calculados en la tabla 2.4 para el material base.

Fuente: (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

### 2.6.2. Diagrama WRC – 92

#### 2.6.2.1. Diagrama WRC – 92

Para calcular el cromo y níquel equivalente se utilizan los valores de la Tabla 1.2, cuyos valores obtenidos se colocan en el diagrama WRC – 92 como se indica en la Figura 2.4. donde se tiene los tipos de solidificación y el número de ferrita, calculados con las

ecuaciones 1.4 y 1.5. A continuación en la siguiente tabla mostraremos los resultados obtenidos.

Tabla 2.5. Valores de  $Cr_{equi.}$  y  $Ni_{equi.}$  con el Diagrama WRC.

Material		AISI 304
$Cr_{equi.}$	Máx.	20.00
	Mín.	18,00
$Ni_{equi.}$	Máx.	15,30
	Mín.	11,20

Fuente: (Propia)

### 2.6.2.2. Diagrama WRC – 92 para el material base

Se ubican los valores máximos y mínimos en la Figura 2.4 obtenidos para el acero 304. Donde se observa que posiblemente los tipos de solidificación son AF y FA.

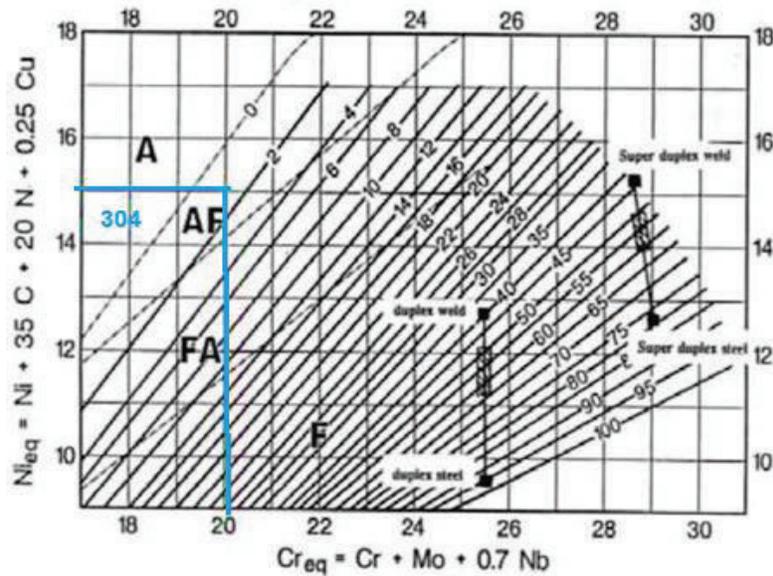


Figura 2.4. Posibles tipos de solidificación para el acero inoxidable 304.

Fuente: ( D. J Kotecki and T. A. Siewert, May 1992)

### 2.6.2.3. Material aporte

Tabla 2.6. Valores de  $Cr_{equi.}$  y  $Ni_{equi.}$  con el Diagrama WRC.

Material	308 L
$Cr_{equi.}$	19.99
$Ni_{equi.}$	10.5

Fuente: (Propia)

Los valores obtenidos se colocan en el diagrama WRC – 92 del material aporte y se los puede apreciar en la Figura 2.5.

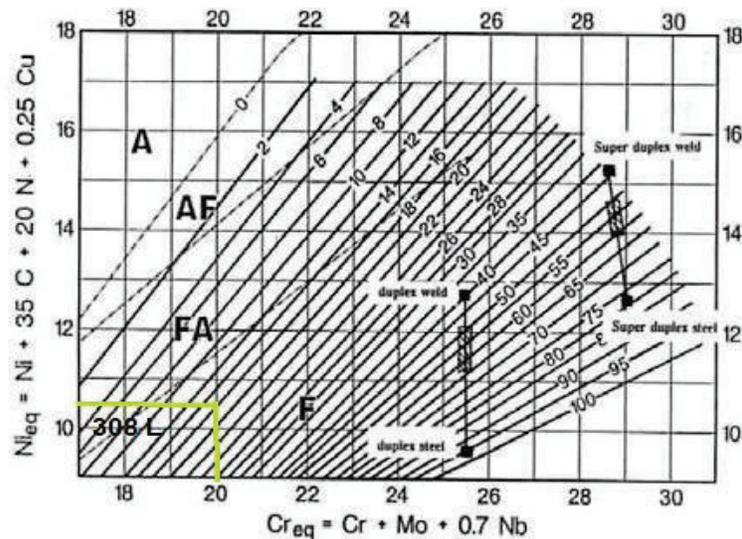


Figura 2.5. Diagrama WRC para el material aporte ER 308L.

Fuente: (D. J. Kotecki & A. Siewert, 2017)

## 2.7. Descripción del gas de protección

De acuerdo al metal base es necesario la selección de un gas inerte como lo es el argón debido a que es un gas naturalmente presente en el aire con una concentración aproximada del 1%, es un gas incoloro e inodoro. Además, garantiza una correcta protección de la soldadura a la atmosfera y permite obtener un cordón de soldadura de buena calidad. Sin embargo, según el electrodo seleccionado, se elige como gas de protección el argón al 100%, debido a que la ficha técnica del electrodo establece el uso de argón puro. En la Figura 2.6. se puede observar el tanque de argón de 6 m<sup>3</sup> y sus características en el Anexo II.



Figura 2.6. Tanque de Argón al 100%.

Fuente: Propia.

Para el caso de la soldadura del metal base con el electrodo seleccionado y los tipos de transferencia a usar, en la hoja técnica del mismo detalla el tipo de gas a ser utilizado y también indica el caudal necesario del gas en base al diámetro del material de aporte en donde de acuerdo a las transferencias de cortocircuito y spray se establece usar alrededor de 12 y 16  $lt/min$ .

## 2.8. Preparación de las juntas y diseño de la unión

Una vez cortadas las placas según lo que especifica el código AWS D1.6, se procede a la limpieza de las mismas con ayuda de una esmeriladora y discos esmeriladores para acero inoxidable.

Dado que la unión a realizar es a tope, se considera realizar un bisel con un ángulo de  $60^\circ$  en las placas de 3 y 6 [mm] para mejorar la penetración. La Figura 2.7. muestra la sección transversal de las placas a ser soldadas.

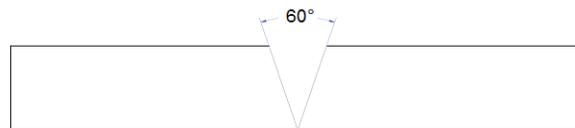


Figura 2.7. Ángulo de apertura entre placas para soldadura.

Fuente: Propia



Figura 2.8. Preparación de probetas con esmeril.

Fuente: Propia

### 2.8.1. Pre calentamiento de las placas

Por lo general, no se recomienda someter a las placas de acero inoxidable austenítico a un pre calentamiento previo a la soldadura, debido a deteriora la resistencia a la corrosión de estos aceros como consecuencia de los fenómenos de precipitación de compuestos de carburo de cromo.

Además, aumenta el riesgo de producir una fisuración en caliente en la soldadura y de generar una distorsión y deformaciones debido al mayor coeficiente de dilatación de los aceros inoxidable austeníticos respecto a otros aceros.

## 2.9. Soldadura de las placas

A continuación, se menciona algunas consideraciones al momento de realizar el proceso de soldadura.

El primer punto es la elaboración del WPS, el cual se detalló anteriormente. Este documento asegura una mayor precisión en la elaboración del cordón de soldadura. Una vez elaborado el WPS, el soldador tiene el conocimiento completo de las directrices que debe seguir para poder fabricar el cordón y cumplir así con las normas requeridas.



Figura 2.9. Bisel de 60° en el acero AISI 304

Fuente: Propia.

Una vez realizada la limpieza se procede a colocar las placas en la posición 1G para la soldadura del material base como muestra la Figura 2.9.

### 2.9.1. Equipo de soldadura

En la siguiente Figura 2.10. se muestra el equipo de soldadura que se utilizó para el procedimiento GMAW y para el ensayo de soldabilidad de Houldcroft.



Figura 2.10. Equipo de soldadura MIG.

Fuente: Propia

Para evitar defectos de deformación en el cordón de soldadura se sueldan platinas al inicio y final entre las placas, tomando en cuenta la distancia correcta de separación del acero se muestra en la Figura 2.11.



Figura 2.11. Colocación de respaldos entre las placas.

Fuente: Propia

A continuación, se muestra en la Figura 2.12. la realización del cordón de soldadura y después se puede apreciar en las Figuras 2.13. y 2.14. las juntas soldadas con los parámetros considerados del WPS.



Figura 2.12. Realización del cordón de soldadura.

Fuente: Propia



Figura 2.13. Soldadura GMAW  $e = 6$ [mm].

Fuente: Propia



Figura 2.14. Cordón de soldadura GMAW e = 3 [mm].

Fuente: Propia.

Una vez obtenido el cordón de soldadura se deja enfriar las placas a temperatura ambiente. Después que se han enfriado se procede a la respectiva limpieza, con la finalidad de remover las impurezas que puedan aparecer en la superficie del cordón. Para realizar la limpieza es necesario utilizar un cepillo y una grata de acero inoxidable para evitar posible contaminación en el cordón.



Figura 2.15. Limpieza del cordón con el cepillo y grata de inoxidable.

Fuente: Propia.

## 2.10. Cálculo del aporte de calor generado (Heat Input)

El aporte de calor es la energía que se genera en el momento de la soldadura. Esta energía o aporte de calor está limitada por la eficiencia del proceso de soldadura usado. Se expresa normalmente en términos de Joule por milímetro ( $KJ/mm$ ). A continuación, se expresa la siguiente ecuación y se realiza los respectivos cálculos.

$$Q \left( \frac{KJ}{mm} \right) = \frac{V[\text{Voltios}] * I[\text{Amperios}]}{\text{velocidad} [mm/s] * 1000} * f$$

Donde “f” es el factor de eficiencia del proceso de soldadura utilizado, para lo cual el valor a utilizar es del 60 – 70 % en el proceso GMAW. (Fosca, 2002)

Tabla 2.7. Resultados de Calor generado de la soldadura.

Transferencia del AISI 304	Espesor [mm]	Intensidad [A]	Voltaje [V]	Velocidad [mm/s]	Aporte de calor [KJ/mm]
Spray	3	140	25	6.02	4.06
Cortocircuito	3	83	21	4.61	2.65
Spray	6	151	25.1	6.37	4.16
Cortocircuito	6	119	21	4.78	3.66

Fuente: (Propia)

## 2.11. Ensayos No Destructivos para calificación de soldadura

### 2.11.1. Inspección visual

Para realizar la inspección visual se utiliza un lente convexo, donde se observa las probetas con el objetivo principal de analizar superficialmente el cordón y así buscar fisuras o algún tipo de discontinuidad y también en base a los criterios de aceptación ver si esta soldadura es buena o no como lo indica la norma.

Además, se va señalando las posibles discontinuidades para luego con ayuda de las tintas penetrantes confirmar o negar dichas condiciones.



Figura 2.16. Lente utilizado para determinar discontinuidades.

Fuente: Propia



Figura 2.17. Señalización de posibles defectos en probetas con espesor 3 mm, el (1) transferencia Spray y (2) Transferencia cortocircuito.

Fuente: Propia



Figura 2.18. Señalización de posibles defectos en probetas con espesor 6 mm, el (1) transferencia Spray y (2) Transferencia cortocircuito.

Fuente: Propia

### 2.11.2. Tintas Penetrantes Fluorescentes

Después de hacer la inspección visual se procede a realizar el ensayo de tintas penetrantes fluorescentes fundamentado por la norma ASTM E – 165. A continuación, se muestra los productos que se utilizan como lo es el penetrante, removedor y revelador:



Figura 2.19. Tintas fluorescentes.

Fuente: Propia

Se empieza limpiando la superficie del cordón con un paño y con un poco de thinner de manera uniforme para retirar cualquier contaminante para después secarla.



Figura 2.20. Secado después de la limpieza en la superficie.

Fuente: Propia

Aplicar el líquido penetrante al cordón de soldadura. Por un tiempo de 20 minutos.



Figura 2.21. Aplicación de penetrante.

Fuente: Propia

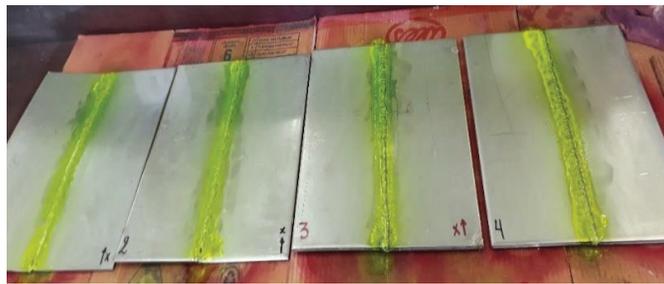


Figura 2.22. Reposo del penetrante.

Fuente: Propia

Remover el penetrante de la superficie con agua con un caudal contante y con un trapo limpio libre de pelusas. La probeta deberá quedar completamente seca. El tiempo de lavado con agua será de 2 minutos.



Figura 2.23. Lavar exceso de penetrante.

Fuente: Propia

Aplicar removedor en un paño de algodón limpio y realizar la limpieza del cordón de soldadura con ayuda de una linterna se puede ir viendo que no quede sucio.



Figura 2.24. Remoción del penetrante en el cordón.

Fuente: Propia

Aplicar el revelador para que absorba el penetrante que se encuentra en las discontinuidades, formando indicaciones fluorescentes, sobre el fondo blanco. Se deberá esperar unos 15 minutos.



Figura 2.25. Dejar secar revelador.

Fuente: Propia

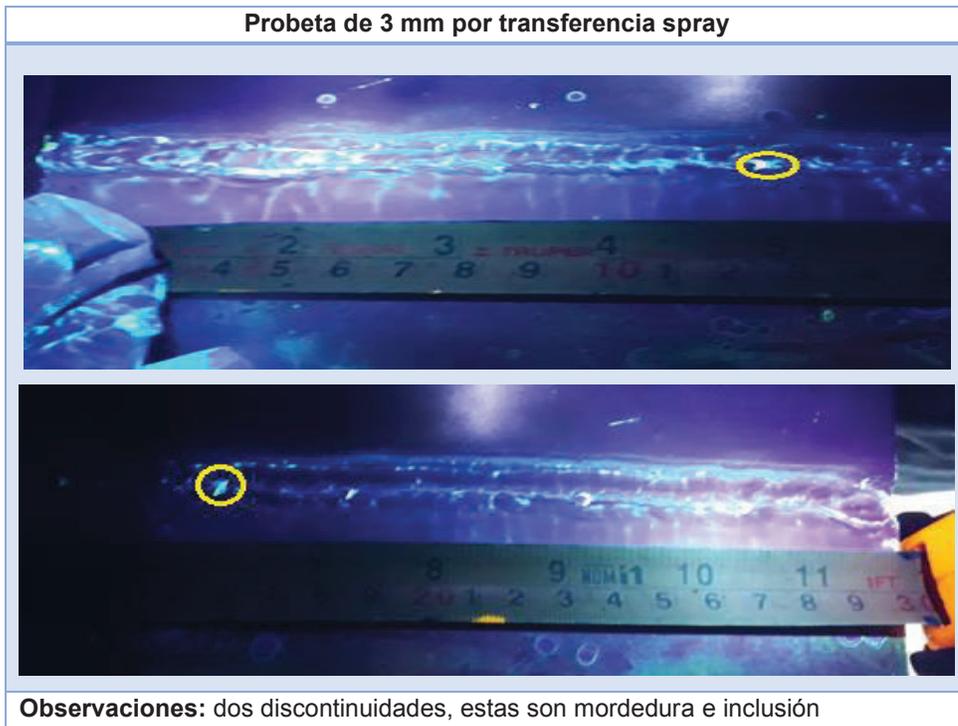
Utilizar una linterna para iluminar la superficie del cordón sobre la que se hizo el ensayo, además se lo hizo en cabina oscura para tener una mejor apreciación. Inspección y registro de discontinuidades en el cordón de soldadura por los distintos tipos de transferencias obtenidos por el proceso GMAW.

Tabla 2.8. Resultados transferencia por cortocircuito.



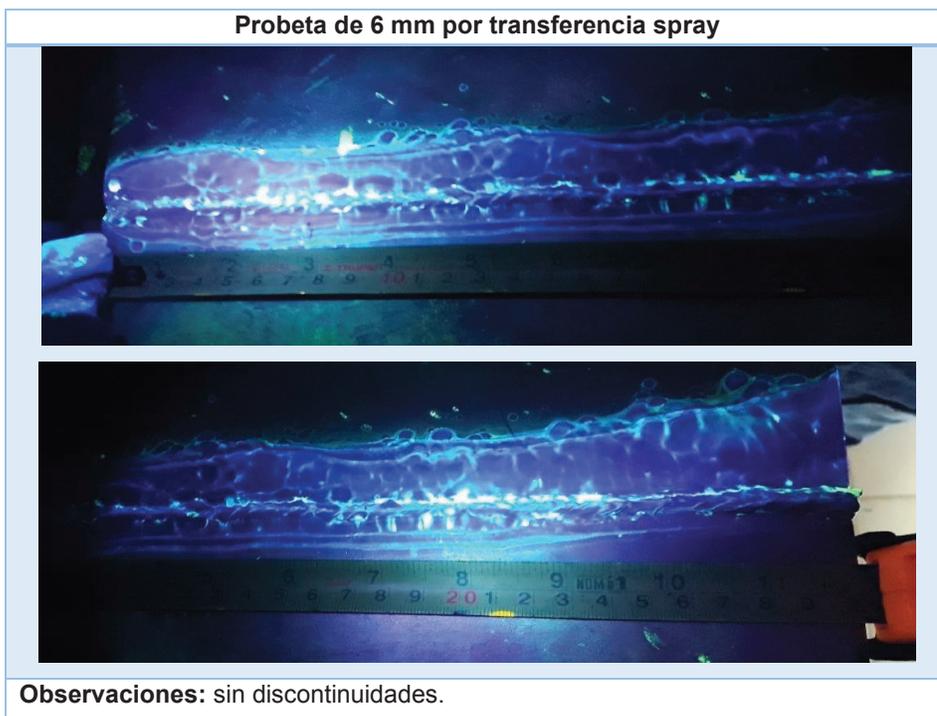
Fuente: (Propia)

Tabla 2.9. Resultados transferencia por spray.



