



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SOLDABILIDAD EN EL ACERO DE ALTO PORCENTAJE DE CARBONO Y CROMO CON MATERIAL DE APORTE AUSTENÍTICO-FERRÍTICO CON PROCESO DE SOLDADURA SMAW**

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

**JIMMY GABRIEL ALVAREZ ZAMBRANO**  
jimmy.alvarez@epn.edu.ec

**DIRECTOR: Ing. GALO HOMERO BARRAGÁN CAMPOS**  
homero.barragan@epn.edu.ec

**COLABORADOR: Ing. GABRIEL EDMUNDO VELASTEGUÍ BALDA**  
gabriel.velastegui@epn.edu.ec

Quito, febrero 2020

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **JIMMY GABRIEL ALVAREZ ZAMBRANO**, bajo nuestra supervisión.

---

Ing. Galo Homero Barragán Campos  
*DIRECTOR DE PROYECTO*

---

Ing. Gabriel Edmundo Velasteguí Balda  
*COLABORADOR DE PROYECTO*

## DECLARACIÓN

Yo, **Jimmy Gabriel Alvarez Zambrano**, 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.

---

Jimmy Gabriel Alvarez Zambrano

## DEDICATORIA

A mis padres Carlos y Jenny, por ser las personas más importantes en mí vida, por nunca dudar de mí y siempre apoyarme frente a cualquier adversidad presentada.

A mis hermanos Carlos y Gina, por todo su apoyo en la formación profesional, sé que al ser colegas en un futuro no muy lejano vamos a poder constituir un espacio de oportunidades para el desarrollo de la industria del país.

Sin duda me hubiera encantado seguir siendo compañeros de viaje Rocko (+), para que puedas ser testigo de mi consecución profesional, pero el destino esta vez no estuvo de nuestro lado, pero la certeza que poseo es que nos vamos a volver encontrar en el embale por la infinidad del universo.

A los miembros del distinguido "club" Emilio, Bruno y Rubén por ser parte de esta etapa de mi vida y por el acole en todo momento.

## AGRADECIMIENTO

La sintonía con el universo provoca que todos los instantes de vida relativamente se puedan valorarse como buenos y malos. El momento, el lugar y las personas imponen la condición para catalogar ese lapso de vida. El desarrollar y culminar este estudio sin duda entra en los mejores momentos de mi vida, el estar en el lugar adecuado y rodeado de las personas correctas aportaron desde varios aspectos para culminar el trabajo.

Un gran agradecimiento y estima a mi hermano Carlos por siempre estar dispuesto a brindarme su apoyo.

A todo el personal que conforma el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica por brindarme la oportunidad y abrirme las puertas para desarrollar mi tesis, a su titular el Ing. Homero Barragán por su gentil dirección en el trabajo, al Ing. Gabriel Velasteguí por la información técnica proveída para plantear el tema de titulación, al “Welder man API 1104” Jorge Guzmán, por la colaboración brindada para ejecutar la parte práctica del estudio.

Y al resto de personas que influenciaron, acolitaron y rifaron esa sintonía con el universo, en el tiempo vivido en mi etapa universitaria.

# ÍNDICE

CERTIFICACIÓN .....	i
DECLARACIÓN .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	1
1. MARCO TEÓRICO .....	3
1.1. Soldadura .....	3
1.2. Procesos de soldadura .....	3
1.3. Procesos de soldadura por arco .....	4
1.4. Soldadura por arco metálico protegido (SMAW) .....	5
1.4.1. Efectos de las variables del proceso de soldadura .....	7
1.4.2. Diseños típicos de juntas y posiciones utilizados para SMAW .....	8
1.5. Clasificación de electrodos utilizados con proceso SMAW .....	10
1.6. Generalidades del código AWS A5.4 .....	11
1.7. Características del depósito de soldadura austenítico-ferrítico .....	11
1.8. Características, propiedades y aplicaciones del electrodo E312-16 .....	12
1.8.1. Características .....	12
1.8.2. Propiedades .....	12
1.8.3. Aplicaciones .....	13
1.9. Aceros de alto contenido de carbono y cromo .....	14
1.9.1. Aceros para herramientas .....	14
1.10. Características, propiedades y aplicaciones del acero AISI D3 .....	15
1.10.1. Características .....	15
1.10.2. Propiedades .....	16
1.10.3. Aplicaciones .....	16

1.11.	Tratamientos térmicos para el acero AISI D3 .....	17
1.12.	Tratamiento de precalentamiento.....	19
1.13.	Ensayos de soldabilidad.....	20
1.13.1.	Fisuramiento en caliente.....	22
1.13.1.1.	Ensayo <i>Varestraint</i> .....	22
1.13.2.	Fisuramiento en frío.....	23
1.13.2.1.	Ensayo <i>Cruciform</i> .....	23
2.	METODOLOGÍA.....	25
2.1.	Metodología teórica.....	25
2.1.1.	Proceso de soldadura SMAW para aceros de alto porcentaje de carbono y cromo 25	
2.1.2.	Definición de las temperaturas de precalentamiento del material base .....	25
2.1.2.1.	Temperatura de precalentamiento basado en $M_s$ .....	26
2.1.2.2.	Temperatura de precalentamiento recomendada por el fabricante.....	26
2.1.3.	Tratamiento térmico post soldadura .....	27
2.1.3.1.	Procedimiento para el tratamiento térmico de revenido .....	28
2.1.4.	Ensayos de soldabilidad.....	29
2.1.4.1.	Ensayo de <i>Varestraint</i> .....	30
2.1.4.2.	Ensayo <i>Cruciform</i> .....	32
2.2.	Metodología experimental .....	35
2.2.1.	Proceso de soldadura ensayo <i>Varestraint</i> .....	35
2.2.1.1.	Variables en el proceso SMAW para el ensayo <i>Varestraint</i> .....	39
2.2.2.	Proceso de soldadura ensayo <i>Cruciform</i> .....	39
2.2.2.1.	Variables en el proceso SMAW para el ensayo <i>Cruciform</i> .....	44
2.2.3.	Ensayos no destructivos .....	46
2.2.3.1.	Inspección visual ensayo <i>Varestraint</i> .....	46
2.2.3.2.	Inspección visual ensayo <i>Cruciform</i> .....	47
2.2.3.3.	Líquidos penetrantes ensayo <i>Varestraint</i> .....	47
2.2.3.4.	Líquidos penetrantes ensayo <i>Cruciform</i> .....	49

2.2.3.5.	Radiografía industrial ensayo <i>Varestraint</i> (RX) .....	50
2.2.3.6.	Partículas magnéticas ensayo <i>Cruciform</i> .....	52
2.2.4.	Ensayos destructivos .....	53
2.2.4.1.	Análisis metalográfico .....	53
2.2.4.2.	Preparación metalográfica ensayo <i>Varestraint</i> .....	54
2.2.4.3.	Preparación metalográfica ensayo <i>Cruciform</i> .....	55
2.2.4.4.	Macrografía.....	58
2.2.4.5.	Micrografía.....	58
2.2.4.6.	Ensayo de dureza.....	58
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
3.1.	Resultados y discusión ensayos no destructivos .....	61
3.1.1.	Inspección visual ensayo <i>Varestraint</i> .....	61
3.1.2.	Inspección visual ensayo <i>Cruciform</i> .....	63
3.1.3.	Líquidos penetrantes ensayo <i>Varestraint</i> .....	65
3.1.4.	Líquidos penetrantes ensayo <i>Cruciform</i> .....	67
3.1.5.	Radiografía industrial ensayo <i>Varestraint</i> (RX).....	69
3.1.6.	Partículas magnéticas ensayo <i>Cruciform</i> .....	72
3.2.	Resultados y discusión de ensayos destructivos .....	75
3.2.1.	Macrografía ensayo <i>Varestraint</i> .....	75
3.2.2.	Macrografía ensayo <i>Cruciform</i> .....	80
3.2.3.	Micrografías ensayo <i>Varestraint</i> .....	82
3.2.4.	Micrografías ensayo <i>Cruciform</i> .....	87
3.2.5.	Ensayo de dureza en el ensayo <i>Varestraint</i> .....	92
3.2.6.	Ensayo de dureza en el ensayo <i>Cruciform</i> .....	94
3.3.	Análisis suplementarios.....	99
3.3.1.	Tasas de enfriamiento.....	99
3.3.2.	Expansión térmica.....	104
3.3.3.	Tensión residual y distorsión.....	105
3.3.4.	Ensayos no destructivos complementarios .....	107



3.3.4.1.	Partículas magnéticas en vía húmeda ensayo <i>Varestraint</i> .....	107
3.3.4.2.	Radiografía industrial ensayo <i>Varestraint</i> (RG).....	109
3.3.5.	Soplo magnético del arco.....	111
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	112
4.1.	Conclusiones.....	112
4.2.	Recomendaciones.....	114
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	116
	ANEXOS.....	117

## Índice de Figuras

Figura 1.1. Procesos comunes de soldadura por arco.....	4
Figura 1.2. Circuito de soldadura por arco (representación SMAW).....	5
Figura 1.3. Soldadura por arco metálico protegido (SMAW).....	6
Figura 1.4. Efectos típicos del amperaje, longitud de arco y velocidad de avance.....	8
Figura 1.5. Diversas juntas y posiciones de soldadura.....	9
Figura 1.6. Conjunto de electrodos E312-16 marca Kiswel.....	14
Figura 1.7. Esquema simplificado ensayo <i>Varestraint</i> .....	22
Figura 2.1. Diagrama de transformación para enfriamiento continuo.....	27
Figura 2.2. Esquema del tratamiento térmico del acero AISI D3.....	28
Figura 2.3. Diagrama de revenido.....	29
Figura 2.4. Dimensiones de la probeta ensayo <i>Varestraint</i> .....	30
Figura 2.5. Configuración del ensayo <i>Varestraint</i> .....	31
Figura 2.6. Ensamble del ensayo <i>Cruciform</i> .....	33
Figura 2.7. Localización del corte para las probetas del ensayo <i>Cruciform</i> .....	34
Figura 2.8. Material base cortado a medida para ensayo <i>Varestraint</i> .....	35
Figura 2.9. Expansión térmica angular opuesta a la dirección del peso aplicado en probeta ensayo <i>Varestraint</i> .....	36
Figura 2.10. Aplicación de la fuerza de doblado sobre una probeta en el ensayo <i>Varestraint</i> .....	36
Figura 2.11. Proceso de precalentamiento utilizando una llama de oxiacetilénica.....	37
Figura 2.12. Cordón de soldadura depositado en posición 1G ensayo <i>Varestraint</i> .....	38
Figura 2.13. Probeta deformada, el enfriamiento se llevó a cabo con la fuerza de doblado aplicada.....	38
Figura 2.14. Material base cortado según dimensiones del ensayo <i>Cruciform</i> .....	40
Figura 2.15. Ensamble de las probetas ensayo <i>Cruciform</i> .....	40
Figura 2.16. Cordón de soldadura depositado en posición 2F ensayo <i>Cruciform</i> .....	41
Figura 2.17. Expansión térmica angular ensayo <i>Cruciform</i> .....	42
Figura 2.18. Fisura a lo largo de todo el cordón de soldadura en el tercer filete, <i>Cruciform 1</i> .....	42
Figura 2.19. Soplo magnético en el tercer filete <i>Cruciform 2</i> .....	43
Figura 2.20. Horno para tratamiento térmico. a) Ingreso de las probetas al horno. b) programación del horno para ejecutar el tratamiento térmico post soldadura.....	43
Figura 2.21. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes en la probeta 1, del ensayo <i>Varestraint</i> por inspección visual.....	46

Figura 2.22. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes por inspección visual del <i>Cruciform 1</i> . .....	47
Figura 2.23. Líquidos utilizados para ensayo de tintas penetrantes. (a) Penetrante, (b) revelador.....	47
Figura 2.24. Aplicación por aspersion del líquido penetrante en las probetas del ensayo <i>Varestraint</i> . .....	48
Figura 2.25. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes en la probeta 1 del ensayo <i>Varestraint</i> por tintas penetrantes. ....	48
Figura 2.26. Aplicación por aspersion del líquido penetrante en las probetas del ensayo <i>Cruciform</i> . .....	49
Figura 2.27. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes en el tercer filete del <i>Cruciform 1 por tintas penetrantes</i> . ....	50
Figura 2.28. Placa radiográfica de la probeta 1 ensayo <i>Varestraint</i> . .....	51
Figura 2.29. Medición del campo magnético residual .....	52
Figura 2.30. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes en el tercer filete del <i>Cruciform 1 por partículas magnéticas</i> . ....	53
Figura 2.31. Extracción de las probetas, secciones de corte del ensayo <i>Varestraint</i> . ....	54
Figura 2.32. Montaje de las probetas del ensayo <i>Varestraint</i> en resina poliéster. ....	54
Figura 2.33. Probetas del ensayo <i>Varestraint</i> pulidas y aplicadas el ataque químico y probeta pulida del material base.....	55
Figura 2.34. Corte transversal con enfriamiento con agua de la probeta <i>Cruciform 1</i> . ....	56
Figura 2.35. Proceso de desbaste grueso realizo a una probeta del ensayo <i>Cruciform</i> . ..	56
Figura 2.36. Probetas pulidas del ensayo <i>Cruciform</i> . .....	57
Figura 2.37. Probetas pulidas aplicadas el ataque químico del ensayo <i>Cruciform</i> . ....	57
Figura 2.38. Ensayo de dureza sobre el material base. ....	59
Figura 2.39. Ensayo de dureza sobre la probeta MI 1.....	59
Figura 3.1. Diagrama de cajas y bigotes de la longitud de las fisuras de las probetas <i>Varestraint</i> . .....	78
Figura 3.2. Ensayos de dureza sobre la probeta P3 del ensayo <i>Varestraint</i> y el material base en condición de origen.....	92
Figura 3.3. Mediciones de la dureza en función de su localización en las regiones del cordón de soldadura para el ensayo <i>Varestraint</i> . .....	93
Figura 3.4. Probetas del ensayo <i>Cruciform</i> , se identifican los cuatro filetes y las temperaturas a las cuales se realizaron los precalentamientos. ....	94
Figura 3.5. Mediciones de la dureza en las probetas MI 1 y MA 1 en función de su localización en las regiones de soldadura para el ensayo <i>Cruciform</i> . .....	96

Figura 3.6. Mediciones de la dureza en las probetas MI* 2 y MA* 3 en función de su localización en las regiones de soldadura para el ensayo <i>Cruciform</i> . .....	98
Figura 3.7. Temperatura de enfriamiento en función del tiempo para probetas del ensayo <i>Varestraint</i> precalentadas a 200 y 300 °C. ....	100
Figura 3.8. Tasa de enfriamiento de la probeta <i>Cruciform 1</i> . ....	102
Figura 3.9. Tasa de enfriamiento de la probeta <i>Cruciform 2</i> . ....	103
Figura 3.10. Deformación en la probeta P4 ensayo <i>Varestraint</i> . ....	105
Figura 3.11. Distorsión del ensamble <i>Cruciform 2</i> . ....	106
Figura 3.12. Cápsula de fuente radioactiva de RG. ....	109
Figura 3.13. Representación del soplo magnético del arco. ....	111

## Índice de Tablas

Tabla 1.1. Composición química del metal depositado [%].	12
Tabla 1.2. Propiedades mecánicas del metal depositado.	13
Tabla 1.3. Equivalencias en marcas del electrodo E312-16.	13
Tabla 1.4. Elementos y porcentajes del acero de alto contenido de carbono y cromo D3.	15
Tabla 1.5. Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI D3.	17
Tabla 1.6. Dureza obtenida en función de la temperatura de templado del acero AISI D3.	18
Tabla 1.7. Ensayos de soldabilidad para evaluar la susceptibilidad al fisuramiento.	21
Tabla 2.1. Dimensiones de las placas para ensayo <i>Cruciform</i> .	33
Tabla 2.2. Variables controladas en el proceso SMAW ensayo <i>Varestraint</i> .	39
Tabla 2.3. Temperaturas y tiempos de precalentamiento <i>Cruciform 1</i> .	44
Tabla 2.4. Temperaturas y tiempos de precalentamiento <i>Cruciform 2</i> .	44
Tabla 2.5. Temperaturas entre pases y velocidades de avance <i>Cruciform 1</i> .	45
Tabla 2.6. Temperaturas entre pases y velocidades de avance <i>Cruciform 2</i> .	45
Tabla 2.7. Condiciones de trabajo para ensayo de RX, probeta 1.	51
Tabla 2.8. Tiempos de procesamiento de la película radiográfica.	51
Tabla 2.9. Identificación metalográfica para las probetas del ensayo <i>Cruciform</i> .	56
Tabla 3.1. Resultados de inspección visual ensayo <i>Varestraint</i> .	61
Tabla 3.2. Resultados de inspección visual ensayo <i>Cruciform</i> .	63
Tabla 3.3. Resultados de inspección por líquidos penetrantes del ensayo <i>Varestraint</i> .	65
Tabla 3.4. Resultados de inspección por líquidos penetrantes del ensayo <i>Cruciform</i> .	67
Tabla 3.5. Placas radiográficas de las probetas del ensayo <i>Varestraint</i> .	70
Tabla 3.6. Resultados inspección por radiografía industrial ensayo <i>Varestraint</i> .	71
Tabla 3.7. Resultados de inspección por partículas magnéticas del ensayo <i>Cruciform</i> .	72
Tabla 3.8. Identificación de las longitudes de las fisuras en la probeta P3 del ensayo <i>Varestraint</i> .	76
Tabla 3.9. Longitud de las fisuras, totales y combinadas de las probetas del ensayo <i>Varestraint</i> .	77
Tabla 3.10. Identificación del material base, material de aporte y zona afectada por el calor en la probeta P1 ensayo <i>Varestraint</i> .	79
Tabla 3.11. Valores de áreas de la zona afectada por el calor para probetas del ensayo <i>Varestraint</i> .	79
Tabla 3.12. Identificación del material base, material de aporte y zona Afectada por el Calor para una probeta MA 1 del ensayo <i>Cruciform 1</i> .	80

Tabla 3.13. Identificación del material base, material de aporte y Zona Afectada por el Calor para la probeta MA* 3 del ensayo <i>Cruciform 2</i> .	81
Tabla 3.14. Valores del área de la zona afectada por el calor para las probetas del ensayo <i>Cruciform</i> .	81
Tabla 3.15. Micrografías del material base en condiciones de fábrica y después de haber ejecutado el proceso de soldadura <i>Varestraint</i> .	83
Tabla 3.16. Micrografías de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) de las probetas a) P1 y b) P3 del ensayo <i>Varestraint</i> .	84
Tabla 3.17. Micrografías del metal de aporte de las probetas a) P1 y b) P3 del ensayo <i>Varestraint</i> .	85
Tabla 3.18. Micrografías de las fisuras en las probetas a) P1 y b) P3 del ensayo <i>Varestraint</i> .	86
Tabla 3.19. Micrografías del material base en condiciones de origen y después de haberse ejecutado el proceso de soldadura en el ensayo <i>Cruciform</i> .	87
Tabla 3.20. Micrografías de la ZAC en el primer filete de las probetas a) MI 1 y b) MI* 2 del ensayo <i>Cruciform</i> .	88
Tabla 3.21. Micrografías de la ZAC en el segundo filete de las probetas a) MI 1 y b) MI* 2 del ensayo <i>Cruciform</i> .	89
Tabla 3.22. Micrografías de la ZAC en el tercer filete de las probetas a) MI 1 y b) MI* 2 del ensayo <i>Cruciform</i> .	90
Tabla 3.23. Microestructuras de la ZAC en el cuarto filete de las probetas a) MI 1 y b) MI* 2 del ensayo <i>Cruciform</i> .	91
Tabla 3.24. Resultados de medición de dureza en las probetas del ensayo <i>Varestraint</i> y material base en condición de origen.	92
Tabla 3.25. Resultados de medición de dureza en la probeta MI 1 del ensayo <i>Cruciform 1</i> .	95
Tabla 3.26. Resultados de medición de dureza en la probeta MA 1 del ensayo <i>Cruciform 1</i> .	96
Tabla 3.27. Resultados de medición de dureza en la probeta MI* 2 del ensayo <i>Cruciform 2</i> .	97
Tabla 3.28. Resultados de medición de dureza en la probeta MA* 3 del ensayo <i>Cruciform 2</i> .	97
Tabla 3.29. Tiempos y temperaturas de enfriamiento de las probetas P1, P2, P3 y P4 del ensayo <i>Varestraint</i> .	99
Tabla 3.30. Tiempos y temperaturas de enfriamiento de la probeta <i>Cruciform 1</i> .	101
Tabla 3.31. Tiempos y temperaturas de enfriamiento de la probeta <i>Cruciform 2</i> .	102

Tabla 3.32. Coeficiente de expansión térmica del acero AISI D3. ....	104
Tabla 3.33. Magnitudes de deformación en las probetas del ensayo <i>Varestraint</i> . ....	106
Tabla 3.34. Cuantificación de la distorsión de las probetas <i>Cruciform</i> . ....	107
Tabla 3.35. Resultados de inspección por partículas magnéticas en vía húmeda de las probetas P1 y P3 del ensayo <i>Varestraint</i> . ....	108
Tabla 3.36. Resultados de inspección por radiografía industrial (RG) de las probetas P1 y P3 del ensayo <i>Varestraint</i> . ....	110

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tiene como finalidad estudiar la soldabilidad del acero de alto porcentaje de carbono y cromo AISI D3, mediante el depósito de material de aporte del tipo austenítico-ferrítico E312-16 y empleando el proceso manual de electrodo revestido SMAW. La composición química del acero provoca que su nivel de soldabilidad sea bajo, además, que su microestructura lo hace sensible a la aparición de poros, fisuras o grietas. El electrodo seleccionado, generalmente empleado con aceros inoxidable, es recomendado para aceros de difícil soldabilidad y alta resistencia, y debe ir acompañado de tratamientos térmicos de pre y post soldadura. Para generar los indicadores de soldabilidad del acero se ejecutaron ensayos de soldabilidad bajo los lineamientos establecidos en la norma AWS B4.0; la tendencia al fisuramiento en caliente se analiza a través del ensayo *Varestraint* y la tendencia al fisuramiento en frío se estudia por medio del ensayo *Cruciform*. Para soldar los especímenes para los ensayos de soldabilidad, se establecen dos temperaturas de precalentamiento basadas en la temperatura de transformación martensítica del material base, por disposición de la norma se practicaron tratamientos térmicos de alivio de esfuerzos a las probetas del ensayo *Cruciform*. Finalmente, se presentan los resultados de los ensayos no destructivos y destructivos realizados a las configuraciones soldadas, estas pruebas normalizadas permiten distinguir el grado de influencia de las restricciones impuestas en ambos ensayos de soldabilidad en lo referente a la generación de discontinuidades.

**Palabras clave:** acero AISI D3, fisuramiento, soldabilidad, ensayo *Varestraint*, ensayo *Cruciform*.



## ABSTRACT

The purpose of this work is to study the weldability of the high percentage of carbon and chromium steel, AISI D3 by using an austenitic-ferritic electrode E312-16, and employing the shield metal arc welding (SMAW) process. The chemical composition of steel causes poor weldability level and its microstructure makes it sensitive to the appearance of pores and cracks. The selected electrode, generally used with stainless steels, is recommended for steels with difficult weldability and high strength, and it also must be accompanied by pre and post welding heat treatments. In order to generate the weldability indicators of the steel, weldability tests were carried out under the guidelines established in the AWS B4.0 standard; hot cracking trend is analyzed through the *Varestraint* test and the cold cracking trend is studied through the *Cruciform* test. In order to weld the specimens for the weldability tests, two preheating temperatures are established based on the martensitic transformation temperature of the base material. Thermal stress relief treatments were applied to the *Cruciform* specimens. Finally, the results of the non-destructive and destructive tests performed on the welded configurations are presented, these standardized tests allow us to distinguish the degree of influence of the restrictions imposed in both weldability tests on the generation of discontinuities.

**Keywords:** AISI D3 steel, cracking, weldability, *Varestraint* test, *Cruciform* test.

# **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SOLDABILIDAD EN EL ACERO DE ALTO PORCENTAJE DE CARBONO Y CROMO CON MATERIAL DE APORTE AUSTENÍTICO - FERRÍTICO CON PROCESO DE SOLDADURA SMAW**

## **INTRODUCCIÓN**

Los altos porcentajes de carbono y cromo presentes en los aceros para herramientas para trabajo en frío les otorgan alta dureza y resistencia al desgaste. El cromo es el responsable de la formación de carburos de dureza elevada que mejoran la resistencia. Sin embargo, los altos contenidos de carbono presentes en la aleación reducen el nivel de soldabilidad del material; por otro lado, los carburos, debido a su dureza, pueden actuar como concentradores de tensiones. Particularmente, en los procesos de soldadura el carbono y el cromo presentes en los aceros altamente aleados provocan la aparición de poros, grietas y fisuras; por lo que se deben adoptar técnicas especiales de soldadura. Generalmente, en el mercado local las herramientas como: punzones, matrices de corte y extrusión, mandriles, rodillos de conformado en frío, herramientas para trabajo en madera, troqueles, etc., están fabricados con aceros de altos contenidos de carbono y cromo. Las recomendaciones de los fabricantes asociadas a la soldabilidad de los aceros altamente aleados son variadas, partiendo desde recomendación parcial y aplicación de procesos generalmente utilizados en aceros inoxidable, pasando por sugerencias que la metodología debe ser elegida por el usuario y llegando a no recomendar definitivamente ningún tipo de soldadura; es decir, bajo esas consideraciones no existe un consenso definitivo y la posibilidad de identificar un proceso de soldadura adecuado está abierta. Si se adoptan procesos de soldadura para aceros inoxidable el material de aporte puede ser del tipo austenítico-ferrítico, ya que la ferrita es beneficiosa para reducir la tendencia al agrietamiento y a la aparición de fisuras en metales soldados. En este estudio experimental se propone investigar la soldabilidad del acero para herramientas AISI D3, considerando una técnica especial de soldadura basada en la selección del material de aporte, del tipo austenítico-ferrítico, y el proceso de soldadura. Los resultados obtenidos permitirán implementar y desarrollar procedimientos de soldadura sobre estos aceros, mejorando la información técnica disponible y abriendo las posibilidades de su utilización a otro tipo de aplicaciones.

## **Objetivo general**

Estudiar la soldabilidad en el acero de alto porcentaje de carbono y cromo con material de aporte austenítico - ferrítico con proceso de soldadura SMAW.

## **Objetivos específicos**

- Establecer los parámetros apropiados para realizar el proceso de soldadura SMAW con el acero AISI D3, aplicando el electrodo austenítico-ferrítico E312-16 y ejecutar tratamientos térmicos pre y post soldadura acordes a los materiales base y de aporte empleados.
- Determinar el rango de temperatura para el precalentamiento del material base antes del proceso de soldadura.
- Evaluar el fisuramiento en caliente y en frío para el material base mediante indicadores de soldabilidad.
- Evaluar las propiedades de las juntas soldadas utilizando ensayos destructivos y no destructivos.

# **1. MARCO TEÓRICO**

La información contenida en el presente capítulo ofrece al lector una descripción de las características generales sobre soldadura, los procesos de soldadura y en particular el proceso denominado SMAW y sus variables asociadas. A la par se describen los aceros para herramientas, haciendo enfoque en las características físicas y químicas de los aceros de alto porcentaje de carbono y cromo. Seguidamente se abordan las generalidades sobre los materiales de aporte con revestimiento; el electrodo revestido del tipo austenítico-ferrítico es el escogido para estudiar sus características. También, se presenta el análisis de la soldabilidad del metal base a través de indicadores de la tendencia al fisuramiento en frío y en caliente, los cuales forman parte de un conjunto de ensayos de soldabilidad. Finalmente, se describen algunos puntos de la norma AWS B4.0, en la cual se basan los ensayos de soldabilidad.

## **1.1. Soldadura**

En lenguaje coloquial se describe a una soldadura cuando piezas separadas de material se combinan y forman un solo elemento al ser calentadas a elevadas temperaturas para provocar ablandamiento o fusión. De acuerdo a la American Welding Society (AWS), la soldadura es una coalescencia localizada de metales o no metales, lograda al someter a los materiales a temperaturas de soldadura, con o sin la aplicación de presión, o mediante la aplicación de presión sola y con o sin el uso de material de aporte. (American Welding Society, 2001)

## **1.2. Procesos de soldadura**

Cada proceso de soldadura tiene sus ventajas y desventajas que los hacen más o menos idóneos para una aplicación específica. Actualmente existen alrededor de setenta y cinco procesos disponibles, de los cuales los procesos de soldadura por arco sobresalen por su bajo costo de aplicación y portabilidad, aun cuando son relativamente lentos y dependen de una cantidad considerable de calentamiento para producir la soldadura. Procesos de alta densidad de energía, tales como la soldadura láser tienen velocidades altas de soldadura y producen consumos bajos de calor pero los equipos que se utilizan son caros. Generalmente los procesos de soldadura por resistencia son de rápida ejecución y no requieren materiales de relleno, pero se ven limitados a espesores delgados.

La unión metálica que producen estos procesos se basa en una combinación de calor, presión y tiempo. Los procesos de arco y alta densidad dependen directamente de la aplicación de un calor extremo en la fuente y no necesitan presión.

La dependencia del calor, presión y de un lapso amplio de tiempo se vincula al proceso de soldadura por difusión. Para realizar una soldadura por explosión se debe aplicar una elevada cantidad de presión y mínimas cantidades de calor y tiempo (Phillips, 2016).

### 1.3. Procesos de soldadura por arco

El principio de funcionamiento de los procesos de soldadura por arco se basa en el calor extremo de un arco eléctrico para crear una soldadura, generalmente, pero no siempre, implican el uso de metal de aporte para completar la soldadura. Dichos procesos fueron los primeros en ser desarrollados y hasta la actualidad continúan siendo muy populares debido al bajo costo de sus equipos, portabilidad y flexibilidad. Parte del desarrollo de la soldadura por arco, radica en el descubrimiento del arco eléctrico en el año de 1820, el registro de la primera patente de soldadura con un electrodo de carbono se da en 1886, en tanto que, el lanzamiento del primer electrodo revestido ocurre en 1900, siendo el resultado de sumergir un alambre de hierro en mezclas de carbonatos y silicatos para recubrir el electrodo, y es en el año de 1940 que se da el primer proceso utilizando un electrodo alimentado continuamente (Phillips, 2016).

En la Figura 1.1 se presentan los procesos de soldadura por arco más comunes en la actualidad. La designación en siglas obedece a la terminología utilizada por la American Welding Society (AWS), de la siguiente manera: SMAW: soldadura por arco metálico protegido, GMAW: soldadura por arco bajo gas protector, GTAW: soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno, PAW: soldadura con arco de plasma, SAW: soldadura por arco sumergido, FCAW: soldadura por arco con núcleo de fundente, SW: soldadura por arco de espárragos y EGW: soldadura de electrogas.



Figura 1.1. Procesos comunes de soldadura por arco.

Fuente: (Phillips, 2016)

Para estos procesos de soldadura, el arco comienza a producirse cuando se cierra el circuito eléctrico, la configuración más básica de un proceso de soldadura por arco, está

formada por una fuente de poder, electrodo, cables de trabajo, soporte del electrodo y la pieza de trabajo. La Figura 1.2 muestra la configuración de un proceso de soldadura por arco SMAW, con valores para la corriente y voltaje típicos. La fuente de alimentación otorga voltajes máximos en el rango de 60 a 80 V sin arco, a lo que se denomina voltaje de circuito abierto de la fuente de alimentación, estos valores de voltajes son altos como para establecer y mantener el arco, pero a la vez, bajos para minimizar el riesgo de descarga. Los voltajes de arco oscilan entre 10 y 40 V una vez que se establece el arco. Generalmente, las fuentes de suministro de energía de soldadura están diseñadas para proveer corriente continua (DC), pero a veces se puede trabajar con máquinas de corriente alterna (CA), las cuales son simples y económicas.

Se puede clasificar como procesos semiautomáticos a los procesos: GMAW, FCAW y SAW ya que utilizan una alimentación continua de alambre, en estos procesos la fuente de poder controla la longitud del arco a lo que se conoce como autorregulación. Los procesos SMAW y GTAW son procesos manuales debido a que es el soldador quien controla la entrega de metal de aporte mientras mantiene la longitud de arco (Phillips, 2016).

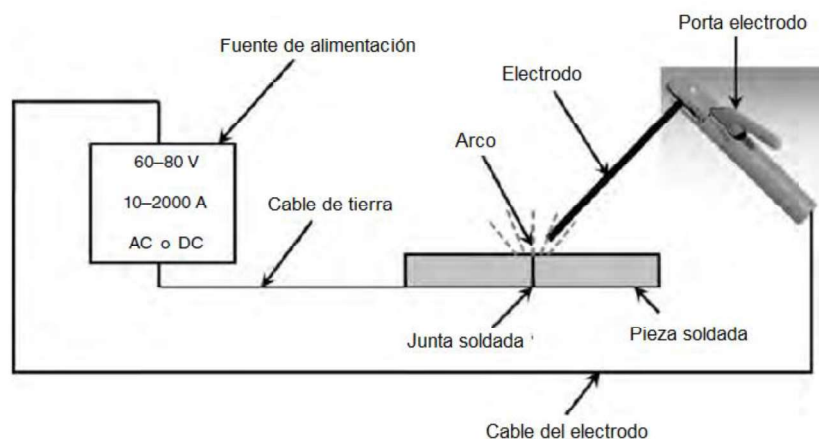


Figura 1.2. Circuito de soldadura por arco (representación SMAW).

(Fuente: Adaptado de (Phillips, 2016))

#### 1.4. Soldadura por arco metálico protegido (SMAW)

El proceso de soldadura por arco eléctrico metálico protegido SMAW (por sus siglas en inglés shielded metal arc welding), que se ha venido utilizando desde principios del siglo XX, se ha convertido en el proceso soldadura por arco más común en todo el mundo. Utiliza un electrodo revestido y no requiere gas de protección externo (Figura 1.3). El revestimiento del electrodo se produce por procesos de extrusión y cocción (sinterización), su función principal es descomponerse cuando es sometido al calor del arco, formando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como gas protector que ayuda a conservar la soldadura a medida

que se solidifica y enfría. El emplear electrodos puede derivar en la formación de escoria protectora que flota hasta la parte superior del charco de soldadura y se solidifica. Otra característica a mencionar del proceso es su versatilidad, tanto para la fabricación en campo como en el taller. Las fuentes de alimentación son de bajo costo, portátiles y tienden a ser robustas, pero estas características se ven contrarrestadas ya que se requiere un soldador con un nivel alto de habilidad que realice el proceso.

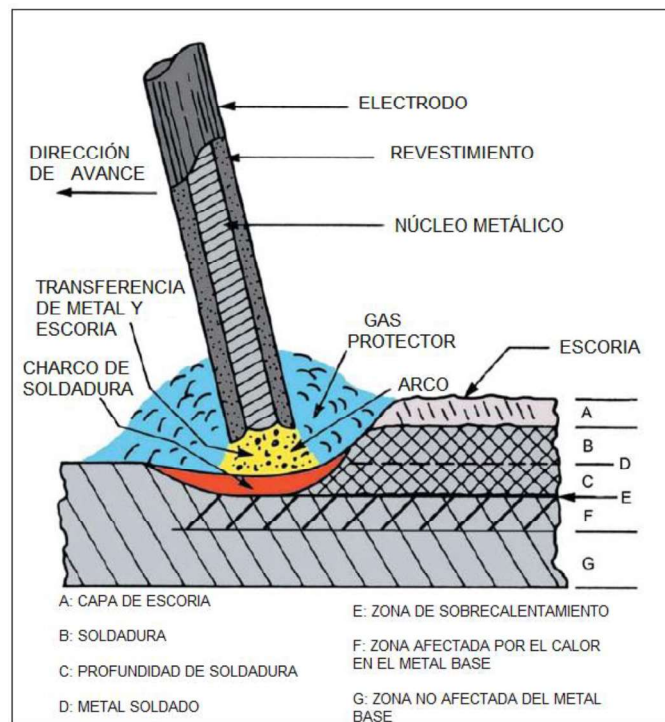


Figura 1.3. Soldadura por arco metálico protegido (SMAW).

(Fuente: Adaptado de (American Welding Society, 2001))

En este método de soldadura la tasa de productividad es baja debido a que el proceso no es continuo por la necesidad de detenerse y reiniciarse a medida que se consumen los electrodos. La salud del soldador puede verse afectada por los altos niveles de gases que son producidos por los electrodos. Además, los niveles de defectos en el depósito del proceso pueden ser significativos, existiendo la posibilidad de encontrar escoria atrapada, porosidad, fusión incompleta y mala formación del cordón. La eliminación de escoria mayoritariamente se realiza después del proceso (Phillips, 2016).

Es impracticable un proceso SMAW a metales reactivos tales como el titanio por su sensibilidad a la fragilidad intersticial y por requerir un gas inerte protector. El espesor mínimo para soldar con SMAW es de 3 mm, la habilidad del soldador determinará la posibilidad de soldar espesores menores evitando la fusión a través de la pieza. Se puede decir que no existe un límite para el espesor máximo de placa a soldarse, esto es una

consecuencia de la capacidad de producir soldaduras de múltiples pasos; sin embargo, al soldar grandes espesores se requerirá un mayor número de pases, lo cual eleva el costo del proceso y al final que se tenga que recurrir a un proceso de mayor tasa de depósito. Se debe mencionar que no se tiene restricción de posición de soldadura, pero no todos los electrodos pueden ser utilizados en cualquier posición. El revestimiento del electrodo utilizado en SMAW, además de proteger el metal de soldadura a medida que se solidifica con la formación de  $\text{CO}_2$ , cumple otras funciones: agrega limpiadores y desoxidantes para permitir la soldadura de materiales base que no están limpios o que contienen óxidos e incrustaciones, adiciona elementos de aleación al recubrimiento del electrodo, mejora las propiedades mecánicas del metal de soldadura al formar microestructuras deseadas, etc. Para aumentar la tasa de aporte se puede agregar polvo de hierro, mientras la escoria formada por los electrodos no solo proporciona protección contra la atmósfera, sino que puede mejorar la forma del cordón (Phillips, 2016).

#### **1.4.1. Efectos de las variables del proceso de soldadura**

La Figura 1.4 muestra los efectos típicos del amperaje, la longitud de arco y la velocidad del desplazamiento en la apariencia visual de la soldadura. Dichos efectos varían de acuerdo al metal base a ser soldado, al tipo y diámetro del electrodo y a la polaridad empleada. Generalmente, se emplea corriente continua (DC) ya que proporciona un arco más estable. La velocidad de fusión del electrodo y el calentamiento de la pieza a soldarse son influenciadas por la cantidad de corriente proporcionada. Trabajar con longitudes de arco excesivas provoca grandes cantidades de salpicaduras, un perfil de soldadura plano y afecta la efectividad de la protección contra gases; promoviendo así la contaminación y porosidad del metal. Los efectos de trabajar con longitudes de arco demasiado cortas, están asociados a una transferencia de cortocircuito del metal de relleno, reduciendo el calentamiento y provocando también salpicaduras. Como regla general, la longitud de arco debe ser igual al diámetro del cable del electrodo que se está empleando.

La velocidad de avance perjudica directamente la entrada de calor a la pieza y el tamaño de soldadura. Adicional a las variables de amperaje, longitud de arco y velocidad de desplazamiento, la orientación del electrodo con respecto a la pieza de trabajo también desempeña un papel importante. Existen dos ángulos a tomarse en cuenta: el ángulo de desplazamiento, que es el ángulo del electrodo en relación con la dirección del desplazamiento y el ángulo de trabajo, que es el ángulo que forma el electrodo y la pieza de trabajo (Phillips, 2016).



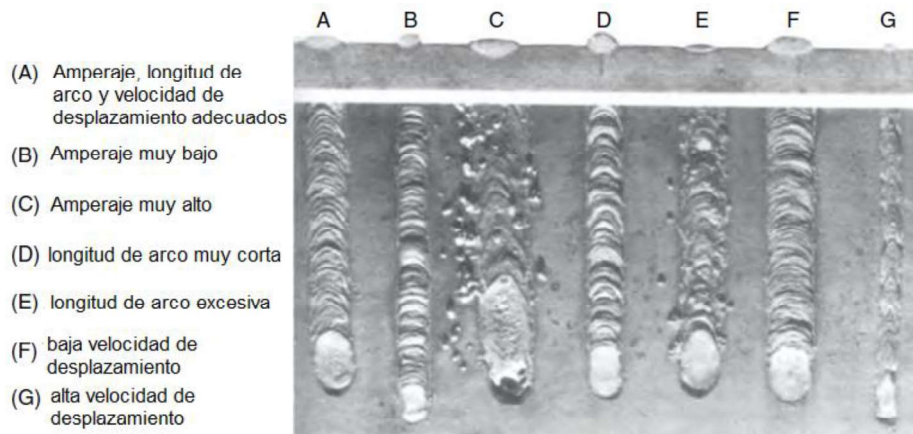


Figura 1.4. Efectos típicos del amperaje, longitud de arco y velocidad de avance.

(Fuente: Adaptado de (Phillips, 2016))

#### 1.4.2. Diseños típicos de juntas y posiciones utilizados para SMAW

Ejemplos de los diseños típicos de juntas y posiciones utilizados en el proceso se observan en la Figura 1.5. Dependiendo de la aplicación, puede existir la necesidad de diseñar una junta para tener la capacidad de producir una soldadura de penetración total. Para partes relativamente delgadas, la penetración total puede ser posible con un simple espacio entre las piezas, sin embargo, partes más gruesas requieren que los ángulos de las ranuras sean mecanizados. Un ángulo de ranura excesivamente estrecho puede ocasionar defectos tales como: inclusiones de escoria y falta de fusión. Un ángulo de ranura demasiado grande puede resultar en el incremento del número de pasadas de soldadura, ocasionando un incremento en el costo y tiempo asociados a la producción de la soldadura. Se debe procurar que las juntas tengan un diseño que facilite el acceso a los electrodos y fijación correcta. Adicionalmente, se debe encontrar el equilibrio entre los costos de soldadura y los costos de mecanizado y corte, por ejemplo, una ranura en V de doble cara ocupará menos metal de aporte que una ranura grande de una cara, sin embargo, será más costosa mecanizarla (Phillips, 2016).

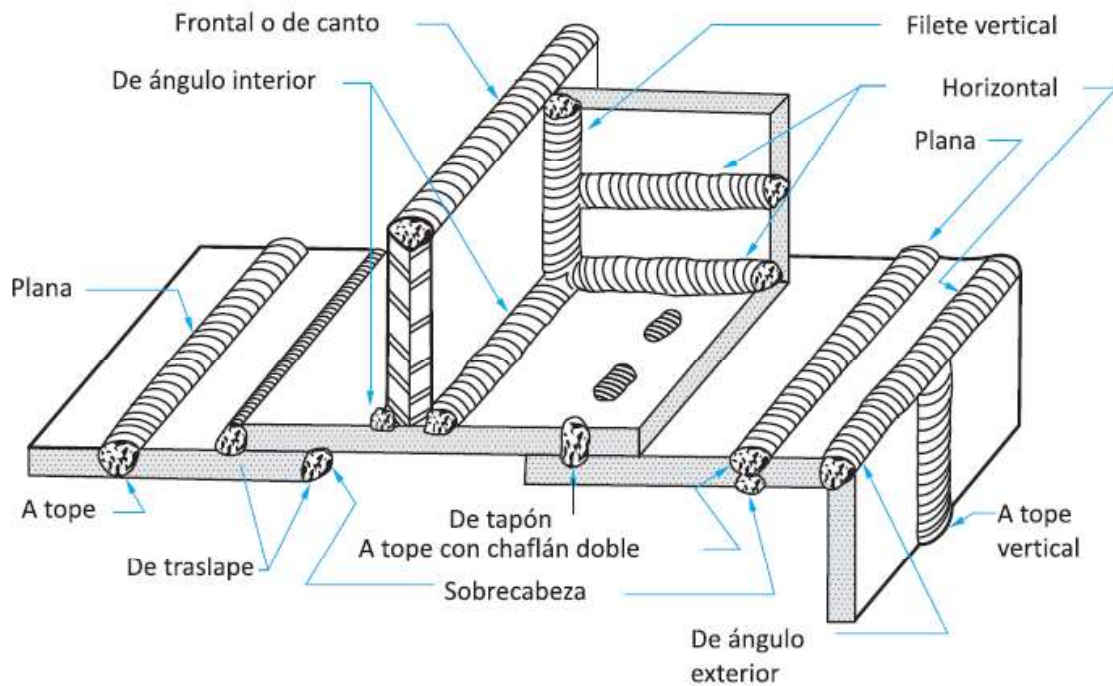


Figura 1.5. Diversas juntas y posiciones de soldadura.

(Fuente: Adaptado de (Soldexa, 2012))

Resumiendo lo anteriormente expuesto sobre el proceso de soldadura de arco metálico protegido, se presenta una lista en la cual se especifican las principales ventajas y limitaciones que posee este proceso.

**Ventajas:**

- *Bajo costo en equipos.*
- *Portátil.*
- *Con el correcto electrodo se puede soldar en todas las posiciones.*
- *Posibilidad de soldar en condiciones exteriores.*
- *Aplicando múltiples pases de soldadura, no existe límite para el espesor máximo que se puede soldar.*

**Limitaciones:**

- *El proceso es lento, como consecuencia se debe reemplazar repetitivamente los electrodos.*
- *Requiere que el soldador tenga una buena habilidad para el proceso.*
- *Los trozos de electrodos desechados se convierten en residuos.*

- Crece la posibilidad de tener defectos, debidos a las paradas e inicios frecuentes al reemplazar los electrodos.
- Soldar espesores menores a 3 mm dificulta el proceso.
- No se pueden soldar metales reactivos.
- Se tiene sensibilidad de los electrodos a la absorción de humedad.

## 1.5. Clasificación de electrodos utilizados con proceso SMAW

Existe una extensa variedad de electrodos revestidos que se pueden utilizar para distintas aleaciones de metal base y aplicaciones con el uso del proceso SMAW, bajo los parámetros de la AWS (A5 Committee on Filler Metals and Allied Materials, 2018) se ha clasificado a estos electrodos de la siguiente manera:

**AWS A5.1** Especificación para electrodos de acero al carbono para soldadura por arco metálico protegido.

**AWS A5.3** Especificación para electrodos de aluminio y aleaciones de aluminio para soldadura por arco metálico protegido.

**AWS A5.4** Especificación para electrodos de acero inoxidable para soldadura por arco metálico protegido.

**AWS A5.5** Especificación para electrodos de aceros de baja aleación para soldadura por arco metálico protegido.

**AWS A5.6** Especificación para cobre y electrodos de aleación de cobre para soldadura por arco metálico protegido.

**AWS A5.11** Especificación para níquel y electrodos de soldadura de aleación de níquel para soldadura por arco metálico protegido.

**AWS A5.13** Especificación para electrodos de superficie para soldadura por arco metálico protegido.

**AWS A5.15** Especificación para electrodos y varillas de soldadura para hierro fundido.

**AWS A5.21** Especificación para electrodos desnudos y barras para revestimiento.

**AWS A5.35** Especificación para electrodos recubiertos para soldadura por arco metálico protegido húmedo subacuático.

Este estudio se enfoca en analizar el código de las especificaciones para los electrodos de acero inoxidable A5.4, el mismo que abarca el electrodo con características de depósito de estructura del tipo austenítico – ferrítico. Este material ha sido escogido como material de

aporte para realizar los ensayos de soldabilidad, las razones se detallan a lo largo del documento.

## **1.6. Generalidades del código AWS A5.4**

Esta especificación describe la composición y requisitos para clasificar más de cuarenta electrodos recubiertos de acero inoxidable para soldadura de arco metálico protegido, entre los requisitos están, requisitos generales, pruebas y embalaje. El metal de soldadura depositado en lo referente a su contenido de cromo no es menor al 10,5% y el contenido de hierro excede al de cualquier otro elemento, por motivos de clasificación el contenido de hierro se deriva como el elemento de equilibrio cuando todos los otros elementos se consideran en sus valores mínimos señalados. La clasificación que poseen estos electrodos bajo este código es de acuerdo con la norma A5.4 (AWS A5.4, 2006).

- Requisitos de composición química para el metal de soldadura sin diluir.

- Tipo de corriente de soldadura y posición de soldadura.

A continuación, para el caso de este estudio en particular, según la norma se describe la clasificación del electrodo E312-16, donde, E indica que es un electrodo, los siguientes tres dígitos (312) señalan la composición química nominal (% en peso), que es de 30 Cr, 9 Ni, los dos últimos dígitos (16) designan la usabilidad, posee elementos fácilmente ionizantes para estabilizar el arco de soldadura con corriente alterna, diámetros de electrodos de 4mm o menores que se pueden usar en todas las posiciones de soldadura.

## **1.7. Características del depósito de soldadura austenítico-ferrítico**

La tendencia al fisuramiento o agrietamiento en metales de soldadura es disminuida por la presencia de ferrita; sin embargo, no es fundamental. Material de soldadura completamente austeníticos otorgan un nivel alto de rendimiento de servicio. Comúnmente, la ferrita es provechosa cuando las soldaduras están restringidas, las uniones son grandes, las fisuras y grietas perjudican el rendimiento del servicio. Pero a la par tiene un efecto negativo sobre la resistencia a la corrosión, para la tenacidad en servicio criogénico y en servicio de alta temperatura, teniendo la posibilidad de transformarse en la fase sigma frágil. Para 1974 el Consejo de Investigación de Soldadura (WRC, del inglés Welding Research Council) adoptó el término Número de Ferrita (FN, del inglés Ferrite Number) que se emplea en

lugar de porcentaje de ferrita. En la clasificación E3XX, varios tipos de electrodos como: E310, E310Mo, E316LMn, E320, E320LR, E330, E383, E385 y E3155 son totalmente austeníticos. La mayoría de las otras clasificaciones E3XX están por debajo de 10 FN, en tanto que en electrodos como E308LMo, E309L se encuentra un nivel de ferrita superior a 15 FN. Pero existen particularidades que superan estos niveles de ferrita, tal como es el caso del material de aporte escogido para el presente estudio: E312, el cual contiene más de 20 FN. Otros con alto FN son: E2209, E253, E2593, E2534 y E2595 (AWS A5.4, 2006).

## **1.8. Características, propiedades y aplicaciones del electrodo E312-16**

### **1.8.1. Características**

El material de aporte seleccionado para este estudio es el denominado E312-16, esta aleación provee un depósito de soldadura de dos fases con cantidades sustanciales de ferrita en una matriz austenítica, incluso con una dilución considerable por elementos formadores de austenita, como el níquel. La microestructura permanece en dos fases y, por lo tanto, es altamente resistente a las grietas y fisuras (AWS A5.4, 2006). Deposita un número de ferrita mayor a 20 FN, el mismo que lo hace insensible al fisuramiento en caliente al soldar metales base de difícil soldabilidad y unir aceros disímiles. La remoción de escoria se da con facilidad, se suelda en todas las posiciones, el aspecto del cordón es óptimo, sin socavaduras ni salpicaduras durante el aporte, endurece con el trabajo.

### **1.8.2. Propiedades**

Posee propiedades mecánicas sobresalientes, ya que presenta alta resistencia a la rotura, y al impacto, son resistentes a los medios ácidos, al calor, a la corrosión y a la fricción metal - metal, además los depósitos son maquinables. La composición química y las propiedades mecánicas del metal depositado se muestran en las Tablas 1.1 y 1.2, respectivamente.

Tabla 1.1. Composición química del metal depositado [%].

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>
0,08	29,10	1,30	0,45	-----	-----	-----	8,50

(Fuente: Kiswell Welding Consumibles)

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas del metal depositado.

<b>Resistencia a la tracción</b> <b>[MPa]</b>	<b>Límite de elasticidad</b> <b>[MPa]</b>	<b>Alargamiento</b> <b>[%]</b>	<b>Dureza</b> <b>Brinell</b>
800	620	Hasta 22	Aprox. 235

(Fuente: Kiswell Welding Consumibles)

### 1.8.3. Aplicaciones

Existen diversas aplicaciones ideales para el uso de este electrodo, unir aceros de difícil soldabilidad, como es el caso de los aceros para herramientas, en particular, los aceros de alto porcentaje de carbono y cromo. Un uso más convencional es para soldar aceros inoxidables, uniendo aceros austeníticos y ferríticos, aceros al manganeso con aceros aleados y no aleados, aceros de alta resistencia, aceros aleados, aceros susceptibles de tratamiento térmico. Labores de mantenimiento y reparación en los sectores industriales pueden ser efectuadas con este material de aporte. En el mercado local las diferentes comercializadoras de consumibles de soldadura designan bajo distintas equivalencias al electrodo E312-16, la Tabla 1.3 indica este particular.

Tabla 1.3. Equivalencias en marcas del electrodo E312-16.

<b>Marcas de electrodos</b>	<b>Equivalencia E312-16</b> <b>(AWS A5.4)</b>
AGA	R91
INDURA	E29-9s
KISWELL	E312-16
Lincoln	Grinox 29

(Fuente: propia)

Por disponibilidad en el mercado se practicarán los ensayos de soldabilidad con el electrodo de marca KISWELL (ver Figura 1.6).



Figura 1.6. Conjunto de electrodos E312-16 marca KISWEL.

(Fuente: Propia)

## **1.9. Aceros de alto contenido de carbono y cromo**

Dentro de los aceros de alto contenido de carbono y cromo se encuentran los aceros para herramientas. Para este trabajo fue seleccionado un acero para herramientas ampliamente utilizado en la industria ecuatoriana, como material para fabricar punzones y rodillos para trabajo en frío, troqueles y matrices. En esta sección se describen algunas generalidades de los aceros para herramientas y las propiedades del acero seleccionado.

### **1.9.1. Aceros para herramientas**

El término aceros para herramientas suele referirse a aceros especiales de alta calidad utilizados para corte y formado. Los principales factores para escoger un acero para herramientas son la dureza, tenacidad y resistencia al desgaste; y en aplicaciones específicas se consideran: su templabilidad, resistencia a las fracturas por calor, requisitos de tratamiento térmico (temperatura, atmósferas y equipos) y maquinabilidad.

Existen varios métodos para clasificar a los aceros para herramientas, uno de ellos es de acuerdo al medio de temple que se utilice, esto es, aceros templados en agua, en aire o en aceite. El contenido de la aleación es otro método de clasificación, teniendo así aceros al carbono para herramientas, aceros de mediana aleación, y aceros de baja aleación. Una tercera forma de clasificación es basada en la utilización del acero para herramientas, a esta última forma corresponden los aceros para trabajo en caliente, aceros resistentes al impacto, de alta velocidad, y para trabajo en frío. El método de identificación y tipo de clasificación empleado por la American Iron and Steel Institute (AISI) es el adoptado en el

presente estudio. Esa clasificación tiene en cuenta el medio de temple, aplicaciones, características particulares y aceros para industrias específicas (Avner, 1988). Dentro del grupo trabajo en frío, identificado con la letra D, se encuentran los aceros de alto carbono y alto cromo. Dependiendo de los porcentajes de los elementos aleantes, principalmente del carbono, se tienen los tipos de acero D2, D3, D4, D5 y D7 (Avner, 1988).

## 1.10. Características, propiedades y aplicaciones del acero AISI D3

### 1.10.1. Características

El material base escogido para este estudio es el denominado AISI D3. Este tipo de acero es templado en aceite y tiene una elevada resistencia al desgaste. Endurece con poco cambio de forma y dimensiones, es un metal de endurecimiento profundo y alta resistencia a la compresión. Debido a su alto contenido de cromo tiene excelentes propiedades de resistencia a la corrosión suave cuando endurece (Palmer, Luerssen, & Pendleton, 1986). Por otro lado, por su alto contenido de carbono tiende a ser frágil y de baja tenacidad (Avner, 1988). En la Tabla 1.4 se presentan los elementos constitutivos, y sus porcentajes, del acero de alto contenido de carbono y cromo AISI D3.

Tabla 1.4. Elementos y porcentajes del acero de alto contenido de carbono y cromo D3.

Tipo	Elementos y porcentajes [%]							
	C	Mn	Si	Cr	V	Ni	Mo	W
D3	2,25	0,35	0,30	12,00	-----	0,50	-----	-----

(Fuente: (Avner, 1988))

A continuación, una descripción resumida de cada elemento aleante y su función en los aceros para herramientas (Palmer, Luerssen, & Pendleton, 1986).

**Carbono (C):** Este elemento tiene como utilidad hacer al acero más duro y resistente al desgaste. Conforme se agrega más carbono se incrementa la capacidad de endurecimiento del acero hasta alcanzar el 0,80% de contenido. Agregar más carbono no aumenta visiblemente la dureza, pero sí su resistencia al desgaste. Conforme el contenido de carbono aumenta el acero se vuelve más sensible a los tratamientos térmicos.

**Manganeso (Mn):** Este elemento hace que el acero sea más fácil de laminar en caliente o de forjar. Generalmente, todo acero para herramientas contiene al menos 0,20% de



manganeso. Este elemento también tiene como efecto reducir ligeramente el punto crítico y por lo tanto la temperatura a la que debe ser calentado el acero para ser endurecido.

**Silicio (Si):** Los aceros para herramientas incorporan una pequeña cantidad de este material, entre 0,10% y 0,30%, y tiene como finalidad es dar dureza y tenacidad a este tipo de aceros. Y al igual que el manganeso este elemento facilita la fundición y el trabajo en caliente del acero. Siendo considerado como un elemento purificador en la soldadura.

**Cromo (Cr):** Al añadir este elemento en porcentajes entre el 11% y el 14% a aceros que contienen entre 1,5% y 2,2% de carbono resultan los aceros para herramientas de alto carbono y alto cromo. Estos materiales presentan una notable resistencia al desgaste y pueden templarse en aceite o en aire. Además, el cromo contribuye a incrementar la resistencia al desgaste y a la tenacidad.

**Níquel (Ni):** Cuando se usa en conjunto con el cromo este elemento aumenta la tenacidad y la resistencia al desgaste, y contribuyendo a bajar en algo la temperatura de templado y haciendo posible el temple en aceite en lugar de agua. Es un elemento presente en aceros que se templean en aceite como es el caso del AISI D3.

### **1.10.2. Propiedades**

**Mecánicas:** Los aceros de alto contenido de carbono y cromo, como el AISI D3, adquieren su excelente resistencia al desgaste a causa de un balance químico que los hace resistentes al rayado y de baja ductilidad. La experiencia indica que se pueden soportar cargas de compresión mayores de 2758 MPa si se aplican lentamente (Avner, 1988).

**Físicas:** En la Tabla 1.5 se resumen algunas propiedades físicas del acero AISI D3.

### **1.10.3. Aplicaciones**

El acero AISI D3 se usa para herramientas que requieren una combinación de precisión y seguridad en el templado. Una de sus mejores cualidades es su resistencia al desgaste. Se usan para cualquier herramienta que requiera una larga vida útil o para trabajar con materiales abrasivos. Como ejemplos se tienen: dados de troquelado, de formado y de laminación, mandriles, dados de tarraja, rodillos para trabajo en frío, cortadores de tiras y herramientas patrón. Además, este acero es utilizado para herramientas que deban

conservar su tamaño y forma con mayor precisión que los aceros templados en agua. Ejemplos de este tipo de aplicación se tienen: calibradores de roscas, herramientas de hilar, dados de extrusión, dados para troquelado, émbolos, punzones, entre otros (Avner, 1988).

Tabla 1.5. Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI D3.

Propiedad	Valor
Densidad	7860 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	207 GPa
Punto de fusión	1421°C
Coefficiente de Poisson	0,30

(Fuente: (Avner, 1988))

En el ANEXO III se muestra la certificación de origen de la composición química del acero AISI D3 para los ensayos de soldabilidad, la cual fue emitida por el proveedor Böhler.

### 1.11. Tratamientos térmicos para el acero AISI D3

En este trabajo de titulación se ha considerado que posterior al proceso de soldadura se ejecutará un tratamiento térmico a las probetas obtenidas. Por esta razón, en esta sección se describen los tratamientos térmicos y las características del acero D3 asociadas a esos tratamientos (Palmer, Luerssen, & Pendleton, 1986).

**Forjado:** Para el forjado se debe calentar lenta y uniformemente a una temperatura entre 1052 y 1093°C, no se debe continuar la forja por debajo de 927°C, pero recalentar frecuentemente cuando sea necesario. Para forjas grandes se recomienda colocarlas en un horno a una temperatura de 843°C, remojarlas uniformemente a esta temperatura, luego apagar el horno y dejar que la pieza se enfríe en él lentamente. Finalmente, al enfriarse la forja se debe llevar a cabo un recocido.

**Normalizado:** El normalizado no es necesario y no se recomienda después del enfriamiento en el horno descrito anteriormente.

**Recocido:** Para este proceso el acero puede ser colocado en un horno de atmósfera controlada y calentarlo uniformemente hasta 843°C a 871°C. Después, enfriarlo lentamente a una razón no mayor de 11°C por hora hasta que el horno esté negro, luego apagar el

horno para que se enfríe naturalmente. Este procedimiento producirá una dureza máxima de Brinell 255.

**Temple:** La dureza máxima se asegura en el intervalo de temperatura de 954 a 982°C, al mismo tiempo conservando las dimensiones del material. Por otro lado, si el acero AISI D3 se sobrecalienta se vuelve más suave, se contrae y muestra un comportamiento algo magnético. Los baños de sales neutras o los hornos de atmósfera controlada son los más convenientes para el templeado de este tipo de acero. En la Tabla 1.6 se muestran los valores de dureza obtenidos a diferentes temperaturas de templeado del acero AISI D3.

Tabla 1.6. Dureza obtenida en función de la temperatura de templeado del acero AISI D3.

Templado en aceite desde [°C]	Dureza obtenida Rockwell C [HRC]
899	61/63
927	64/65
954	65/66
982	65/66
1010	61/63
1066	54/56

(Fuente: (Palmer, Luerssen, & Pendleton, 1986))

**Revenido:** Después de realizar un proceso de templeado debe ser efectuado un proceso de revenido. Considerando una temperatura de temple de 969°C y ejecutando un revenido a 204°C se asegura la máxima dureza y resistencia al desgaste (durezas de 62/63 HRC). A una temperatura de revenido de 427°C puede obtenerse una ductilidad mayor con cierta disminución de la dureza (58/59 HRC).

Como efectos de aplicar un tratamiento térmico se pueden presentar la *deformación en el templeado y descarburación*. El acero D3, conocido como acero aceite – desgaste, es un acero para herramientas esencialmente indeformable. Sin embargo, nunca debe sobrecalentarse durante el templeado, es decir, evitar el sobrecalentamiento; la temperatura de templeado no debe ser superior a 996°C. Por otro lado, la descarburación puede ser evitada calentando el acero en un baño de sal neutro o en un horno de atmósfera controlada.

## 1.12. Tratamiento de precalentamiento

Debido a las características del acero AISI D3, especialmente las referentes a su alto contenido de carbono, ejecutar un proceso soldadura empleándolo como material base implica varias complicaciones. Las consideraciones del fabricante del acero asociadas a procesos de soldadura expresan que se debe llevar a cabo un proceso de precalentamiento previo a la suelda. Para determinar una temperatura adecuada para ese proceso se tienen algunas opciones. Una de ellas es emplear el método del carbono equivalente en conjunto con un método para determinar la temperatura de precalentamiento (por ejemplo, los métodos de Seferian y el especificado en la norma AWS D1.1). El método del carbono equivalente, que se basa en la composición química del material, determina un número porcentual que proporciona una idea aproximada sobre el comportamiento del acero en lo referente a la soldabilidad. El principal elemento que influencia la soldabilidad es el carbono; mientras el contenido de carbono incrementa el proceso de soldadura se complica. De esta manera, el carbono equivalente (CE) es un buen indicador de facilidad de soldar un material (American Welding Society (AWS), 2011).