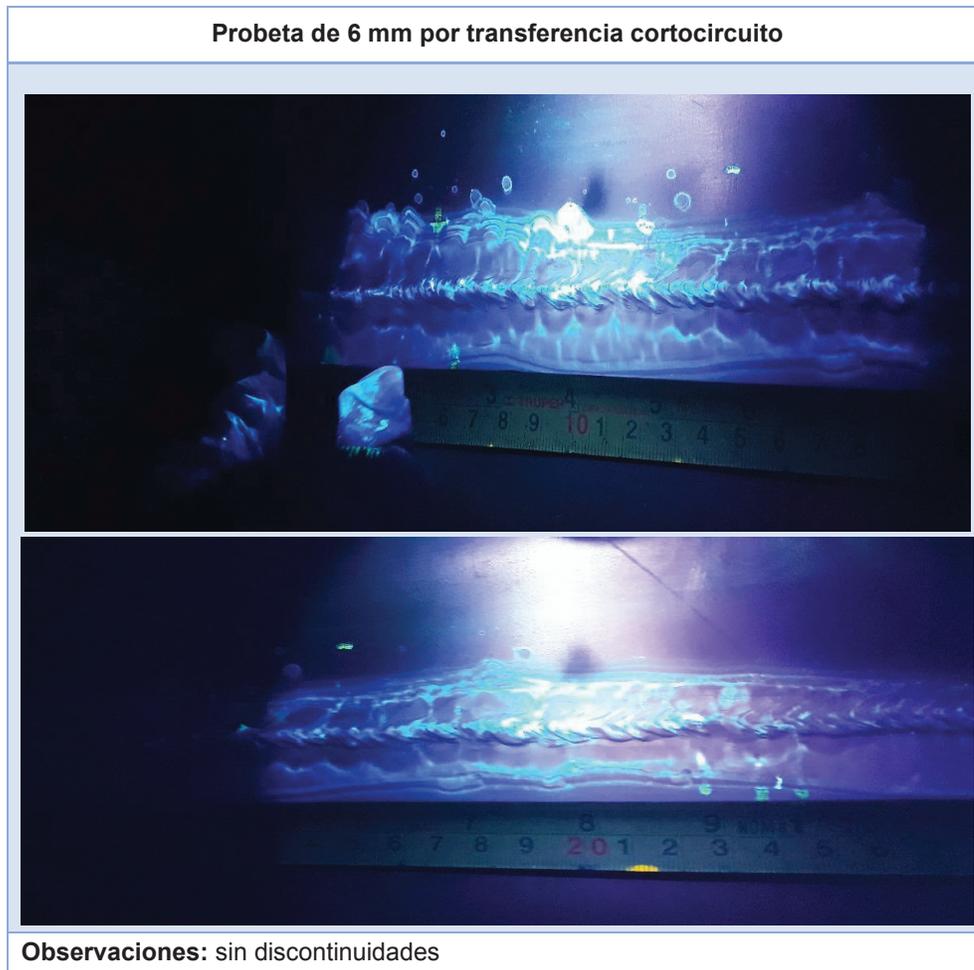
Fuente: (Propia)

Tabla 2.10. Resultados transferencia por spray.



Fuente: (Propia)

Tabla 2.11. Resultados transferencia por cortocircuito.



Fuente: (Propia)

### 2.11.3. Radiografía Industrial

Después de realizar la inspección visual y tintas penetrantes se procede a la inspección radiográfica con el objetivo de mejorar el análisis de las probetas y asegura que existe o no algún defecto que perjudique la soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304.

El ensayo se lo realiza en el Laboratorio de END de la Escuela Politécnica Nacional basado en la norma ASTM E 94.

Para hacer la toma de radiografía es necesario calcular el tiempo de exposición, por lo que se toma en consideración el espesor de la placa y la distancia a la que se coloca la probeta. A continuación, se muestra en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Espesores para probetas ensayadas.

Probeta	Espesor [mm]	Distancia [cm]
Probeta 1	3.0	52
Probeta 2	3.0	52
Probeta 3	6.0	52
Probeta 4	6.0	52

Fuente: (Propia)

Después de obtener este dato procedemos al diagrama de exposición del equipo de rayos X, Figura 2.26., el cual nos dará el valor de tiempo dependiendo del kilo voltaje y amperaje a ser usado.

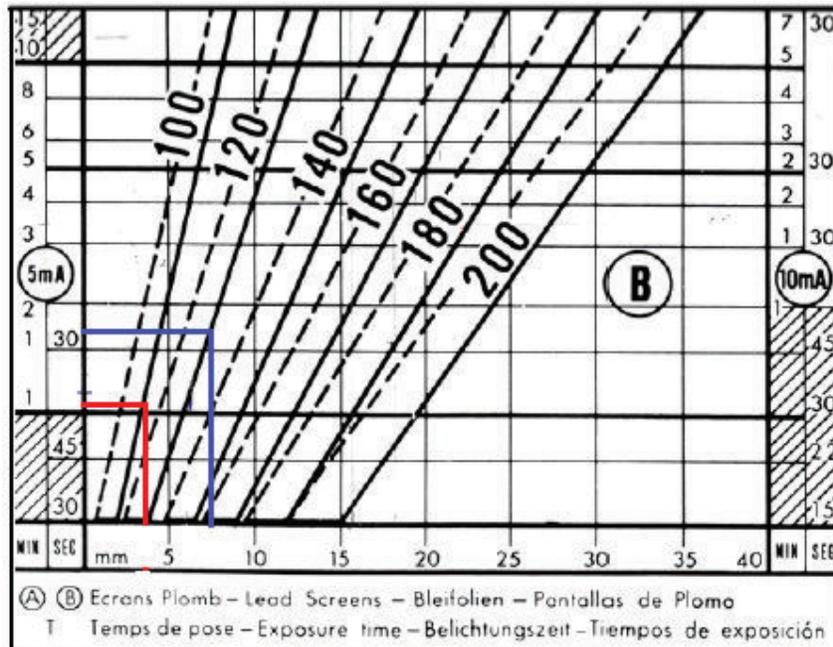


Figura 2.26. Diagrama de operación de la máquina de rayos x, del laboratorio de END.

Fuente: Propia

Se utiliza un kilo voltaje de 100 Kv para probetas de 3 mm y 120 Kv para probetas de 6 mm y un amperaje de 5mA.

Dado que el tiempo de exposición se ve afectado por el tipo de película, densidad, distancia y ciertos factores se corrige el tiempo del diagrama usando la siguiente formula:

$$t_{exp} = t_c * f_n * f_p * f_D * f_v$$

Donde:

$t_{exp}$ : tiempo de exposición.

$t_c$ : tiempo de diagrama.

$f_n$ : Factor de corrección por densidad.

$f_p$ : Factor de corrección por película.

$f_D$ : Factor de corrección por distancia.

$f_v$ : Factor de corrección por varios

Para completar los valores faltantes es necesario usar la Tabla 2.13

Tabla 2.13. Factores de corrección.

Densidad		Película		Distancia	
N = 1	T x 1	Gevaert	Structurix	35 cm (14')	T x 0,25
N = 1,5	T x 1,6	D 10 Tx1	D 7 Tx1	50 cm (20')	T x 0,5
N = 2	T x 2,2	D 7 Tx3,7	D 4 Tx3,7	70 cm (27,5')	T x 1
N = 2,5	T x 3	D 4 Tx15	D 2 Tx15	100 cm (40')	T x 2
		A	B	140 cm (55')	T x 4
				200 cm (80')	T x 8,8

Fuente: (Cely, 2014)

$$t_{exp} = t_c * f_n * f_p * f_D * f_v$$

$$t_{exp\ 6mm} = 69 * 2.2 * 1 * 0.52 * 1$$

$$t_{exp\ 6mm} = 78.93\ s$$

$$t_{exp\ 6mm} = 1\ \text{min y } 32\ s$$

$$t_{exp} = t_c * f_n * f_p * f_D * f_v$$

$$t_{exp\ 3mm} = 42 * 2.2 * 1 * 0.52 * 1$$

$$t_{exp\ 3mm} = 48\ s$$

Luego de obtener el tiempo se procede a cortar la película de acuerdo a la longitud de la probeta, para nuestro caso son cuatro películas de 30 cm, al momento de cortar se lo hace en el cuarto oscuro y evitando el contacto con la luz para que no se vea.

Después de tener las películas cortadas lo siguiente es etiquetar las películas con las letras de plomo para su posterior identificación, utilizando el indicador de calidad de imagen 1B.

Se recaldea el equipo de rayos x y se realiza la toma de radiografías centrando la película, ya finalmente se procede a revelar las mismas en el cuarto oscuro.

A continuación, se describe el siguiente proceso a seguir:

- Retirar las letras de plomo y el indicador
- Preparar los químicos para el revelado y fijador.

- Sacar las películas retirando el plomo que se encuentra como protección
- Colocar las películas con cuidado en el primer baño de revelado por 5 minutos, evitando ser sobrepuestas.
- Después sumergir las películas en el baño de parada el cual es agua por un tiempo de 2 minutos.
- Las películas pasaran al fijador por un tiempo de 10 minutos a los 3 minutos se puede sacar las películas y ver que discontinuidades se tiene y de ahí dejar que cumpla el tiempo establecido.
- Ya casi para terminar se pone las películas en el último baño de para de 15 minutos.
- Finalmente se procede a dejar secar las películas por aproximadamente 30 minutos. Una vez secas se procede a la interpretación en el negatoscopio.



Figura 2.27. Negatoscopio.

Fuente: Propia

## 2.12. Ensayos Destructivos

### 2.12.1. Maquinado y preparación de las probetas

Con la finalidad de cumplir los requerimientos establecidos en el WPS, se procede a la preparación de las probetas para la realización de los ensayos de doblado de cara, doblado de raíz, tracción y Houldcroft.

La preparación de las probetas y los respectivos cortes de las placas se los hace ajustándose a los requerimientos y dimensiones especificadas en el código AWS D1.6.

### 2.12.2. Requerimiento del código AISI AWS D1.6

Para la elaboración del presente proyecto es necesario el establecimiento de procedimientos y requisitos mínimos que debe cumplir la junta soldada por lo que es indispensable basarse en el código AISI AWS D1.6.

A continuación, se presentan algunos requisitos y ensayos que se realizarse a las probetas especificándolos en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Ensayos requeridos del código AWS D1.6.

ESPESOR (T) [mm]	Rango de espesor calificado [mm]		MACROGRAFIA	ENSAYOS			
	Mín.	Máx.		TENSIÓN	DOBLADO LATERAL	DOBLADO DE CARA	DOBLADO DE RAIZ
2 a 10	2	2T	3	2	-	2	2
10 a 20	5	2T	3	2	4	2	2
					(ver nota)	(ver nota)	(ver nota)
> a 20	5	Sin Limite	3	2	4	-	-

Nota: Cuatro doblados laterales, o, dos doblados de raíz y dos doblados de cara

Fuente: (Código AWS D1.6, 1999)

### 2.12.2.1. Tamaño de las probetas ensayadas

Para la adquisición de las probetas, el cordón de soldadura debe tener las medidas específicas que permitan realizar la cantidad de ensayos necesarios. La Figura 2.28 muestra la división e estructuración de las probetas para realizar la calificación de manera adecuada y correcta.

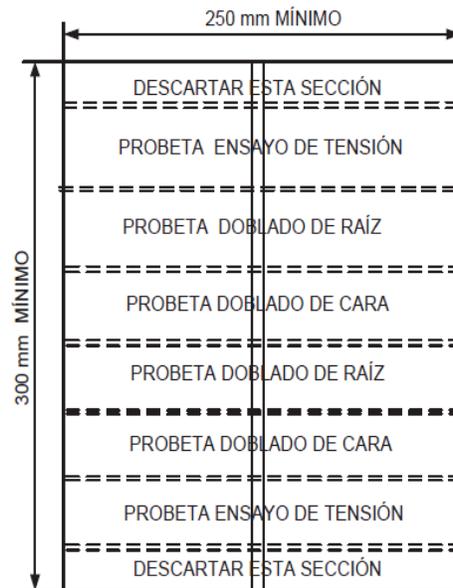


Figura 2.28. Tamaño de la probeta seleccionada para la realización de ensayos.

Fuente: (Código AWS D1.6, 1999)

## **2.12.3. Criterio de aceptación según el código AWS D1.6**

### **2.12.3.1. Inspección Visual**

- a. La soldadura no debe presentar fisuras.
- b. Las mordeduras no deben exceder de 1 [mm] y el refuerzo del cordón no debe sobrepasar los 3 [mm].
- c. Para la penetración completa de la junta, sin placa de refuerzo, la raíz de la soldadura debe ser inspeccionada y no presenta evidencia de fisuras, fusión incompleta o inadecuada penetración.
- d. El sobre espesor de la raíz (melt through) no debe pasar los 3 [mm].

### **2.12.3.2. 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 las discontinuidades en la superficie. Para su aceptación es necesario que se cumplan los requisitos siguientes:

- Las discontinuidades medidas en cualquier dirección en la superficie no deben tener más de 3 [mm].
- La suma de todas las discontinuidades presentes de entre 1 [mm] y 3 [mm] no deben sobrepasar los 10 [mm] del total.

### **2.12.3.3. Ensayo de Tracción**

El ensayo es utilizado para determinar la resistencia a la tracción de la soldadura. Antes de iniciar con el ensayo se debe tomar las dimensiones de espesor y ancho de la sección reducida de las probetas.

Para que exista su aceptación son necesarios los siguientes criterios:

- La resistencia a la tracción no debe ser menor al límite inferior especificado en la tensión del material base.
- Cuando se usa un metal de aporte con una resistencia a la tracción menor que el material base, la resistencia a la tracción obtenida no debe ser menor que la especificada para el tipo de metal de aporte.

### **2.12.3.4. Macrografías**

Para realizar a las macrografías las probetas deben estar correctamente terminadas por lo que la probeta debe ser desbastada utilizando lijas sobre el disco giratorio de la pulidora.

Esto se lo hace con la finalidad de que se pueda determinar la extensión de la zona de fusión y cualquier tipo de discontinuidad.

### 2.12.3.5. Micrografías

La micrografía se la hace con la finalidad de conocer la microestructura obtenida en el cordón de soldadura, zona afectada por el calor y del metal base.

Las probetas son pulidas en la pulidora del paño en suspensión de agua con el propósito de remover los defectos dejados por el desbaste, luego se procede al ataque químico de la superficie soldada utilizando agua regia. Después se coloca la probeta en el microscopio metalográfico, con un aumento de 100X y 500X para obtener las imágenes.

### 2.12.4. Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción según el código AWS D1.6, requiere que primero se realice el rayado en la probeta para proceder después al corte como lo indica la Figura 2.29.

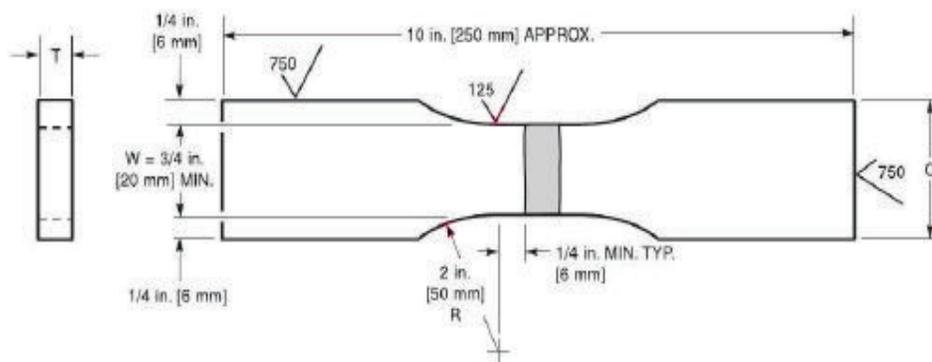


Figura 2.29. Dimensiones de la probeta para el ensayo de Tensión.

Fuente: (Código AWS D1.6, 1999)

Se analiza las 8 probetas soldadas por transferencia de cortocircuito y spray. El número de probetas expuestas al ensayo de tensión se enumeran a continuación:

Tabla 2.15. Número de probetas para el ensayo de Tensión.

MATERIAL	ESPESOR [mm]	TRANSFERENCIA	Nº PLACAS ENSAYADAS
AISI 304	3	SPRAY	2
	3	CORTOCIRCUITO	2
	6	SPRAY	2
	6	CORTOCIRCUITO	2

Fuente: (Propia)



Figura 2.30. Probeta preparada para ensayo de tracción.

Fuente: Propia

Verificadas las dimensiones de las probetas se procede a colocar un líquido para localizar el cordón de soldadura y luego se lo señala para finalmente ubicarlo en la maquina universal de ensayos.



Figura 2.31. Identificación de cordón de soldadura en junta.

Fuente: Propia

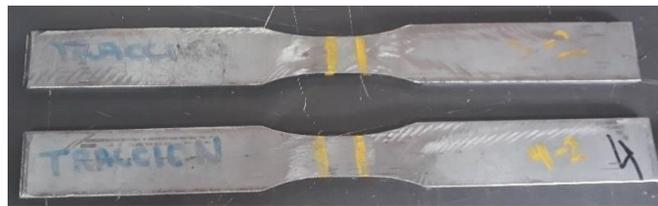


Figura 2.32. Señalización de cordón en junta soldada.

Fuente: Propia



Figura 2.33. Colocación de probeta en la maquina universal de ensayos.

Fuente: Propia

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción se muestran en la Tabla 2.16. El informe técnico del ensayo de tracción es otorgado por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos de la Facultad de Ingeniería Mecánica se encuentra en el Anexo.

Tabla 2.16. Resultados de probetas ensayadas.

Probeta	Tipo de transferencia	Carga máxima registrada (Lbf)	Resistencia (ksi)	Fractura
T 1-1	Spray	6530	75.2	Material base
				
T 1-2	Spray	7130	79.3	Material base
				
T 2-1	Cortocircuito	7820	78.7	Junta soldada
				
T 2-2	Cortocircuito	8190	82.4	Material base
				
T 3-1	Cortocircuito	14880	69.8	Junta soldada
				

T 3-2	Cortocircuito	14300	70.4	Junta soldada
				
T 4-1	Spray	17320	82.8	Junta soldada
				
T 4-2	Spray	15610	79.5	Junta soldada
				

Fuente: (Propia)

### 2.12.5. Ensayo de Doblado

El ensayo de doblado se lo hace para justificar y dar seguimiento al comportamiento del material para ello se usa el código AWS D1.6, además con el ensayo se puede conocer la ductilidad y el grado de rigidez. A las probetas se las prepara con la ayuda de una amoladora puliendo la zona de soldadura para después colocarla en la maquina universal. La Figura 2.34. muestra las dimensiones que se necesita para realizar el ensayo de doblado.