Se han desarrollado varias fórmulas para calcular el CE, entre esas, uno de las más empleadas es la propuesta en el código de soldadura D1.1 de la American Welding Society (AWS D1.1).

$$CE = \%C + \frac{\%(Mn + Si)}{6} + \frac{\%(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{\%(Ni + Cu)}{15}$$

Para el acero AISI D3, utilizando los valores de la Tabla 1.4 se tiene que CE = 4,75%. Para el valor obtenido la teoría indica que el ejecutar un proceso de soldadura no es recomendable. Otra opción para determinar una temperatura de precalentamiento,  $T_p$ , adecuada para soldar aceros como el AISI D3 es seguir las recomendaciones del fabricante. Generalmente, esa temperatura está asociada con la temperatura de transición martensítica, con el objetivo es mantener al acero en la región austenítica durante toda la operación de soldado. Además, que una tasa de enfriamiento controlado tiene el objetivo de prevenir la transformación martensítica, la cual produce una microestructura frágil. La martensita es un cambio en la microestructura como un resultado de un rápido enfriamiento desde la fase austenítica por debajo de la temperatura del inicio de formación de la martensita  $M_s$ . Esta microestructura se caracteriza por un patrón tipo aguja (American Welding Society (AWS), 2011). Algunos de los métodos más usuales para el

precalentamiento incluyen: hornos eléctricos o a gas, mesas de calentamiento con llama a gas, bancos calentados por infrarrojo. Para calentamiento localizado, se pueden usar sopletes de oxiacetileno. Detalles sobre el procedimiento para determinar la temperatura de precalentamiento más adecuada son presentados en el Capítulo 2.

### **1.13. Ensayos de soldabilidad**

La soldabilidad es definida como la capacidad de un material para ser soldado bajo condiciones de fabricación específicas y cumplir satisfactoriamente el servicio previsto. Los ensayos de soldabilidad son utilizados para evaluar las características de soldadura del material base, principalmente, en la etapa de su desarrollo. Cada prueba está diseñada para evaluar la susceptibilidad a un específico problema. Las mejores condiciones serían evaluar la soldabilidad en condiciones reales de servicio; sin embargo, esto es muy costoso y posiblemente impracticable, por esa razón ensayos normalizados han sido desarrollados. Estos evalúan las respuestas del metal base a diferentes condiciones de servicio, para los ensayos se emplean configuraciones y geometrías simples y con aplicación de carga uniforme. Además, los ensayos de soldabilidad pueden involucrar soldadura real o simulada. Para el primer caso las pruebas involucran el proceso de soldadura como tal, por otro lado, para las pruebas simuladas, la aplicación de calor es a través de otros medios. El ensayo *Varestraint* es un ejemplo de un ensayo con soldadura real que evalúa el fisuramiento en caliente y puede ser ejecutado usando un proceso como el GTAW, por ejemplo. Por otra parte, en el ensayo *Gleeble* la probeta es calentada usando una resistencia para simular la zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés) (American Society for Metals (ASM), 1997). La Tabla 1.7 presenta una comparación de diferentes ensayos de soldabilidad para evaluar la susceptibilidad al fisuramiento, sus aplicaciones y resultados obtenidos. La formación de defectos en materiales que han sido soldados por fusión es la mayor preocupación en el diseño de ensamblajes soldados. Existen cuatro tipos de defectos, que en particular, se consideran como los que más impacto causan en la calidad de la soldadura. Esos defectos, que se evidencian como grietas, ocurren en determinados intervalos de temperaturas dependiendo de la aleación, y estos son: fisuramiento en caliente, microfisuras de la Zona Afectada por el Calor (HAZ), fisuramiento en frío y goteos. El término JIG se refiere a un equipamiento que soporta un elemento y a la vez guía una herramienta utilizada en conjunto con este. Ni un ensayo individual o la combinación de algunos de ellos pueden duplicar las condiciones de una estructura real soldada. Las pruebas de laboratorio únicamente ofrecen un marco comparativo del comportamiento de los metales, los procedimientos y los procesos.

Tabla 1.7. Ensayos de soldabilidad para evaluar la susceptibilidad al fisuramiento.

Ensayo	Aplicación	Variables evaluadas	Tipo de dato obtenido	Equipo especializado necesario	Costo
Restricción Lehigh	Fisuramiento en frío y caliente del metal de soldadura, fisuramiento de raíz, fisuramiento por hidrógeno de la HAZ, fisuramiento por esfuerzo	Geometría de la junta, proceso, metal de aporte, nivel de restricción, entrada de calor, precalentamiento	Restricción crítica o porcentaje de contracción	Ninguno	Alto
Muesca (slot test)	Fisuramiento por hidrógeno de la HAZ	Metal de aporte, tiempo entre pases, precalentamiento	Tiempo para el fisuramiento, precalentamiento crítico	Ninguno	Bajo
Restricción rígida (RRC test)	Fisuramiento en frío y caliente del metal de soldadura, fisuramiento de raíz, fisuramiento por hidrógeno de la HAZ	Geometría de la junta, nivel de restricción del proceso, metal de aporte, entrada de calor, precalentamiento	Restricción crítica	JIG de restricción	Alto
Tekken	Fisuramiento de raíz del metal de suelda, fisuramiento por hidrógeno de la HAZ	Geometría de la junta, proceso, metal de aporte, entrada de calor, precalentamiento	Precalentamiento crítico	Ninguno	Bajo
Ranura circular	Fisuramiento en frío y caliente del metal de soldadura, fisuramiento por hidrógeno de la HAZ	Proceso, metal de aporte, precalentamiento	Pasa o No pasa	Ninguno	Alto
Implante	Fisuramiento por hidrógeno de la HAZ, fisuramiento por el alivio de esfuerzos	Proceso, metal de aporte, precalentamiento	Esfuerzo de fractura crítico, precalentamiento crítico	JIG de carga	Medio
TRC test	Fisuramiento por hidrógeno de la HAZ	Proceso, metal de aporte, entrada de calor, precalentamiento	Esfuerzo de fractura crítico, precalentamiento crítico	JIG de carga	Alto
Varestraint	Metal de soldadura, fisuramiento en caliente de la HAZ	Proceso, metal de aporte, entrada de calor	Longitud de fisuras, porcentaje de deformación	JIG de carga	Alto
Severidad térmica controlada (CTS test)	Fisuramiento en caliente de la HAZ en juntas del tipo filete	Corriente, tasa de enfriamiento, precalentamiento	Pasa o No pasa (al menos dos tasas de enfriamiento)	Ninguno	Alto
Cruciform	Fisuramiento por hidrógeno de la HAZ, fisuras de raíz del metal de suelda	Proceso, metal de aporte, entrada de calor, precalentamiento	Pasa o No pasa	Ninguno	Alto
Cantilever Lehigh	Goteo	Proceso, entrada de calor, precalentamiento	Restricción crítica, esfuerzo y deformación	JIG de carga	Alto
Cranfield	Goteo	Metal de aporte	Número de pases para el fisuramiento	Ninguno	Bajo
Doblado Nick	Solidez del metal de suelda	Metal de aporte	Pasa o No pasa	Ninguno	Bajo

(Fuente: (American Society for Metals (ASM), 1997)

### 1.13.1. Fisuramiento en caliente

Las fisuras en caliente son formadas a altas temperaturas y a menudo son el resultado de la segregación y contracción durante la solidificación. Las pruebas para estudiar el fisuramiento en caliente utilizan, a su vez, una carga impuesta durante la soldadura o la deformación por contracción desde una soldadura adyacente para inducir el fisuramiento. Este tipo de defecto es también conocido como fisuramiento de solidificación. A continuación, se describen las generalidades de un ensayo ampliamente utilizado para probar el fisuramiento en caliente.

#### 1.13.1.1. Ensayo *Varestraint*

El ensayo de restricción variable o simplemente *Varestraint* es uno de los más usados para evaluar el fisuramiento en caliente. Este ensayo utiliza una carga externa para imponer una deformación plástica en una placa mientras un cordón de soldadura es depositado a lo largo del eje longitudinal o transversal de la placa. El grado de la deformación es controlado con el radio de doblado dado por un bloque metálico (ver Figura 1.7).

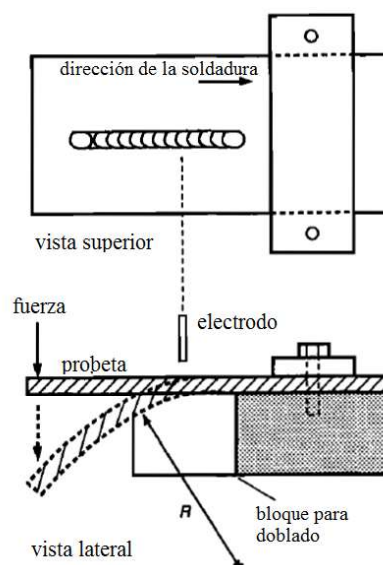


Figura 1.7. Esquema simplificado ensayo *Varestraint*.

(Fuente: Adaptado de (American Society for Metals (ASM), 1997))

La magnitud de deformación que causa el fisuramiento es un indicador de la susceptibilidad del metal base. En este ensayo, tres criterios son utilizados para evaluar los resultados. El

primero es el umbral de fisuramiento, el cual se refiere al mínimo esfuerzo requerido para causar fisuramiento en un metal base soldado con un conjunto dado de variables de soldadura o un determinado proceso. El segundo criterio que es la longitud de fisura máxima, que evalúa la sensibilidad al fisuramiento del metal. Un tercer criterio es la longitud total de las fisuras, que se obtiene sumando las longitudes de todas las grietas presentes en el metal soldado y en la zona afectada por el calor, este constituye el mejor indicativo cuantitativo del fisuramiento en caliente (American Welding Society (AWS), 2011). Una descripción completa de este ensayo se presenta en el capítulo dedicado a la Metodología.

### **1.13.2. Fisuramiento en frío**

Este fenómeno, conocido también como fisuramiento inducido por hidrógeno, ocurre después que la soldadura se solidifica. Es también referido como fisuramiento retrasado, debido a que el fenómeno aparece después de minutos u horas después de la solidificación. El fisuramiento en frío es a menudo asociado con la presencia de hidrógeno en aceros endurecibles. La ductilidad y tenacidad de la estructura soldada son grandemente reducidas por el fisuramiento en frío. Los requisitos para el fisuramiento en frío incluyen: esfuerzo de tracción (carga externa o esfuerzo residual provocado por la soldadura), microestructura susceptible al fisuramiento (martensita), y la presencia de hidrógeno. El fisuramiento en frío puede ocurrir en la zona de fusión de la soldadura o en la HAZ (American Society for Metals (ASM), 1997). Los métodos para evaluar este fisuramiento mayoritariamente empleados son: restricción Lehigh, severidad térmica controlada (CTS por sus siglas en inglés), el ensayo *Cruciform*, y el ensayo implante (American Welding Society (AWS), 2011).

#### **1.13.2.1. Ensayo *Cruciform***

Esta prueba es usada para medir la susceptibilidad de las juntas soldadas, especialmente del tipo filete, al fisuramiento. Una de sus mayores virtudes es que el método ofrece información valiosa sobre los efectos de la composición del metal base en la tendencia al fisuramiento. La probeta, mostrada en la Figura 1.8 comprende de tres placas soldadas formando una junta doble T inicialmente unidas con dos pequeños cordones auxiliares. Después, cuatro cordones de similar tamaño del tipo filete son depositados en la secuencia mostrada en la figura, se debe permitir el completo enfriamiento de cada uno de estos antes



de depositar el siguiente cordón. El fisuramiento, el cual es muy probable que ocurra en el tercer cordón, es detectado por una inspección visual o metalográfica (American Welding Society (AWS), 2011).

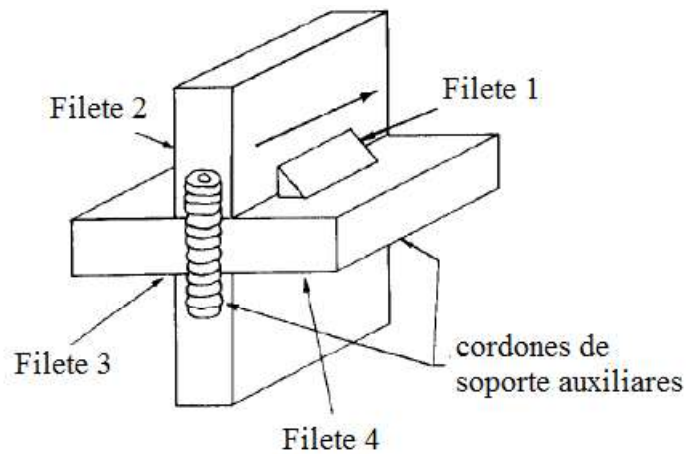


Figura 1.8. Esquema simplificado del ensayo *Cruciform*.  
(Fuente: Adaptado de (American Society for Metals (ASM), 1997) )

Para este trabajo se ha considerado estudiar la soldabilidad a través de los ensayos *Cruciform* y *Varestraint*, los cuales permiten analizar los fisuramientos en frío y en caliente, respectivamente. Detalles de la Metodología y de la aplicación de estos ensayos a las probetas son presentados en los siguientes capítulos.

## **2. METODOLOGÍA**

El presente capítulo está enfocado en crear un procedimiento para evaluar a través de ensayos de soldabilidad la factibilidad de aplicar un proceso de soldadura SMAW en el acero de alto porcentaje de carbono y cromo AISI D3, con material de aporte austenítico-ferrítico E312-16. Tomando en consideración las variables de soldadura asociadas al proceso y a su vez los tratamientos térmicos pre y post soldadura. La calificación del proceso se la determinará aplicando los criterios de aceptación que dicta la norma AWS B4.0.

### **2.1. Metodología teórica**

#### **2.1.1. Proceso de soldadura SMAW para aceros de alto porcentaje de carbono y cromo**

En el presente estudio se aplicará el proceso SMAW al acero de alto porcentaje de carbono y cromo, AISI D3, el cual se caracteriza por su dificultad en ser soldado, bajo este antecedente se debe seleccionar un electrodo revestido que permita soldar este tipo de material. Después de una revisión técnica, se determina que el electrodo revestido austenítico-ferrítico E312-16 posee alta resistencia a la fisuración al soldar metales base de difícil soldabilidad. Se practicará el proceso de soldadura en posición plana (1G) para el ensayo *Varestraint* con un espesor de material base de 10 mm y para el ensayo *Cruciform* en posición horizontal (2F) para un espesor de material base de 15 mm. Además, es importante adoptar técnicas especiales de soldadura para garantizar las especificaciones de una junta soldada de calidad, parte de estas técnicas es controlar los procesos térmicos pre y post soldadura.

#### **2.1.2. Definición de las temperaturas de precalentamiento del material base**

Debido a la composición química del acero AISI D3, generalmente no es recomendado llevar a cabo procesos de soldadura a temperatura ambiente sin el riesgo de la aparición de fisuras u otro tipo de discontinuidades. Es necesario realizar un precalentamiento a la pieza previo a la soldadura. El precalentamiento debe ser ejecutado a una tasa uniforme y

controlada. El método de precalentamiento para este estudio fue considerado a través de una llama de oxiacetilénica. El aumento de temperatura del material a soldar, utilizando un horno no ha sido considerado debido a que existe la posibilidad que la temperatura sea desigual (crea tensiones) y que baje excesivamente antes de que se complete la soldadura. (UDDEHOLM, Welding of tool steel , 2012). Las consideraciones sobre la temperatura de precalentamiento ( $T_p$ ) obedecen a que se trata de mantener en la región austenítica durante toda la operación de soldado y permitir que se tenga una baja velocidad de enfriamiento. Esto asegura microestructuras y dureza uniforme sobre la totalidad de la pieza soldada.

La temperatura de transformación martensítica ( $M_s$ ) del acero puede ser considerada como referencia para la temperatura pre soldadura. Nótese que estrictamente hablando la temperatura  $M_s$  de la junta podría ser diferente a la del metal base; sin embargo, por simplicidad, en este estudio la temperatura  $M_s$  es considerada según el metal base. También, para estimar  $T_p$  se puede seguir el criterio antes señalado, o la recomendación emitida por el fabricante del acero (Böhler).

#### **2.1.2.1. Temperatura de precalentamiento basado en $M_s$**

Una temperatura de 100°C por encima de la temperatura  $M_s$  del acero puede ser utilizada como la temperatura de precalentamiento. Para el acero AISI D3 la temperatura  $M_s$  es 200°C (ver la Figura 2.1). (UDDEHOLM, Welding of tool steel , 2012)

#### **2.1.2.2. Temperatura de precalentamiento recomendada por el fabricante**

Cuando se necesita realizar un procedimiento de soldadura en el acero AISI D3, Böhler recomienda que una temperatura de precalentamiento posible es 200°C, Basado en esta directriz se escoge esa temperatura como  $T_p$  para el presente estudio. Contemplando las consideraciones anteriores, se determinan dos temperaturas de precalentamiento: 200 y 300°C, las cuales corresponden al estado  $M_s$  y otra superior a la temperatura de transformación martensítica, respectivamente.

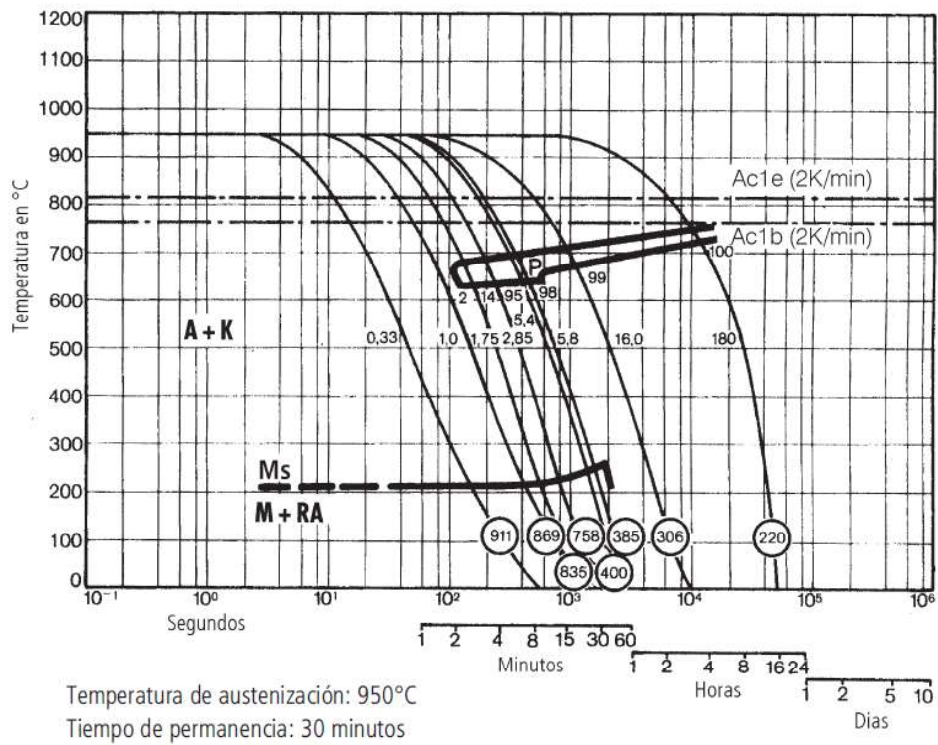


Figura 2.1. Diagrama de transformación para enfriamiento continuo.

(Fuente: Adaptado del catálogo acero K100 Böhler)

### 2.1.3. Tratamiento térmico post soldadura

Según las recomendaciones del fabricante del acero, un tratamiento térmico de revenido debe ser efectuado después del proceso de soldadura. El revenido mejora la tenacidad del metal soldado y es particularmente importante cuando el área soldada soporta altos niveles de esfuerzo (American Welding Society, 2001). La temperatura de revenido debe ser seleccionada de tal manera que sea compatible con la del metal base y la del metal de aporte. Según los catálogos del fabricante se concluye que la temperatura de revenido para metal base es una condición suficiente para ser seguida.

Considerando solo al metal base, generalmente, un revenido complementa a un tratamiento térmico de temple. En las condiciones del proceso de soldadura diseñadas

para este trabajo de titulación, los niveles de dureza obtenidos después de la soldadura son prácticamente los mismos que se obtendrían después de un templado. Durezas en escala Rockwell C (HRC) entre 55 y 61 son obtenidas después del proceso de suelta (American Welding Society, 2001), por tal razón se efectuó un revenido después de la soldadura. La Figura 2.2 muestra el esquema del tratamiento térmico del acero AISI D3, en el cual se observan las condiciones necesarias para realizar los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido del acero. De acuerdo a la información disponible en las fichas técnicas del acero y del electrodo, y en la literatura este mismo esquema puede ser aplicable al metal después de haber sido soldado.

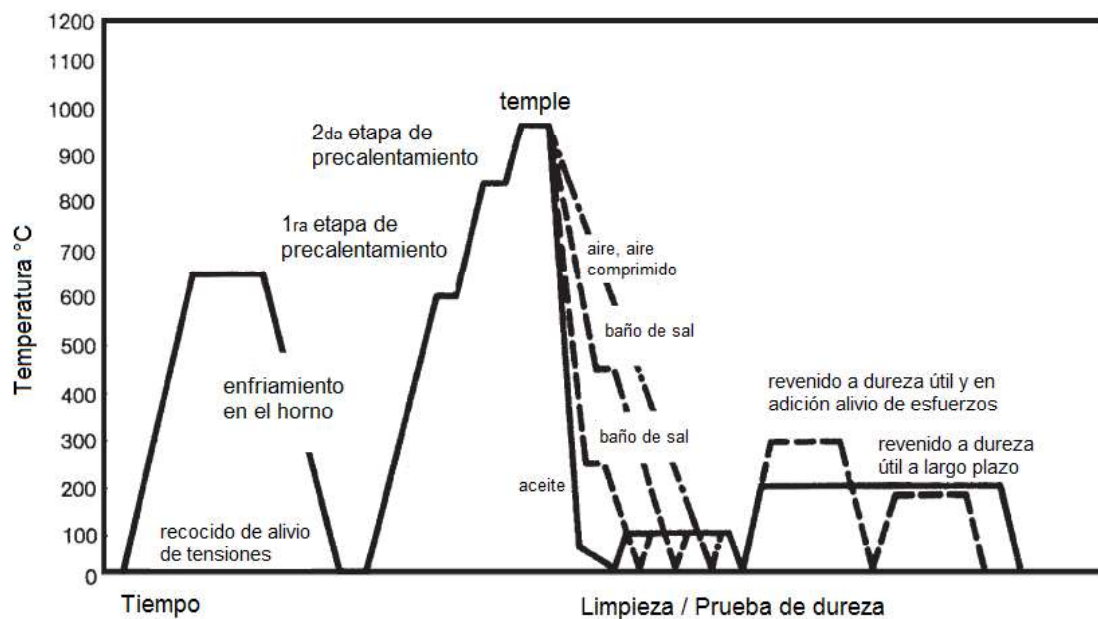


Figura 2.2. Esquema del tratamiento térmico del acero AISI D3.

(Fuente: Adaptado del manual de Böhler)

### 2.1.3.1. Procedimiento para el tratamiento térmico de revenido

Se debe efectuar un calentamiento lento hasta la temperatura de revenido, con un tiempo de permanencia en el horno de una hora por cada 20 mm de espesor de la pieza y como mínimo dos horas de enfriamiento en aire. Los valores aproximados de dureza alcanzables después del revenido se especifican en la Figura 2.3. En este estudio se definen los parámetros basado en la curva continua de la Figura 2.3.

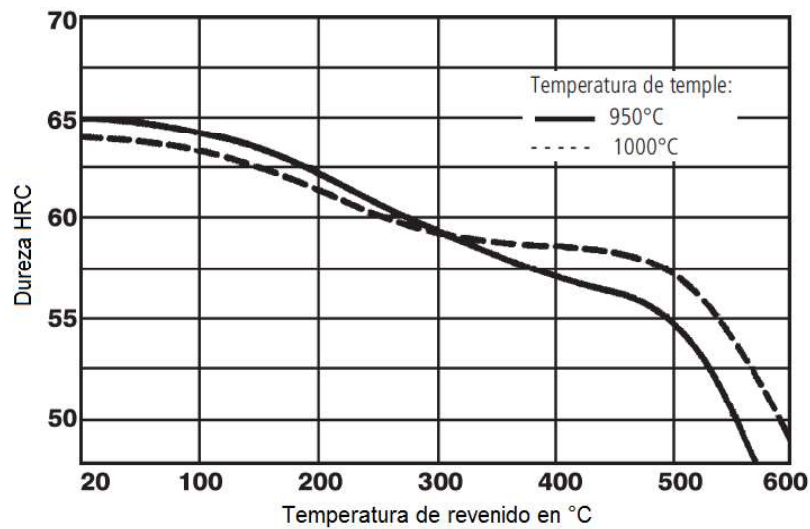


Figura 2.3. Diagrama de revenido.

(Fuente: Adaptado del manual de Böhler)

#### 2.1.4. Ensayos de soldabilidad

Como se estableció en la sección 1.13 del Capítulo 1, los factores que influyen en la soldabilidad de un material están: la composición química del metal base y la del material de aporte, el tipo de junta, el espesor del material base que se relaciona directamente con la velocidad de enfriamiento, el calor de aporte, el nivel de hidrógeno y las transformaciones microestructurales de la zona afectada por el calor (ZAC). Todo este conjunto de factores permite predecir la soldabilidad del material y evaluar la tendencia al fisuramiento en caliente y en frío.

Este estudio analiza la soldabilidad del acero altamente aleado AISI D3, para éste la composición química revela que los altos porcentajes de carbono y cromo provocan un bajo nivel de soldabilidad. Debido a la disponibilidad en el mercado local, los espesores del material son 10 mm y 15 mm, basado en el espesor se puede inferir que se tendrá una alta velocidad de enfriamiento. El aporte térmico, el tipo de junta, el nivel de hidrogeno difusible en el metal de aporte potencialmente pueden provocar problemas de fisuramiento en la ZAC.

Para garantizar una soldadura sin presencia de fisuras se debe recurrir a un análisis experimental. Bajo este marco se determina que los ensayos de fisuramiento pueden cumplir con ese propósito. Los ensayos de *Varestraint* y *Cruciform* han sido los escogidos para evaluar las tendencias de fisuramiento en caliente y en frío respectivamente. Los mismos que se encuentran normalizados bajo las directrices de la norma AWS B4.0.

#### 2.1.4.1. Ensayo de *Varestraint*

Este ensayo es usado para cuantificar la susceptibilidad al agrietamiento, evaluar la soldabilidad del metal base y determinar la influencia de las variables del proceso de soldadura en el fisuramiento en caliente del metal base, este ensayo está diseñado para materiales bases con espesores en el rango de 6-13 mm. La ventaja radica en la rápida evaluación de los resultados, combinada con la buena reproducibilidad y poca variabilidad.

Para este estudio fueron consideradas probetas de dimensiones de 50 mm de ancho x 305 mm de largo x 10 mm de espesor (Figura 2.4), obtenidas directamente desde el proveedor.

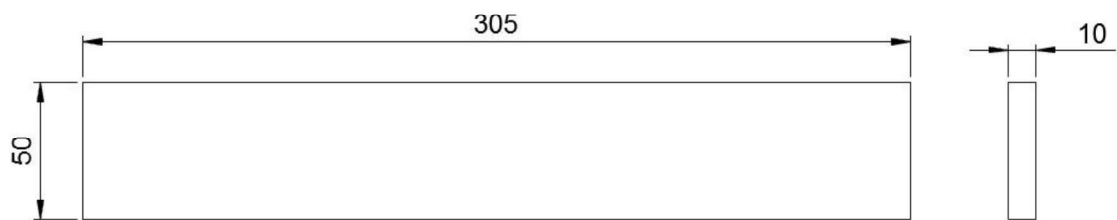


Figura 2.4. Dimensiones de la probeta ensayo *Varestraint*.

(Fuente: propia)

Este ensayo se lo lleva a cabo depositando un cordón de soldadura en una probeta previamente fijada en uno de sus extremos, resultando en una configuración en voladizo. La dirección del cordón de soldadura va desde el extremo libre hacia el extremo fijo. Es necesario utilizar un dado de un radio especificado (R) y colocarlo en la posición mostrada en la Figura 2.5.

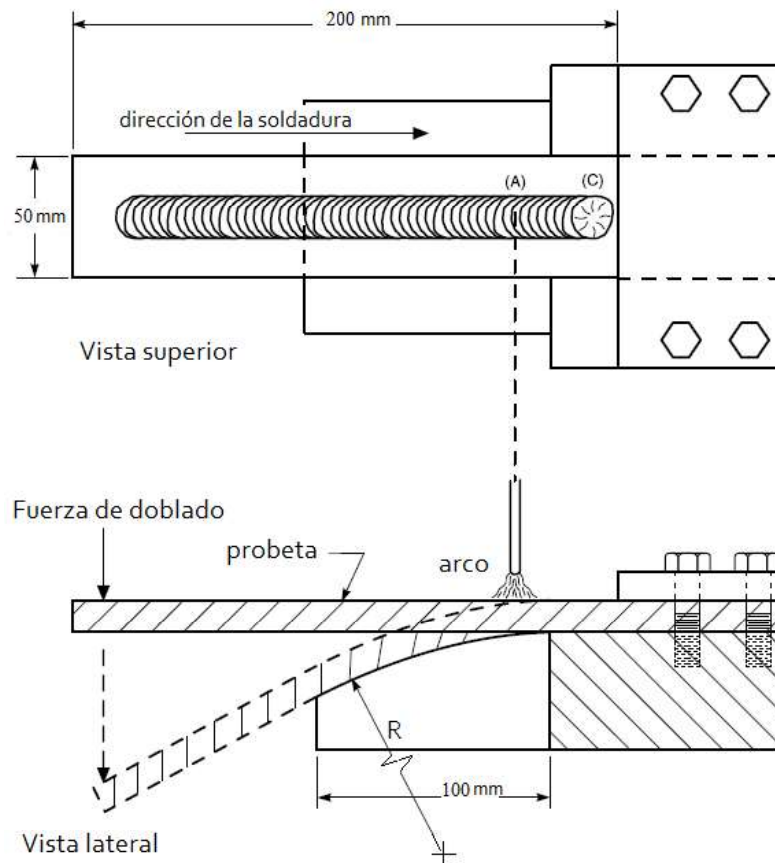


Figura 2.5. Configuración del ensayo *Varestraint*.

(Fuente: Adaptado desde AWS B4.0, 2007)

El cordón de soldadura debe ser iniciado en la línea del centro de la probeta, aproximadamente a 50 mm medidos desde su borde libre. La fuerza de doblado es repentinamente aplicada cuando el centro del arco de suelda pasa por el punto de referencia A, el cual está cerca del punto de tangencia entre la superficie curvada del dado y el extremo fijo de la probeta. La tasa de aporte del arco debe ser constante desde su punto de inicio hasta el punto de terminación localizado en C, este último ubicado en el extremo fijo de la probeta (ver Figura 2.5).

Dentro de las recomendaciones que dicta la norma AWS B4.0 para aplicar este ensayo, se establece que se debe tener una muestra de dos especímenes para cada condición del proceso de soldadura aplicado. La fuerza de doblado requerida se determina a partir de las condiciones físicas y geométricas de las probetas. En primer lugar, se calcula la deformación máxima vertical utilizando la Ecuación 2.1. La probeta para este ensayo se considera como una viga en voladizo con una carga aplicada en uno de sus extremos.



$$y_{\max} = \frac{PL^3}{3EI}$$

Ecuación 2.1. Máxima deformación vertical para una viga en voladizo.

(Fuente: Gere, 2009)

$y_{\max}$ : máxima deformación vertical.

E: módulo de Young del material (210 GPa).

I: inercia transversal.

L: longitud. Este valor corresponde a 200 mm (ver Figura 2.5).

P: fuerza aplicada, corresponde a la fuerza de doblado que en este caso es el peso de un objeto suspendido en el extremo de la probeta.

La inercia de la probeta se calcula como  $I = a^3b^3/12$ , con  $a$  = ancho (50 mm) y  $b$  = espesor (10 mm). Con lo que se obtiene que  $I = 4,16 \times 10^{-9} \text{ m}^4$ . Reemplazando los valores geométricos y físicos de la probeta, y asumiendo una deformación vertical máxima de 4 mm, se obtiene la siguiente expresión para calcular el valor del peso  $P$

$$P = \frac{0,004 * (3 * 210 \times 10^9 * 4,16 \times 10^{-9})}{0.2^3}$$

$$P = 1312,5 \text{ N.}$$

Con el valor calculado para  $P$ , se determina que es necesario un cuerpo de masa  $m = P/g$  de 133,9 kg, siendo  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  la aceleración de la gravedad.

#### 2.1.4.2. Ensayo *Cruciform*

Este ensayo es usado para medir la susceptibilidad al fisuramiento debido a la presencia de hidrógeno en juntas de acero soldadas. Su aplicación principal es evaluar la susceptibilidad al fisuramiento debido a la composición del metal base, pero también evaluar los efectos producidos por la selección del tipo de electrodo, las variables del proceso de soldadura y por los tratamientos térmicos pre y post soldadura (AWS B4.0, 2007).

Para realizar el ensayo se utilizaron placas con las dimensiones resumidas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Dimensiones de las placas para ensayo *Cruciform*.

Placas	Dimensiones [mm]		
	Largo	Ancho	Espesor (e)
<b>A</b>	305	152	15
<b>B</b>	305	76	15
<b>C</b>	305	76	15

(Fuente: propia)

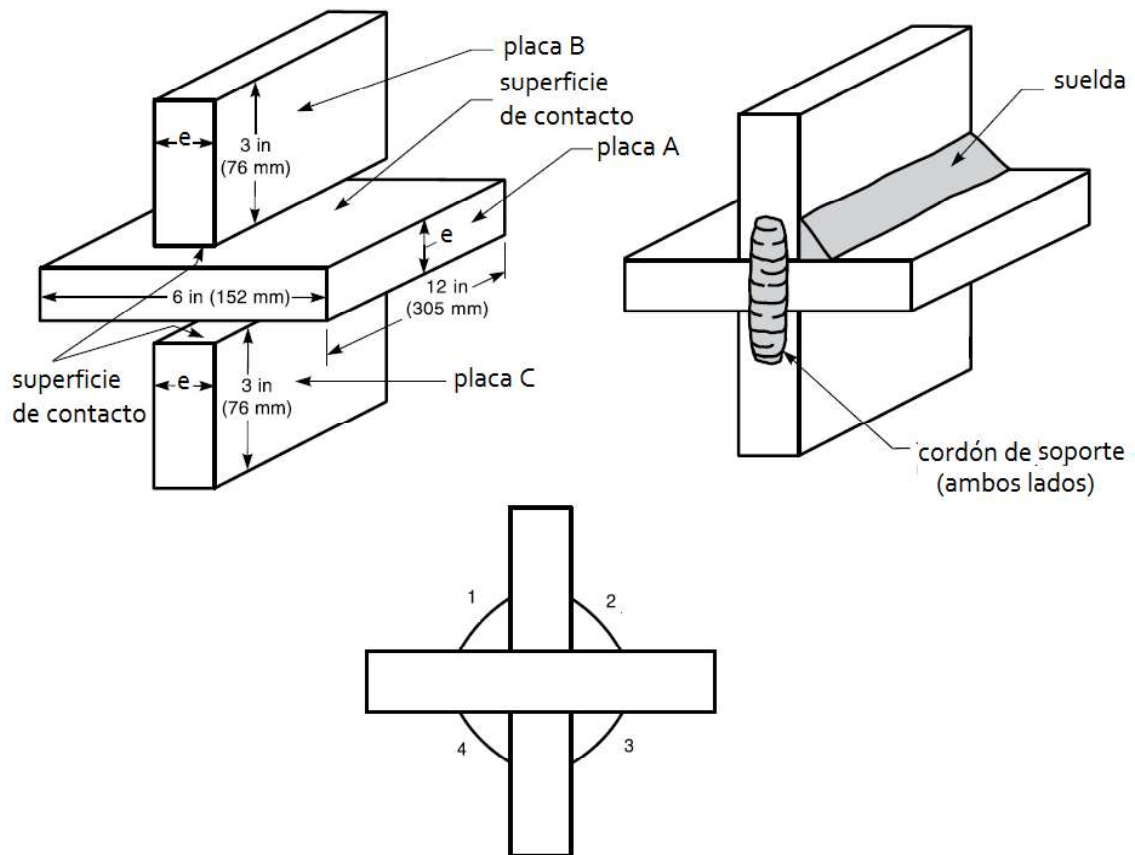


Figura 2.6. Ensamble del ensayo *Cruciform*.

(Fuente: Adaptado desde AWS B4.0, 2007)

El largo y el ancho de las placas A, B y C fueron obtenidas por la directriz de la norma AWS B4.0, y el espesor se ajusta a la disponibilidad del material base en el mercado; sin embargo, cumpliendo lo especificado en dicha norma. Todas las soldaduras serán realizadas en posición plana (2F). Las placas deberán ser precalentadas de acuerdo a lo

especificado en la sección 2.2. De acuerdo a la norma el tratamiento de post calentamiento se lo debe practicar inmediatamente después de finalizada la soldadura.

Para cada ensamble las tres placas son soldadas en una junta doble T (Figura 2.6). Esta configuración se la logra al aplicar unos pequeños depósitos de material de aporte en las dos partes externas de las placas que sirven como soportes previos a la soldadura tipo filete. Varios pases de una soldadura tipo filete serán depositados en cada una de las cuatro juntas tipo T (ver Figura 2.6). Este depósito de material de aporte debe ser realizado en sentido horario en cada uno de las juntas tipo T.

Después del tratamiento térmico de post soldadura el ensamble *Cruciform* debe seccionado e inspeccionado para encontrar posibles fisuras. Para esto las probetas deben ser cortadas transversalmente de acuerdo a lo mostrado en la Figura 2.7. Las secciones deben identificadas y siguiendo las recomendaciones de la norma las secciones con un ancho de 25 mm medido de los bordes pueden ser descartadas.

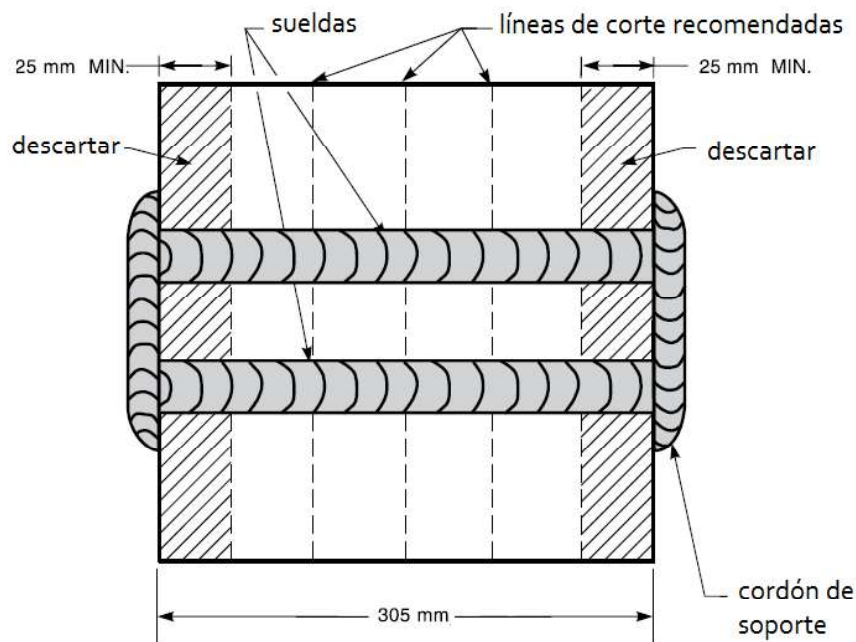


Figura 2.7. Localización del corte para las probetas del ensayo *Cruciform*.

(Fuente: Adaptado desde AWS B4.0, 2007)

La norma específica que una de las caras de cada probeta sea pulida con un material abrasivo numero 240 (o más fino) y examinadas con un aumento a 50x. Después del proceso de pulido las probetas deben ser analizadas utilizando medios ópticos.

## 2.2. Metodología experimental

En esta sección se detalla el proceso de soldadura ejecutado para desarrollar los ensayos de soldabilidad y las variables asociadas descritos anteriormente. Posteriormente se evidencia de manera gráfica y se describe cada uno de los ensayos no destructivos y destructivos practicados a las configuraciones soldadas. Todas las especificaciones y variables del proceso de soldadura se registran en las especificaciones del proceso de soldadura WPS (del inglés Welding Procedure Specification). Para la ejecución de los ensayos de soldabilidad se utilizó el equipo de soldadura por arco eléctrico metálico protegido (SMAW), disponible en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica, los datos técnicos del equipo se describen en el ANEXO I de este documento. Las configuraciones soldadas fueron realizadas con las condiciones de trabajo establecidas para el ensayo *Varestraint* como *Cruciform*.

### 2.2.1. Proceso de soldadura ensayo *Varestraint*

El desarrollo del ensayo *Varestraint* estuvo basado en las directrices descritas anteriormente. Basado en la metodología experimental se definen las temperaturas de precalentamiento, dimensiones, números de probetas y fuerza aplicada en el ensayo. En la Figura 2.8 se visualiza el material base cortado a medida, obtenido desde el proveedor del material base Böhler, cabe señalar que el material base posee un recubrimiento de protección que debe ser removido antes de iniciar el proceso de soldadura, la figura también identifica la trazabilidad de origen descrita por la fuente.



Figura 2.8. Material base cortado a medida para ensayo *Varestraint*.

(Fuente: propia)

Para lograr que el ensayo refleje resultados adecuados, se realizó una prueba previa sobre una probeta para ajustar algunas de las variables del proceso, las consideraciones preliminares fueron: fijación, posicionamiento, temperatura y tiempo de precalentamiento; además del cálculo de la fuerza aplicada, número de electrodos consumidos y regulación de voltaje e intensidad. En la Figura 2.9 se observa que la probeta sufre una expansión térmica angular opuesta a la dirección de aplicación de la fuerza esto a consecuencia del elevado coeficiente de expansión térmica, dicho comportamiento del material base es discutido posteriormente en este documento. De esta prueba preliminar se pudo concluir que durante el enfriamiento de la probeta se debe mantener el peso aplicado.



Figura 2.9. Expansión térmica angular opuesta a la dirección del peso aplicado en probeta ensayo *Vareststraint*.  
(Fuente: propia)



Figura 2.10. Aplicación de la fuerza de doblado sobre una probeta en el ensayo *Vareststraint*.  
(Fuente: propia)

Como se indicó en la sección 2.1.4.1. se realizó el cálculo de la fuerza de doblado necesaria para lograr que la probeta fleje, por disponibilidad de los recursos dentro del Laboratorio de Soldadura se utilizaron tres cuerpos con una masa combinada de 135 Kg, como se observa en la Figura 2.10. Lo señalado en la sección 2.1.2 y en las sus subsecciones contenidas en este, el precalentamiento al que debe ser sometido el material base para evitar el riesgo de aparición de discontinuidades, es de suma importancia para el proceso de soldadura. Contemplando estos antecedentes, se determinan dos temperaturas de precalentamiento, 200 y 300°C, las cuales corresponden al estado  $M_s$  y a la temperatura de transformación martensítica, respectivamente. Se observa en la Figura 2.11 el empleo de una llama de oxiacetilénica para alcanzar la  $T_p$  de cada probeta, en la Tabla 2.3 se presentan los valores de las temperaturas de precalentamiento  $T_p$  que se alcanzaron cada uno de los especímenes.



Figura 2.11. Proceso de precalentamiento utilizando una llama de oxiacetilénica.

(Fuente: propia)

Con la probeta fijada en una configuración en voladizo, se practicó el precalentamiento, posterior a esto se depositó un cordón de soldadura en posición plana (1G), sin técnica de arrastre, a cada una de las cuatro probetas que fueron ensayadas. Cabe señalar que en dicho cordón se consumió un total de tres electrodos E312-16. La Figura 2.12 muestra el instante en el que el arco de suelda a pasado por el punto de tangencia del dado de curvatura, mientras la fuerza está aplicada en un extremo de la probeta y la escoria protectora aun no ha sido removida.



Figura 2.12. Cordón de soldadura depositado en posición 1G ensayo *Varestraint*.  
(Fuente: propia)

Una vez retirada la escoria generada en el cordón de soldadura, propia del proceso de SMAW, se dejó enfriar a la probeta con la fuerza aplicada. La Figura 2.13 presenta la situación del material base después de haber realizado el proceso. El tiempo y las temperaturas de enfriamiento de las probetas fueron registrados y serán discutidos más adelante en este documento.



Figura 2.13. Probeta deformada, el enfriamiento se llevó a cabo con la fuerza de doblado aplicada.  
(Fuente: propia)

### 2.2.1.1. Variables en el proceso SMAW para el ensayo *Varestraint*

Los parámetros del proceso de soldadura deben ser controlados para poder ejecutar un análisis diferenciado de las propiedades mecánicas de las probetas que se obtienen a distintas condiciones de trabajo. Los parámetros controlados se los presenta en la Tabla 2.2, la misma que contiene la temperatura y el tiempo de precalentamiento, y la velocidad de avance. Este último parámetro es resultado del cálculo de la relación entre la longitud del cordón y el tiempo de depósito. Cabe señalar que a partir de esta sección y a lo largo del documento se identifican a las probetas por la temperatura de precalentamiento  $T_p$  que ha sido sometida. Es así que las probetas 1 y 2 son las que corresponden a  $T_p = 200^\circ\text{C}$ , y las probetas 3 y 4 con  $T_p = 300^\circ\text{C}$ .

Tabla 2.2. Variables controladas en el proceso SMAW ensayo *Varestraint*.

	<b>Temperatura de precalentamiento [°C]</b>	<b>Tiempo de precalentamiento [s]</b>	<b>Velocidad de avance [mm/s]</b>
Probeta 1	234	781	1,65
Probeta 2	220	758	1,56
Probeta 3	336	920	1,58
Probeta 4	348	908	1,62

(Fuente: propia)

El control de las temperaturas de precalentamiento y del posterior enfriamiento de las probetas se lo realizó mediante un pirómetro disponible en el Laboratorio de Soldadura, las características técnicas de este equipo se presentan en el ANEXO I. Las demás especificaciones que intervienen en el proceso de soldadura serán señaldas a través de un WPS (Welding Procedure Specification) presentado en el ANEXO II.

### 2.2.2. Proceso de soldadura ensayo *Cruciform*

Para analizar la tendencia al fisuramiento en frío del material base en una junta soldada del tipo filete, se practicó el ensayo *Cruciform*, el mismo que se ha descrito a detalle en la sección 2.1.4.2, contemplando los detalles de los tratamientos térmicos pre y post soldadura, como la localización de los cortes de las configuraciones para la extracción de las probetas. La preparación dimensional de las placas (cortes) fueron realizadas por el



proveedor del material base Böhler, como se evidencia en la Figura 2.14, también se visualiza la trazabilidad de origen descrita por la fuente.



Figura 2.14. Material base cortado según dimensiones del ensayo *Cruciform*.  
(Fuente: propia)



Figura 2.15. Ensamble de las probetas ensayo *Cruciform*.  
(Fuente: propia)

Previo al proceso de soldadura, las superficies de contacto entre las placas fueron limpiadas y se retiró el recubrimiento de protección, procurando dejar las superficies lo más lisas posibles para asegurar un contacto óptimo y una apropiada transferencia de calor

entre ellas. Posterior a esto, se realizó el ensamble de cada una de las configuraciones de la junta doble T a través del depósito de pequeños cordones auxiliares en los extremos de las placas, que además sirvieron de soporte de la junta previo a la realización del proceso de soldadura como tal (ver Figura 2.15).

Por la composición química del acero AISI D3 se debe practicar un proceso de precalentamiento previo a la soldadura, este tratamiento térmico previo fue realizado utilizando una llama oxiacetilénica tal como se ve en la Figura 2.11. Todas las juntas tipo filete de cada configuración *Cruciform* alcanzó una  $T_p$  de acuerdo a lo establecido, es así, que las cuatro juntas de la primera configuración estuvieron a una temperatura de 200°C, de igual manera, en la segunda configuración todas sus caras alcanzaron un rango de temperatura superior a la de transformación martensítica, 300°C. Cada ensamble del tipo de junta doble T, fue fijado en una entenalla de banco para garantizar perpendicularidad al momento de depositar el material de aporte. Los pases de soldadura fueron depositados en posición horizontal (2F) sin técnica de arrastre, la Figura 2.16 muestra el instante previo al último pase de soldadura, una vez ya removida la escoria generada.

La identificación de las probetas que se mantendrá en el resto del documento se basa en la  $T_p$  a la cual fue sometida la configuración, de esta manera se señala como *Cruciform 1* a la que estuvo expuesta a una temperatura de 200°C y como *Cruciform 2* a la que alcanzó 300°C.



Figura 2.16. Cordón de soldadura depositado en posición 2F ensayo *Cruciform*.  
(Fuente: propia)

A continuación, se reportan algunas observaciones referidas al proceso de soldadura. Tanto para el *Cruciform* 1 y 2 se evidenció que las configuraciones sufrieron una expansión térmica angular una vez finalizado el depósito del material de aporte en la primera junta tipo filete ver (Figura 2.17), este comportamiento del acero AISI D3 será discutido en detalle en una sección posterior en este documento.



Figura 2.17. Expansión térmica angular ensayo *Cruciform*.

(Fuente: propia)



Figura 2.18. Fisura a lo largo de todo el cordón de soldadura en el tercer filete, *Cruciform* 1.

(Fuente: propia)

En el *Cruciform 2* en su tercera junta tipo filete presentó un soplo magnético en el extremo de la probeta tal como se ve en la Figura 2.19, el cual provocó dificultades para completar el pase de soldadura, la disminución de la velocidad de avance y salpicaduras del material de aporte. Un análisis detallado se aborda en una sección posterior de este documento.



Figura 2.19. Soplo magnético en el tercer filete *Cruciform 2*.  
(Fuente: propia)

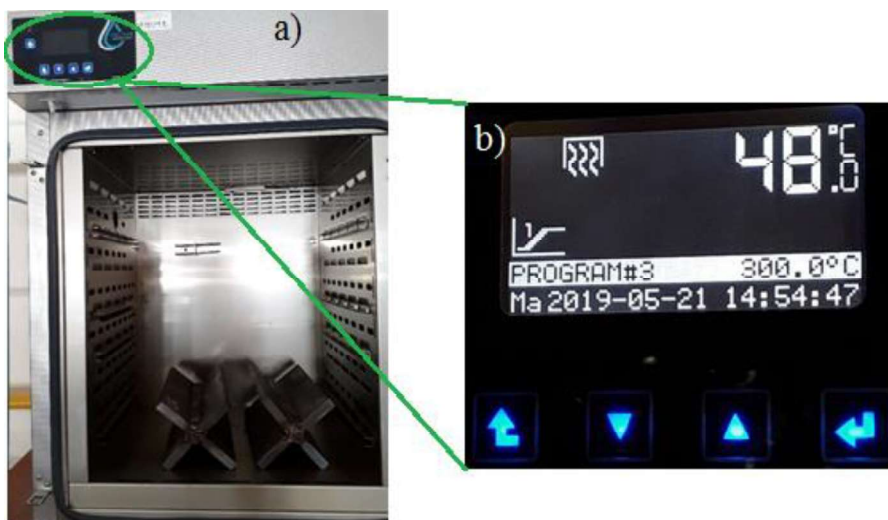


Figura 2.20. Horno para tratamiento térmico. a) Ingreso de las probetas al horno. b) programación del horno para ejecutar el tratamiento térmico post soldadura.  
(Fuente: propia)

Según la norma AWS B4.0 en la ejecución de este ensayo, se debe realizar un tratamiento térmico post soldadura, como fue explicado en la sección 2.1.3., inmediatamente después que se finalice la soldadura y la probeta se haya enfriado por completo. Este tratamiento térmico de alivio de esfuerzos es el revenido, y por disponibilidad del equipo (Figura 2.20), se lo realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química. El tiempo de permanencia en el horno fue de dos horas a una temperatura de

300°C. La Figura 2.20 (b) muestra la programación del horno para someter a las probetas al tratamiento térmico post soldadura por el tiempo y temperatura requeridos. Las características técnicas del horno donde se realizó el tratamiento térmico post soldadura se las presenta en el ANEXO I.

### 2.2.2.1. Variables en el proceso SMAW para el ensayo *Cruciform*

Las variables controladas propias del proceso de soldadura fueron la temperatura y tiempo de precalentamiento, temperaturas entre pases ( $T_{pases}$ ) y velocidades de avance de soldadura ( $V_a$ ). Las variables de precalentamiento son tabuladas en la Tabla 2.3 para el *Cruciform 1* y en la Tabla 2.4 para el *Cruciform 2*. Las temperaturas y tiempos de enfriamiento serán presentados y discutidos en más adelante en este trabajo.

Tabla 2.3. Temperaturas y tiempos de precalentamiento *Cruciform 1*.

	<b>Temperatura de precalentamiento [°C]</b>	<b>Tiempo de precalentamiento [s]</b>
Filete 1	194	763
Filete 2	214	738
Filete 3	238	695
Filete 4	221	682

(Fuente: propia)

Tabla 2.4. Temperaturas y tiempos de precalentamiento *Cruciform 2*.

	<b>Temperatura de precalentamiento [°C]</b>	<b>Tiempo de precalentamiento [s]</b>
Filete 1	291	913
Filete 2	282	879
Filete 3	296	924
Filete 4	308	896

(Fuente: propia)

El número de pases de soldadura practicados a las probetas en todas las juntas tipo filete fueron cuatro, esto para garantizar la penetración completa en la junta ya que se trabajó con un espesor de 15 mm de material base, exceptuando los filetes tres y cuatro del

*Cruciform 1* donde no se realizó el último pase de soldadura por la presencia de una fisura en todo el cordón de soldadura en el tercer filete Tabla 2.5.

La Tabla 2.6. referente al *Cruciform 2* muestra como en el tercer filete en los pases tres y cuatro se da una disminución de la velocidad de avance debido al soplo magnético acontecido, este parámetro es resultado de la relación entre de la longitud del cordón y el tiempo de depósito.

Tabla 2.5. Temperaturas entre pases y velocidades de avance *Cruciform 1*.

<b>Cruciform 1</b>								
	<b>Filete 1</b>		<b>Filete 2</b>		<b>Filete 3</b>		<b>Filete 4</b>	
	<b>Tpases [°C]</b>	<b>Va [mm/s]</b>	<b>Tpases [°C]</b>	<b>Va [mm/s]</b>	<b>Tpases [°C]</b>	<b>Va [mm/s]</b>	<b>Tpases [°C]</b>	<b>Va [mm/s]</b>
Pase 1	216,34	2,17	217,80	2,24	215,64	1,98	223,39	2,12
Pase 2	221,97	1,94	219,21	2,08	218,47	1,89	225,15	1,93
Pase 3	222,72	2,29	219,64	2,01	221,63	2,09	226,73	2,21
Pase 4	221,33	2,13	220,12	1,96	-----	-----	-----	-----

(Fuente: propia)

Tabla 2.6. Temperaturas entre pases y velocidades de avance *Cruciform 2*.

<b>Cruciform 2</b>								
	<b>Filete 1</b>		<b>Filete 2</b>		<b>Filete 3</b>		<b>Filete 4</b>	
	<b>Tpases [°C]</b>	<b>Va [mm/s]</b>	<b>Tpases [°C]</b>	<b>Va [mm/s]</b>	<b>Tpases [°C]</b>	<b>Va [mm/s]</b>	<b>Tpases [°C]</b>	<b>Va [mm/s]</b>
Pase 1	324,24	2,11	288,78	2,07	314,23	2,04	307,31	1,81
Pase 2	336,46	1,82	328,32	2,19	334,76	2,18	317,84	1,97
Pase 3	328,18	1,93	322,96	1,92	344,37	1,54	332,59	2,11
Pase 4	352,83	2,05	346,64	2,24	358,69	1,71	341,77	2,19

(Fuente: propia)

Las demás especificaciones del proceso de soldadura de cada configuración soldada se las señala por medio de un WPS presentado en el ANEXO 2.

### 2.2.3. Ensayos no destructivos

La aplicación de ensayos no destructivos en las probetas de los ensayos de soldabilidad en este estudio permite: detectar los defectos en las soldaduras, evaluar el tamaño, forma y tipo de discontinuidades, y a su vez calificar la severidad de las discontinuidades. Las directrices señaladas por la norma AWS B4.0, no estipulan la realización de ensayos no destructivos en los ensayos de soldabilidad *Varestraint* y *Cruciform*, pero para complementar el análisis en el estudio se realizaron ensayos de inspección visual, tintas penetrantes, radiografía industrial y partículas magnéticas. Todos estos ensayos se los llevó a cabo en el Laboratorio de Ensayos No Destructivos (END) de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

#### 2.2.3.1. Inspección visual ensayo *Varestraint*

La inspección visual es el ensayo no destructivo más básico de todos los métodos no destructivos, pudiéndose determinarse características dimensionales y la presencia de discontinuidades en la soldadura. De esta manera, como primer paso se procedió identificando a cada una de las probetas con la designación que se maneja en el Laboratorio de END (Figura 2.21), posteriormente se realizó un registro fotográfico de las probetas a ser examinadas, esto para elaborar el reporte de inspección visual. Se debe señalar que también se inspeccionó la probeta que sirvió como prueba previa en el ensayo *Varestraint*.



Figura 2.21. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes en la probeta 1, del ensayo *Varestraint* por inspección visual.

(Fuente: propia)

### 2.2.3.2. Inspección visual ensayo *Cruciform*

La inspección visual generalmente es empleada para brindar soporte a otros métodos no destructivos. Con la certeza de que todos los filetes de las dos configuraciones están limpios se procede a identificar a las probetas con la designación del Laboratorio de END, esto para facilitar el levantamiento del reporte de las discontinuidades detectadas. También se elaboró el registro fotográfico de cada uno de los filetes ver Figura 2.22.



Figura 2.22. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes por inspección visual del *Cruciform 1*.  
(Fuente: propia)

### 2.2.3.3. Líquidos penetrantes ensayo *Varestraint*

Este tipo de ensayos no destructivos permite identificar y detectar las discontinuidades presentes en toda la superficie del material inspeccionado, su costo de implementación es bajo y los resultados obtenidos son inmediatos. El kit de líquidos penetrantes utilizado es mostrado en la Figura 2.23.(a), el penetrante (P-HF PENETRANT), y en la Figura 2.23. (b), el revelador (Met-L-Check D-70).



Figura 2.23. Líquidos utilizados para ensayo de tintas penetrantes. (a) Penetrante, (b) revelador.  
(Fuente: propia)



Con las probetas identificadas de acuerdo a la designación manejada en el Laboratorio de END, el paso preliminar fue limpiar las superficies de las probetas con paños humedecidos con thinner, esto para garantizar que estén libres de grasas, polvos y óxidos. Posteriormente, se aplicó por aspersion el líquido penetrante como se observa en la Figura 2.24, la probeta que sirvió como prueba preliminar en el proceso de soldadura también fue inspeccionada.



Figura 2.24. Aplicación por aspersion del líquido penetrante en las probetas del ensayo

*Varestaint.*

(Fuente: propia)

Cubiertas las superficies en su totalidad se dejó transcurrir un lapso de doce minutos para permitir que el penetrante actúe, después se ejecutó la remoción del exceso del líquido penetrante a través de paños absorbentes. Una que la superficie estuvo seca se aplicó el revelador dejándolo actuar por cinco minutos, la Figura 2.25, muestra el proceso de inspección y la interpretación de las discontinuidades encontradas en la probeta 1.



Figura 2.25. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes en la probeta 1 del ensayo *Varestaint* por tintas penetrantes.

(Fuente: propia)

#### 2.2.3.4. Líquidos penetrantes ensayo *Cruciform*

La fundamentación de este método radica en la capacidad de ciertos líquidos para penetrar y ser retenidos en poros, grietas y fisuras que están abiertos a la superficie, siendo una técnica fácil y rápida de emplear, además, que la geometría y tamaño de la pieza no es un inconveniente. Este método se aplicó a las probetas *Cruciform*.

En la norma ASTM E 165, Tipo II, Método A, se basa el procedimiento de inspección realizado, el kit de líquidos penetrantes utilizado fue señalado en la Figura 2.23. Identificadas correctamente las dos probetas, previamente se limpian con un paño humedecido en thinner los cuatro filetes que las conforman, esperando un tiempo prudencial que se evapore este diluyente, se aplicó por aspersion el líquido penetrante en el primer filete de ambas configuraciones *Cruciform* tal como se ve en la Figura 2.26.

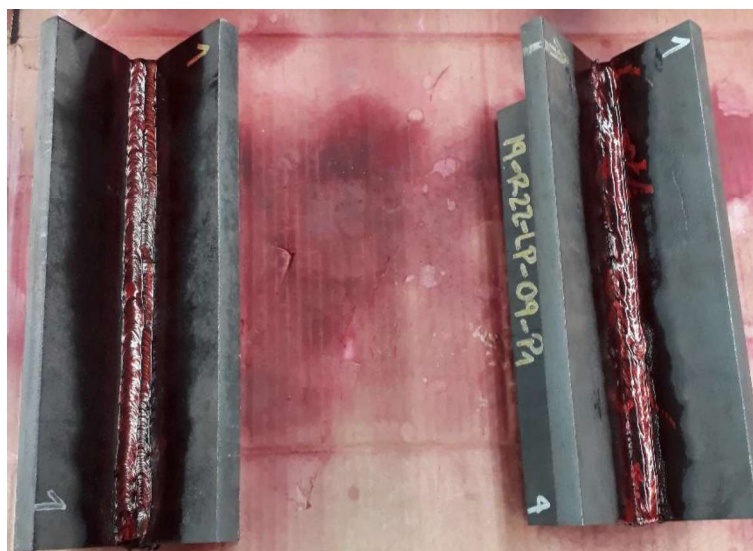


Figura 2.26. Aplicación por aspersion del líquido penetrante en las probetas del ensayo *Cruciform*.

(Fuente: propia)

La aplicación del penetrante se efectuó en un filete a la vez, de esta manera se tuvo que esperar doce minutos por cada uno para que el penetrante actúe. La remoción del exceso del líquido se hizo con paños absorbentes, una vez seca la superficie se colocó el revelador sobre cada filete, para cinco minutos después proceder con la observación y analizar la aparición de indicaciones. La Figura 2.27, deja ver las discontinuidades encontradas en la tercera junta tipo filete del *Cruciform 1*, se ha seleccionado mostrar este filete para tener concordancia con lo descrito en la Figura 2.18. Observando esta discontinuidad se debe

señalar que la longitud es la real pero el ancho es mayor que el real debido a la acción del revelador.



Figura 2.27. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes en el tercer filete del *Cruciform 1* por tintas penetrantes.

(Fuente: propia)

### 2.2.3.5. Radiografía industrial ensayo *Varestraint* (RX)

Se considera uno de los métodos más utilizados de Ensayos No Destructivos, otorgando la posibilidad de detectar defectos superficiales e internos debido a que es una técnica de ensayo volumétrica, la identificación de los defectos es a través de la capacidad de radiación electromagnética de corta longitud de onda que penetra los materiales. La intensidad de radiación que atraviesa el componente es capturada por una película sensible a la radiación, generándose un esquema de sombras sobre ella, que se convierte en un registro permanente. Existen dos clases de radiaciones utilizadas en este método los Rayos X (RX) y Rayos Gamma (RG), la principal diferencia entre estos es el origen, los RX son producidos de manera artificial por un generador y los RG es un producto de materiales radioactivos. El equipo disponible en el Laboratorio END es el de RX, sus características se presentan en el ANEXO I.