Cuando se termina de realizar el procedimiento de limpieza, se realiza los ensayos de doblado de raíz y cara, con los que se puede verificar la calidad del cordón, penetración y fusión entre el material aporte y el material base.

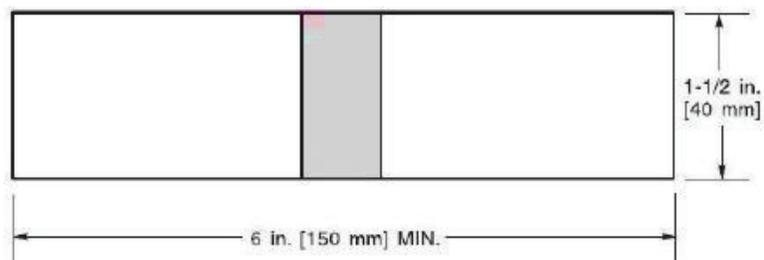


Figura 2.34. Dimensiones de la probeta para ensayo de doblado de raíz y doblado de cara.

Fuente: (Código AWS D1.6, 1999)

El número de probetas que son sometidas al ensayo se establece en el código que son 2 para el doblado de raíz y 2 para el doblado de cara para esto se utilizan 16 probetas. La identificación de las probetas se muestra a continuación:

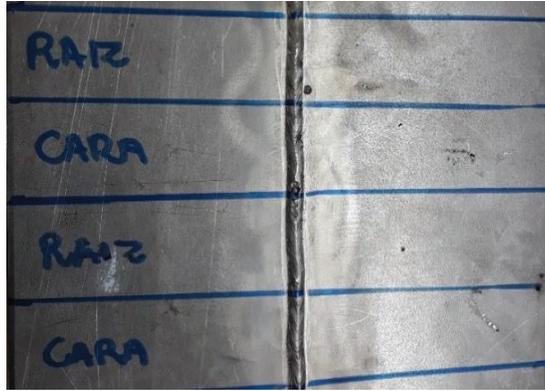


Figura 2.35. Identificación de las probetas para el ensayo de doblado.

Fuente: Propia

Después de identificar y marcar las probetas, se coloca a punto en la maquina universal del laboratorio de esfuerzos y se procede con en el ensayo.



Figura 2.36. Probeta colocada en la máquina para ensayo de doblado.

Fuente: Propia

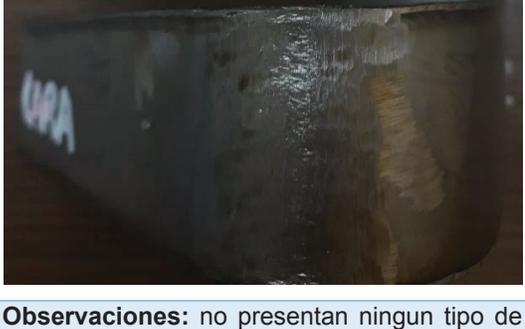
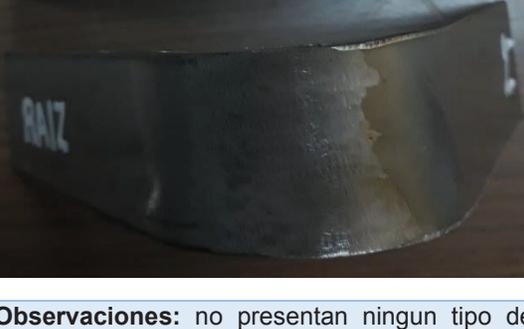
En las Tablas 2.18. hasta la Tabla 2.20. se detallan los resultados de doblado de cara y raíz al material base AISI 304 por el tipo transferencia spray y cortocircuito cuyos espesores son de 3 y 6 [mm].

Tabla 2.17. Ensayo de doblado a probetas de espesor 3 mm con transferencia spray.

Doblado de Cara	Doblado de raíz
	
	
<p><b>Observaciones:</b> no presentan ningun tipo de discontinuidad.</p>	<p><b>Observaciones:</b> no presentan ningun tipo de discontinuidad.</p>

Fuente: (Propia)

Tabla 2.18. Ensayo de doblado a probetas de espesor 3 mm con transferencia cortocircuito.

Doblado de Cara	Doblado de raíz
	
	
<p><b>Observaciones:</b> no presentan ningun tipo de discontinuidad</p>	<p><b>Observaciones:</b> no presentan ningun tipo de discontinuidad.</p>

Fuente: (Propia)

Tabla 2.19. Ensayo de doblado a probetas de espesor 6 mm con transferencia cortocircuito.

Doblado de Cara	Doblado de raíz
	
	
<p><b>Observaciones:</b> presenta un tipo de discontinuidad.</p>	<p><b>Observaciones:</b> no presentan ningun tipo de discontinuidad.</p>

Fuente: (Propia)

Tabla 2.20. Ensayo de doblado a probetas de espesor 6 mm con transferencia spray.

Doblado de Cara	Doblado de raíz
	
	
<p><b>Observaciones:</b> no presentan ningun tipo de discontinuidad.</p>	<p><b>Observaciones:</b> no presentan ningun tipo de discontinuidad.</p>

Fuente: (Propia)

## 2.12.6. Inspección metalográfica

Para analizar la estructura del material, se realiza un estudio metalográfico en donde se analizan los cambios en la estructura del material debido al proceso de soldadura. A su vez se busca ilustrar la forma de estructura y los tipos de falla del material, por lo que se decide realizar macrografías y micrografías, donde las macrografías son utilizadas para observar el tipo de discontinuidad de la soldadura y en las micrografías se observa los distintos tipos de estructuras que determinan el comportamiento del material, cambios de estructuras debido a la ZAC, análisis del material de aporte y su unión con el metal base.

La preparación de las probetas inicia con la obtención de las muestras de cada tipo de transferencia y espesor, esto se lo realiza cortando con una sierra manual para mantener la temperatura de corte y así evitar la afectación a la estructura del material.

Ya cuando se tiene las probetas se las numera y se las lleva a la máquina de desbaste grueso y se empieza con el desbaste de cara y de ahí los laterales para ir dándole la forma.



Figura 2.37. Máquina para desbaste grueso.

Fuente: Propia

Después se procede a la limpieza del molde con alcohol y se deja secar, luego se realiza el montaje de dichas muestras en bakelita, que es un compuesto a base de resina poliéster para una manipulación adecuada de las probetas.

Se espera aproximadamente 30 minutos para obtener una solidificación, luego que la resina poliéster se endurece se procede al desprendimiento del molde, el cual se lo hace con mucho cuidado para evitar quebrar o romper la muestra.

Ya realizado el desmontaje se continua con el proceso de desbaste fino para lo que se utiliza lijas de agua de 240 y 600, el desbaste fino se lo realiza en la maquina pulidora FORCIMAT, la cual da un acabado superficial adecuado para realizar las metalografías.



Figura 2.38. Corte y montaje de juntas soldadas y material base.

Fuente: Propia



Figura 2.39. Proceso desbaste fino.

Fuente: Propia

Posteriormente se procede a realizar el pulido de las superficies de las muestras, para lo cual se usa un paño de tres micras, suspensión de diamante de 3 micras y lubricante de diamante a base de agua con lo que se obtiene un buen acabado superficial libre de rayas o manchas en el metal.



Figura 2.40. Pulidora FORZIPOL con paño de 3 micras.

Fuente: Propia

Una vez que la superficie tenga la apariencia de un espejo y no se observen manchas o rayas en la superficie del metal como se muestra en la Figura 2.41., se procede lavarlas con agua y limpiarlas con alcohol etílico para después realizar un secado de la superficie como lo muestra la Figura 2.42.



Figura 2.41. Secar la probeta de alcohol

Fuente: Propia



Figura 2.42. Observación de acabado para realizar metalografías

Fuente: Propia

Luego de eso se procede al ataque químico del cordón para ello se utiliza agua regia que consiste en la composición de ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) este compuesto es especialmente para acero inoxidable austenítico. Con ello se busca hacer visible la microestructura y visualizar la zona afectada por el calor.



Figura 2.43. Ataque químico del cordón.

Fuente: Propia

Finalmente, las probetas son llevadas al microscopio metalográfico del Laboratorio de Metalografía para el análisis de la estructura del material, para lo que se realiza tomas de 100X y 500X.



Figura 2.44. Probetas para metalografías

Fuente: Propia

### 2.12.6.1. Macrografías

Para la calificación del WPS un requerimiento necesario es realizar las macrografías las cuales permiten verificar si existe o no discontinuidades como lo son: porosidades, deficiencia de aporte, falta de penetración.



Figura 2.45. Equipo para hacer macrografías

Fuente: Propia

### 2.12.6.2. Micrografías

Con las micrografías se determinan las características estructurales y la calidad del proceso de soldadura y se las realiza después de que hayan pasado por el análisis macrográfico. Las micrografías se las hace con un microscopio metalográfico de la marca OLYMPUS modelo GX41, los lentes usados son de 100X y 500X, donde se aprecia muy claramente el tamaño de grano y la estructura del material.



Figura 2.46. Equipo de micrografías

Fuente: Propia

### 2.12.7. Ensayo de Dureza

Para realizar la medición de dureza se utilizó el durómetro HR - 150 A del laboratorio de metalografía; con la finalidad de determinar la dureza del material base y de la soldadura, el proceso se lo realizo con escala HRB para las cinco probetas.



Figura 2.47. Durómetro HR - 150 A

Fuente: Propia

Los puntos para la medición de la dureza se toman considerando el material base, la soldadura y material base a una distancia de 2 mm de separación logrando en si 5 puntos en forma vertical.

En la zona de soldadura se realiza una indentación de 6 puntos en forma horizontal tomando en cuenta las pasadas realizadas en el proceso. A continuación, se muestra en la Figura 2.48 la repartición de los puntos tomados para la prueba.

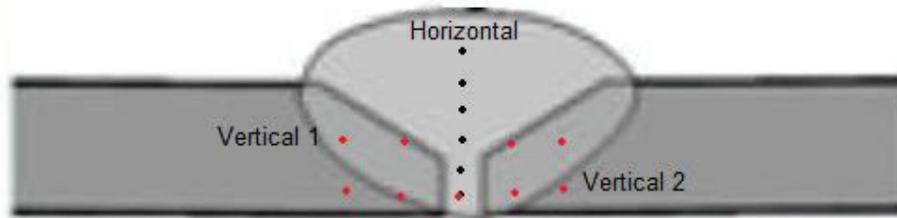


Figura 2.48. Indentación para dureza

Fuente: Propia

A su vez se debe considerar que para realizar este ensayo las superficies de las probetas deben estar planas y paralelas con la finalidad de evitar errores.

## 2.13. Análisis de la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304

En el estudio que se ha realizado en este proyecto se ha destacado que las características importantes del acero son la soldabilidad y maquinabilidad.

Para determinar la soldabilidad del material existen diferentes tipos de ensayos, los cuales deben ser calificados de acuerdo a normas. Los principales objetivos de estos ensayos es verificar la penetración de soldadura, penetración de poros y otros defectos o discontinuidades de la soldadura.

### 2.13.1. Ensayo de soldabilidad houldcroft

Se escoge este ensayo debido a que es el más adecuado para el análisis de la soldabilidad en juntas a tope bajo el proceso GMAW, además es un ensayo de soldadura de penetración completa y es el 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 se necesita de la realización de ranuras a distancias específicas en las placas además de su respectivo bisel para una correcta penetración.

Tabla 2.21. Dimensiones de las probetas para el ensayo de Houldcroft.

Método de soldabilidad	W	$W_1$	$W_2$	w	L	$I_1$	$I_2$	P	G	t
GMAW (MIG)	140	70	60	20	240	20	220	23	3	3
GMAW (MIG)	140	70	60	20	240	20	220	23	3	6

Fuente: (Messler, 2008)

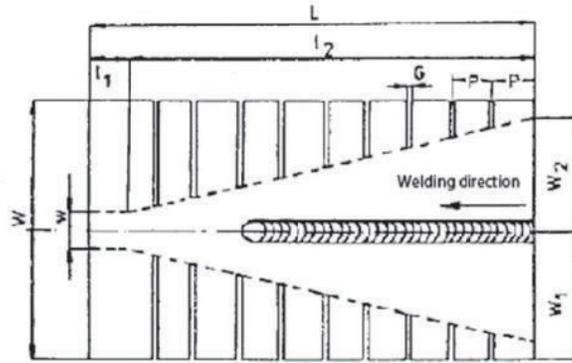


Figura 2.49. Dimensiones de las probetas para el ensayo de Houldcroft.

Fuente: (Messler, 2008)

El ensayo se hará depositando un cordón de soldadura con penetración completa en una probeta con varias ranuras, las cuales van aumentando conforme avance el cordón en la dirección de soldadura (Figura 2.49.), esta progresión de ranuras permite la disipación de las tensiones internas. Como criterio de susceptibilidad de agrietamiento, longitud de grieta la cual es medida desde el inicio de la soldadura. La penetración de la soldadura debe ser completa y estar asegurada en su totalidad.

Para este ensayo se necesita una soldadura a tope, donde su cordón de soldadura se lo hace mediante un pase recto, en posición 1G, sin arrastre, con una corriente continua.



Figura 2.50. Obtención de soldadura para ensayo Houldcroft.

Fuente: Propia

Luego de realizar la soldadura de las probetas, cuidando que estén en un medio libre de contaminación para evitar posibles defectos se las almacena en un ambiente libre de corrientes de aire para empezar después el análisis de inspección.

La calidad del cordón se define mediante ensayos no destructivos. Para este caso en particular se realiza el ensayo de inspección visual y de radiografía los cuales permiten realizar la calificación de las características del cordón de soldadura. Los ensayos se realizan en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la EPN.

## 2.13.2. Ensayos no Destructivos

### 2.13.2.1. Inspección Visual

Para realizar la inspección visual se utiliza un lente convexo, donde se observa las probetas con el objetivo principal de analizar superficialmente el cordón y así buscar fisuras o algún tipo de discontinuidad y también en base a los criterios de aceptación ver si esta soldadura es buena o no como lo indica el código. Además, se va señalando las posibles discontinuidades para luego con ayuda de las tintas penetrantes confirmar o negar dichas condiciones.



Figura 2.51. Lente utilizado para determinar discontinuidades.

Fuente: Propia



Figura 2.52. Señalización de posibles defectos.

Fuente: Propia

### 2.13.2.2. Tintas penetrantes fluorescentes

Después de hacer la inspección visual se procede a realizar el ensayo de tintas penetrantes fluorescentes fundamentado por la norma ASTM E – 165. A continuación, se muestra los productos que se utilizan como lo es el penetrante, removedor y revelador:



Figura 2.53. Tintas fluorescentes.

Fuente: Propia

Se empieza limpiando la superficie del cordón con un paño y con un poco de thinner de manera uniforme para retirar cualquier contaminante para después secarla.



Figura 2.54. Limpieza de superficie.

Fuente: Propia

Aplicar el líquido penetrante al cordón de soldadura. Por un tiempo de 20 minutos.



Figura 2.55. Aplicación de penetrante.

Fuente: Propia

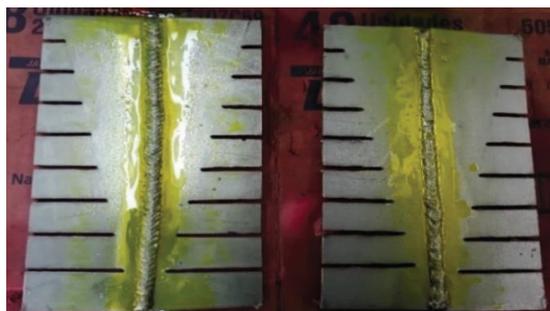


Figura 2.56. Reposo del penetrante.

Fuente: Propia

Remover el penetrante de la superficie con agua con un caudal contante y con un trapo limpio libre de pelusas. La probeta deberá quedar completamente seca. El tiempo de lavado con agua será de 2 minutos.



Figura 2.57. Lavar exceso de penetrante.

Fuente: Propia

Aplicar removedor en un paño de algodón limpio y realizar la limpieza del cordón de soldadura con ayuda de una linterna se puede ir viendo que no quede sucio.



Figura 2.58. Remoción del penetrante en el cordón.

Fuente: Propia

Aplicar el revelador para que absorba el penetrante que se encuentra en las discontinuidades, formando indicaciones fluorescentes, sobre el fondo blanco. Se deberá esperar unos 15 minutos.



Figura 2.59. Aplicación del revelador en el cordón.

Fuente: Propia



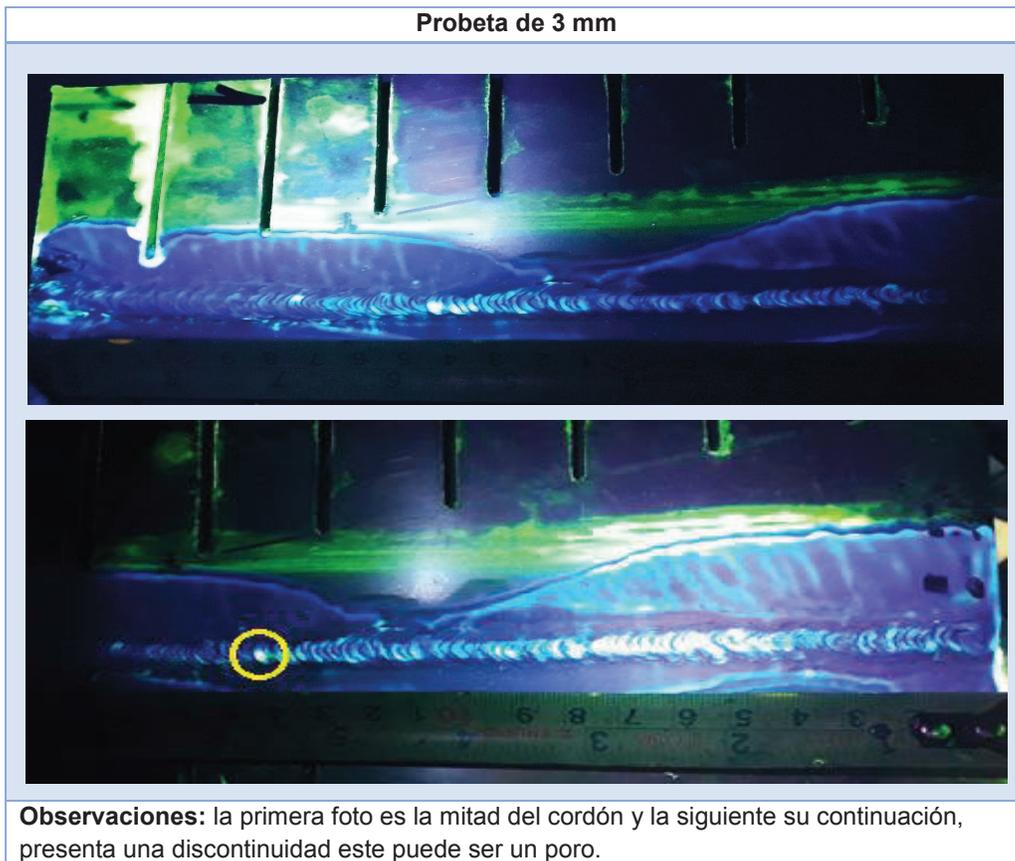
Figura 2.60. Dejar secar revelador.