Preliminarmente se cortó una película radiográfica y se identificaron las cuatro probetas con la designación manejada por el laboratorio END, dicha denominación es montada con letras de plomo sobre una cinta masking y es sujeta a la película radiográfica, también, son fijados debajo de la probeta los hilos de indicadores de calidad de imagen (ICI). Las condiciones de trabajo con la que se ejecutó el ensayo para la probeta 1 se señalan en la

Tabla 2.7, para las otras tres probetas el único factor que cambia es el tiempo de exposición, la variación es mínima entre ellas.

Tabla 2.7. Condiciones de trabajo para ensayo de RX, probeta 1.

<b>Identificación:</b> 2019-R-20-RX-11-001		
Tomas: 1	Kv: 140 kV	mA: 5 mA
Tiempo de Exp: 1 min 13 s	Distancia a la Fuente: 54 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen

(Fuente: propia)

El procesamiento de las películas radiográficas (revelado), se lo realizó en el cuarto oscuro dotado de una correcta iluminación, el proceso empieza agitando las soluciones y controlando la temperatura del revelador, entonces, se procede a abrir el envoltorio de la película y se dan los baños de revelado, parada y fijado. Después vienen los lavados final y deshumectante. Finalmente, se realiza el secado de la película, los tiempos de estos procesos se los muestra en la Tabla 2.8, el registro permanente generado de la probeta 1 se lo presenta en la Figura 2.28.

Tabla 2.8. Tiempos de procesamiento de la película radiográfica.

<b>Tiempos de procesamiento de la película radiográfica</b>		
T. Revelado: 5 min	T. Parada: 1 min	T. Fijado: 10 min
T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min

(Fuente: propia)



Figura 2.28. Placa radiográfica de la probeta 1 ensayo *Varestraint*.

(Fuente: propia)

### 2.2.3.6. Partículas magnéticas ensayo *Cruciform*

Este ensayo no destructivo se emplea para localizar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos, las operaciones básicas del método se basan en: establecer un flujo magnético adecuado sobre la muestra a inspeccionarse, aplicar partículas magnéticas sobre la pieza y la interpretación de las indicaciones del medio magnético. El procedimiento se rige a la norma ASTM E 709- de izquierda a derecha. Con las probetas *Cruciform* libres de cualquier agente contaminante, se estableció la designación usada en el laboratorio de END, y se procede a verificar con el medidor de campo residual (gaussímetro) el magnetismo residual presente en la pieza como se observa en la Figura 2.29. El valor aceptable por la norma de magnetismo residual es alrededor de dos G (gauss), el tercer filete del *Cruciform 2* superó este valor por lo que preliminarmente tuvo que ser desmagnetizado, esto a consecuencia de que en el proceso de soldadura se produjo un soplo magnético como se describió en la Figura 2.19.



Figura 2.29. Medición del campo magnético residual  
(Fuente: propia)

En el ANEXO I se presentan las características técnicas del yugo magnético utilizado para magnetizar las probetas. La magnetización de las configuraciones *Cruciform* se ejecutó colocando al yugo magnético de forma diagonal al cordón de soldadura de cada uno de las juntas tipo filete, la longitud de la probeta provocó que se realice dos traslapes de magnetización, entre cada traslape se depositaron las partículas magnéticas, se retiró el flujo magnético de la pieza y se removió el exceso de partículas con la ayuda de una brocha. El registro de las imperfecciones encontradas se realizó a través de fotografías para su posterior evaluación e interpretación, la Figura 2.30. muestra una discontinuidad a lo largo de todo el cordón de soldadura del tercer filete del *Cruciform 1*. Para desmagnetizar

la pieza nuevamente se aplicó un flujo magnético con el yugo mientras el equipo se alejaba paulatinamente de la pieza dando giros de 90° varias veces.



Figura 2.30. Inspección e interpretación de las discontinuidades presentes en el tercer filete del *Cruciform 1 por partículas magnéticas.*

(Fuente: propia)

## 2.2.4. Ensayos destructivos

La aplicación de ensayos destructivos en este estudio tuvo como finalidad determinar las propiedades mecánicas, metalúrgicas y microestructurales de las configuraciones soldadas. Según los parámetros establecidos en la norma AWS B4.0, para los ensayos de soldabilidad *Varestraint* y *Cruciform*, se debe ejecutar un análisis metalográfico en las probetas extraídas, estos ensayos se orientan a estudiar la tendencia al fisuramiento en caliente y en frío de una soldadura, además también se realizó un ensayo de dureza que permitirá analizar las fallas producidas. En el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Facultad de Ingeniería Mecánica, se ejecutaron estos ensayos.

### 2.2.4.1. Análisis metalográfico

El efectuar un análisis metalográfico contempla la realización de macrográficas y micrográficas sobre los elementos de la junta soldada, es decir, se deben analizar el material base, el material de aporte y la zona afectada por el calor (ZAC), y a su vez determinar la microestructura de estas zonas, el proceso finaliza comparando las imágenes obtenidas con metalografías estandarizadas. El análisis metalográfico obedece a la necesidad de realizar un análisis causal y cuantitativo del fisuramiento sufrido por el material base.

#### 2.2.4.2. Preparación metalográfica ensayo *Varestraint*

La preparación metalográfica comenzó con la extracción de las probetas de los especímenes soldados, y de una muestra de material base con sus condiciones microestructurales originales. La Figura 2.31 presenta las secciones en la cuales se realizaron los cortes con el empleo de una tronzadora con enfriamiento de agua, el corte refrigerado reduce la posibilidad de cambiar la microestructura de la muestra, también, un corte transversal en los dos lados de las probetas fue necesario para que estas se adecuen a los moldes circulares de montaje.



Figura 2.31. Extracción de las probetas, secciones de corte del ensayo *Varestraint*.

(Fuente: propia)

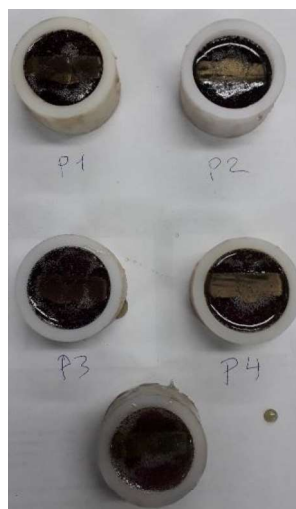


Figura 2.32. Montaje de las probetas del ensayo *Varestraint* en resina poliéster.

(Fuente: propia)

Extraídas las muestras metalográficas, con el uso de la devastadora de disco, se desbastó ambas caras de las probetas para obtener superficies planas y paralelas. Las probetas fueron montadas en moldes de duralón y rellenas con resina poliéster tal como se ve en la Figura 2.32, una vez seca la resina poliéster se desmontó de los moldes y se las sometió nuevamente a un desbaste grueso para retirar el exceso con la finalidad de que sus caras sean paralelas. Garantizando paralelismo en las caras de las probetas, se procedió a realizar un pulido fino en la pulidora automática (detalles técnicos del equipo disponibles en el ANEXO I), empleando una serie de lijas Nos 240, 320, 600 y 1200 aplicando una fuerza de 10 newtons y usando agua como lubricante y método de limpieza.

Finalmente, para que las probetas adquirieran una superficie sin rayaduras y de apariencia de espejo, se pulió mediante el empleo de un paño para pulido, utilizando un abrasivo monocristalino de diamante en base de agua y alúmina. Antes de realizar las macrográficas y micrográficas, por la composición química del material de aporte, se realizó un ataque químico con el uso de un cotonete humedecido con el reactivo denominado marble, Para los ensayos en el material base se efectuó el ataque químico con vilella. La Figura 2.33 presenta la probeta del material base pulida y las cuatro del ensayo *Varestraint* pulidas y después de realizado el ataque químico. Cada probeta metalográfica tuvo su identificación propia.



Figura 2.33. Probetas del ensayo *Varestraint* pulidas y aplicadas el ataque químico y probeta pulida del material base.

(Fuente: propia)

#### **2.2.4.3. Preparación metalográfica ensayo *Cruciform***

Las dos probetas *Cruciform* fueron seccionadas transversalmente con la utilización de una tronzadora con enfriamiento de agua como se observa en la Figura 2.34, se siguieron las recomendaciones de la norma para este procedimiento, la localización de los cortes realizados son los presentados en la Figura 2.7, la identificación establecida para las probetas metalográficas se presenta en la Tabla 2.9.





Figura 2.34. Corte transversal con enfriamiento con agua de la probeta *Cruciform 1*.  
(Fuente: propia)

Tabla 2.9. Identificación metalográfica para las probetas del ensayo *Cruciform*.

<b>Corte</b>	<b><i>Cruciform 1</i></b>	<b><i>Cruciform 2</i></b>
Sección 1	Descarte	Descarte
Sección 2	MA 1	MA* 1
Sección 3	MA 2	MA* 2
Sección 4	MI 1	MI* 2
Sección 5	MA 3	MA* 3
Sección 6	Descarte	Descarte

(Fuente: propia)



Figura 2.35. Proceso de desbaste grueso realizado a una probeta del ensayo *Cruciform*.  
(Fuente: propia)

La denominación MA y MA\* provista a las muestras metalográficas responden a las que fueron preparadas para macrografía y la denominación MI y MI\* corresponde a las que se realizó una micrografía. Se empleó un ataque químico preliminar en una de las cruces para identificar las ZAC presentes, lo que posibilitó hacer un corte del exceso del material base en sus cuatro lados, esto para facilitar el manejo y pulido de las probetas metalográficas. Seccionadas las probetas a su tamaño final se procede al desbaste grueso (ver Figura 2.35) para lograr superficies planas, el equipo utilizado está descrito en el ANEXO I. Luego del desbaste grueso, se debió realizar un lijado fino por la forma y tamaño de las probetas, esta acción se la realizó de forma manual utilizando una serie de lijas Nos 240, 320, 600 y 1200. Después de este lijado fino, se realizó el pulido final para lo cual, con un paño de pulido y alúmina para lograr obtener una superficie sin rayaduras, todo esto para las muestras en las que se realizó las macrografías.

Para las muestras destinadas para micrografías es necesario hacer un pulido final con agua y un paño de pulido, la Figura 2.36 muestra que se logró obtener una superficie de apariencia de espejo en las probetas.



Figura 2.36. Probetas pulidas del ensayo *Cruciform*.

(Fuente: propia)



Figura 2.37. Probetas pulidas aplicadas el ataque químico del ensayo *Cruciform*.

(Fuente: propia)

La aplicación de los reactivos químicos sobre las muestras se lo hizo con un cotonete, el material base fue atacado con vilella, mientras, que el material de aporte se lo atacó con marble, todas las muestras preparadas y aplicadas el ataque químico se las observa en la Figura 2.37.

#### **2.2.4.4. Macrografía**

Es un ensayo con el cual se puede extraer información sobre la calidad de una junta soldada, es decir, permite encontrar discontinuidades o defectos en las muestras previamente preparadas. En las probetas de los ensayos de soldabilidad practicados se esperó comprobar que la distribución de las zonas de soldadura y los defectos generados. Las características técnicas del equipo microscópico utilizado se las muestra tabulado en el ANEXO I. Para el caso particular del ensayo *Varestraint*, practicar macrografías en las muestras permite localizar y medir la longitud de cada una de las fisuras, para después realizar la sumatoria total de las longitudes de esas discontinuidades. En el ensayo *Cruciform*, el realizar macrografías facilita el análisis de cada junta tipo filete que conforman las probetas y localizar las fallas que se han generado en el ensayo.

#### **2.2.4.5. Micrografía**

La microestructura interna de las juntas soldadas se las determina con la realización de este ensayo, determinar los posibles cambios estructurales por el proceso térmico, que conlleva realizar una soldadura, es otra de las ventajas que presenta el realizar micrografías. El equipo microscópico utilizado se lo describe en el ANEXO I. En el ensayo *Varestraint* se decidió practicar micrografías a las probetas 1 y 3, cada una de ellas representan las dos condiciones de precalentamiento practicadas. En el ensayo *Cruciform* de todas las secciones cortadas se escogió preparar dos probetas para la inspección por micrografías, tomando en cuenta el tratamiento térmico pre soldadura.

#### **2.2.4.6. Ensayo de dureza**

Practicar un ensayo de dureza sobre un material permite conocer la resistencia que opone dicho material a sufrir una deformación plástica superficial permanente, ya sea por penetración o rayado. Para cuantificar las durezas que poseen los materiales existen varios ensayos, en el presente estudio se ejecutó el ensayo de dureza Rockwell (HR), que

mediante el uso de un indentador se penetra el material. En este proceso se cuantifica la profundidad de la indentación. El tratamiento de los datos recolectados en este ensayo, permite analizar la formación de fisuras, grietas y la afectación térmica en el material base como consecuencia del proceso de soldadura. Las características del durómetro con el que cuenta el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla se muestran en el ANEXO I. En el ensayo *Varestraint* la medición de la dureza se la hizo sobre cinco zonas de cada una de las cuatro probetas, el material base también tiene igual número de mediciones. La Figura 2.38, muestra la probeta de material base practicada el ensayo de dureza.

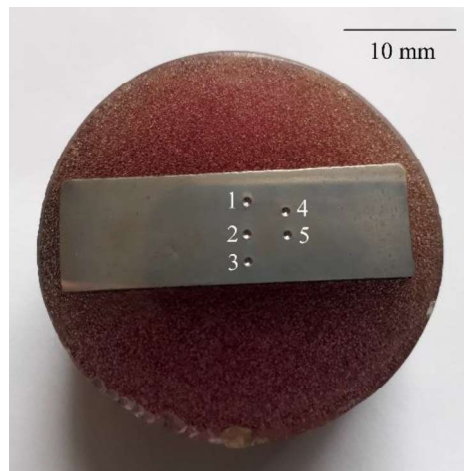


Figura 2.38. Ensayo de dureza sobre el material base.  
(Fuente: propia)

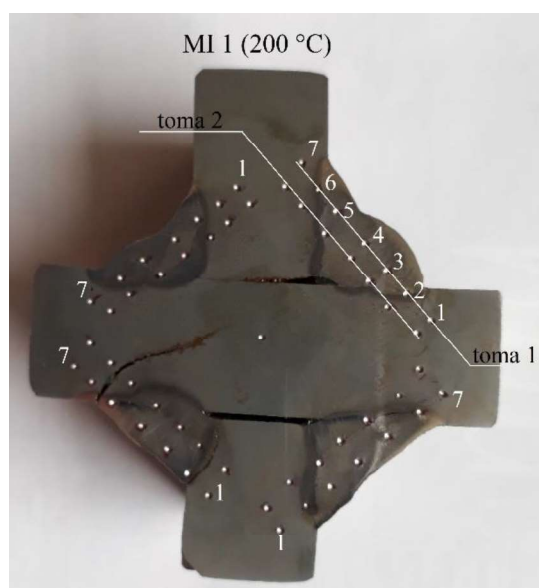


Figura 2.39. Ensayo de dureza sobre la probeta MI 1.  
(Fuente: propia)

La medición de dureza en cada probeta del ensayo *Cruciform* fue realizada en dos tomas debido al número de pases de soldadura realizados, la toma uno corresponde a los últimos pases, es decir, a las periferias de los filetes y la toma dos señala los primeros pases, entonces cada toma se divide en siete zonas de medición, este proceso se realizó sobre cada junta del tipo filete. La disposición de las zonas de medida se presenta en la Figura 2.39.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo abarca la presentación de resultados y la correspondiente discusión y análisis, de los ensayos destructivos y no destructivos practicados a las probetas de los ensayos de soldabilidad *Varestraint* y *Cruciform*. Orientando a este estudio a determinar la soldabilidad que posee el acero de alto porcentaje de carbono y cromo con la aplicación del material de aporte de características de depósito austenítico-ferrítico, bajo condiciones de trabajo establecidas para el proceso de soldadura SMAW.

#### 3.1. Resultados y discusión ensayos no destructivos





Los resultados que se muestran a continuación son basados en los reportes de inspección emitidos por parte del Laboratorio de END, la identificación de las probetas mostrada es la que se manejó durante los ensayos y con la cual fue realizados los reportes. Dichos reportes sirven de referencia para analizar y discutir la calidad de las soldaduras cualitativamente y cuantitativamente de los dos ensayos de soldabilidad.

##### 3.1.1. Inspección visual ensayo *Varestraint*

Las discontinuidades superficiales encontradas por simple inspección visual en las cinco probetas del ensayo *Varestraint*, se las detalla en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados de inspección visual ensayo *Varestraint*.

Identificación	Registro fotográfico	Inspección
2019-R-18-IV-01-001		Se observa una fisura tipo estrella en el borde del cordón 2 poros de 0,3mm y 0,2mm respectivamente de diámetro a una distancia de 158mm.

2019-R-18-IV-01-002		No se observan discontinuidades
2019-R-18-IV-01-003		Se observan 3 poros de 0,2mm, 0,3mm y 0,2mm respectivamente a una distancia de 4mm.
2019-R-18-IV-01-004		No se observan discontinuidades
2019-R-18-IV-01-005		Se observa un nido de poros en el borde del cordón de soldadura de diámetro 3mm.




(Fuente: propia)

Se reportan imperfecciones únicamente en tres de las cinco probetas inspeccionadas, para la probeta P1 al inicio del cordón de soldadura se visualizan fisuras en el cráter, la distribución radial de estas fisuras en P1, pueden denominarse como fisuras en estrella, en la probeta P3 se observa tres poros distribuidos uniformemente al comienzo del cordón, la última probeta con reporte de imperfecciones es la P5 que es la que sirvió como muestra de referencia para este ensayo, aquí se observa un nido de poros en el borde del cordón de soldadura, en tanto que P2 y P4 no presentan ningún tipo de discontinuidades.






### 3.1.2. Inspección visual ensayo *Cruciform*

La inspección visual realizada a las probetas del ensayo *Cruciform*, brindará una primera interpretación de las fisuras presentes en los ensambles generadas durante proceso de soldadura y posterior al mismo, en la Tabla 3.2 se reportan dichas discontinuidades superficiales, la identificación de las juntas tipo filete de cada ensamble es con la que se trabajó por parte del Laboratorio de END.

Tabla 3.2. Resultados de inspección visual ensayo *Cruciform*.

Identificación	Registro fotográfico	Inspección
2019-R-21-IV-01-001-A		Discontinuidad alargada de 6 cm, discontinuidad alargada de 17mm, discontinuidad alargada de 27mm, discontinuidad redondeada de 5mm, discontinuidad redondeada de 4mm, discontinuidad redondeada de 2mm, discontinuidad redondeada de 1mm, discontinuidad alargada de 4cm.
2019-R-21-IV-01-001-B		Discontinuidad alargada 3,2cm, y discontinuidad redondeada 7mm.
2019-R-21-IV-01-001-C		Discontinuidad alargada en todo el cordón



2019-R-21-IV-01-001-D		Discontinuidad alargada de 10,2cm, discontinuidad redondeada de 4mm.
2019-R-21-IV-01-002-A		Discontinuidad de 7mm, discontinuidad redondeada de 6mm, discontinuidad redondeada de 1mm, discontinuidad redondeada 2mm.
2019-R-21-IV-01-002-B		Discontinuidad alargada 13,2cm.
2019-R-21-IV-01-002-C		Discontinuidad alargada en todo el cordón.
2019-R-21-IV-01-002-D		Discontinuidad alargada 16,3cm.

(Fuente: propia)

Para las dos probetas *Cruciform* en todas las juntas tipo filete se reportan discontinuidades, particularmente en la probeta *Cruciform 1* las discontinuidades de mayor relevancia son las fisuras en el pie, es así que en los filetes identificados como (001-A, 001-C y 001-D) que serían los filetes primero, tercero y cuarto son los que mayor longitud de fisuras en el pie poseen, para el tercer filete la fisura en el pie de soldadura se extiende por toda la longitud del metal base, el segundo filete (001-B) es el que menor longitud de fisura en el pie se visualiza ubicándose al inicio del filete.





Las fisuras en el pie de soldadura predominan en las juntas tipo filete del *Cruciform 2*, las de mayor longitud reportadas son las presentes en los filetes segundo, tercero y cuarto (002-B, 002-C y 002-D), para el tercer filete la fisura en el pie de la soldadura se extiende en la totalidad de su longitud, consecuentemente es el doble de lo que se pudo medir para los filetes segundo y cuarto, el primer filete (002-A) solo se visualiza pequeñas discontinuidades redondeadas. (Ruiz, 2009)

### 3.1.3. Líquidos penetrantes ensayo *Varestraint*

La aparición de indicaciones generadas por la aplicación de los líquidos penetrantes en las probetas del ensayo *Varestraint* se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados de inspección por líquidos penetrantes del ensayo *Varestraint*.

Identificación	Registro fotográfico	Inspección
2019-R19-LP-08-001		<p>Mancha redonda de 5mm en el inicio del cordón de soldadura, mancha redonda de 4mm, mancha alargada de 2cm al final del cordón.</p>

2019-R19-LP-08-002		Mancha redondeada de 5mm.
2019-R19-LP-08-003		Mancha redondeada de 7mm en el borde del cordón de soldadura y 3 manchas redondeadas en un lado del cordón de soldadura. De 4mm, 5mm y 3mm.
2019-R19-LP-08-004		No presenta irregularidades mayores.
2019-R19-LP-08-005		Mancha redondeada de 8mm al inicio del cordón de soldadura.

(Fuente: propia)

La aplicación de líquidos penetrantes permitió confirmar la presencia de discontinuidades en las probetas *Varestraint* que no pudieron ser identificadas con la inspección visual preliminar, en este sentido solo la probeta P4 no muestra irregularidades. Anteriormente las discontinuidades observadas en P1, P3 y P5 fueron señaladas como del tipo fisura en estrella, poros distribuidos y un nido de poros respectivamente, por la acción del revelador el ancho observado en las discontinuidades es mayor lo que deriva en la formación de indicaciones de manchas redondeadas, P2 presenta el mismo tipo de indicación redondeada. La cualidad común de estas






irregularidades es que se encuentran en el principio del cordón de soldadura, la causal probablemente es una variante en la técnica de soldadura, un ejemplo puede ser el empleo de un arco excesivamente largo en el proceso SMAW. (Ruiz, 2009)

### 3.1.4. Líquidos penetrantes ensayo *Cruciform*

La capacidad de los líquidos penetrantes en ser retenidos en las discontinuidades superficiales de las probetas del ensayo *Cruciform* permiten hacer visibles las discontinuidades mostradas en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de inspección por líquidos penetrantes del ensayo *Cruciform*.

Identificación	Registro fotográfico	Inspección
2019-R-22-LP-08-001-A		Discontinuidad alargada de 6cm, discontinuidad alargada de 17mm, discontinuidad alargada de 27mm, discontinuidad redondeada de 5mm, discontinuidad redondeada de 4mm, discontinuidad redondeada de 1mm, discontinuidad alargada de 4cm
2019-R-22-LP-08-001-B		Discontinuidad alargada 3,2cm, discontinuidad redondeada 7mm.

2019-R-22-LP-08-001-C		Discontinuidad alargada en todo el cordón.
2019-R-22-LP-08-001-D		Discontinuidad alargada de 10,2cm, discontinuidad redondeada de 4mm.
2019-R-22-LP-08-002-A		Discontinuidad de 7mm, discontinuidad redondeada de 6mm, discontinuidad redondeada de 1mm, discontinuidad redondeada 2mm.
2019-R-22-LP-08-002-B		Discontinuidad alargada 13,2cm.
2019-R-22-LP-08-002-C		Discontinuidad alargada en todo el cordón.

2019-R-22-LP-08-002-D		Discontinuidad alargada 16,3cm.
-----------------------	--	---------------------------------

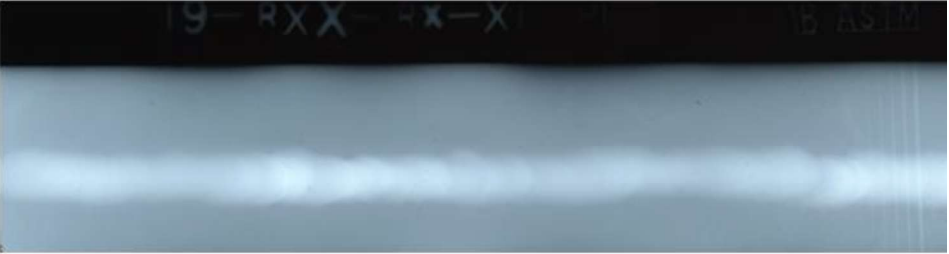
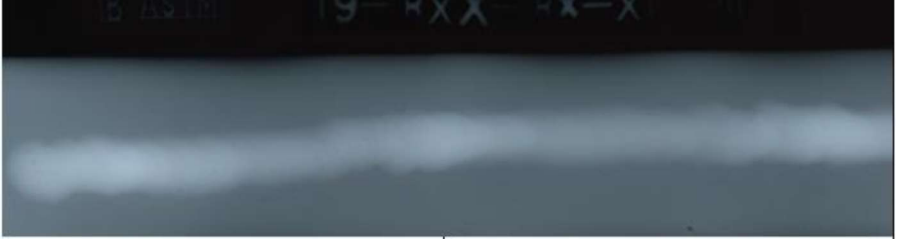


(Fuente: propia)

Confirmar las irregularidades encontradas con la inspección visual es posible gracias a la inspección mediante líquidos penetrantes, es así que se observan fisuras en el pie de soldadura en los cuatro filetes que conforman las probetas *Cruciform 1* y *2*, con la excepción del primer filete del segundo ensamble (002-A), la longitud de las fisuras en el pie son las reales pero su ancho es mayor por la acción del revelador, es común para las dos configuraciones *Cruciform* que en el tercer filete (001-C, 002-C) la fisura en el pie de soldadura se haya propagado en el metal base por toda la longitud de la probeta, también, se corrobora la predicción descrita en este ensayo de soldabilidad, la cual señala que mayor posibilidad de fisuramiento ocurra en el tercer cordón depositado, existen secciones de los filetes que no presentan indicación alguna, esto conlleva que al seccionar las probetas para el análisis por macrografías no todas las probetas muestren las fisuras de pie en el metal base, estas fisuras son generalmente consideradas como fisuras en frío. (Ruiz, 2009)

### 3.1.5. Radiografía industrial ensayo *Varestraint* (RX)

Las placas radiográficas que son resultado de la ejecución del ensayo de RX sobre las cuatro probetas del ensayo de soldabilidad *Varestraint*, son las que proporcionan la información para identificar las posibles discontinuidades internas y externas que posean las probetas y analizar la tendencia al fisuramiento en caliente del material base sometido a un proceso de soldadura, los registros permanentes de RX y su interpretación se muestran en las Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente.

Tabla 3.5. Placas radiográficas de las probetas del ensayo *Varestraint*.

Identificación	Registro Radiográfico
2019-R-20-RX-11-001	
2019-R-20-RX-11-002	
2019-R-20-RX-11-003	
2019-R-20-RX-11-004	

(Fuente: propia)

Tabla 3.6. Resultados inspección por radiografía industrial ensayo *Varestraint*.

Interpretación Radiográfica								
Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades							
	2019-R-20-RX 11-001		2019-R-20-RX 11-002		2019-R-20-RX 11-003		2019-R-20-RX 11-004	
	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	---	---
Fusión Incompleta	---	---	---	---	---	---	---	---
Penetración excesiva	---	---	---	---	---	---	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---	---	---	---	---	---	---
Porosidad	---	---	---	---	---	---	---	---
Nido de poros	---	---	---	---	---	---	---	---
Grietas	---	---	---	---	---	---	---	---
Mordeduras	---	---	---	---	---	---	---	---
Escoria Alargada	---	---	---	---	---	---	---	---
Quemón	---	---	---	---	---	---	---	---
<b>Observaciones:</b>	- Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa. - No se observan.							

(Fuente: (END, 2019))

El registro permanente generado de las cuatro probetas *Varestraint* a consecuencia de la exposición a RX, deja en evidencia la no presencia de ningún tipo de discontinuidad (ver Tabla 3.6), siendo una técnica de evaluación volumétrica se esperaba que las placas radiográficas indiquen las fisuras internas que poseen las probetas a consecuencia de la deformación impuesta, el análisis metalográfico corrobora existencia de estas fisuras, se puede mencionar varias causales para que no se visualice ninguna imperfección entre las cuales se tiene: la sensibilidad, medida de la calidad de la imagen en términos del detalle más pequeño que se puede detectar, vinculado directamente con el contraste y definición de la imagen, la densidad radiográfica, que es la medida del grado de oscurecimiento de la película, varía por la cantidad de radiación que alcanzó la película después de atravesar el elemento, se la mide a través de un densitómetro los valores para una observación aceptable están entre dos y cuatro, la densidad radiográfica no fue establecida en nuestros registros permanentes, el tamaño de la fuente de generación de radiación que posee el equipo, la distancia fuente-objeto







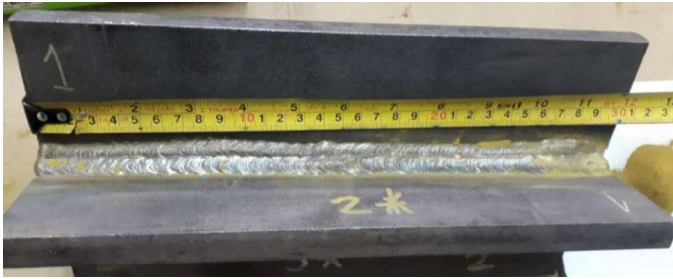

y la distancia objeto- película interfieren en la generación de penumbra que no es otra cosa que la pérdida de definición en la película radiográfica, requerimientos de normas señalan que la penumbra geométrica sea limitada dichos valores se refieren al ancho de la sombra de la penumbra en una placa. (Sotomayor, 2017)



### 3.1.6. Partículas magnéticas ensayo *Cruciform*

La interpretación de las indicaciones generadas por partículas magnéticas en las probetas *Cruciform* a consecuencia de establecer un flujo magnético sobre estas, se analizan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resultados de inspección por partículas magnéticas del ensayo *Cruciform*.

Identificación	Registro fotográfico	Inspección
2019-R-22-PM-08-001-A		Discontinuidad alargada de 15mm, discontinuidad alargada de 10mm, discontinuidad alargada de 40mm, discontinuidad redondeada de 4mm, discontinuidad redondeada de 10mm discontinuidad redondeada de 25mm
2019-R-22-PM-08-001-B		Discontinuidad redondeada de 9mm, discontinuidad redondeada de 3mm, discontinuidad redondeada de 4mm, discontinuidad redondeada de 3mm, discontinuidad redondeada de 7mm, discontinuidad redondeada de 5mm, discontinuidad redondeada de 2mm, discontinuidad alargada de 17mm, discontinuidad alargada de 15mm, discontinuidad alargada de 6mm,

		discontinuidad alargada de 8mm.
2019-R-22-PM-08-001-C		Discontinuidad alargada de 271mm.
2019-R-22-PM-08-001-D		Discontinuidad redondeada de 10mm, discontinuidad redondeada de 3mm, discontinuidad redondeada de 4mm, discontinuidad redondeada de 2mm, discontinuidad alargada de 70mm.
2019-R-22-PM-08-002-A		Discontinuidad redondeada de 8mm, discontinuidad redondeada de 4mm, discontinuidad redondeada de 5mm, discontinuidad redondeada de 4mm, discontinuidad alargada de 58mm, discontinuidad redondeada de 5mm, discontinuidad alargada de 18mm, discontinuidad alargada de 35mm.
2019-R-22-PM-08-002-B		Discontinuidad redondeada de 5mm, discontinuidad alargada de 15mm, discontinuidad alargada de 35mm, discontinuidad alargada de 17mm, discontinuidad redondeada de 3mm, discontinuidad alargada de 15mm, discontinuidad alargada de 30mm,

		discontinuidad redondeada de 17mm.
2019-R-22-PM-08-002-C		Discontinuidad alargada de 150mm.
2019-R-22-PM-08-002-D		Discontinuidad redondeada de 3mm, discontinuidad alargada de 7mm, discontinuidad alargada de 40mm, discontinuidad alargada de 17mm, discontinuidad alargada de 40mm, discontinuidad alargada de 60mm, discontinuidad alargada de 40mm, discontinuidad alargada de 45mm.