Fuente: Propia

Utilizar una linterna para iluminar la superficie del cordón sobre la que se hizo el ensayo, además se lo hizo en cabina oscura para tener una mejor apreciación.

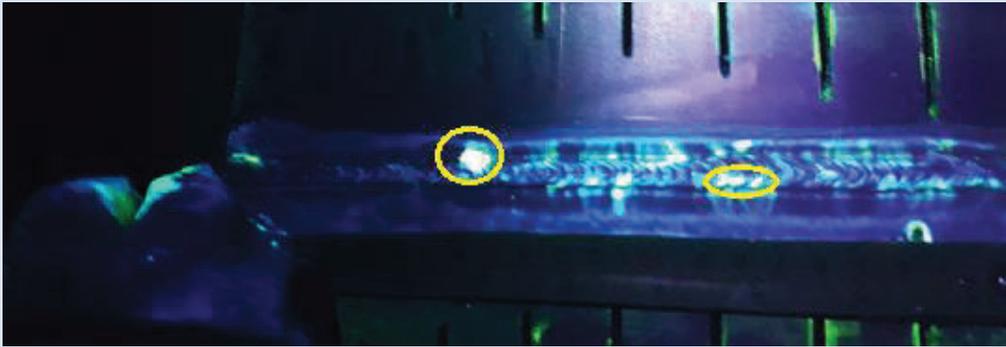
La inspección y registro de discontinuidades en el cordón de soldadura se muestra en las Tablas 2.22. y 2.23.

Tabla 2.22. Resultados probeta de 3 mm.



Fuente: (Propia)

Tabla 2.23. Resultados probeta de 6 mm.

Probeta de 6 mm
 A fluorescence image of a 6 mm specimen, likely a dental or forensic sample, showing a blue-green glow. Two yellow circles highlight specific features on the surface. The background is dark, and the specimen is illuminated from above.
<p><b>Observaciones:</b> presenta mordeduras fuera del cordón, no se observó ningún tipo de fisuras.</p>

Fuente: (Propia)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados del ensayo de tintas penetrantes

Los resultados de los ensayos de doblado realizados a las 16 probetas ensayadas se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados inspección tintas fluorescentes.

Discontinuidades en tintas fluorescentes			
Probeta Transferencia	Discontinuidades		Descripción
1 - Spray	SI	NO	Mordedura e inclusión de material sobre cordón
2 - Cortocircuito	SI	NO	Falta de fusión al final del cordón
3 - Cortocircuito	SI	NO	-----
4 - Spray	SI	NO	-----

Fuente: (Propia)

#### 3.2. Resultados del ensayo de radiografía

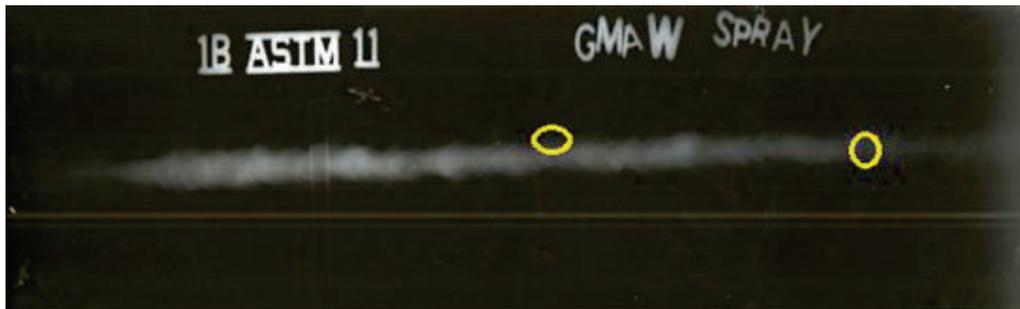


Figura 3.1. Radiografía 1 - transferencia por spray.

Fuente: Propia

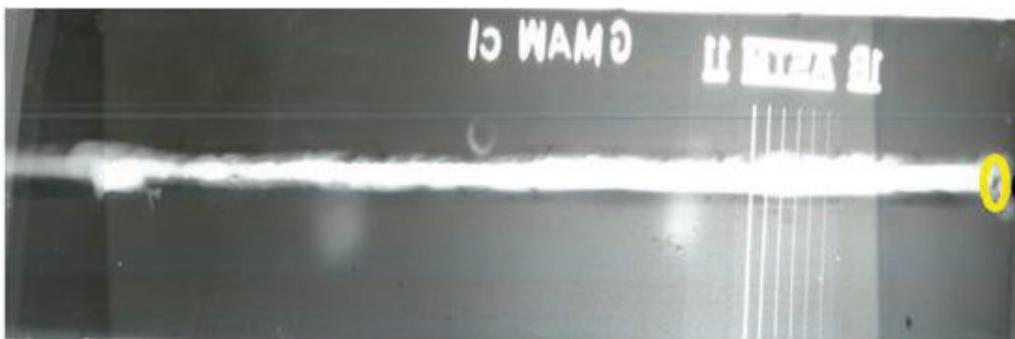


Figura 3.2. Radiografía 2 - transferencia por cortocircuito.

Fuente: Propia

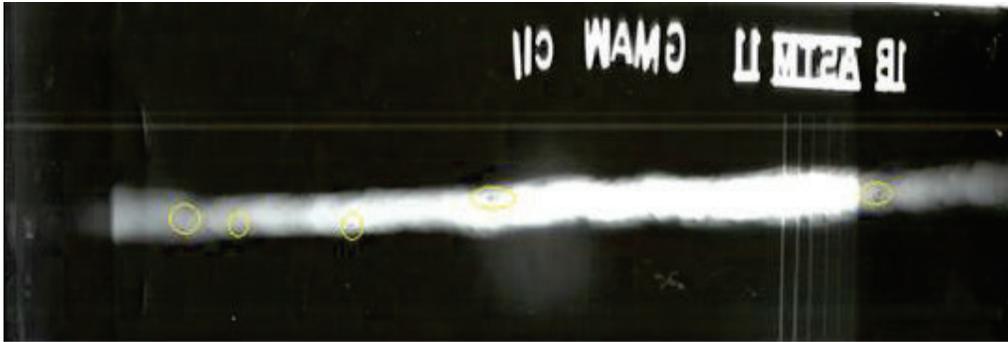


Figura 3.3. Radiografía 3 - transferencia por cortocircuito.

Fuente: Propia



Figura 3.4. Radiografía 4 - transferencia por spray.

Fuente: Propia

Tabla 3.2. Resultados obtenidos de la inspección radiográfica.

DISCONTINUIDADES EN RADIOGRAFÍAS					
PROBETA	Fisuras		Otras discontinuidades		Descripción
1 de e = 3 [mm]	SI	NO	SI	NO	Poros
2 de e = 3 [mm]	SI	NO	SI	NO	Falta de fusión
3 de e = 6 [mm]	SI	NO	SI	NO	Poros
4 de e = 6 [mm]	SI	NO	SI	NO	Poros

Fuente: (Propia)

### 3.3. Resultados del ensayo de tracción

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción en la Tabla 3.3., mostrando también la gráfica de la curva esfuerzo vs, porcentaje de deformación de cada probeta ensayada. Además, se da una comparación con la resistencia a la tracción del material base (acero inoxidable austenítico AISI 304) cuyo valor es de 75 ksi. Se puede apreciar que a pesar que se dio una falla en la junta soldada, la resistencia a la tracción presentada por las probetas es aceptable según el código AWS D1.6.

Tabla 3.3. Resistencia a la tracción de probetas.

Id. probetas	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima soportada		Resistencia a la tracción		Obs.	Calificación
	mm	mm	Lbf.	N	ksi	MPa		
T 1-1	19,66	2,85	6530	29047	75,2	518,4	FMB	Aprueba
T 1-2	19,73	2,94	7130	31716	79,3	546,8	FMB	Aprueba
T 2-1	19,58	3,27	7820	34785	78,8	543,3	FJS	Aprueba
T 2-2	19,78	3,24	8190	36431	82,4	568,5	FMB	Aprueba
T 3-1	20,31	6,77	14880	66190	69,8	481,4	FJS	No aprueba
T 3-2	20,42	6,42	14300	63610	70,4	485,2	FJS	No aprueba
T 4-1	20,64	6,54	17320	77043	82,8	570,8	FJS	Aprueba
T 4-2	20,18	6,28	15610	69437	79,5	547,9	FJS	Aprueba

Fuente: (Propia)

- **FMB:** Falla en el material base
- **FJS:** Falla en la junta soldada

Aquí se muestra las gráficas esfuerzo vs. Deformación de cada probeta.

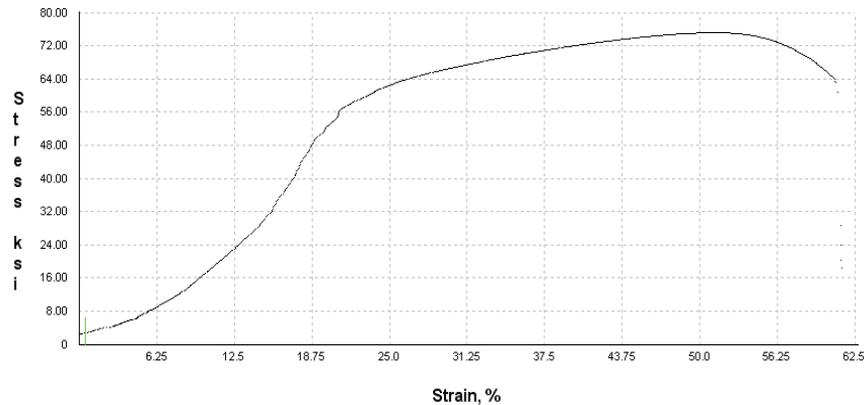


Figura 3.5. Curva Esfuerzo vs. % Deformación de la probeta T 1-1.

Fuente: Laboratorio

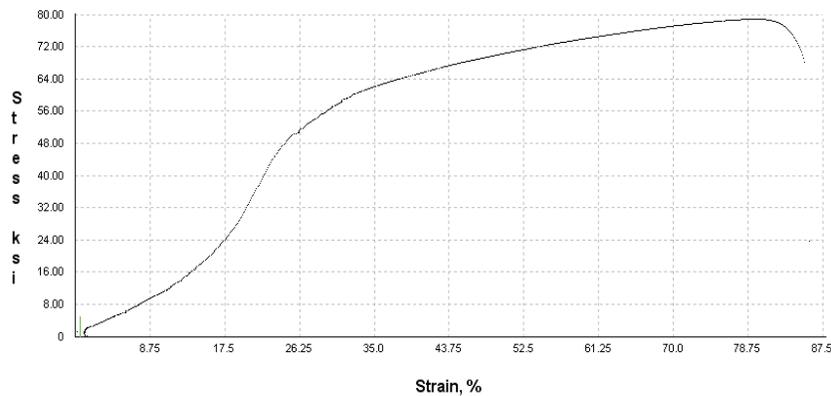


Figura 3.6. Curva Esfuerzo vs. % Deformación de la probeta T 1-2.

Fuente: Laboratorio

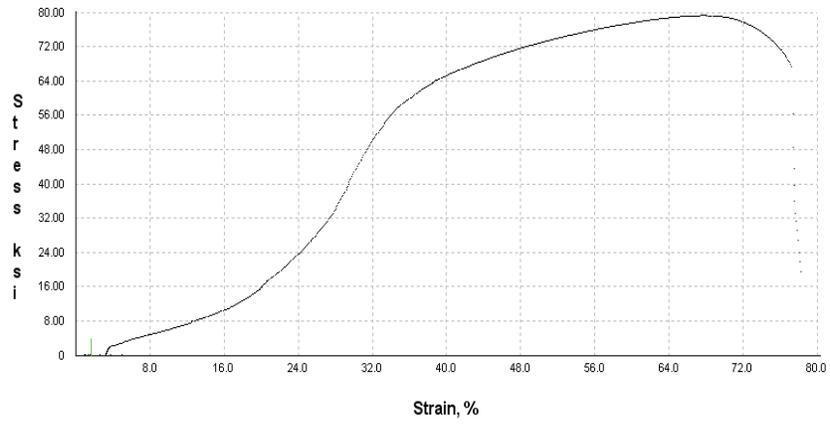


Figura 3.7. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 2-1.

Fuente: Propia

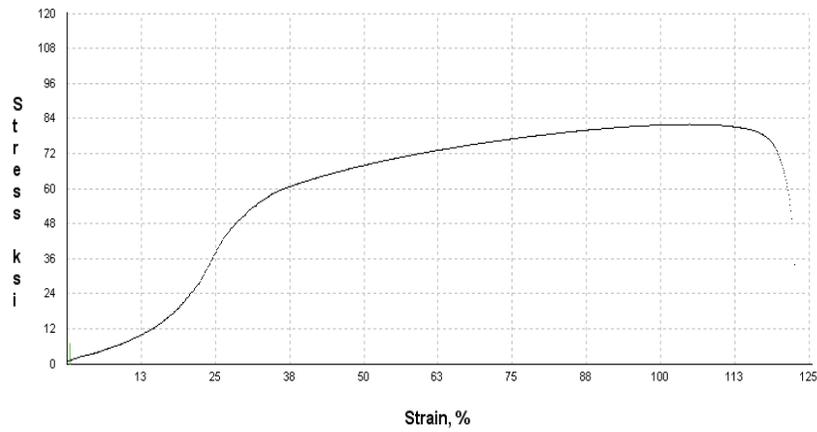


Figura 3.8. Curva Esfuerzo vs. Deformación de probeta T 2-2.

Fuente: Propia

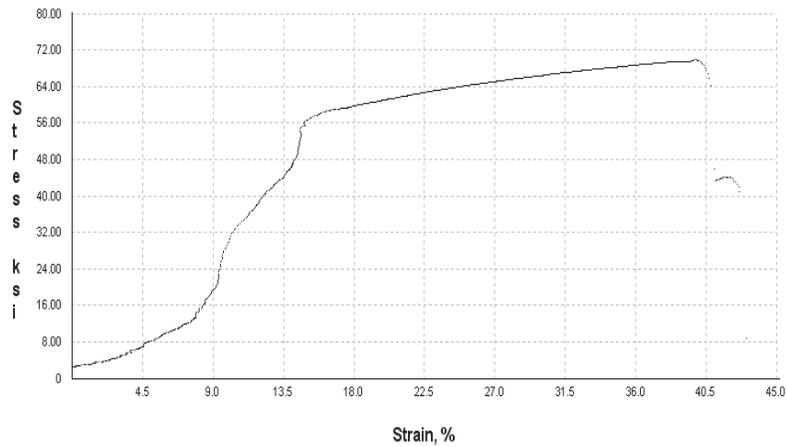


Figura 3.9. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 3-1.

Fuente: Propia

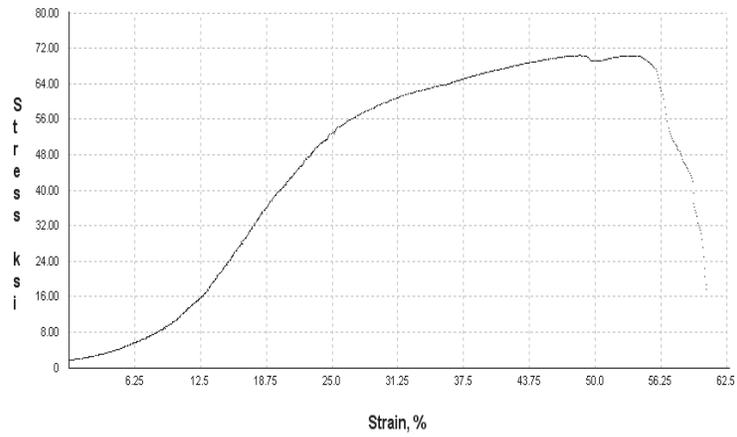


Figura 3.10. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 3-2.  
Fuente: Propia

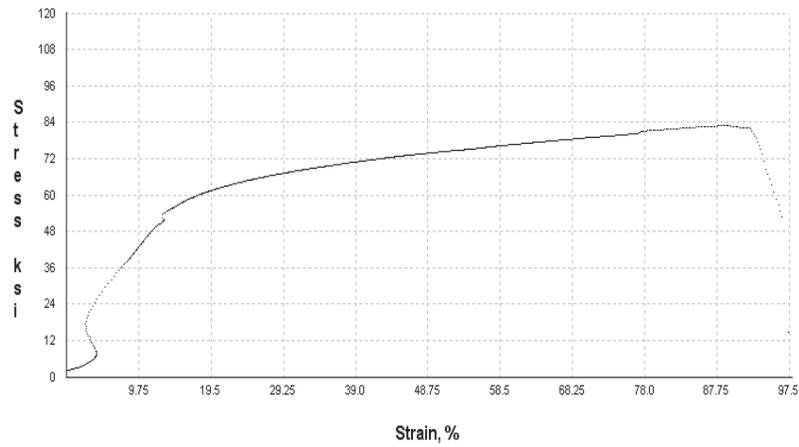


Figura 3.11. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 4-1.  
Fuente: Propia

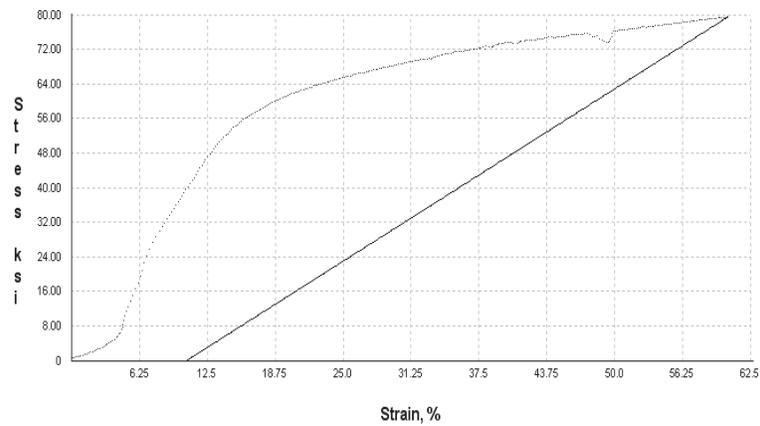


Figura 3.12. Curva Esfuerzo vs. Deformación de la probeta T 4-2.  
Fuente: Propia

### 3.4. Resultados del ensayo de doblado

El ensayo de doblado de cara y de raíz arroja los siguientes resultados en 16 probetas ensayadas los cuales se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de ensayo de doblado.