(Fuente: propia)

Las discontinuidades superficiales observadas en las probetas *Cruciform* con los anteriores ensayos no destructivos, se ratifican con la aplicación de partículas magnéticas sobre un campo magnético establecido en cada filete para su posterior registro e interpretación, de esta manera, se encuentran fisuras de pie e imperfecciones redondeadas en la mayor parte de filetes, la cuantificación longitudinal de estas imperfecciones varían ligeramente con lo reportado con líquidos penetrantes, las partículas magnéticas atrapadas en las fisuras de pie, ayudan a describir esta discontinuidad que afecta al metal base, factores como el espesor del acero pueden generar concentración de tensiones en los pies de soldadura que su origen probablemente es resultado de las tensiones transversales de contracción de soldadura y una microestructura frágil en la ZAC elevan la susceptibilidad de la configuración soldada *Cruciform* a las fisuras en el pie.

## **3.2. Resultados y discusión de ensayos destructivos**

En esta sección del documento se presenta los resultados obtenidos de practicar los ensayos de macrografías, micrografías y durezas, a las probetas preparadas con el fin de un análisis metalográfico. Dentro de las acciones de este análisis están: identificar y medir las zonas de soldadura, identificar las zonas de falla, analizar y comparar la microestructura de estas zonas, para el caso del ensayo *Varestraint* medir la longitud de las fisuras presentes; para posteriormente brindar un enfoque causal de las discontinuidades presentes en las probetas de los ensayos de soldabilidad, teniendo como base los resultados de las inspecciones metalográficas y ensayo de dureza.

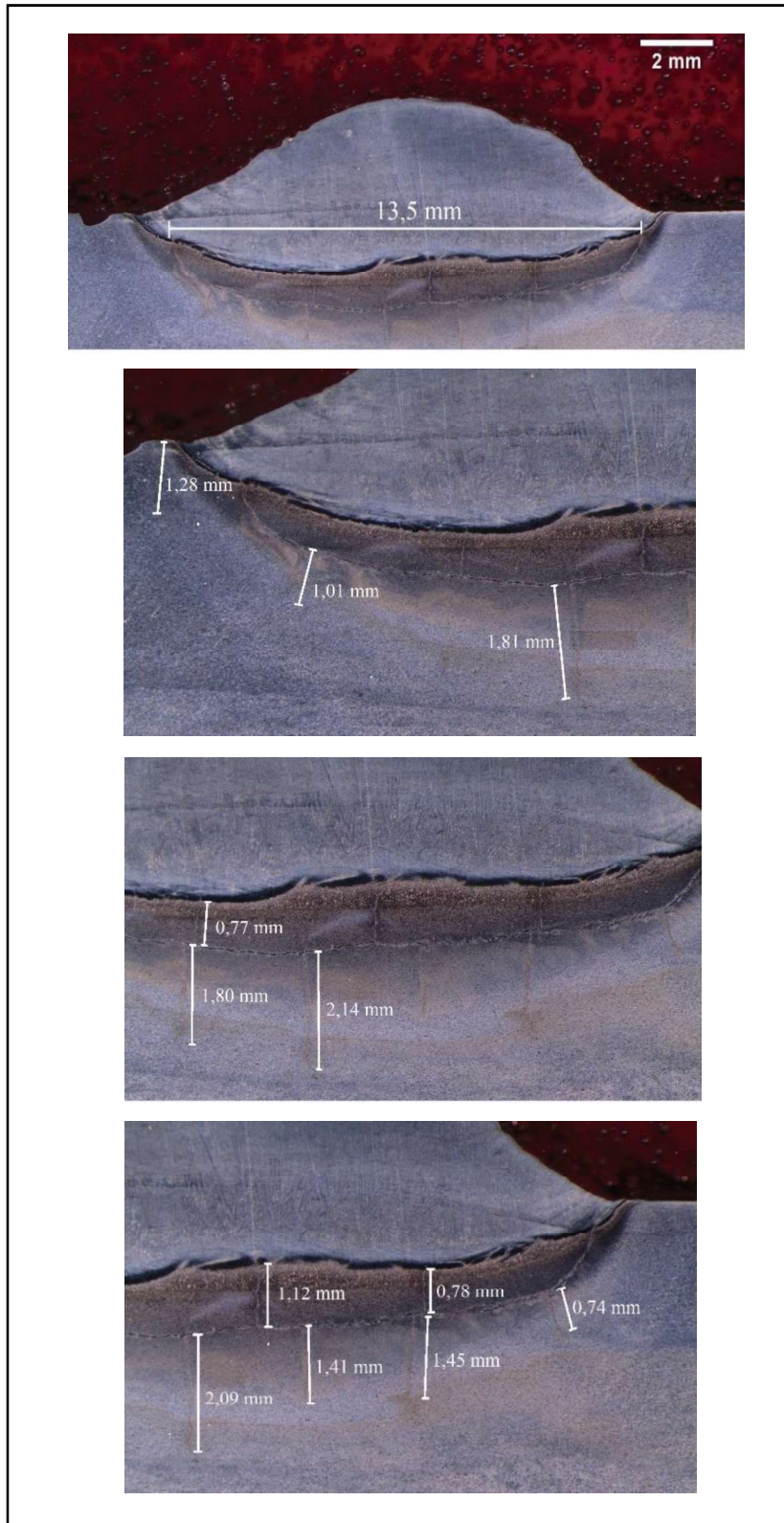
### **3.2.1. Macrografía ensayo *Varestraint***

En las directrices de la norma AWS B4.0 para el ensayo *Varestraint*, el tipo de dato que se debe obtener al realizar este ensayo con la ayuda de una macrografía es el poder medir la longitud de las fisuras de cada probeta y así conocer la longitud máxima de fisuramiento y la longitud total combinada de fisuramiento para los especímenes soldados en las mismas condiciones, se muestran las fisuras con sus longitudes de la probeta P3 en la Tabla 3.8, se tabulan las dimensiones de las fisuras de todas las probetas en la Tabla 3.9. Además, de la toma de macrografías identificaremos las zonas de soldadura (ver Tabla 3.10) para la probeta P1 y el cálculo del área de la ZAC de las probetas se presenta en la Tabla 3.11.

Todas las probetas fueron inspeccionadas por macrografías, razón por la cual se pudo conocer la longitud de fisuras, longitud total de cada una de ellas y longitud combinada de los especímenes soldados bajo los mismos parámetros (ver Tabla 3.9), dando cumplimiento a los señalamientos de la norma AWS B4.0. De esta manera se puede ver que la probeta P2 es la que posee la fisura con mayor longitud de las cuatro muestras, de las condiciones de  $T_p$  200°C P2 presenta mayor longitud total de fisuras, de las condiciones de  $T_p$  300°C el espécimen P3 posee mayor longitud de fisuras total, en cuanto a la longitud combinada de fisuras las probetas en condiciones  $T_p$  300°C son en las que mayormente se ha presentado el fisuramiento. La identificación de las zonas de soldadura también fue posible gracias a las macrografías (ver Tabla 3.10), la zona donde se presentan las fisuras es en la ZAC y sus adyacentes, se determinó el área de

afectación térmica para cada probeta (ver Tabla 3.11), P4 es la que posee mayor área de afectación térmica posee. (Phillips, 2016) (Lippold, 2015)

Tabla 3.8. Identificación de las longitudes de las fisuras en la probeta P3 del ensayo *Varestraint*.



(Fuente: propia)

Tabla 3.9. Longitud de las fisuras, totales y combinadas de las probetas del ensayo *Varestraint*.

	<b>Ensayo Varestraint</b>			
	<b>T<sub>p</sub> 200°C</b>		<b>T<sub>p</sub> 300°C</b>	
	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>
<b>Longitud de fisuras [mm]</b>	<b>11,22</b>	<b>13,68</b>	<b>13,5</b>	<b>11,22</b>
	2,40	1,24	0,77	2,26
	2,59	0,55	1,80	2,75
	0,92	0,47	2,14	0,37
	2,25	0,30	2,09	0,36
	2,12	1,53	1,12	0,95
	1,15	0,60	1,41	0,69
		1,71	0,78	0,66
		1,16	1,45	0,42
		1,16	0,74	1,30
		0,59	1,28	0,43
		0,62	1,01	1,43
			1,81	0,39
				1,38
				0,39
			1,45	
			1,12	
			2,56	
<b>Longitud total de fisuras [mm]</b>	<b>22,65</b>	<b>23,61</b>	<b>29,9</b>	<b>28,36</b>
<b>Longitud combinada de fisuras [mm]</b>	<b>46,26</b>		<b>58,26</b>	

(Fuente: propia)

Presentada la tabulación de datos de las longitudes de las fisuras para las cuatro probetas *Varestraint* en la Tabla 3.9, para una mejor visualización de la información levantada se ha elaborado la Figura 3.1 la cual es un diagrama de cajas y bigotes que permite incorporar información relevante respecto a las fisuras generadas a consecuencia de la restricción extrínseca impuesta en el ensayo. Las líneas en color rojo, dentro de las cajas, representan la mediana de la longitud de todas las fisuras que posee cada probeta, las líneas horizontales superiores e inferiores en color negro muestran la longitud máxima y mínima de las fisuras transversales. Por otra parte, los símbolos (+) en color rojo representan la longitud de las fisuras cóncavas (las de mayor longitud) que contiene cada probeta. Finalmente, las cajas en color azul contienen los demás datos de la distribución.

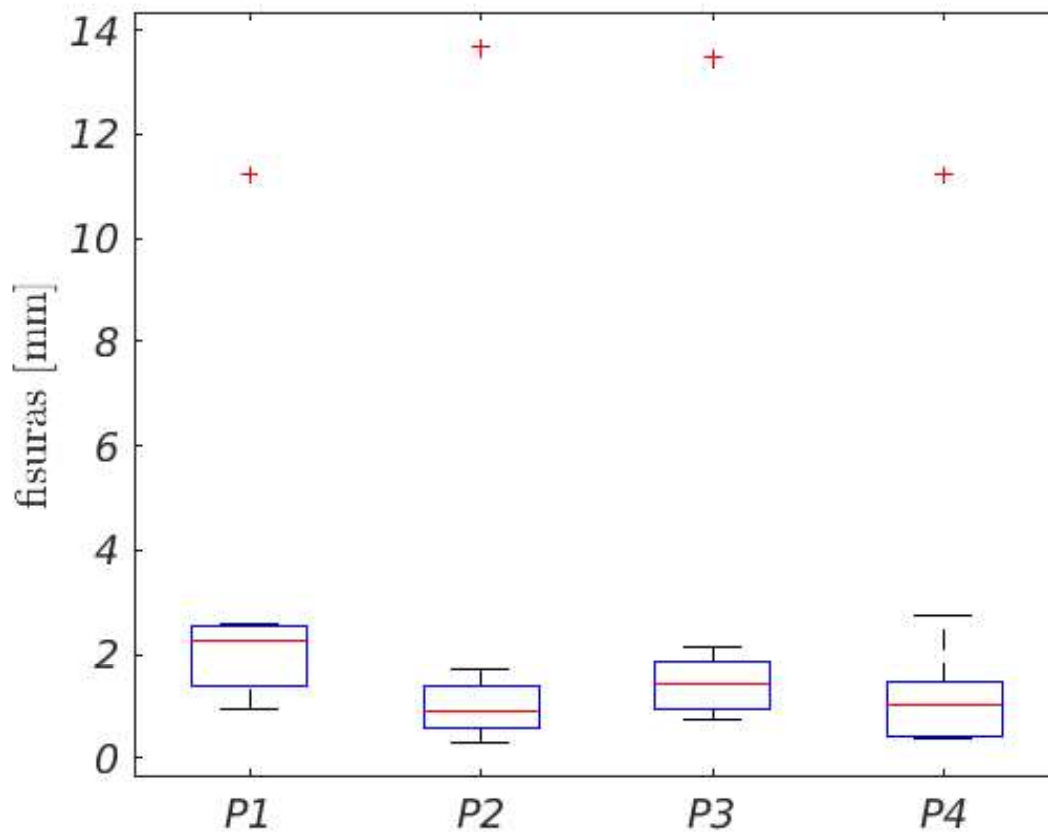
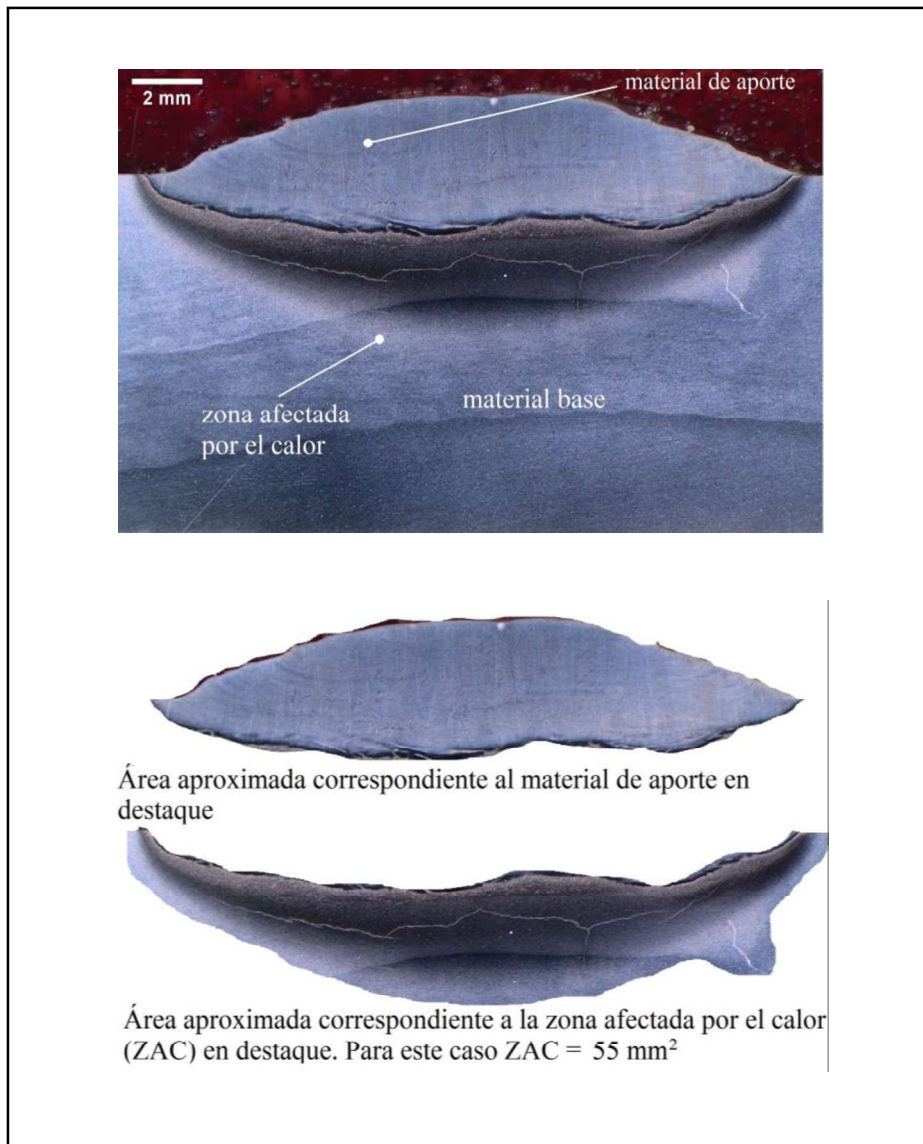


Figura 3.1. Diagrama de cajas y bigotes de la longitud de las fisuras de las probetas *Varestraint*.

(Fuente: propia)

Tabla 3.10. Identificación del material base, material de aporte y zona afectada por el calor en la probeta P1 ensayo *Varestraint*.



(Fuente: propia)

Tabla 3.11. Valores de áreas de la zona afectada por el calor para probetas del ensayo *Varestraint*.

$T_p \text{ 200}^\circ\text{C}$		$T_p \text{ 300}^\circ\text{C}$	
Probeta 1 [mm <sup>2</sup> ]	Probeta 2 [mm <sup>2</sup> ]	Probeta 3 [mm <sup>2</sup> ]	Probeta 4 [mm <sup>2</sup> ]
55	63	59	66

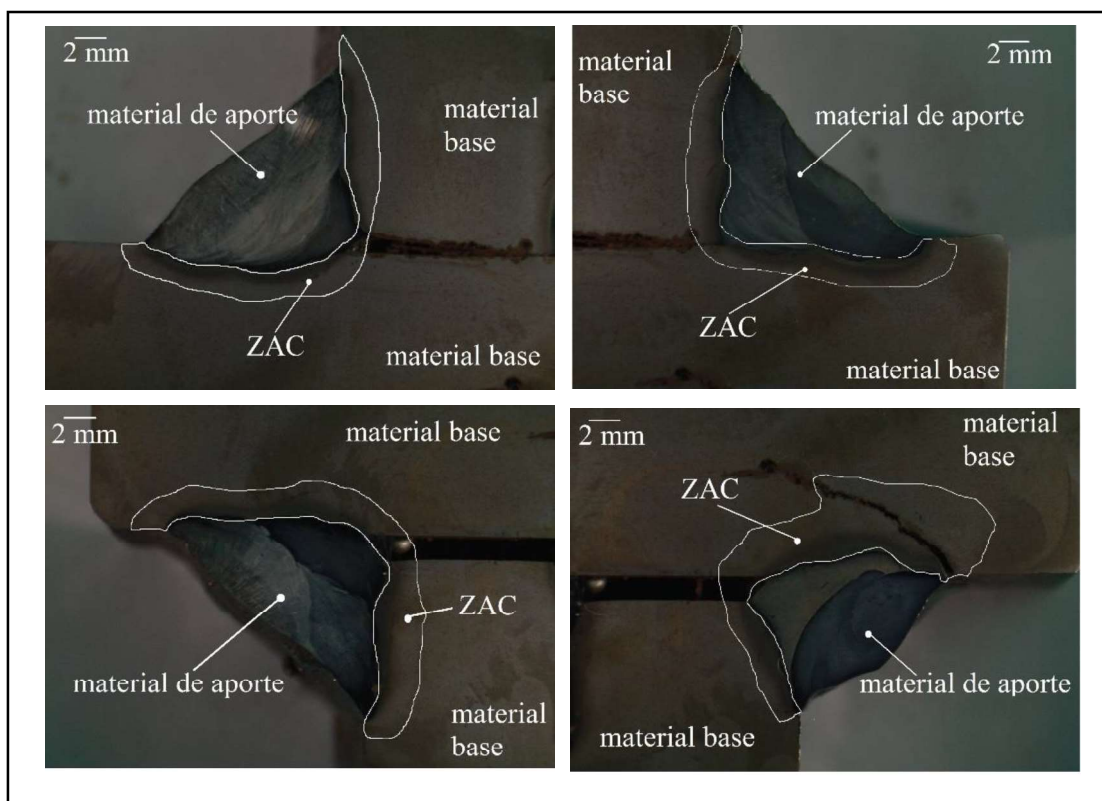
(Fuente: propia)



### 3.2.2. Macrografía ensayo *Cruciform*

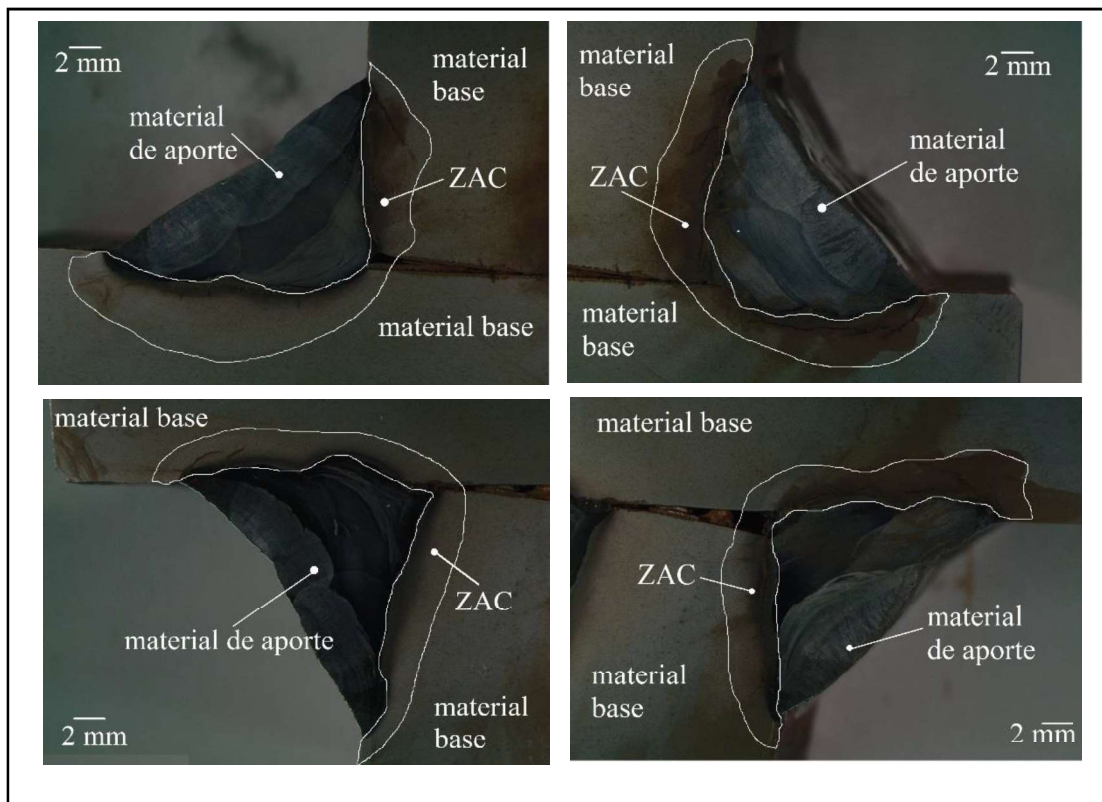
La inspección por macrografías realizadas a las probetas de ensayo *Cruciform*, permite identificar la distribución de las zonas de soldadura y zonas de falla, para una mejor visualización de estas zonas se ha editado las imágenes de destino tomadas con el microscopio señalado en el ANEXO I. La Tabla 3.12 muestra las imágenes correspondientes a la probeta MA 1 y la Tabla 3.13 las de la probeta MA\* 3, para todo el conjunto de macrografías de los *Cruciform 1* y 2, se ha procedido con el cálculo del área de la zona afectada por el calor, estos valores se presentan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.12. Identificación del material base, material de aporte y zona Afectada por el Calor para una probeta MA 1 del ensayo *Cruciform 1*.



(Fuente: propia)

Tabla 3.13. Identificación del material base, material de aporte y Zona Afectada por el Calor para la probeta MA\* 3 del ensayo *Cruciform 2*.



(Fuente: propia)

Tabla 3.14. Valores del área de la zona afectada por el calor para las probetas del ensayo *Cruciform*.

	$T_p$ 200 °C			$T_p$ 300 °C		
	MA 1 [mm <sup>2</sup> ]	MA 2 [mm <sup>2</sup> ]	MA 3 [mm <sup>2</sup> ]	MA* 1 [mm <sup>2</sup> ]	MA* 2 [mm <sup>2</sup> ]	MA* 3 [mm <sup>2</sup> ]
<b>Filete 1</b>	70	73	69	88	82	91
<b>Filete 2</b>	60	66	70	94	95	94
<b>Filete 3</b>	120	115	121	113	108	115
<b>Filete 4</b>	85	89	91	84	82	80

(Fuente: propia)

La inspección por macrografías de las probetas *Cruciform* identificadas como: MA 1, MA 2 y MA 3 para la condición de  $T_p$  de 200°C y MA\* 1, MA\* 2 y MA\* 3 para la condición de  $T_p$  300°C, permitió identificar las zonas de soldadura y a la vez mostrar los filetes que


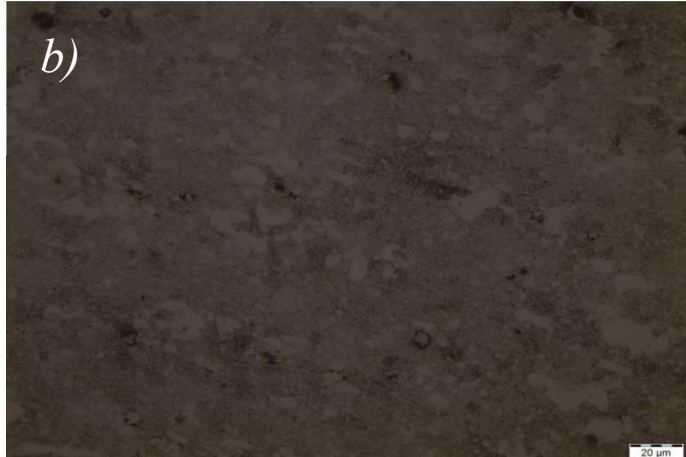
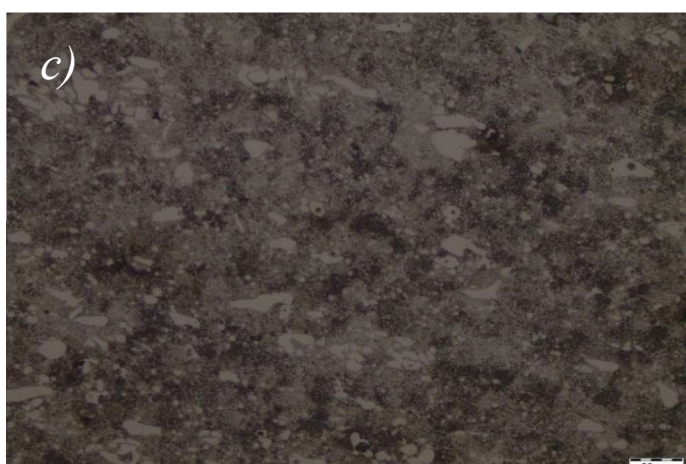
sufrieron mayor agrietamiento por hidrógeno (ver Tabla 3.12 y Tabla 3.13), es así que el fisuramiento sufrido mayoritariamente se presenta en la zona afectada por el calor específicamente en el pie de la soldadura que es una región de concentraciones de esfuerzos, el proceso de soldadura SMAW es susceptible a la absorción de hidrógeno en una amplia gama de niveles en función de la naturaleza del sistema de escoria que es usado. El cálculo del área afectada térmicamente (Tabla 3.14), resalta que en el filete 3 existe un área mayor que en el resto de juntas esto para todas las probetas, dando concordancia con la inspección no destructiva realizada donde se observó que la fisura del pie de la soldadura se extiende por toda la longitud de las probetas, particularmente, el *Cruciform1* a  $T_p$  200°C sufrió agrietamiento después del depósito del último pase de soldadura. Generalmente el fisuramiento en frío ocurre entre -100 y 200°C, el control de temperatura entre pases (ver Tabla 2.8) evidencia que para el último pase depositado la  $T_{pases}$  es muy cercana a los 200°C. (Lippold, 2015) (Kou, 2003)

### **3.2.3. Micrografías ensayo *Varestraint***

El análisis microestructural de las zonas de soldadura en las probetas *Varestraint*, permitirá diferenciar la influencia del tratamiento térmico pre soldadura en la estructura interna de cada zona de los especímenes soldados, la estructura que rodea a las fisuras también es sujeta de análisis, para comprender el fisuramiento en caliente inducido.

La Tabla 3.15 contiene las imágenes de micrografías del acero AISI D3 en su condición de origen y después de haberse efectuados los precalentamientos a 200 y 300°C. Cabe destacar que las imágenes presentadas en esta tabla corresponden a zonas exclusivamente del material base, sin la inclusión del material de aporte. La imagen identificada como **a)** presenta la microestructura del AISI D3 en condiciones de fábrica, dureza 18 HRC. Para el caso **b)** el precalentamiento fue a 200°C, y para el caso de **c)** el precalentamiento fue a 300°C. Las tres imágenes tienen un aumento de 500x y el ataque fue efectuado con el agente químico denominado vilella. Se evidencia que la cantidad de perlita incrementa en función del incremento de temperatura.

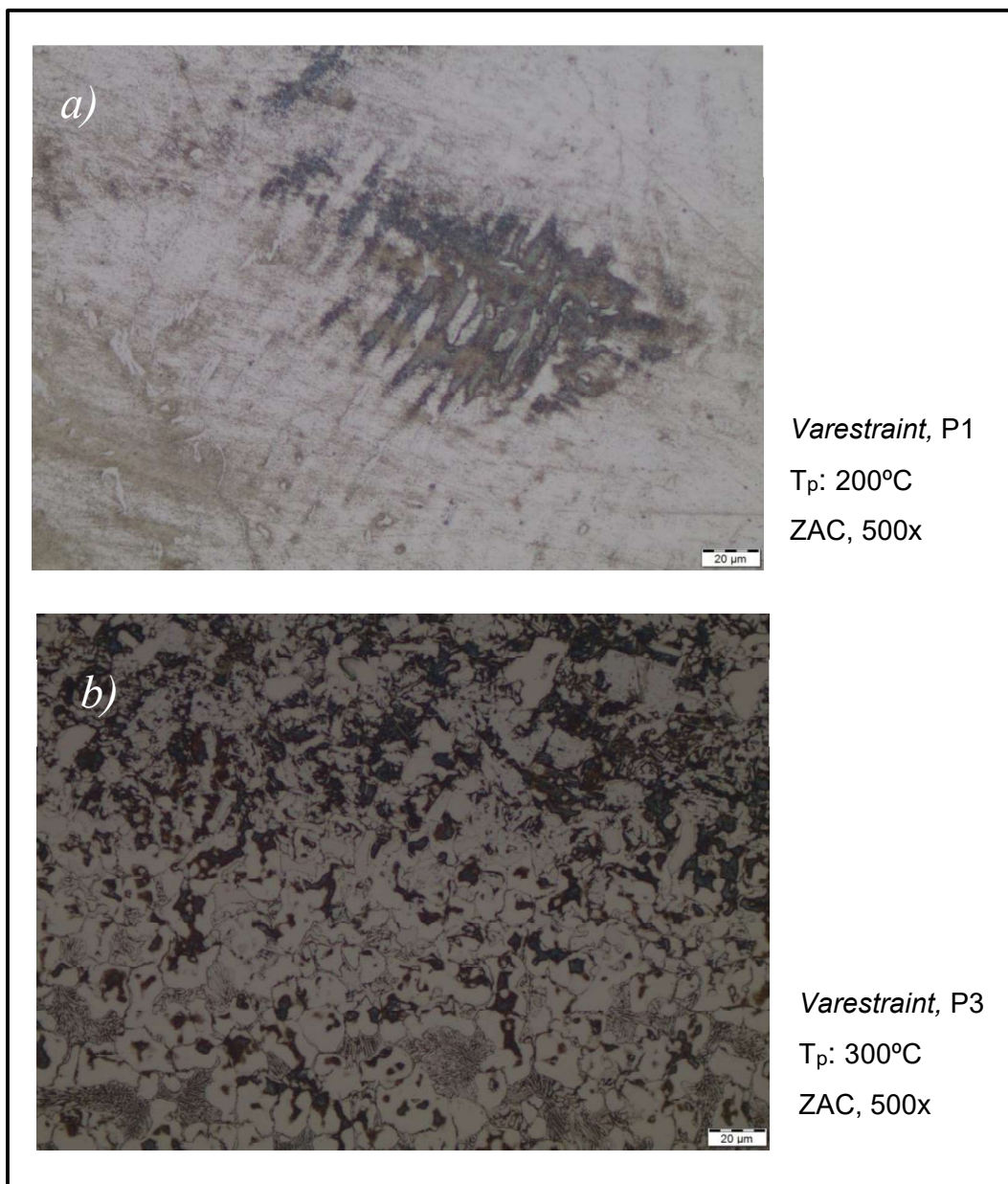
Tabla 3.15. Micrografías del material base en condiciones de fábrica y después de haber ejecutado el proceso de soldadura *Varestraint*.