Id.	Doblado		Discontinuidades				Observaciones	Calificación
	Cara	Raíz	Fisuras		Otras			
1	X		SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
1	X		SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
1		X	SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
1		X	SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
2	X		SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
2	X		SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
2		X	SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
2		X	SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
3	X		SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
3	X		SI	NO	SI	NO	Existe discontinuidad	Aprueba
3		X	SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
3		X	SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
4	X		SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
4	X		SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
4		X	SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba
4		X	SI	NO	SI	NO	No existe discontinuidad	Aprueba

Fuente: (Propia)

### 3.5. Resultados de ensayo de dureza

En la Tabla 3.5. se detallan las mediciones obtenidas del material base.

Tabla 3.5. Dureza de material base.

Muestra	Número de muestras					Promedio HRB
	1 HRB	2 HRB	3 HRB	4 HRB	5 HRB	
Material base	84	82	84	82	82	83

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.6. se detallan las mediciones obtenidas del cordón de soldadura en forma horizontal.

Tabla 3.6. Dureza cordón de soldadura.

Muestra	Número de muestras						Promedio HRB
	1 HRB	2 HRB	3 HRB	4 HRB	5 HRB	6 HRB	
1	72	81	81	84	82	78	80
2	68	84	84	84	85	74	80
3	74	79	82	86	84	85	82
4	64	86	85	86	82	80	81

Fuente: (Propia)

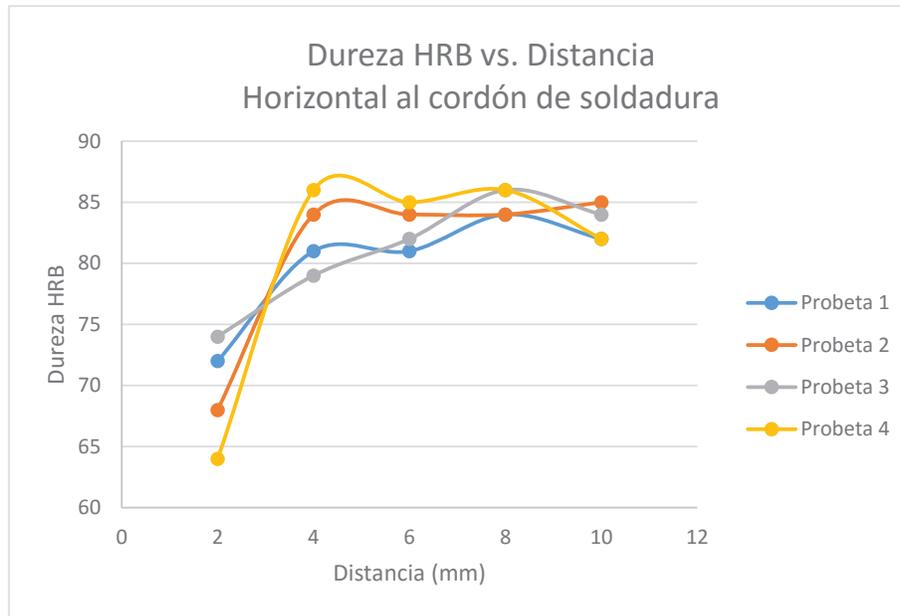


Figura 3.13. Grafica de dureza en el cordón de soldadura.

Fuente: Propia

En la Tabla 3.7. y 3.8. se detallan las mediciones obtenidas en función de la distancia para la junta soldada y son de tomadas verticalmente.

Tabla 3.7. Dureza junta soldada vertical 1.

Muestra	Número de muestras					Promedio HRB
	1 HRB	2 HRB	3 HRB	4 HRB	5 HRB	
1	72	81	81	84	82	80
2	74	65	78	73	75	73
3	86	89	82	86	87	87
4	87	88	86	87	86	88

Fuente: (Propia)

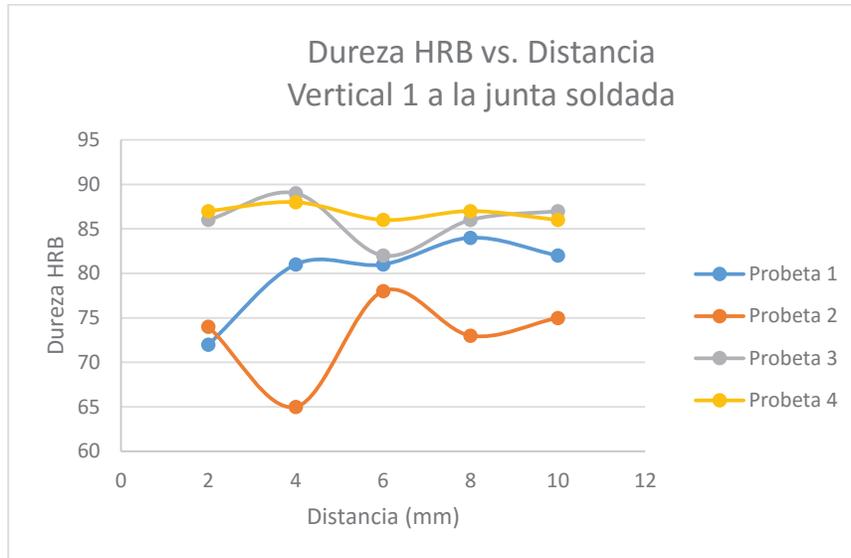


Figura 3.14. Gráfica de dureza en el cordón de soldadura.

Fuente: Propia

Tabla 3.8. Dureza junta soldada vertical 2.

Muestra	Número de muestras					Promedio HRB
	1 HRB	2 HRB	3 HRB	4 HRB	5 HRB	
1	72	81	81	84	82	80
2	72	74	78	75	72	75
3	86	89	82	87	87	87
4	87	86	86	84	85	86

Fuente: (Propia)

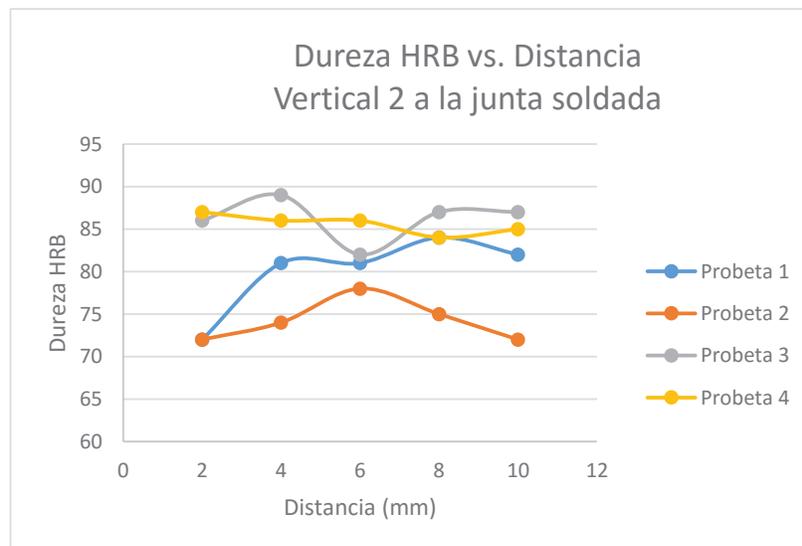


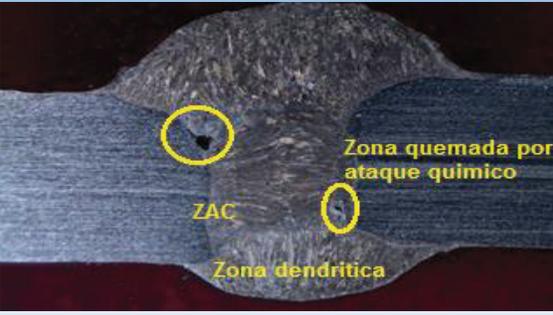
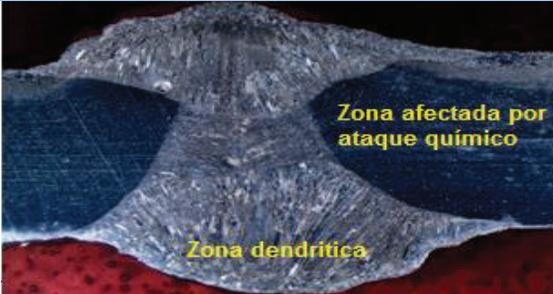
Figura 3.15. Gráfica de dureza en el cordón de soldadura.

Fuente: Propia

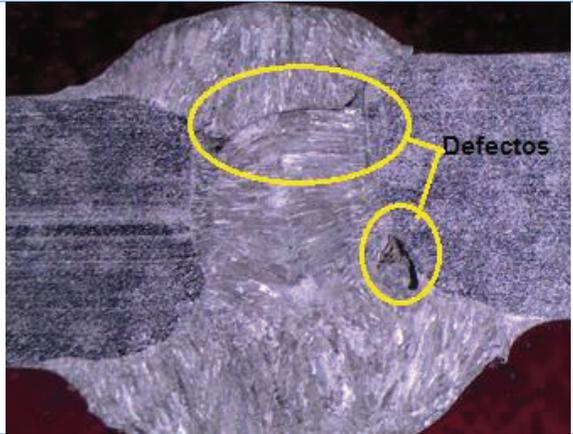
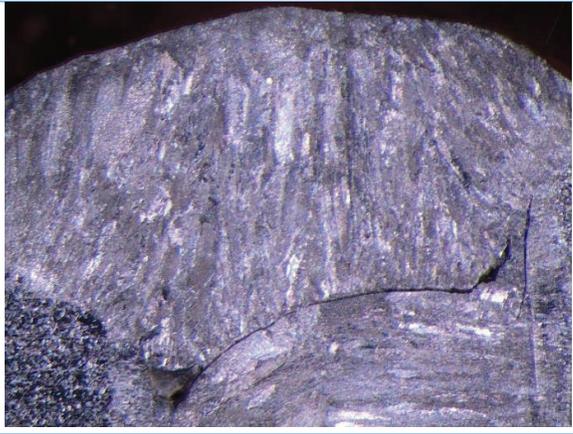
### 3.6. Resultados de macrografías

En la Tabla 3.9. se presenta las macrografías obtenidas para cada una de las probetas analizadas, donde se observará las distintas zonas que conforman el material, la zona del material, la zona afectada por el calor, la zona de fusión la que consta de formaciones dendríticas y la zona del cordón de soldadura.

Tabla 3.9. Macrografías de probetas.

N°	Macrografía	Observaciones
1	 <p>ZAC Zona afectada por ataque químico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La zona afectada por el calor es pequeña.</li> <li>- Existe penetración completa</li> </ul>
2	 <p>ZAC Zona dendrítica ZAC</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se puede apreciar una zona dendrítica.</li> <li>- No muestra discontinuidades</li> <li>- Penetración completa</li> </ul>
3	 <p>Zona quemada por ataque químico ZAC Zona dendrítica</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenta discontinuidades:</li> <li>- Zona dendrítica</li> <li>- Zona sobre atacada por ataque de agua regia</li> </ul>
4	 <p>Zona afectada por ataque químico Zona dendrítica</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penetración completa</li> <li>- No existe discontinuidades</li> <li>- Existe zona sobre atacada por ataque químico</li> <li>- Zona dendrítica</li> </ul>

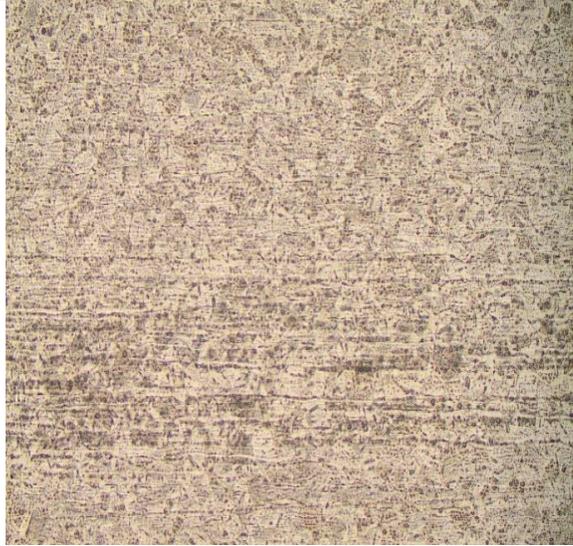
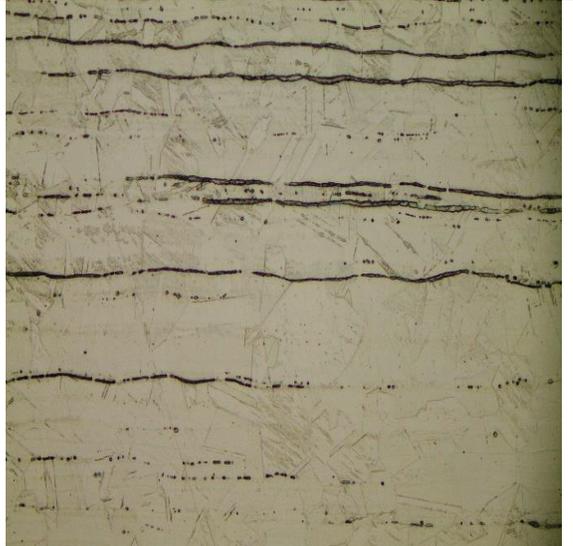
Fuente: (Propia)

PROBETA N° 3	
TRANSFERENCIA POR CORTOCIRCUITO – DEFECTO	
	
<p>Defectos presentes en probeta # 3 realizada con Transferencia cortocircuito, donde se observa una falta de fusión e inclusión de escoria</p> <p>Fuente: (Propia)</p>	

### 3.7. Resultados de micrografías

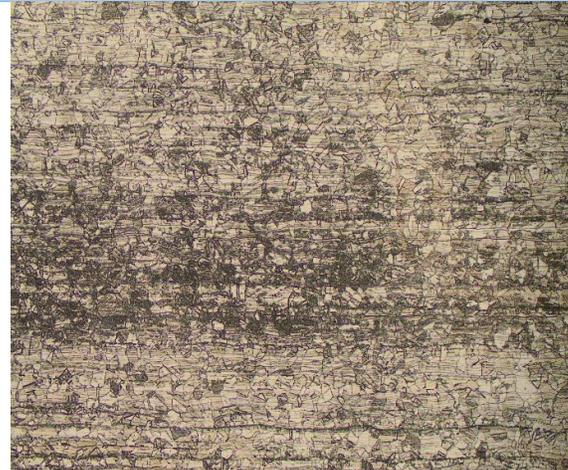
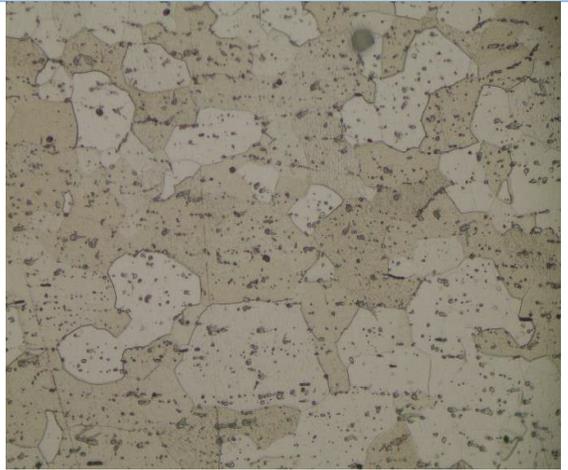
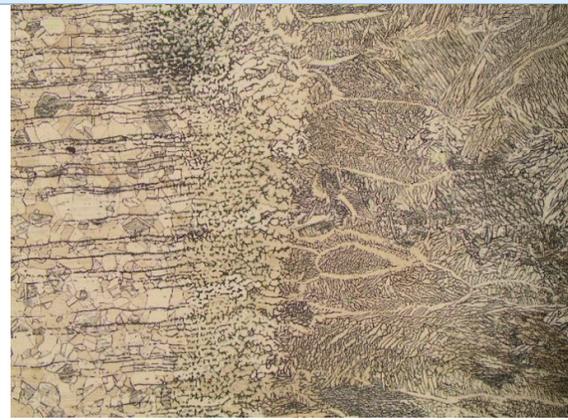
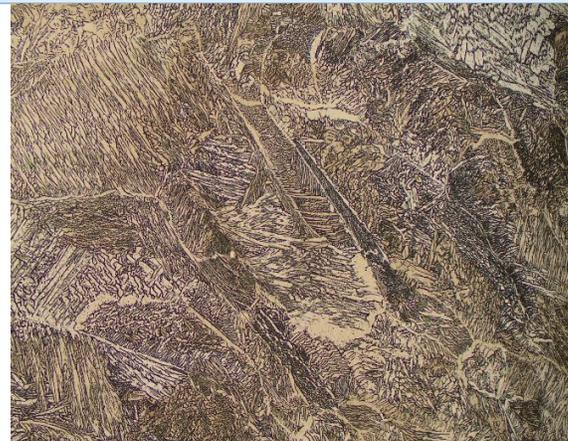
A continuación, en la Tabla 3.10. se apreciarán las micrografías del material base con imágenes aumentadas a 100X y 500X.

Tabla 3.10. Micrografía material base.

MATERIAL BASE	
ACERO INOXIDABLE AISI 304	
	
<p>Microestructura del acero inoxidable austenítico AISI 304. Aumento de 100X con ataque químico (agua regia).</p>	<p>Microestructura del acero inoxidable austenítico AISI 304. Aumento de 500X con ataque químico (agua regia).</p>

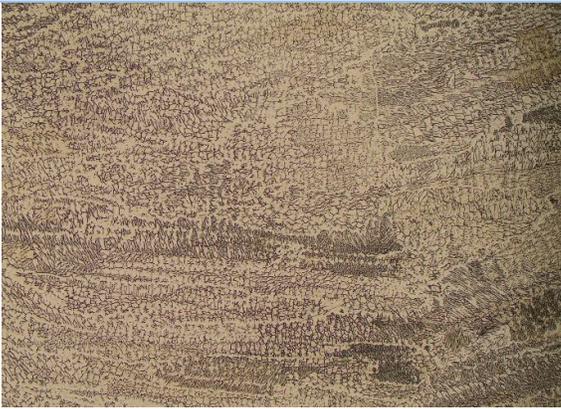
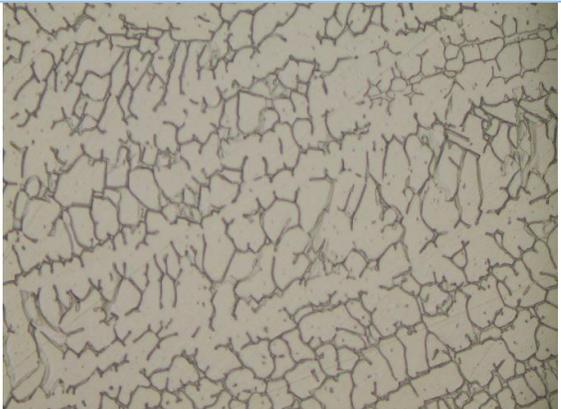
Fuente: (Propia)

Tabla 3.11. Micrografías de probeta soldada con transferencia por spray.

<b>PROBETA N° 1</b>	
<b>TRANSFERENCIA POR SPRAY</b>	
	
Microestructura austenítica del AISI 304 del metal base con aumento 100X.	Micrografía del material base con aumento 500X, cuya microestructura es austenítica.
	
Micrografía ZAC con aumento 100X, presenta zona de normalizado.	Micrografía ZAC con aumento 500X, presenta zona de normalizado.
	
Micrografía zona de fusión con aumento 100X. Presenta una estructura ferrita y austenita Widmanstätten o ferrita a circular	Micrografía zona de fusión con aumento 500X. Presenta una estructura ferrita y austenita Widmanstätten

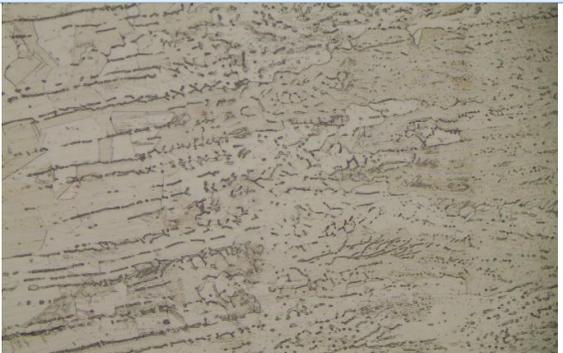
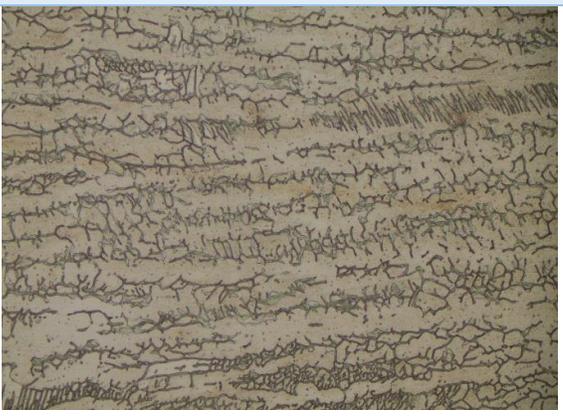
Fuente: (Propia)

Tabla 3.12. Micrografías de probeta soldada con transferencia por cortocircuito.

<b>PROBETA N° 2</b>	
<b>TRANSFERENCIA POR CORTOCIRCUITO</b>	
	
Microestructura austenítica del AISI 304 del metal base con aumento 100X.	Micrografía del material base con aumento 500X, cuya microestructura es austenítica.
	
Micrografía ZAC con aumento 100X, presenta zona de normalizado.	Micrografía ZAC con aumento 500X, zona de normalizado.
	
Micrografía zona de fusión con aumento 100X. Presenta una estructura ferrita y austenita Widmanstätten	Micrografía zona de fusión con aumento 500X. Presenta un crecimiento columnar-dendrítico. La solidificación es de tipo ferrítica

Fuente: (Propia)

Tabla 3.13. Micrografías de probeta soldada con transferencia por cortocircuito.

<b>PROBETA N° 3</b>	
<b>TRANSFERENCIA POR CORTOCIRCUITO</b>	
	
Microestructura austenítica del AISI 304 del metal base con aumento 100X.	Micrografía del material base con aumento 500X, cuya microestructura es austenítica.
	
Micrografía ZAC con aumento 100X, zona de normalizado.	Micrografía ZAC con aumento 500X, zona de normalizado.
	
Micrografía zona de fusión con aumento 100X. Presenta una estructura ferrita y austenita Widmanstätten	Micrografía zona de fusión con aumento 500X, Presenta un crecimiento columnar-dendrítico. La solidificación es del tipo ferrítica, aunque tiene algunas dendritas de austenita primaria creciendo conjuntamente con las dendritas de ferrita

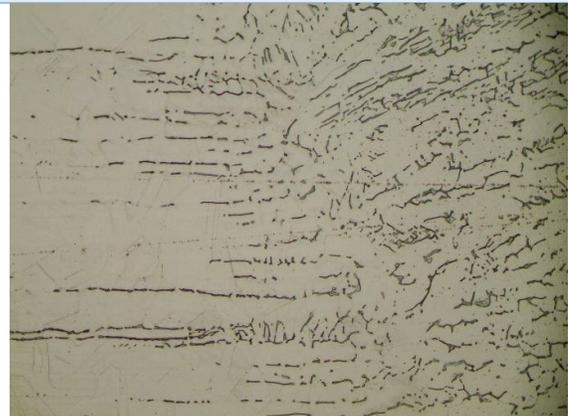
Fuente: (Propia)

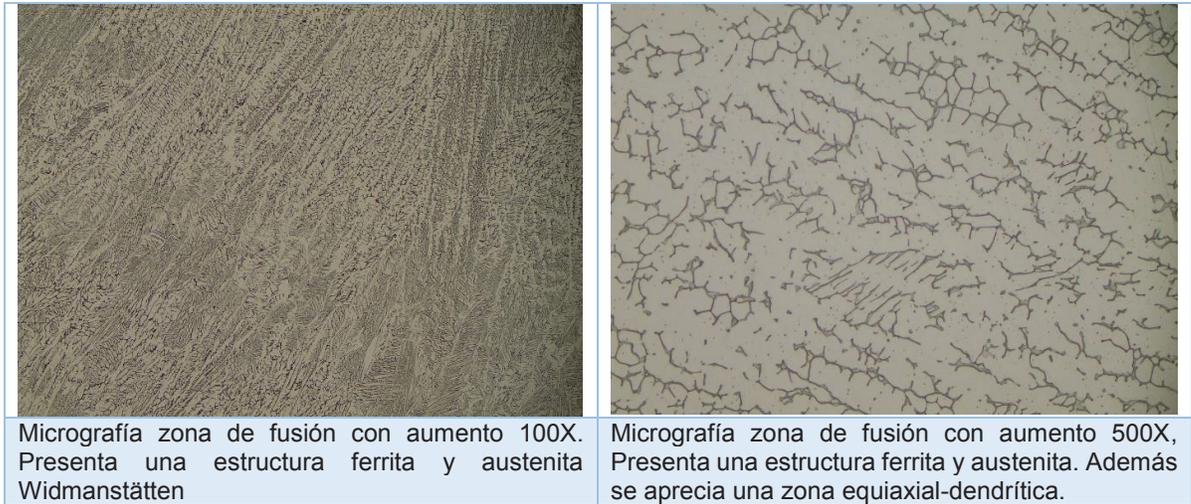
Tabla 3.14. Micrografías de probeta soldada con defecto – transferencia por cortocircuito.

<b>PROBETA N° 3</b>	
<b>TRANSFERENCIA POR CORTOCIRCUITO – DEFECTO</b>	
	
Micrografía de defecto por falta de fusión con aumento 100X.	Micrografía de defecto por falta de fusión con aumento 100X.

Fuente: (Propia)

Tabla 3.15. Micrografías de probeta soldada con transferencia por spray.

<b>PROBETA N° 4</b>	
<b>TRANSFERENCIA POR SPRAY</b>	
	
Microestructura austenítica del AISI 304 del metal base con aumento 100X.	Micrografía del material base con aumento 500X, cuya microestructura es austenítica.
	
Micrografía ZAC con aumento 100X, zona de recristalización.	Micrografía ZAC con aumento 500X, zona de recristalización



Fuente: (Propia)

### 3.8. Resultados del ensayo de houldcroft

Realizado el proceso de inspección en búsqueda de fisuras producidas por el ensayo de houldcroft de soldabilidad, se procede a registrar los datos obtenidos en cada uno de los procesos de inspección.

#### 3.8.1. Resultados de la inspección de fisuras superficiales

A continuación, se resume la presencia o no de fisuras superficiales en cada una de las probetas analizadas para el ensayo de soldabilidad en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16. Resultados por presencia de fisuras.

Probeta	PRESENCIA DE FISURAS				Cantidad de fisuras	Longitud de fisuras [mm]
	Inspección visual		Inspección por tintas penetrantes fluorescentes			
1 de e = 3 [mm]	SI	NO	SI	NO		
2 de e = 6 [mm]	SI	NO	SI	NO		

Fuente: (Propia)

### 3.9. Discusión

Analizando cada una de las probetas soldadas por transferencia spray y cortocircuito para espesores de 3 y 6 (mm), se puede apreciar que en el ensayo de houldcroft por inspección visual y tintas penetrantes fluorescentes no presenta fisuras lo que hace que se determine una buena soldabilidad entre el acero inoxidable austenítico AISI 304 con el proceso de soldadura GMAW.

Como se muestra en las Tablas 3.1. y 3.2. los resultados obtenidos por tintas penetrantes y radiografías industriales están dentro de los parámetros requeridos por el código AWS D1.6 donde se indica que no se debe tener más de 4 (mm) del total de poros por lo que se aprueba la soldadura, otra discontinuidad que se encuentra es la falta al final de la soldadura por lo que no afecta la probeta para ninguno de los ensayos siguientes realizados.

Los resultados de los ensayos de tracción muestran una alta resistencia mecánica al utilizar el proceso GMAW con transferencia por Spray para espesores de 3 y 6 (mm) respectivamente, donde cuyos valores promedios son de 77.25 y 81.15 (ksi) por lo que sobrepasan la resistencia del material base que es de 75(Ksi), lo cual es aceptable.

A su vez para el proceso GMAW con la transferencia por cortocircuito para el espesor de 3 (mm) el valor de 80.6 (ksi) lo que según el código es aceptable, además la probeta realizada por la transferencia por cortocircuito cuyo espesor es de 6 (mm) no soportó la tracción del material base ya que su valor promedio fue de 70.1 (ksi) y esto hace que no sea aceptable según el código AWS D1.6.

Las gráficas obtenidas según el ensayo presentan un desfase en la curva de esfuerzo vs. Porcentaje de deformación y es porque se produce un resbalamiento en las probetas ensayadas al momento de realizar el ensayo esto se puede apreciar en la Figura 3.11. y Figura 3.12.

Así mismo realizando los ensayos de doblado de raíz y cara se llega a determinar que los resultados son aceptables para las transferencias de spray cuyo espesor es de 3 y 6 (mm) respectivamente, presentando nuevamente una discontinuidad en la superficie del doblado de cara por transferencia cortocircuito cuyo espesor es de 6 (mm) donde tiene una medida de 2.5 (mm) del total de discontinuidades lo que según la norma sería aceptable debido a que la suma de discontinuidades no debe sobrepasar los 10 (mm) del total.

Otro ensayo a utilizar fue el de dureza donde se puede apreciar que las durezas longitudinales tienden a disminuir respecto a la dureza que tiene el material base, por el contrario las durezas verticales tienen una dureza igual a la del material presentando una excepción en la probeta numero 3 por transferencia cortocircuito cuya dureza es de 87 HRB sobrepasando en si lo que indica el material base ya que es de 83 HRB, esta soldadura estará dispuesta a una posible fractura o fisuramiento en el futuro.

Para el estudio de las micrografías se considera el calor de aporte entregado en la soldadura donde en la transferencia por spray donde su valor estuvo entre los 4.06 y 4.16 (kJ/mm) mientras que en la transferencia por cortocircuito se tuvo 2.65 y 3.66 (kJ/mm).

En la Tabla 3.17. se puede apreciar la microestructura del material base, la zona afectada por el calor (ZAC) y la zona fundida del material.

La microestructura del material base es austenítica de grano uniforme en todos los tipos de transferencia tanto de cortocircuito como spray. En la ZAC se observa que el metal se calienta hasta una temperatura elevada y así se forman los granos gruesos, por lo que al irse alejando de la soldadura disminuye la temperatura y el tamaño de grano por lo que aquí se encuentra la zona de normalizado donde el grano es fino ya que el tiempo de calentamiento es mínimo para que se produzca el crecimiento entre los granos austeníticos y los granos ferríticos.

La zona fundida presenta la estructura de Widmanstaetten, donde está caracterizada por una simetría que sigue tres o cuatro direcciones, donde está provocando un índice de fragilidad y su estructura aumenta la capacidad de deformación. Está formada por una red compleja y continua de ferrita remanente en una matriz austenítica. A continuación, se muestra en la Figura 3.16 la estructura de Widmanstaetten

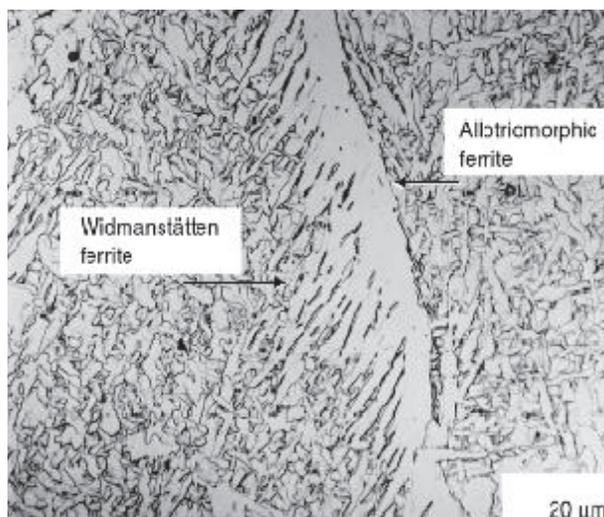


Figura 3.16. Estructura Widmanstaetten.

Fuente: (Totten, 2007)

En la zona afectada por el calor con transferencia por Spray de espesor de 3 (mm) como se muestra en la Tabla 3.17, se puede apreciar que no existe ZAC, esto se dio debido

a que no se tuvo un buen direccionamiento de la pistola lo que provocó que solo un lado se encuentre afectado por el calor.

Además de realizar micrografías se dio un análisis de macrografías donde se puede observar que no existen discontinuidades, exceptuando la probeta tres donde se aprecia una falta de fusión y una inclusión de escoria.

La probeta tres realizada con el proceso GMAW por transferencia cortocircuito cuyo espesor es de 6 (mm), presento algunas dificultades como lo es en el análisis metalográfico, en el ensayo de dureza y de tracción y se debió a que no existe una correcta penetración. Por lo que este tipo de transferencia no se recomienda usar para espesores gruesos es decir a partir de los 5 (mm) de espesor.

Demostrando con todos los ensayos realizados a las probetas se confirma que existe una buena soldabilidad entre el acero inoxidable austenítico AISI 304 con el proceso GMAW, tanto para transferencias por Spray como por la de Cortocircuito.

Tabla 3.17. Micrografías de toda la junta soldada.

Transferencia	Material Base	ZAC	Zona Fundida	ZAC	Material Base
Spray e = 3 mm					
Cortocircuito e = 3 mm					
Cortocircuito e = 6 mm					
Spray e = 6 mm					

Fuente: (Propia)

Finalmente, se muestra en la Tabla 3.18. un resumen de la obtención de resultados de los ensayos realizados a las probetas por los tipos de transferencia por cortocircuito y spray.

Tabla 3.18. Resultados de los distintos ensayos.

<b>Discontinuidades tintas fluorescentes</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Discontinuidades</b>		<b>Observación</b>	
1 de e = 3 [mm]	SI	NO	Aprueba	
2 de e = 3 [mm]	SI	NO	Aprueba	
3 de e = 6 [mm]	SI	NO	Aprueba	
4 de e = 6 [mm]	SI	NO	Aprueba	
<b>Discontinuidades en radiografías</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Fisuras</b>	<b>Otras discontinuidades</b>	<b>Observación</b>	
1 de e = 3 [mm]	NO	SI	Aprueba	
2 de e = 3 [mm]	NO	SI	Aprueba	
3 de e = 6 [mm]	NO	SI	Aprueba	
4 de e = 6 [mm]	NO	SI	Aprueba	
<b>Resistencia a la tracción de probetas</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Carga máxima soportada</b>	<b>Resistencia a la tracción</b>	<b>Observación</b>	
	<b>Lbf.</b>	<b>Ksi</b>		
1 de e = 3 [mm]	6830	77.25	Aprueba	
2 de e = 3 [mm]	8005	80.6	Aprueba	
3 de e = 6 [mm]	14590	70.1	No aprueba	
4 de e = 6 [mm]	16465	81.15	Aprueba	
<b>Ensayo de doblado de cara y raíz</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Cara</b>	<b>Raíz</b>	<b>Otras discontinuidades</b>	<b>Observación</b>
1 de e = 3 [mm]	X	X	NO	Aprueba
2 de e = 3 [mm]	X	X	NO	Aprueba
3 de e = 6 [mm]	X	X	SI	Aprueba
4 de e = 6 [mm]	X	X	NO	Aprueba
<b>Ensayo de dureza</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Promedio HRB</b>		<b>Observación</b>	
1 de e = 3 [mm]	80		Aprueba	
2 de e = 3 [mm]	76		Aprueba	
3 de e = 6 [mm]	87		No aprueba	
4 de e = 6 [mm]	82		Aprueba	

Fuente: (Propia)

## 4. CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se ha logrado cumplir los objetivos específicos propuestos, los cuales son estudiar y determinar la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304, buscar y diferenciar las condiciones óptimas para el proceso de soldadura GMAW con transferencia spray y cortocircuito, comprobando los resultados obtenidos con los distintos ensayos no destructivos y destructivos realizados para determinar una soldadura confiable y de calidad.
- Para la soldadura de aceros inoxidables austeníticos debe tenerse especial cuidado para que ni la estructura, ni la composición del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor, cambien sustancialmente.
- Según los resultados obtenidos no es recomendable soldar con el proceso de transferencia por cortocircuito para espesores a partir de 5 (mm) en adelante debido a que ocurre a bajos niveles de tensión y el calor que entrega es pequeño comparado con los otros tipos de transferencia por lo que hace se vuelve superficial. Por lo que es una excelente transferencia para espesores finos.
- La falta de fusión producida en el interior del cordón hace que no sea expuesta a la superficie y esto afecte a la junta y debido a su posición provoca que no sea detectada por el ensayo de radiografía.
- En relación con las propiedades mecánicas obtenidas se puede apreciar que la transferencia por spray llega a tener una mayor resistencia a la tracción del material base, con ello se concluye que en la industria este proceso no llegaría a presentar problemas.
- Para cualquier análisis de soldadura es fundamental realizar una inspección metalográfica para evitar problemas de discontinuidades y defectos o cambios de microestructuras debido a que no siempre la radiografía podría mostrar todas las posibles fallas.