	<p>Material base en condiciones de origen, 500x</p>
	<p>Material base <i>Varestraint</i>, P1 <math>T_p</math>: 200°C 500x</p>
	<p>Material base <i>Varestraint</i>, P3 <math>T_p</math>: 300°C 500x</p>

(Fuente: propia)

Micrografías de la zona afectada por el calor en probetas *Varestraint* soldadas con el proceso SMAW son presentadas en la Tabla 3.16. La imagen identificada como **a)** corresponde a una probeta con precalentamiento a 200°C, su dureza medida tiene un valor de 33 HRC. Se observan algunas regiones con perlita. Para la imagen identificada como **b)**, el precalentamiento es a 300°C, la dureza es de 30 HRC. Se evidencian estructuras de perlita y ferrita. (Kou, 2003) Ambas imágenes tienen un aumento de 500x y el ataque químico se realizó con marble.

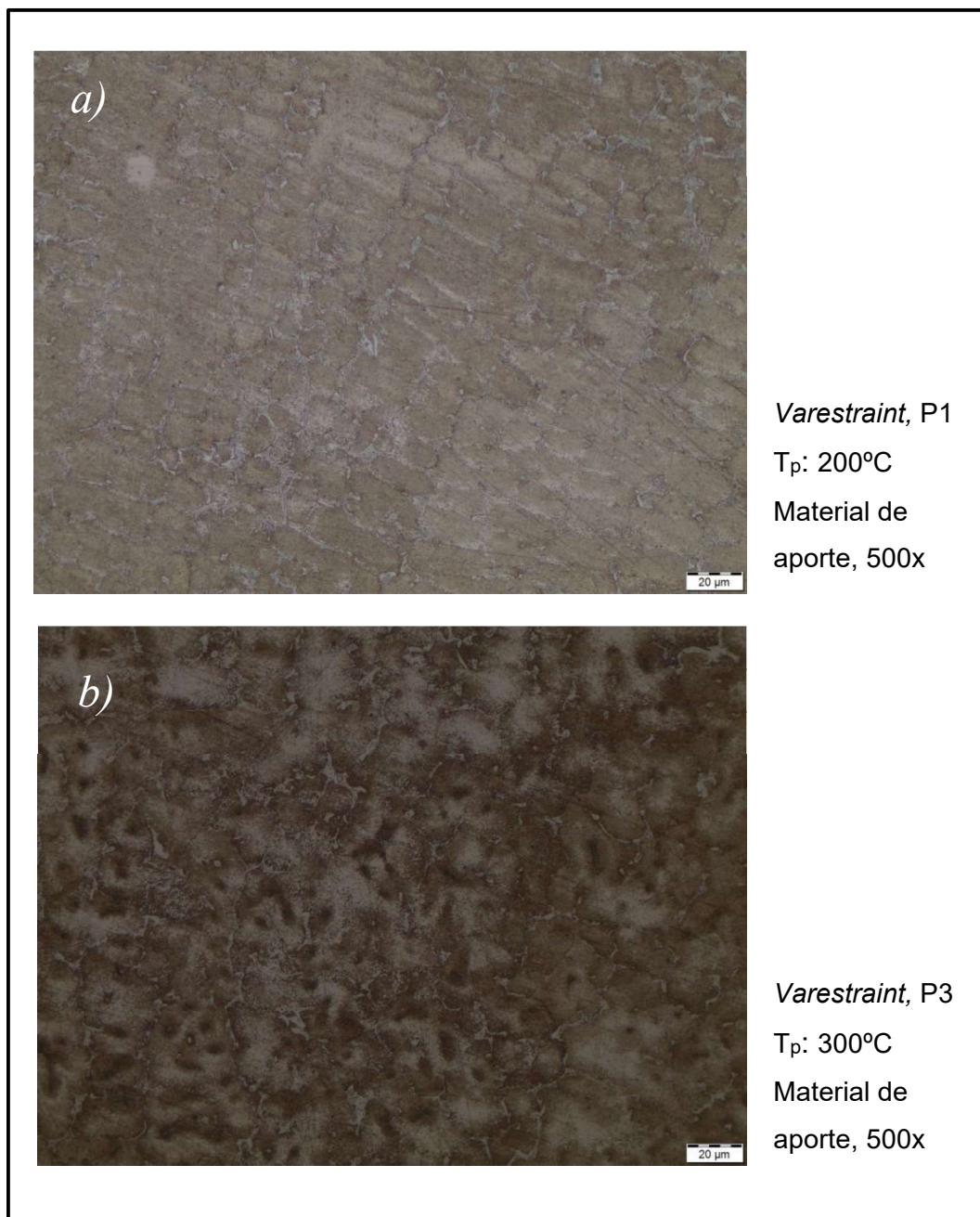
Tabla 3.16. Micrografías de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) de las probetas a) P1 y b) P3 del ensayo *Varestraint*.



(Fuente: propia)

Las micrografías del material de aporte después del proceso de soldadura en las probetas *Varestraint* son presentadas en la Tabla 3.17. La figura **a)** corresponde a la micrografía de la región de una probeta con precalentamiento a 200°C el valor de la dureza es de 53 HRC, en la región mostrada se observan regiones con ferrita. La imagen **b)** corresponde a una zona del material de aporte con un precalentamiento a 300°C. Se reconocen regiones de austenita y ferrita. (Kou, 2003) Las micrografías tienen un aumento de 500x y el ataque químico fue efectuado con marble.

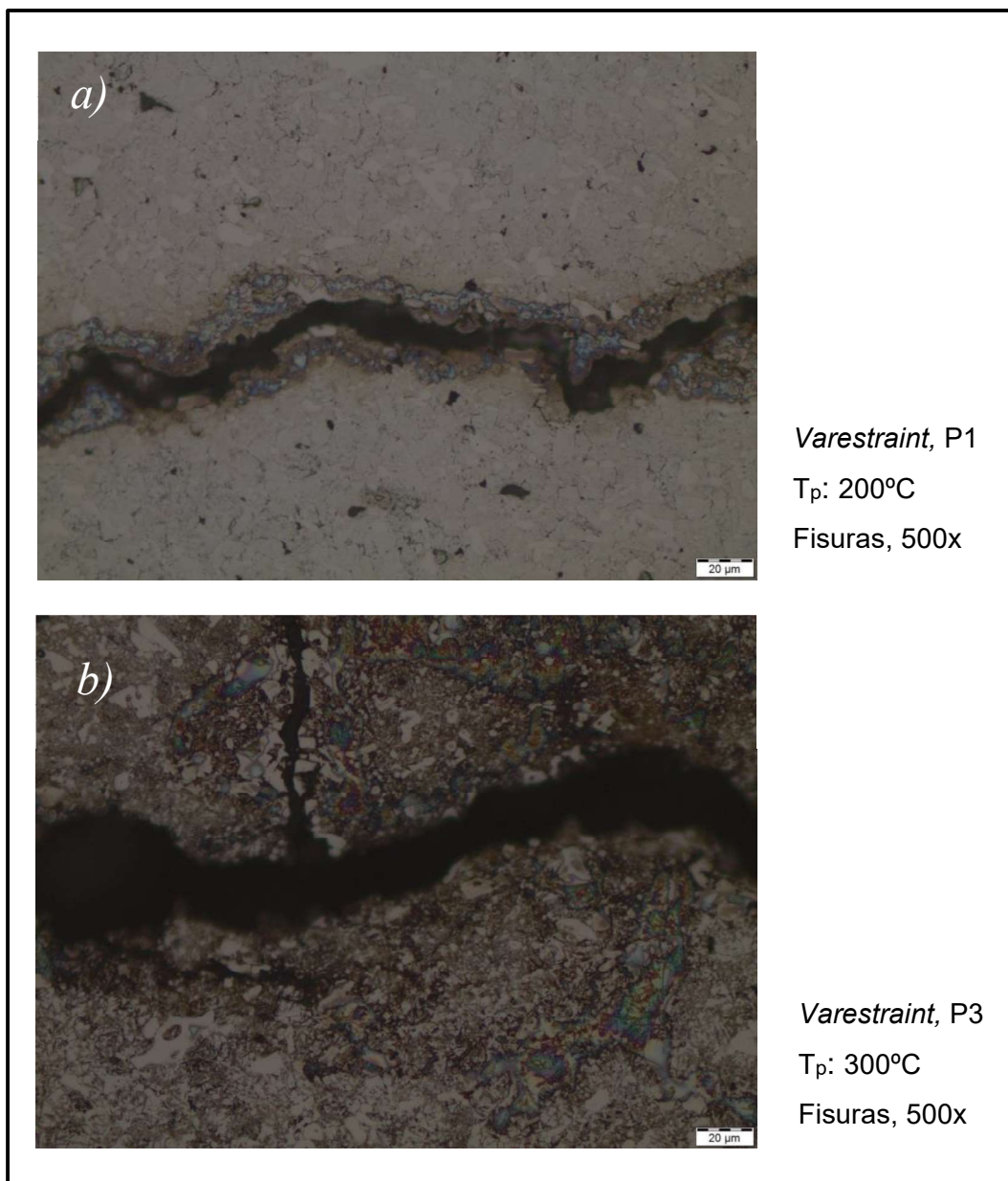
Tabla 3.17. Micrografías del metal de aporte de las probetas a) P1 y b) P3 del ensayo *Varestraint*.



(Fuente: propia)

Las micrografías de las fisuras que se encuentran en la ZAC, producidas en las probetas soldadas para el ensayo *Varestraint* son presentadas en la Tabla 3.18. La figura **a)** es la micrografía de la grieta ocasionado en una probeta con precalentamiento a 200°C, la dureza registrada es de 53 HRC en la vecindad de la grieta. Para la imagen **b)** el precalentamiento fue 300°C, la dureza registra un valor de 53 HRC en la vecindad de la grieta. Se evidencia la formación de estructuras en la vecindad de la grieta conforme aumenta la temperatura de precalentamiento. Las imágenes tienen un aumento de 500x y las muestras fueron atacadas con el agente químico marble.

Tabla 3.18. Micrografías de las fisuras en las probetas a) P1 y b) P3 del ensayo *Varestraint*.

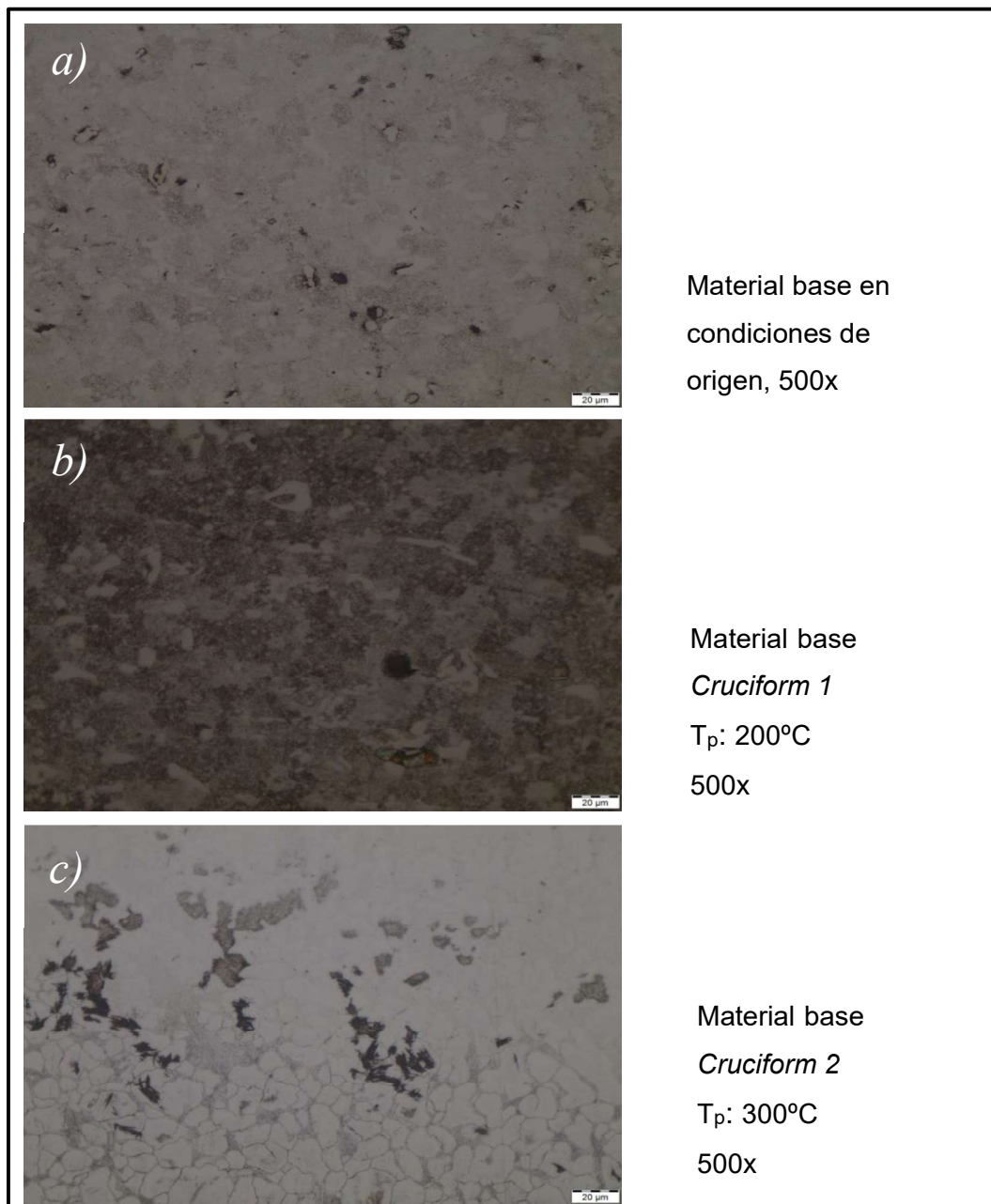


(Fuente: propia)

### 3.2.4. Micrografías ensayo *Cruciform*

Determinar las microestructuras de las juntas tipo filete de las probetas *Cruciform*, y a su vez diferenciar la estructura que posee cada zona de soldadura influenciadas por los tratamientos térmicos pre y post soldadura es parte del análisis por micrografías. En la Tabla 3.19 se presentan las micrografías del acero AISI D3 y se evalúa la influencia de la temperatura en la microestructura del acero. La imagen **a)** muestra al acero AISI D3 en condiciones de fábrica, con dureza 18 HRC.

Tabla 3.19. Micrografías del material base en condiciones de origen y después de haberse ejecutado el proceso de soldadura en el ensayo *Cruciform*.



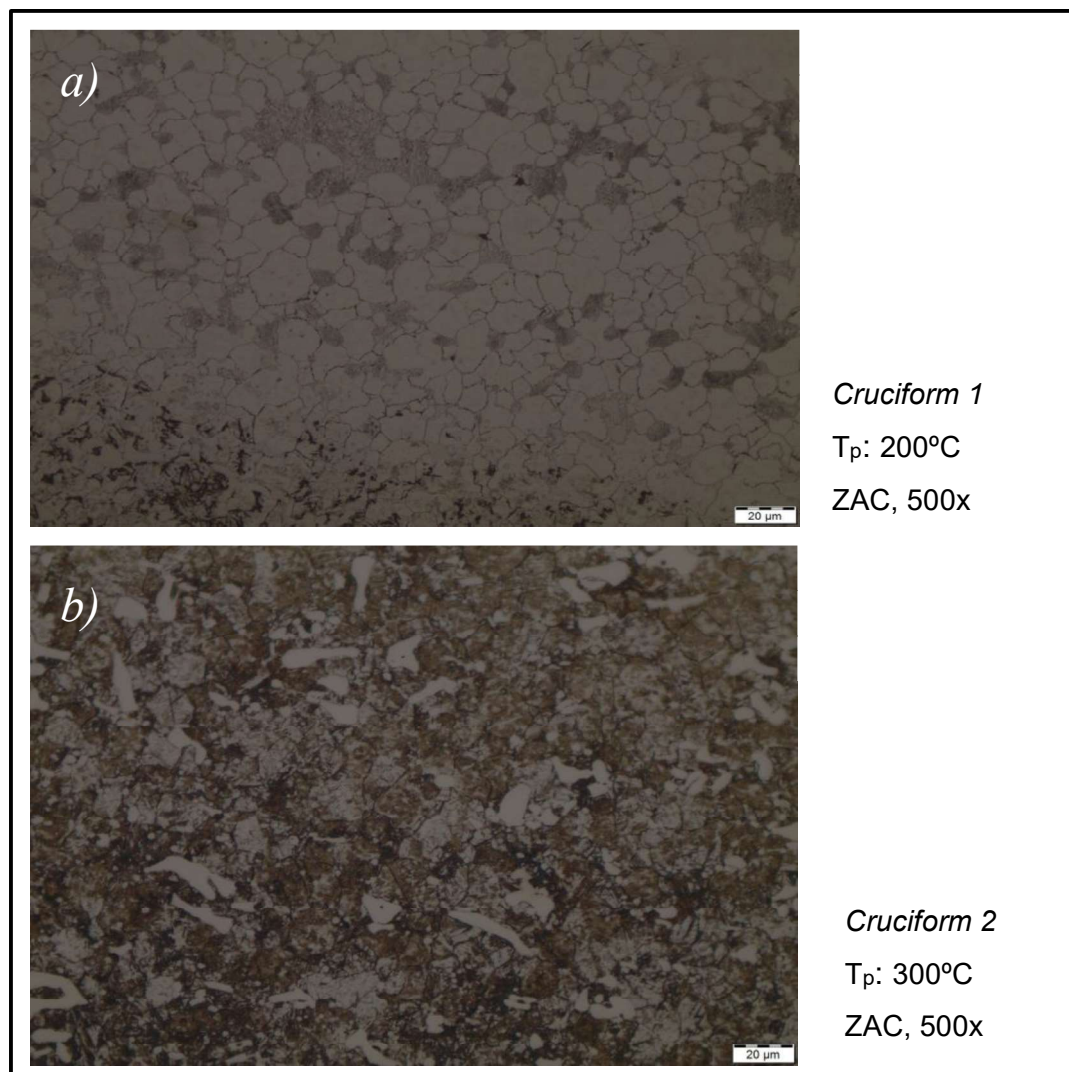
(Fuente: propia)



La micrografía **b)** corresponde al metal base con un precalentamiento a 200°C, la dureza es de 23 HRC. Se observan estructuras perlíticas. La imagen **c)** es el metal base con un precalentamiento a 300 °C, dureza de 22 HRC. Se observan estructuras perlíticas y ferríticas. Las imágenes son a 500x y ataque fue realizado con vilella.

En la Tabla 3.20 se presentan las micrografías de la zona afectada por el calor en probetas soldadas del ensayo *Cruciform* para el filete identificado como 1. En la imagen identificada como **a)** el precalentamiento fue a 200°C, la dureza medida registra 20 HRC. Se observan algunas regiones con perlita. Para la imagen **b)** el precalentamiento se lo llevó a cabo a 300°C, la dureza es un valor de 23 HRC. Se evidencian estructuras de perlita y ferrita. (Kou, 2003) El aumento en ambas imágenes fue de 500x el químico utilizado para el ataque fue marble.

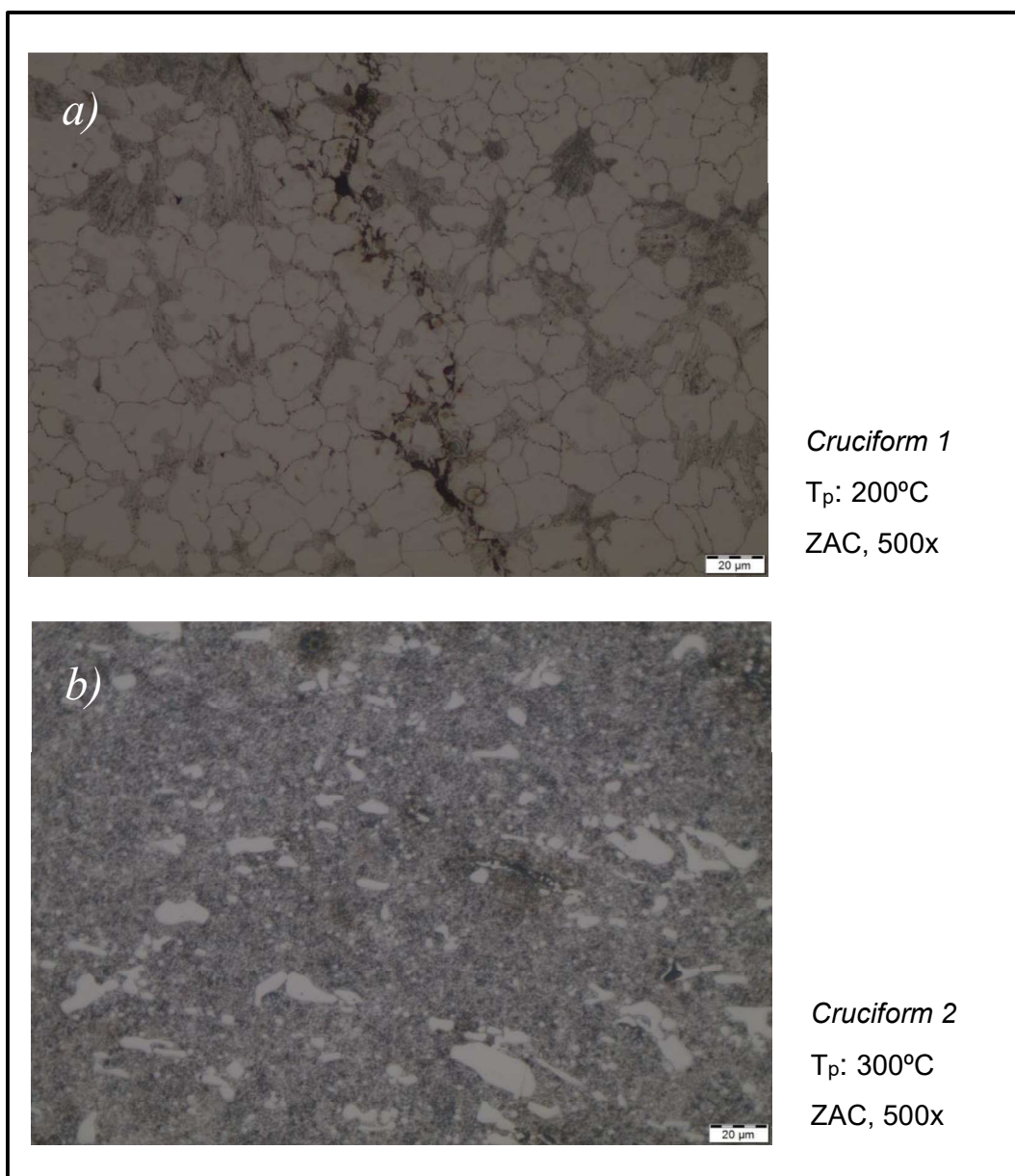
Tabla 3.20. Micrografías de la ZAC en el primer filete de las probetas a) MI 1 y b) MI\* 2 del ensayo *Cruciform*.



(Fuente: propia)

La presencia de hidrógeno atrapado en la ZAC es el causal de las fisuras en esta zona, en la Tabla 3.21 se observan micrografías de la ZAC en probetas soldadas del ensayo *Cruciform* para el filete identificado como 2. La imagen identificada como **a)** presenta el caso del precalentamiento a 200°C, la dureza es 24 HRC. Se observan algunas regiones con ferrita y cementita. En la imagen **b)** el precalentamiento se llevó a cabo a 300°C, la dureza medida fue de 21 HRC. Se evidencian estructuras de perlita y cementita. (Kou, 2003) Las imágenes tienen un aumento a 500 x y las muestras fueron atacadas con marble.

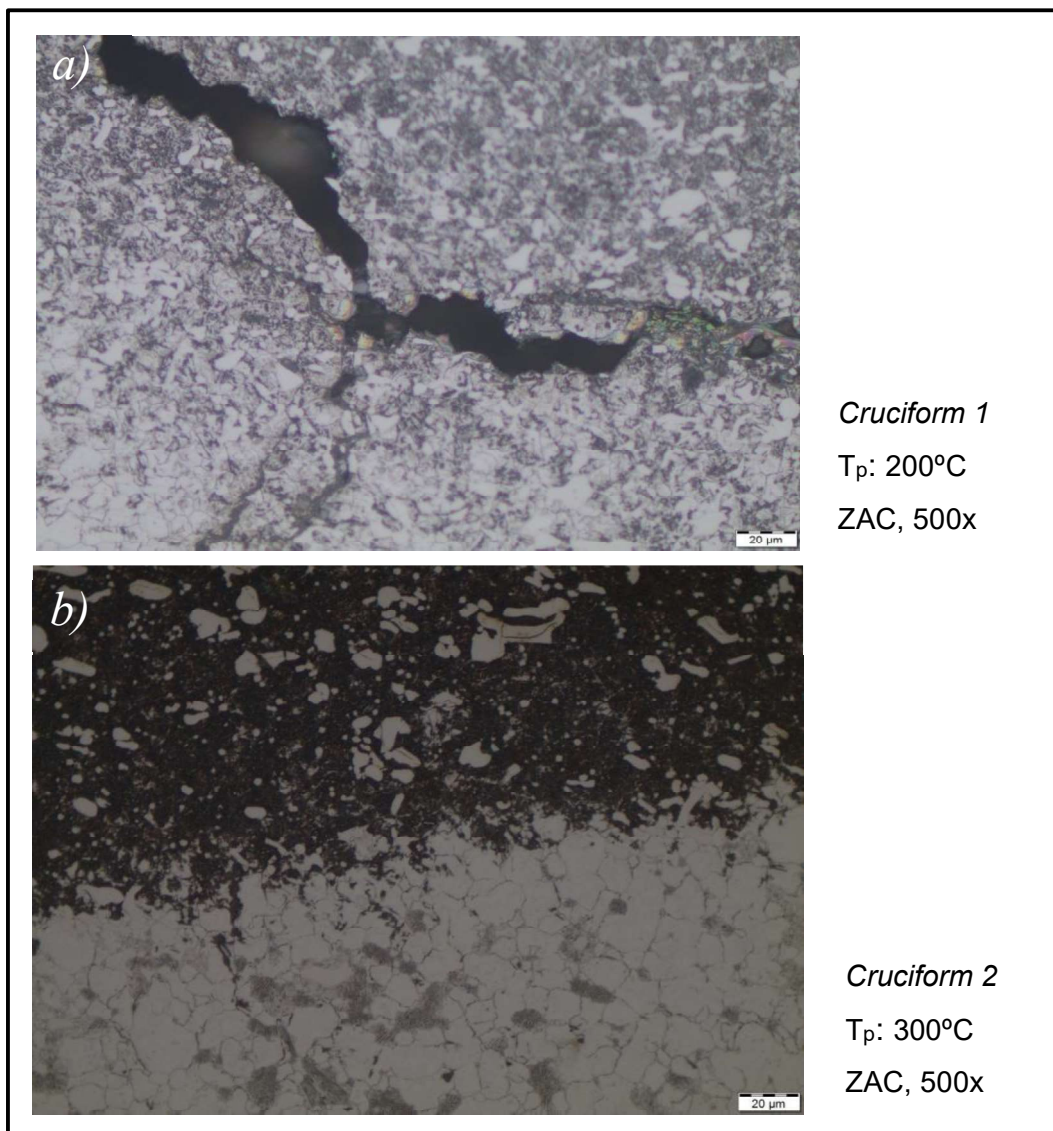
Tabla 3.21. Micrografías de la ZAC en el segundo filete de las probetas a) MI 1 y b) MI\* 2 del ensayo *Cruciform*.



(Fuente: propia)

Las macrográficas señalaron que en el tercer filete de las probetas existen fisuras en el pie de la soldadura que se extienden por toda la longitud del cordón, la ZAC es donde se encuentra estas fisuras la Tabla 3.22 muestra las micrográficas de la Zona Afectada por el Calor en probetas soldadas del ensayo *Cruciform* para el filete identificado como 3. En la imagen identificada como **a)** el precalentamiento se realizó a 200°C, la dureza fue de 38 HRC. Se observan regiones con austenita y martensita. En la imagen identificada como **b)** el precalentamiento se realizó a 300°C y la dureza medida fue de 41 HRC. Se evidencian estructuras de austenita y en mayor porcentaje martensita, además se identifica claramente una zona de transición. (Kou, 2003) En ambas imágenes el aumento es 500x el ataque químico se realizó con marble.

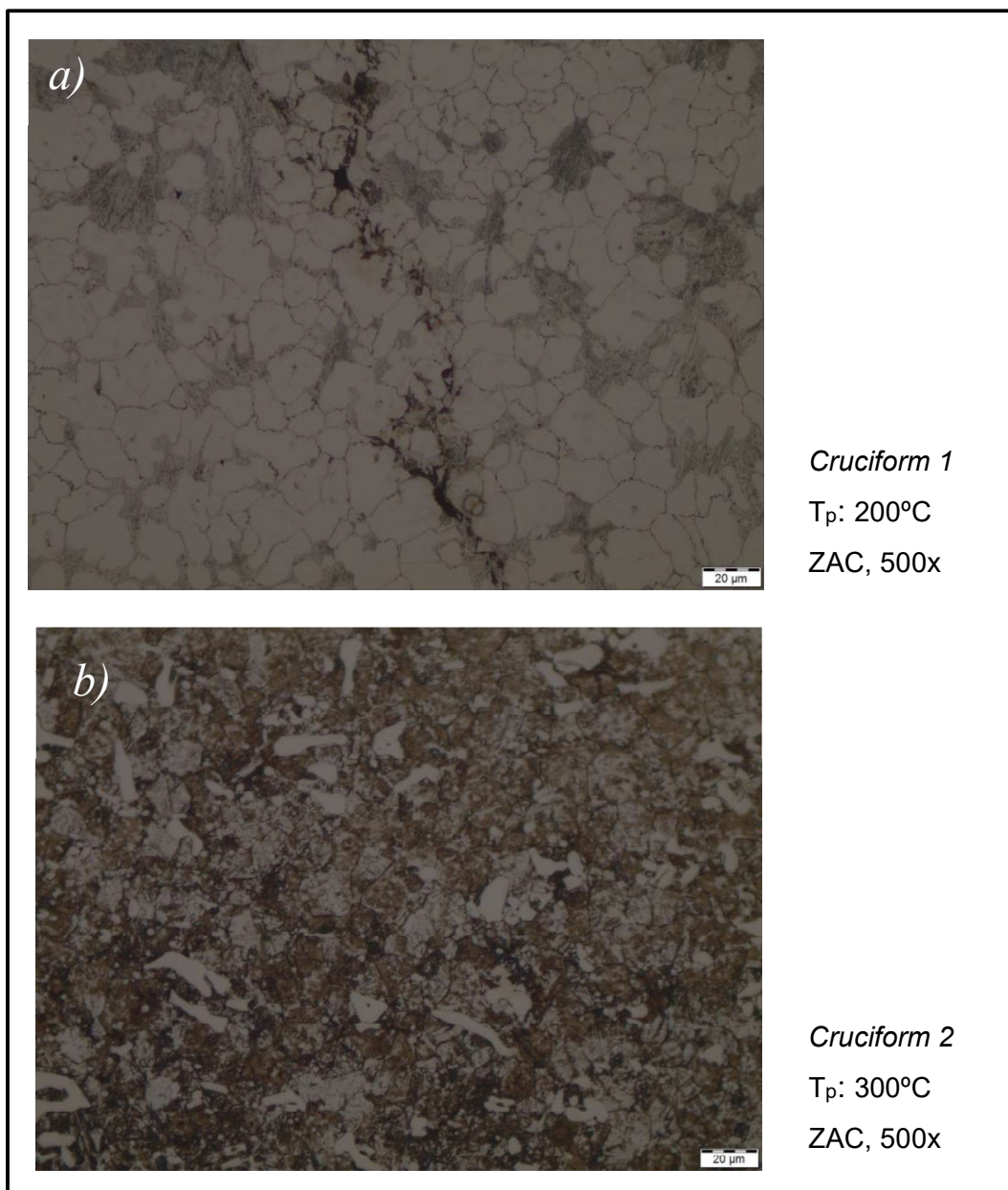
Tabla 3.22. Micrográficas de la ZAC en el tercer filete de las probetas a) MI 1 y b) MI\* 2 del ensayo *Cruciform*.