## 5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que antes de soldar se debe limpiar las placas de acero inoxidable dejándolas libres de impurezas y óxidos para no afectar la calidad de soldadura.
- Cuando se sueldan espesores grandes no es recomendable usar solo transferencia cortocircuito sino se debería usar transferencia spray o globular para realizar más pases debido a que utilizan altas temperaturas y se tendrán una buena penetración.
- Para realizar una inspección metalográfica es muy necesario tener cuidado al momento de obtener los reactivos adecuados para el material a analizar ya que así se podrá obtener la información de microestructura y de la unión del cordón.
- Se recomienda no darles precalentamiento superior a los 400 °C a los aceros inoxidables austeníticos debido a que podrían dar un deterioro en la resistencia a la corrosión intergranular como consecuencia se formaría la precipitación de carburos de cromo en el borde de grano.
- Al momento de limpiar las escorias de una soldadura en acero inoxidable se recomienda realizarlo con grata o cepillo de acero inoxidable para evitar problemas de corrosión en el cordón.
- Es recomendable que para realizar una soldadura en posición plana se ubique la antorcha a un ángulo de 15° respecto a la horizontal para que el arco sea lo más corto posible y este pueda tener una penetración correcta.
- Se recomienda que para cerciorarse que no exista discontinuidades internas se utilice también el ensayo de ultrasonido.
- Sería recomendable que, a partir de este trabajo, se realiza un análisis de las curvas de velocidad de alimentación del alambre vs la corriente para así determinar el tipo de transferencia en el proceso GMAW.

## 6. Referencias Bibliográficas

- D. J Kotecki and T. A. Siewert. (May 1992). *WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: A Modification of the WRC-1988 Diagram*. Welding Research Supplement.
- Ramón Cortes, P., Jaime Villanueva A., Ernesto Ponce L. (2004.). *Estudio de la soldabilidad y corrosión del acero inoxidable AISI 304 con los agentes utilizados en la lixiviación del cobre*. España.
- Anónimo. (2015). *SOLDEXA "MANUAL DE SOLDADURA Y CATÁLOGO DE PRODUCTOS"*. MEXICO: Septima.
- ASM Metal Handbook Volume 09. (1992). *Metallography and microstructures*. Vol. 9: American society of materials.
- ASTM, A. (15 de 04 de 2016). *Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/A240.htm>
- Autor, S. (28 de 11 de 2016). *LINCOLN ELECTRIC*. Obtenido de <http://solysol.com.es/data/documents/SoldaduraMIGMAG.pdf>
- Bencomo, N. (2009). *soldadura disímil entre los aceros AISI/SAE 304 y ASTM A36 mediante el proceso de GMAW-P*. . Venezuela - Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- British stainless steel association*. (25 de 04 de 2017). Obtenido de <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=121>
- Cadenas, M. A. (2012). *Soldeo MIG/MAG*. España: CESOL.
- Caldera, R. (24 de 03 de 2017). *Scibd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/214553267/CAPITULO-15-Discontinuidades-y-Defectos-en-Soldadura>
- Cely, I. M. (2014). *Guía de Prácticas Laboratorio de Ensayos No Destructivos*. Ecuador: EPN.
- Código AWS D1.6. (1999). *Structural Welding Code – Stainless Steel*.
- D. J. Kotecki & A. Siewert. (30 de 05 de 2017). *WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: A Modification of the WRC-1988 Diagram*. Obtenido de [https://app.aws.org/wj/supplement/WJ\\_1992\\_05\\_s171.pdf](https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1992_05_s171.pdf)
- D. Kotecki y J. Lippold. (2005). *Welding Metallurgy of Stainless*. Wiley-Interscience.
- Eyheralde, T. M. (18 de 12 de 2016). *Inspección Especializada de Mecánica General junto al Coordinador Técnico de la Tecnicatura de soldadura*. Obtenido de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf>
- Eyheralde., T. M. (16 de 04 de 2017). *Inspección Especializada de Mecánica General junto al Coordinador Técnico de la Tecnicatura*. Obtenido de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf>

- Ferneto. (24 de 05 de 2017). Obtenido de [http://ferneto.com/novidades/dicas-e-ideias/as-vantagens-do-aco-inoxidavel?set\\_language=es](http://ferneto.com/novidades/dicas-e-ideias/as-vantagens-do-aco-inoxidavel?set_language=es)
- Fosca, C. (2002). *Metalurgia de la soldadura*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ibarra, Núñez & Huerta E. (2010). *Manual Aceros Inoxidables*. Chile: INDURA.
- Inchaurza, A. (1981). *Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor*. México: LIMUSA.
- Istrati, G. (1961). *Manual de los Aceros Inoxidables*. Argentina: Alsina.
- Kalpakistan, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson.
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. New Jersey: Wiley Interscience.
- Larry, J. (2015). *SOLDADURA Principios y Aplicaciones*. Madrid: Pearson.
- Lincoln, D. d. (18 de 11 de 2016). *LINCOLN ELECTRIC*. Obtenido de LINCOLN ELECTRIC
- LIPPOLD, J. (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. EE.UU: Wiley Interscience.
- López, W. (28 de 05 de 2017). *Slideshare*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/marcus1910/discontinuidades-y-defectos-en-soldadura-29694095>
- Mangonon. (2001). *Ciencia de Materiales y Selección*. España: Pearson.
- Mesa, J. (18 de 03 de 2017). *Diagramas de Fase*. Obtenido de [http://joseluismesarueda.com/documents/TEMA\\_4\\_001.pdf](http://joseluismesarueda.com/documents/TEMA_4_001.pdf).
- Messler, R. (2008). *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*. Singapur: John Wiley & Sons.
- Minilo, C. O. (16 de 02 de 2017). *urso Inspector de Soldadura AWS QC1:2007*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/50005935/Libro-Inspector-de-Soldadura-AWS>
- R. Rowe y J. Larry. (s.f.). *MANUAL DE SOLDADURA GMAW (MIG-MAG)*. Madrid: PARANINFO.
- Recalde, R. (25 de 02 de 2017). *Scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/214553267/CAPITULO-15-Discontinuidades-y-Defectos-en-Soldadura>
- Sumitec. (30 de 05 de 2017). *Suministros técnicos S.A.* Obtenido de <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>
- Totten, G. (2007). *STEEL HEAT TREATMENT METALLURGY*. United States of America: Tayylor & Francis.

## 7. ANEXOS

## **ANEXOS**

## ANEXO I. Welding Procedure Specification (WPS)

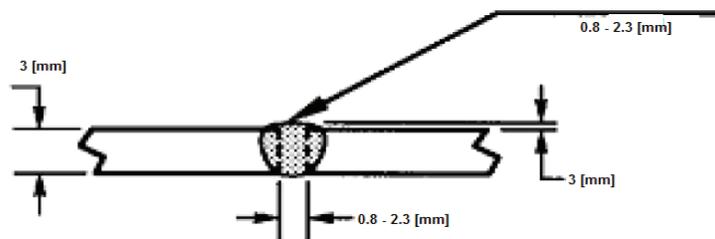


### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE MATERIALES LABORATORIO DE SOLDADURA



ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)			
Nombre de la empresa:	EPN	WPS N°:	EPN - LDS – 01
PQR N°:	EPN - LDS – 01	Fecha:	14/06/2017
Según Norma:	AWS D1.6 Structural Welding Code Steel	Realizado por:	Edith Trujillo
JUNTA UTILIZADA		POSICIÓN DE SOLDADURA	
Tipo de junta:	TOPE	Posición de Soldadura:	1G
Abertura raíz:	2.0 [mm]	Progresión:	Recta
Talón:	N/A	Técnica:	Pasada única
Ángulo de ranura:	N/A	PRECALENTAMIENTO	
Placa de respaldo:	No	Temperatura:	N/A
Preparar bisel:	Si	Temperatura entre pases:	N/A
		Tiempo entre pases:	N/A
METAL BASE		TÉCNICA DE SOLDADURA	
Especificación:	AISI 304	Proceso de Soldadura:	GMAW
Espesor:	3 [mm]	Tipo de Soldadura:	Semiautomática
METAL APORTE		Soldadura a:	Un lado
Proceso:	GMAW	Cordón de respaldo:	NO
Especificación SFA N°:	5.9	Pase múltiples o simples:	Simple
Diámetro:	0.9 [mm]	Cordón recto u oscilante:	Recto
Denominación AWS:	ER 308L	Limpieza:	Cepillo acero inoxidable
Marca:	Blue Max	Modo de transferencia:	Spray
GAS DE PROTECCIÓN		NOTAS	
Tipo:	Argón (Ar)	Cortar la punta del alambre antes de empezar a soldar  La boquilla debe encontrarse 3 [mm] atrás de la tobera	
Protección del arco:	100% Ar		
Caudal:	16 [lt/min]		

#### DETALLE DE LA JUNTA



#### CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

N° DE PASES	METAL DE APORTE		CORRIENTE		TENSIÓN DE TRABAJO (VOLTIOS)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/s)	TÉCNICA DE SOLDADURA	
	CLASE	DIÁMETRO (mm)	TIPO Y POLARIDAD	INTENSIDAD (AMPERIOS)			OSCILADO	RECTO
1	ER 308L	0.9	DC+	140	25	6.02		X



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE MATERIALES  
LABORATORIO DE SOLDADURA**



ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)								
Nombre de la empresa: EPN			WPS N°: EPN - LDS - 01		Fecha: 14/06/2017			
PQR N°: EPN - LDS - 01			Realizado por: Edith Trujillo		Según Norma: AWS D1.6 Structural Welding Code Steel			
JUNTA UTILIZADA				POSICIÓN DE SOLDADURA				
Tipo de junta:		TOPE		Posición de Soldadura:		1G		
Abertura raiz:		2.0 [mm]		Progresión:		Recta		
Talón:		No		Técnica:		Pasada única		
Ángulo de ranura:		N/A		PRECALENTAMIENTO				
Placa de respaldo:		No		Temperatura:		N/A		
Preparar bisel:		Si		Temperatura entre pases:		N/A		
Tiempo entre pases:				Tiempo entre pases:		N/A		
METAL BASE				TÉCNICA DE SOLDADURA				
Especificación:		AISI 304		Proceso de Soldadura:		GMAW		
Espesor:		6 [mm]		Tipo de Soldadura:		Semiautomática		
METAL APORTE				Soldadura a:		Un lado		
Proceso:		GMAW		Cordón de respaldo:		NO		
Especificación SFA N°:		5.9		Pase múltiples o simples:		Simple		
Diámetro:		0.9 [mm]		Cordón recto u oscilante:		Recto		
Denominación AWS:		ER 308L		Limpieza:		Cepillo		
Marca:		Blue Max		Modo de transferencia:		Cortocircuito		
GAS DE PROTECCIÓN				NOTAS				
Tipo:		Argón (Ar)		Cortar la punta del alambre antes de empezar a soldar La boquilla debe sobresalir unos 3 [mm] de la tobera				
Protección del arco:		100% Ar						
Caudal:		12 [lt/min]						
DETALLE DE LA JUNTA								
CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN								
N° DE PASES	METAL DE APORTE		CORRIENTE		TENSIÓN DE TRABAJO (VOLTIOS)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/s)	TÉCNICA DE SOLDADURA	
	CLASE	DIÁMETRO (mm)	TIPO Y POLARIDAD	INTENSIDAD (AMPERIOS)			OSCILADO	RECTO
1	ER 308L	0.9	DC+	119	21	4.78		X



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE MATERIALES  
LABORATORIO DE SOLDADURA**



ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)								
Nombre de la empresa: EPN			WPS N°: EPN - LDS – 01					
PQR N°: EPN - LDS - 01			Fecha: 14/06/2017					
Según Norma: AWS D1.6 Structural Welding Code Steel			Realizado por: Edith Trujillo					
JUNTA UTILIZADA				POSICIÓN DE SOLDADURA				
Tipo de junta:		TOPE		Posición de Soldadura:		1G		
Abertura raíz:		2 [mm]		Progresión:		Recta		
Talón:		N/A		Técnica:		Pasada única		
Ángulo de ranura:		No		PRECALENTAMIENTO				
Placa de respaldo:		No		Temperatura:		N/A		
Preparar bisel:		Si		Temperatura entre pases:		N/A		
Tiempo entre pases:				Tiempo entre pases:		N/A		
METAL BASE				TÉCNICA DE SOLDADURA				
Especificación:		AISI 304		Proceso de Soldadura:		GMAW		
Espesor:		3 [mm]		Tipo de Soldadura:		Semiautomática		
METAL APORTE				Soldadura a:		Un lado		
Proceso:		GMAW		Cordón de respaldo:		NO		
Especificación SFA N°:		5.9		Pase múltiples o simples:		Simple		
Diámetro:		0.9 [mm]		Cordón recto u oscilante:		Recto		
Denominación AWS:		ER 308L		Limpieza:		Cepillo acero inoxidable		
Marca:		Blue Max		Modo de transferencia:		Cortocircuito		
GAS DE PROTECCIÓN				NOTAS				
Tipo:		Argón (Ar)		Cortar la punta del alambre antes de empezar a soldar				
Protección del arco:		100% Ar		La boquilla debe sobresalir unos 3 [mm] de la tobera				
Caudal:		12 [lt/min]						
DETALLE DE LA JUNTA								
CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN								
Nº DE PASES	METAL DE APORTE		CORRIENTE		TENSIÓN DE TRABAJO (VOLTIOS)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/s)	TÉCNICA DE SOLDADURA	
	CLASE	DIÁMETRO (mm)	TIPO Y POLARIDAD	INTENSIDAD (AMPERIOS)			OSCILADO	RECTO
1	ER 308L	0.9	DC+	83	21	4.61		X

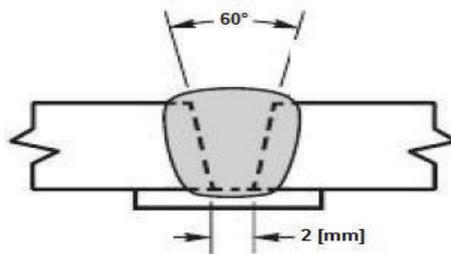


**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE MATERIALES  
LABORATORIO DE SOLDADURA**



<b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)</b>			
Nombre de la empresa:	EPN	WPS N°:	EPN - LDS - 01
PQR N°:	EPN - LDS - 01	Fecha:	14/06/2017
Según Norma:	AWS D1.6 Structural Welding Code Steel	Realizado por:	Edith Trujillo
<b>JUNTA UTILIZADA</b>		<b>POSICIÓN DE SOLDADURA</b>	
Tipo de junta:	TOPE	Posición de Soldadura:	1G
Abertura raíz:	2.0 [mm]	Progresión:	Recta
Talón:	No	Técnica:	Pasada única
Ángulo de ranura:	60°	<b>PRECALENTAMIENTO</b>	
Placa de respaldo:	No	Temperatura:	N/A
Preparar bisel:	Si	Temperatura entre pases:	N/A
		Tiempo entre pases:	N/A
<b>METAL BASE</b>		<b>TÉCNICA DE SOLDADURA</b>	
Especificación:	AISI 304	Proceso de Soldadura:	GMAW
Espesor:	6 [mm]	Tipo de Soldadura:	Semiautomática
<b>METAL APORTE</b>		Soldadura a:	Dos lados
Proceso:	GMAW	Cordón de respaldo:	NO
Especificación SFA N°:	5.9	Pase múltiples o simples:	Simple
Diámetro:	0.9 [mm]	Cordón recto u oscilante:	Recto
Denominación AWS:	ER 308L	Limpieza:	Cepillo acero inoxidable
Marca:	Blue Max	Modo de transferencia:	Spray
<b>GAS DE PROTECCIÓN</b>		<b>NOTAS</b>	
Tipo:	Argón (Ar)	Cortar la punta del alambre antes de empezar a soldar	
Protección del arco:	100% Ar	La boquilla debe encontrarse 3 [mm] atrás de la tobera	
Caudal:	16 [lt/min]		

**DETALLE DE LA JUNTA**



**CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN**

N° DE PASES	METAL DE APORTE		CORRIENTE		TENSIÓN DE TRABAJO (VOLTIOS)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/s)	TÉCNICA DE SOLDADURA	
	CLASE	DIÁMETRO (mm)	TIPO Y POLARIDAD	INTENSIDAD (AMPERIOS)			OSCILADO	RECTO
1	ER 308L	0.9	DC+	151	25.1	6.37		X

## ANEXO II. Ficha técnica del acero inoxidable AISI 304

### PLANCHAS ACERO INOXIDABLE

## Norma: AISI 304

### Especificaciones Generales

DESCRIPCIÓN DE ACUERDO A NORMA	JIS	SUS 304
	ASTM	304
	DIN	4301

**ESPEORES** desde 0.40-15mm

**DIMENSIONES** 1220 x 2440mm (estándar)

1220 x otros largos (especial)



ACERO INOXIDABLE

Descripción: Acero inoxidable aleado al cromo y níquel, muy resistente a la corrosión intergranular y a los ataques químicos del medio ambiente. Posee una buena resistencia a la corrosión del agua, ácidos y soluciones alcalinas si se emplea con superficie pulida a espejo. Se la puede encontrar con acabado ASTM 2B y 1.

### COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)

C Max	Si Max	Mn	P Max	S Max	Ni	Cr	Mo	Otros
0,08	1	2	0,04	0,03	8 - 10,5	18 - 20	XX	XX

### PROPIEDADES MECÁNICAS

RESISTENCIA MECÁNICA		PUNTO DE FLUENCIA		Elongación % Min.	PRUEBAS DE DUREZA (MAX)	
Kg/mm <sup>2</sup>	Psi	Kg/mm <sup>2</sup>	Psi		ROCKWELL B	VICKERS
49	69500	18	25500	40	81,7	160

## ANEXO III. Ficha técnica del Argón

### Argon Ar,

R-740

CAS: 7440-37-1 EC: 231-147-0

UN: 1006 (Compressed); 1951 (Refrigerated liquid)



ADR Class 2, 1A (Compressed);  
3A (Refrigerated liquid)



DOT Class 2.2

#### Instrument argon 5.0

Impurities [ppm] - Purity ≥99.999%

O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	H <sub>2</sub> O
≤2	≤5	≤0.2	≤3

#### Scientific argon 6.0

Impurities [ppm] - Purity ≥99.9999%

O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO+CO <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	H <sub>2</sub> O
≤0.2	≤0.4	≤0.1	≤0.2	≤0.1	<0.5

Typical filling pressure

15 °C: 200 bar(a)

70 °F: 2,640 psi(g)

#### Characteristics

Colourless and odourless gas. Non-reactive. Inert. Asphyxiant in high concentrations.

#### Hazard classifications

Proposed by the Industry

Signal word: WARNING

## ANEXO IV. Ficha técnica del Alambre sólido para MIG 308L

# Blue Max<sup>®</sup> MIG 308LSi

Acero inoxidable • AWS ER308Si, ER308LSi

#### Características principales

- ▶ Alto nivel de silicio para mayor fluidez del charco y mojado de la punta
- ▶ Lubricante patentado de superficie para una alimentación estable y estabilidad del arco
- ▶ Versátil electrodo diseñado para soldar aceros inoxidables CrNi austeníticos
- ▶ Q2 Lot<sup>®</sup>: certificado que muestra la composición real del alambre y el número calculado de ferrita (FN) disponible en línea
- ▶ Contenido controlado de ferrita para una máxima resistencia a la corrosión

#### Aplicaciones típicas

- ▶ Aceros inoxidables tipo 304 y 304L
- ▶ Aceros inoxidables austeníticos comunes denominados aceros "18-8"
- ▶ ASTM A743 o A744 tipo CF-8 y CF-3

#### Cumplimientos

AWS A5.9/A5.9M: 2006:	ER308Si, ER308LSi
ASME SFA-A5.9:	ER308Si, ER308LSi
ABS:	ER308Si, ER308LSi
CWB/CSA W48-06:	ER308LSi
EN ISO 14343-B:	SS308LSi

#### Posiciones de soldadura

Todas

#### Gas protector

Transferencia de corto circuito:  
90% Helio / 7-1/2% Argón / 2-1/2% CO<sub>2</sub>  
Transferencia de spray axial:  
98% Mezcla Argón / Oxígeno

## ANEXO V. Tipo de solidificaciones y evolución del acero inoxidable austenítico AISI 304.

### Solidificación tipo AF.

La solidificación se produce cuando la relación  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  está en los rangos de 1.25 a 148, e involucra a la formación austenítica y ferrita al final del proceso.

Al momento de la soldadura, la solidificación se empieza con la formación de austenita y el líquido remanente que contiene elementos promotores de ferrita (Cromo y Molibdeno) que pueden alterar su composición formando ferrita en las regiones interdendríticas en los distintos estados finales de la solidificación.

La figura 1. (a) muestra un esquema de la solidificación de tipo AF, mientras que la figura 1. (b) nos da un ejemplo de la microestructura en los límites de subgranos de solidificación.

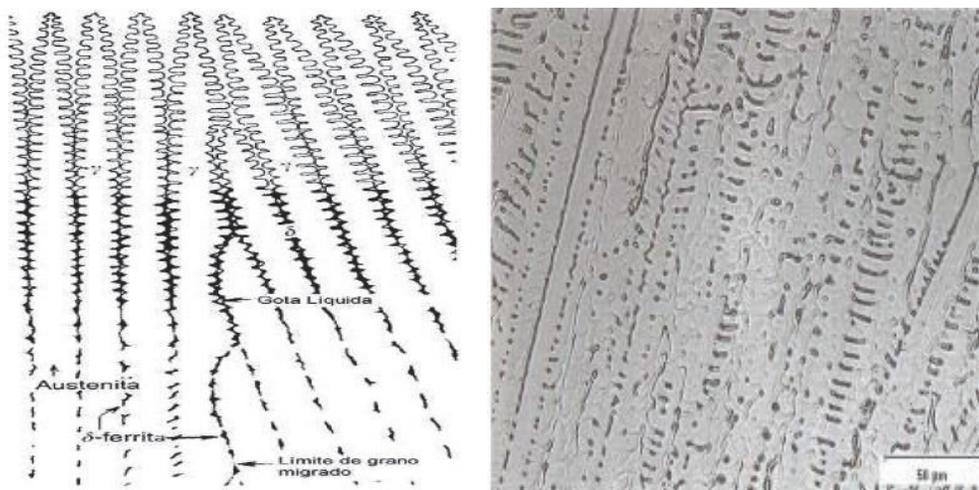


Figura 1. (a) Esquema de la solidificación tipo AF, (b) Microestructura resultante en la zona de fusión de una solidificación Tipo AF.

### Solidificación tipo FA

Cuando la solidificación va desde ferrita primaria hay dos posibilidades. Si al final existen formas austeníticas en la solidificación se denomina Tipo FA. Esta austenita se forma por una reacción peritética-eutética y está en los límites de la ferrita solidificada.

1. Al final de la solidificación de ferrita, una reacción peritética–eutéctica da como resultado la formación de austenita sobre la celda de ferrita y límites dendríticos. Esta reacción ocurre dentro de la región trifásica mostrada en la Figuras 1.19. Se llama eutéctica-peritética por ser una composición dependiente y resultado de una transición desde una reacción peritética en el sistema Fe-Ni a una reacción eutéctica en el sistema Fe-Cr-Ni.

2. Cuando la solidificación está completa la microestructura consiste en dendritas de ferrita primaria con marcas de austenita interdendrítica. El incremento de la austenita presente depende de las condiciones de solidificación y los valores de la relación  $C_{req}/Ni_{eq}$

3. Como el metal soldado enfría desde ferrita + austenita, la ferrita se incrementa de manera inestable y la austenita consume la ferrita por difusión controlada.

4. Cuando las tasas de enfriamiento son moderadas y/o la relación  $C_{req}/Ni_{eq}$  es baja, pero aún se encuentran dentro de los rangos FA resulta en una morfología columnar. Esta es una consecuencia del avance de la austenita consumiendo la ferrita hasta que la ferrita es suficientemente enriquecida por elementos promotores (Cr y Mo) y agota en elementos promotores de austenita (Ni, C y N) que es estable a bajas temperaturas donde la difusión es limitada. Un esquema de la microestructura columnar y su micrografía se observa en la Figura 2.

5. Cuando las tasas de enfriamiento son altas y la relación  $C_{req}/Ni_{eq}$  incrementa dentro del rango FA en la figura 1.19 resulta en una morfología ferrítica tipo placas. Esta morfología se forma en lugar de la morfología columnar debido a la restricción en la difusión durante la transformación ferrita-austenita. Cuando las distancias de difusión son reducidas es más eficiente que la transformación proceda en placas espaciadas más estrechamente que resulta en una ferrita residual que atraviesa la dendrita en la dirección de crecimiento Figura 3.

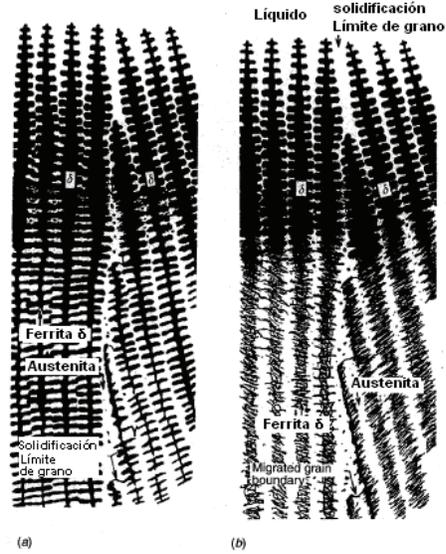


Figura 2. Solidificación tipo AF. a). Ferrita en esqueleto, b) Morfología Lathy.

Fuente: (ASM Metal Handbook Volume 09, 1992)

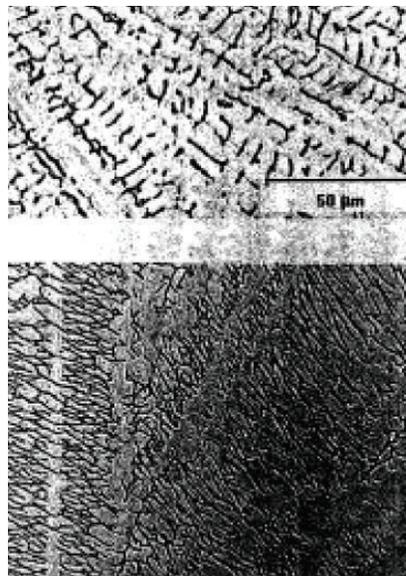


Figura 3 Microestructura en la zona de fusión resultado de una solidificación FA. a) Morfología de ferrita en esqueleto, b) Morfología de ferrita Lathy

Fuente: (ASM Metal Handbook Volume 09, 1992)

# ANEXO VI. Informe técnico del ensayo de Tracción



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



## INFORME TÉCNICO

LAEV-AGO.17.02.0

Quito, 2 de agosto de 2017

TRABAJO SOLICITADO POR: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
Ing. Diego Marcelo Espinosa Chauvín

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de juntas soldadas pertenecientes a la señorita Edith Trujillo para el proyecto de titulación "ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304 CON PROCESO GMAW". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

### RESULTADOS

1. MUESTRAS: Ocho (8) probetas de juntas soldadas para ensayo de tracción
2. ENSAYO DE TRACCIÓN A PROBETAS DE JUNTAS SOLDADAS

En las tablas del 1 al 4 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados.

Tabla 1. Resistencia a la tracción de juntas soldadas (grupo 1).

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
T1-1	19,66	2,85	6.530	29.047	75,2	518,4	FMB
T1-2	19,73	2,94	7.130	31.716	79,3	546,8	FMB

\* FMB: Falla en el material base

Tabla 2. Resistencia a la tracción de juntas soldadas (grupo 2).

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
T2-1	19,58	3,27	7.820	34.785	78,8	543,3	FJS
T2-2	19,78	3,24	8.190	36.431	82,4	568,5	FMB

\* FMB: Falla en el material base

\* FJS: Falla en la junta soldada

Tabla 3. Resistencia a la tracción de juntas soldadas (grupo 3).

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
T3-1	20,31	6,77	14.880	66.190	69,8	481,4	FJS
T3-2	20,42	6,42	14.300	63.610	70,4	485,2	FJS

\* FJS: Falla en la junta soldada

Tabla 4. Resistencia a la tracción de juntas soldadas (grupo 4).

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
T4-1	20,64	6,54	17.320	77.043	82,8	570,8	FJS
T4-2	20,18	6,28	15.610	69.437	79,5	547,9	FJS

\* FJS: Falla en la junta soldada

Las curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria se muestran en el anexo. El porcentaje de deformación que se puede observar en las curvas corresponde al desplazamiento del cabezal de la máquina universal de ensayos.

	ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:			
Nombre:	Ing. Jonathan Rios	Ing. Alexis Sola	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.
Cargo:	ASISTENTE	ESPECIALISTA	JEFE (E)
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES			



ANEXO

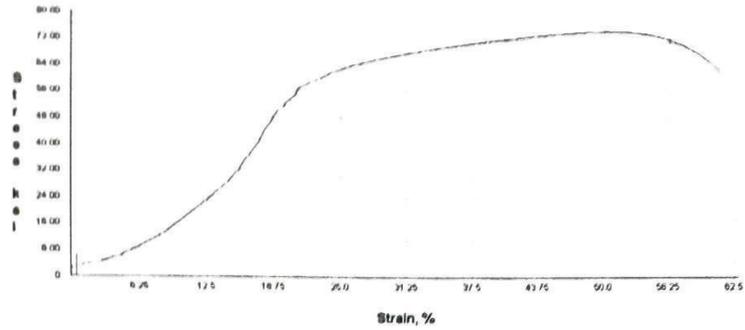


Figura 1. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T1-1.

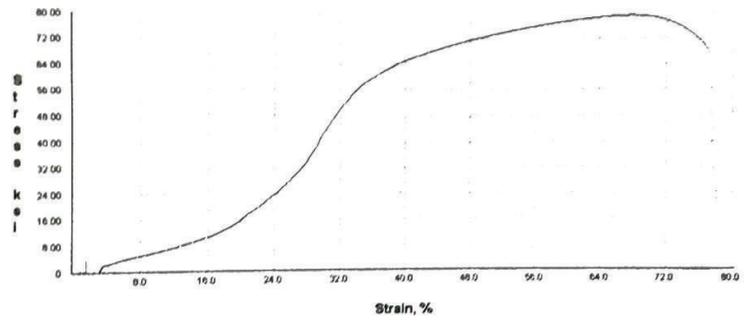


Figura 2. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T1-2.

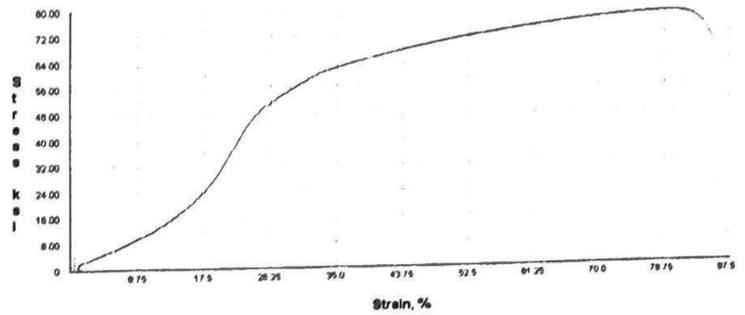


Figura 3. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T2-1.

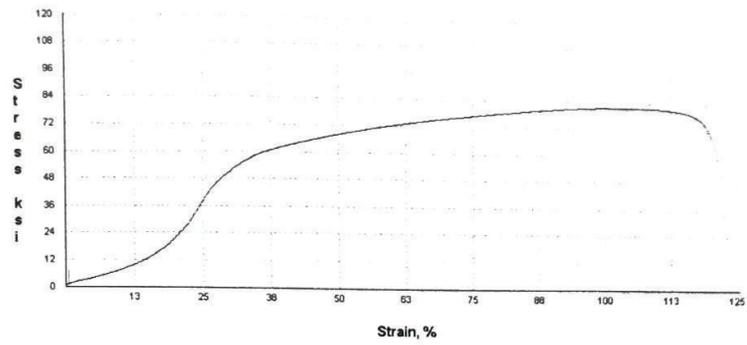


Figura 4. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T2-2.

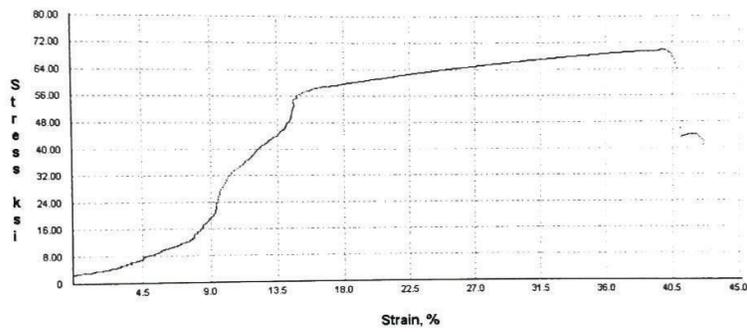


Figura 5. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T3-1.

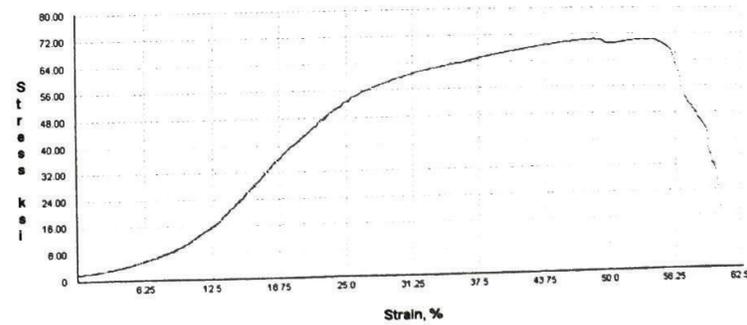


Figura 6. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T3-2.

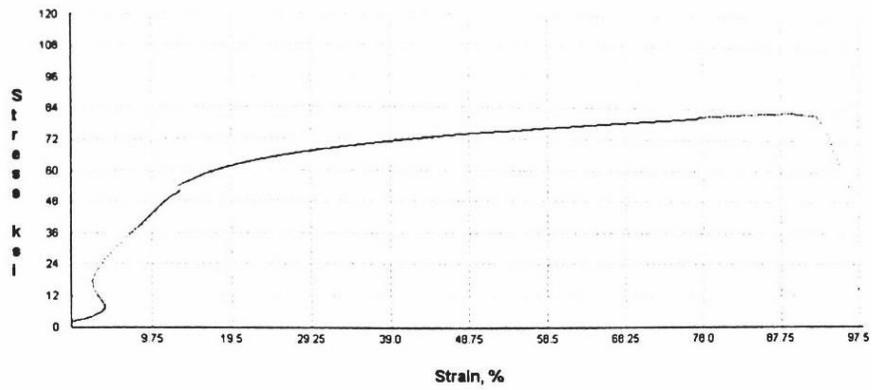


Figura 7. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T4-1.

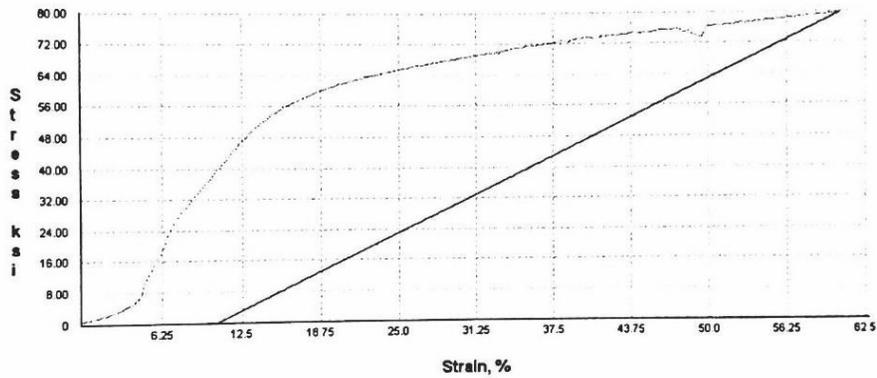


Figura 8. Curva de esfuerzo vs porcentaje de deformación de la probeta T4-2.

## ORDEN DE EMPASTADO