(Fuente: propia)

En la Tabla 3.23 se presentan las micrográficas de la ZAC en probetas soldadas del ensayo *Cruciform* para el filete identificado como 4. En la imagen identificada como **a)** el precalentamiento fue a 200°C y la dureza medida corresponde a un valor de 22 HRC. Se observan regiones con austenita y martensita. Para el caso de la imagen **b)** el precalentamiento fue a 300°C, el valor de dureza es de 20 HRC. Se evidencian estructuras de austenita y en menor cantidad martensita. Aumento a 500x y ataque químico con marble.

Tabla 3.23. Microestructuras de la ZAC en el cuarto filete de las probetas a) MI 1 y b) MI\* 2 del ensayo *Cruciform*.



(Fuente: propia)

### 3.2.5. Ensayo de dureza en el ensayo *Varestraint*

En la medición de la dureza se utilizó la escala Rockwell C (HRC), en las probetas *Varestraint* se midió la dureza transversalmente sobre cinco zonas de las probetas (ver Figura 3.2) igual número de mediciones se practicó en la probeta del material base, los datos levantados son tabulados en la Tabla 3.24.

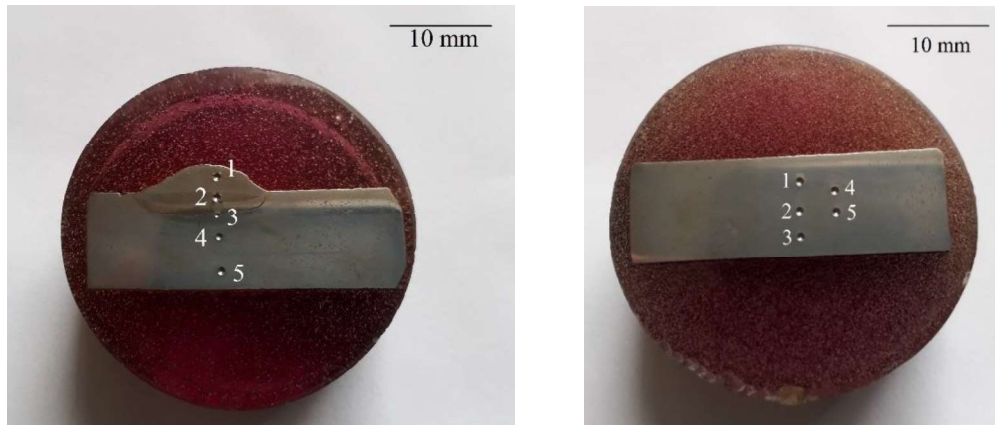


Figura 3.2. Ensayos de dureza sobre la probeta P3 del ensayo *Varestraint* y el material base en condición de origen.

(Fuente: propia)

Tabla 3.24. Resultados de medición de dureza en las probetas del ensayo *Varestraint* y material base en condición de origen.

Zona de medición	P1 [HCR]	P2 [HCR]	P3 [HCR]	P4 [HCR]	MB [HCR]
1	22	15	17	23	18
2	26	25	24	27	17
3	50	55	51	54	18
4	47	27	30	31	18
5	24	18	18	19	18

(Fuente: propia)

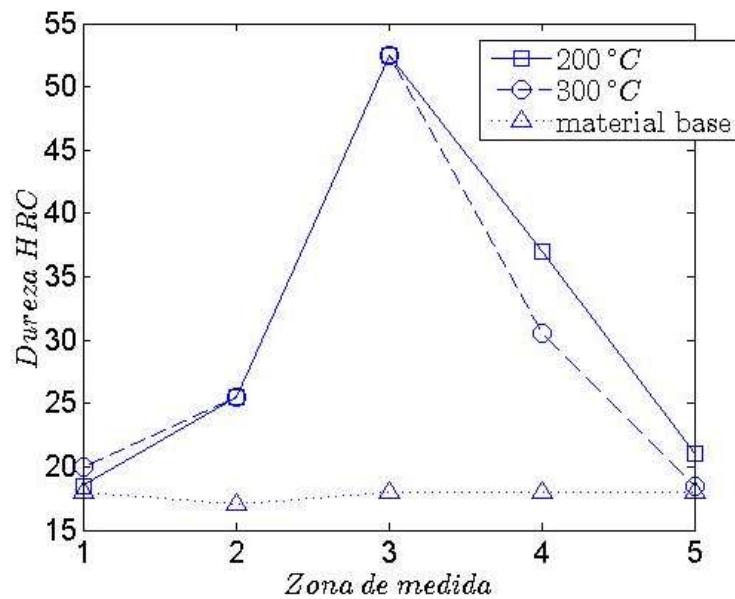


Figura 3.3. Mediciones de la dureza en función de su localización en las regiones del cordón de soldadura para el ensayo *Varestraint*.

(Fuente: propia)

La Figura 3.3 presenta los valores de dureza en función de las zonas de medida identificadas en la Figura 3.2, en este gráfico se muestran tres conjuntos de datos que corresponden a la media aritmética de los valores de dureza para probetas precalentadas a 200°C y 300°C. Para cada temperatura se efectuaron ensayos en dos probetas para calcular la media aritmética. El tercer conjunto de datos corresponde a las mediciones de dureza del material base, para este caso se dispuso de una sola probeta. Los valores de las mediciones se presentan en la Tabla 3.24. Los valores de la dureza para el caso del material base corresponden a mediciones realizadas en 5 diferentes regiones de la probeta como se ilustra en la Figura 3.2. Como era de esperarse la dureza para el caso de material base es casi constante a lo largo de las zonas de medida y es igual a un valor medio de 18 HRC. Para el caso de las probetas sometidas a precalentamiento el máximo valor de dureza se obtiene en la zona identificada como 3, que corresponde a la región de la ZAC. Para las zonas 1, 2 y 5 la dureza medida tiene el mismo valor a pesar de las diferencias en el precalentamiento y en todas esas regiones con un valor superior al del material base. La zona identificada como 4 presenta un valor de dureza medio entre el máximo y el del material base, esta zona corresponde a la de transición entre la ZAC y el metal base.

### 3.2.6. Ensayo de dureza en el ensayo *Cruciform*

Para realizar las mediciones de dureza para el ensayo *Cruciform* las probetas fueron divididas en zonas identificadas del 1 a 7. El número 1 corresponde a un extremo de una placa y el número 7 al extremo de la otra placa de la junta. Los números intermedios identifican zonas del material de aporte y de la ZAC. Para cada filete se llevaron a cabo dos muestreos que son identificados como toma 1 y toma 2. Este procedimiento se repitió para los cuatro filetes que conforman el ensamble. Con este procedimiento se obtienen cuatro mediciones para cada zona de medida, por cada toma y para probeta. En total se ejecutaron ensayos en cuatro probetas, que para el caso del ensayo *Cruciform* se identifican como MI 1, MI\* 2, MA 1 y MA\* 3 (ver Figura 3.4).

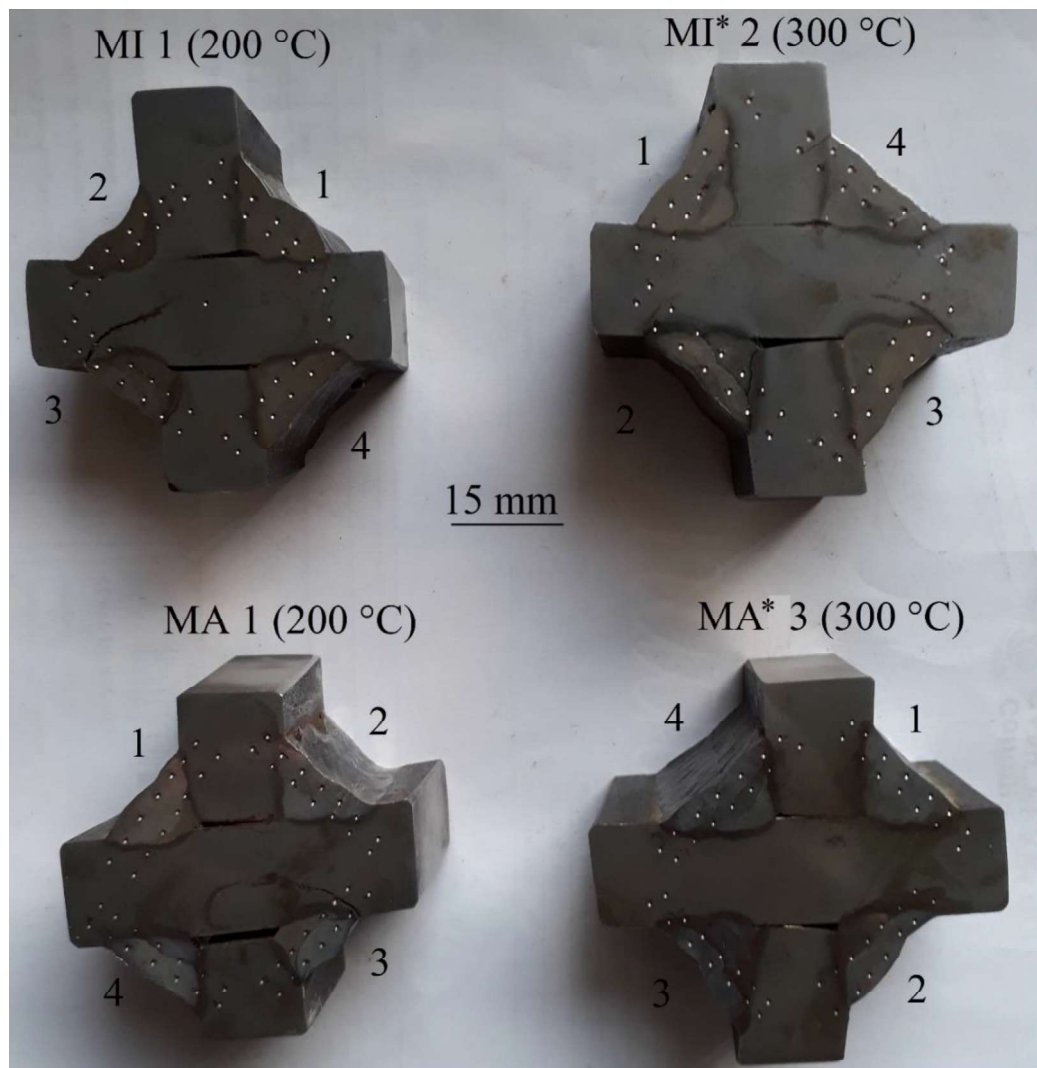


Figura 3.4. Probetas del ensayo *Cruciform*, se identifican los cuatro filetes y las temperaturas a las cuales se realizaron los precalentamientos.

(Fuente: propia)

La Figura 3.4 presenta las probetas obtenidas en el ensayo *Cruciform*, se obtuvieron cuatro probetas sobre las cuales se ejecutaron microscopías y macrografías. En los filetes identificados como número tres se evidencia una fisura, lo cual coincide con la teoría. La norma utilizada refiere a que en el tercer filete que se ejecute en la junta debe ser el lugar en donde deberá presentarse la falla del conjunto material base y metal de aporte para probetas soldadas bajo la normativa del ensayo *Cruciform*.

Todos los valores obtenidos durante el ensayo de dureza se presentan en las Tablas 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28. Los valores medios de la dureza a lo largo de las diferentes zonas de medida se presentan en las Figuras 3.4 y 3.5. Todas las medidas se presentan en escala Rockwell C (HRC). La definición de zona de medición y de toma 1 y toma 2 se lo efectuó en el Capítulo que aborda la metodología. El orden cardinal de los filetes corresponde al orden en el cual se ejecutaron los pases durante el proceso de soldadura

Tabla 3.25. Resultados de medición de dureza en la probeta MI 1 del ensayo *Cruciform 1*.

Zona de medición	<b>CRUCIFORM 1 (MI 1)</b>							
	Filete 1		Filete 2		Filete 3		Filete 4	
	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]
<b>1</b>	21	20	21	20	22	23	19	17
<b>2</b>	31	29	42	32	26	17	22	19
<b>3</b>	18	16	18	24	22	29	24	38
<b>4</b>	20	19	16	20	16	31	23	25
<b>5</b>	20	23	17	24	18	29	23	27
<b>6</b>	39	23	28	38	7	42	28	38
<b>7</b>	21	19	19	20	21	22	22	23

(Fuente: propia)



Tabla 3.26. Resultados de medición de dureza en la probeta MA 1 del ensayo *Cruciform 1*.

Zona de medición	CRUCIFORM 1 (MA 1)							
	Filete 1		Filete 2		Filete 3		Filete 4	
	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]
1	18	18	22	19	45	19	21	23
2	40	20	48	22	16	36	29	31
3	19	32	16	43	12	30	19	28
4	17	26	18	23	13	28	18	21
5	19	23	17	19	28	31	20	19
6	18	22	21	47	19	50	21	45
7	18	20	19	22	22	22	20	19

(Fuente: propia)

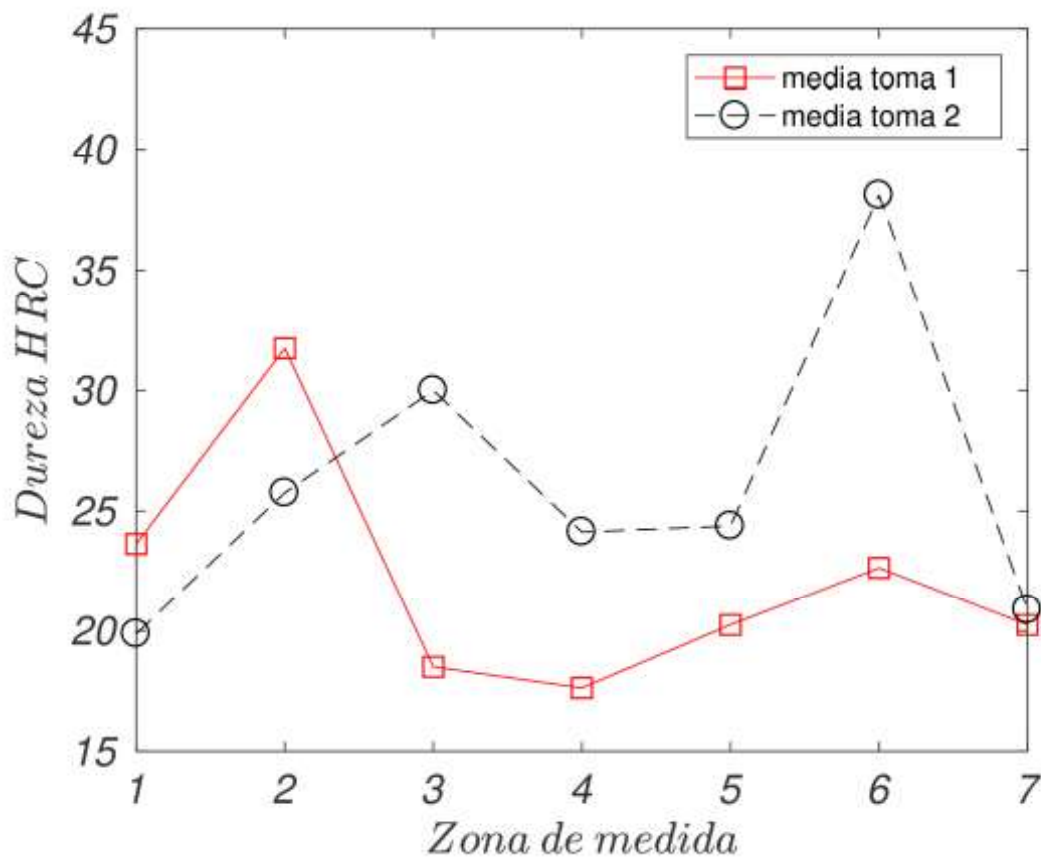


Figura 3.5. Mediciones de la dureza en las probetas MI 1 y MA 1 en función de su localización en las regiones de soldadura para el ensayo *Cruciform*.

(Fuente: propia)

Tabla 3.27. Resultados de medición de dureza en la probeta MI\* 2 del ensayo *Cruciform 2*.

Zona de medición	<b>CRUCIFORM 2 (MI* 2)</b>							
	Filete 1		Filete 2		Filete 3		Filete 4	
	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]
1	22	22	23	23	22	22	21	20
2	35	36	19	40	49	25	37	28
3	21	24	19	25	18	44	18	24
4	21	22	16	26	15	22	15	22
5	20	21	20	20	15	22	17	21
6	25	47	21	39	22	46	22	47
7	21	22	20	22	20	20	22	23

(Fuente: propia)

Tabla 3.28. Resultados de medición de dureza en la probeta MA\* 3 del ensayo *Cruciform 2*.

Zona de medición	<b>CRUCIFORM 2 (MA* 3)</b>							
	Filete 1		Filete 2		Filete 3		Filete 4	
	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]	Toma 1 [HCR]	Toma 2 [HCR]
1	18	21	21	20	22	19	19	20
2	34	33	13	45	19	43	20	35
3	16	16	17	20	16	23	17	22
4	12	18	17	24	14	24	16	22
5	15	20	17	20	17	23	19	23
6	37	49	18	45	35	47	39	41
7	33	21	35	26	20	21	23	21

(Fuente: propia)

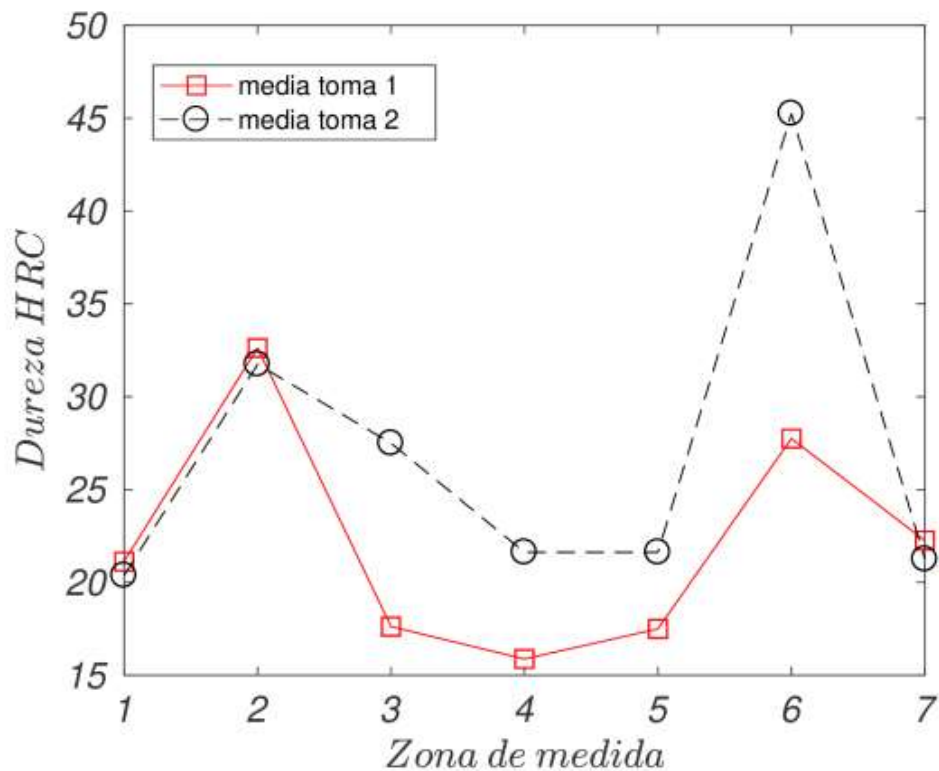


Figura 3.6. Mediciones de la dureza en las probetas MI\* 2 y MA\* 3 en función de su localización en las regiones de soldadura para el ensayo *Cruciform*.

(Fuente: propia)

Los valores de dureza que se observan en las gráficas (Figuras 3.5 y 3.6) corresponden a las mediciones realizadas en probetas del ensayo *Cruciform*. Las  $T_p$  fueron de 200 y 300°C. Los valores en el eje horizontal son las zonas de medida a lo largo de las probetas.

Para la representación gráfica de la dureza, en unidades HRC, en función de la zona de medida se calculó la media aritmética. Las zonas identificadas con los números 3, 4 y 5 presentan el menor valor de dureza media para la toma 1, que en base a su posición geométrica corresponden al material de aporte en la parte más externa con respecto a la junta. Para la toma dos en esas mismas zonas, la dureza es mayor y corresponde a áreas más internas del material de aporte, es decir más próximas al material base. Para las zonas uno y dos en ambas tomas la dureza medida tiene valores similares. El pico de dureza se lo obtiene en la zona 6 para la toma 2, se identifica que es una región de la ZAC, el máximo obtenido está en estrecha relación con la medición en la zona 6 del filete número 3 de la junta. En la imagen se identifica que es una medición ejecutada en un área de proximidad a la grieta. Para la zona 7 las mediciones de dureza para ambas tomas tienen casi el mismo valor, que corresponde a la dureza del material base. Lo discutido aquí aplica para las mediciones tomadas en probetas precalentadas a las dos temperaturas.

### 3.3. Análisis suplementarios

En esta sección se abordan diferentes ítems para complementar el análisis del estudio de soldabilidad, dichos ítems se vinculan con los efectos y comportamientos del acero de alto porcentaje de carbono y cromo ocurridos durante el proceso de soldadura, y reafirmar los resultados de las pruebas no destructivas.

#### 3.3.1. Tasas de enfriamiento

Controlar el tiempo y temperatura de enfriamiento de las probetas soldadas, ayuda a predecir la formación de una estructura frágil, es decir, cuando se tiene tasas de enfriamiento rápidas puede aumentar la posibilidad de formar martensita quebradiza al soldar el acero, el tamaño de la zona afectada por el calor es influenciado directamente por el flujo de calor de entrada y salida, un escaso flujo de calor combinado con un alto coeficiente de expansión térmico pueden contribuir a una distorsión excesiva del acero (Phillips, 2016). En la Tabla 3.29 se presentan las temperaturas de enfriamiento en función del tiempo para las cuatro probetas obtenidas en el ensayo *Varestraint*. El tiempo está dado en minutos y la temperatura en °C. La evolución de la temperatura en función del tiempo muestra el enfriamiento para una toma ubicada en cada una de las probetas.

Tabla 3.29. Tiempos y temperaturas de enfriamiento de las probetas P1, P2, P3 y P4 del ensayo *Varestraint*.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
0	392,94	400,74	506,41	480,63
4	329,46	339,28	426,35	409,32
8	269,28	274,64	342,72	327,97
12	208,64	219,53	261,43	244,46
16	157,38	165,87	203,28	195,32
20	129,28	139,78	164,53	153,78
24	113,86	117,39	122,73	114,96
28	94,71	97,23	102,97	98,78
32	77,29	79,77	93,13	85,28
36	62,56	63,46	84,41	73,29

40	54,84	51,28	76,73	66,15
44	46,12	40,83	65,92	59,64
48	39,56	34,15	55,36	51,49
52	33,47	32,77	53,64	46,33
56	27,39	29,45	51,82	38,22
60	23,23	25,83	44,79	34,98

(Fuente: propia)

En la Figura 3.7 se presentan gráficamente los datos presentados en la Tabla 3.29. El eje vertical representa la temperatura y el horizontal el tiempo. Las probetas 1 y 2 corresponden a una  $T_p$  de 200°C, por otra parte, las probetas 3 y 4 corresponden al caso de  $T_p$  de 300°C. Las probetas precalentadas a la menor temperatura arrancan su enfriamiento a una temperatura alrededor de 400°C, es decir el doble de la de precalentamiento. El registro de la temperatura de las probetas 3 y 4 empieza en 500°C. El tiempo total de enfriamiento de muestreo son 60 minutos, en este intervalo la temperatura de enfriamiento alcanza un comportamiento asintótico, 30°C en media, independientemente de la temperatura del inicio de precalentamiento. A aproximadamente 24 minutos de iniciadas las mediciones, las temperaturas de las cuatro probetas se cruzan en un valor de aproximadamente 116°C.

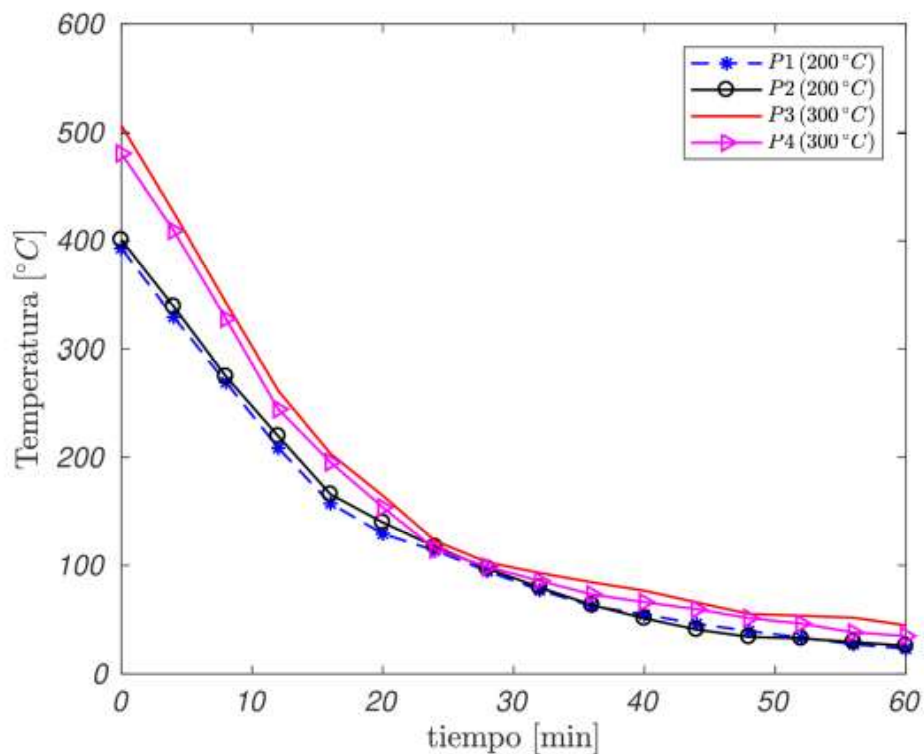


Figura 3.7. Temperatura de enfriamiento en función del tiempo para probetas del ensayo *Varestraint* precalentadas a 200 y 300 °C.

(Fuente: propia)

En la tabla 3.30 se presentan los datos de la temperatura de enfriamiento para una probeta precalentada a 200 °C en la cual se efectuó un ensayo *Cruciform*. Las mediciones se realizaron para los cuatro filetes que conforman el conjunto metal base y material de aporte.

Tabla 3.30. Tiempos y temperaturas de enfriamiento de la probeta *Cruciform 1*.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]			
	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
0	255,36	271,43	284,62	260,73
4	244,65	259,67	272,47	248,27
8	231,89	245,44	259,12	234,68
12	216,46	233,53	244,63	220,42
16	202,51	217,47	228,27	206,10
20	188,72	204,12	215,73	192,39
24	176,33	192,42	202,85	179,78
28	165,85	179,26	189,74	168,25
32	156,28	163,79	173,51	158,82
36	144,16	154,92	162,96	147,25
40	132,76	146,53	151,84	136,45
44	121,88	135,35	143,23	125,67
48	113,67	124,84	133,67	117,34
52	104,33	115,69	121,78	107,83
56	96,29	107,27	112,32	98,10
60	87,33	94,71	98,48	88,40
64	75,16	85,43	87,91	77,39
68	63,48	73,92	75,12	66,27
72	58,23	64,83	67,33	60,96
76	52,69	56,26	58,78	54,75
80	47,21	50,93	53,86	49,24
84	41,63	44,58	47,38	43,53
88	37,38	39,72	42,83	39,18
92	34,14	36,19	39,45	35,37
96	31,83	33,84	36,21	32,85
100	29,76	31,62	33,43	30,81

(Fuente: propia)

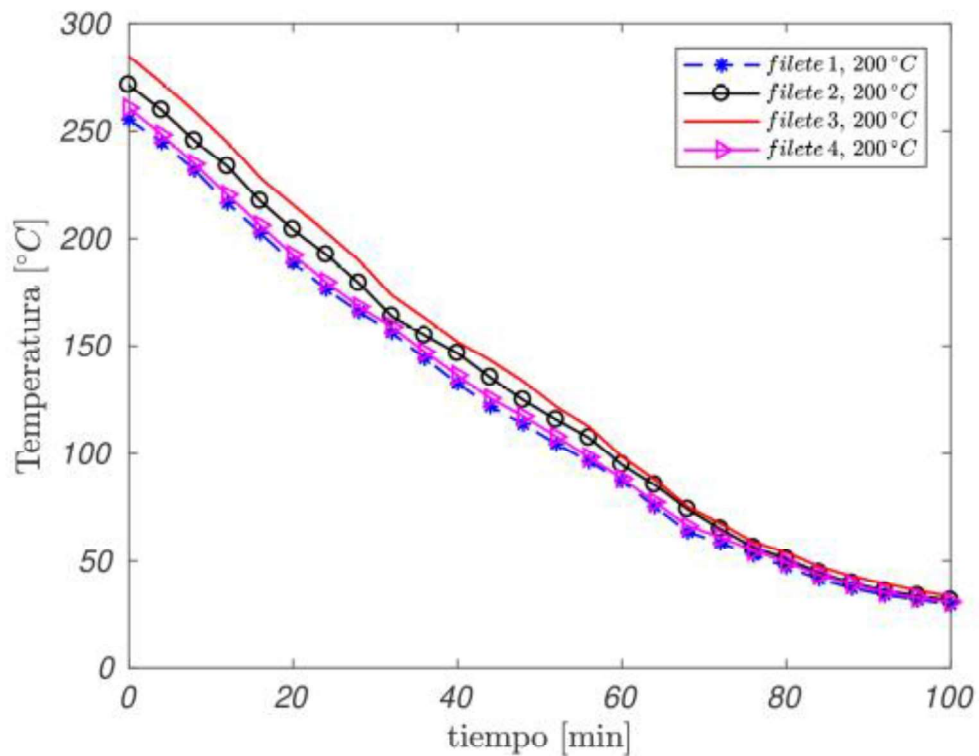


Figura 3.8. Tasa de enfriamiento de la probeta *Cruciform 1*.

(Fuente: propia)

En la tabla 3.31 se presentan los datos de la temperatura de enfriamiento para una probeta precalentada a 300°C en la cual se efectuó un ensayo *Cruciform*. Las mediciones se realizaron para los cuatro filetes que conforman el conjunto metal base y material de aporte.

Tabla 3.31. Tiempos y temperaturas de enfriamiento de la probeta *Cruciform 2*.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]			
	Filete 1	Filete 2	Filete 3	Filete 4
0	352,38	346,61	358,69	341,79
4	340,38	337,23	344,21	332,88
8	321,46	323,17	328,90	317,25
12	297,64	301,48	306,70	293,42
16	278,27	284,33	291,96	276,84
20	264,82	268,39	274,15	259,88
24	231,71	235,92	243,63	228,66
28	203,10	206,23	211,45	201,95
32	189,29	194,78	198,74	186,24
36	162,48	164,83	173,61	159,55

40	144,93	146,27	151,52	141,73
44	131,39	131,88	138,47	128,42
48	121,25	123,27	129,37	117,37
52	106,44	107,83	114,83	103,97
56	94,35	96,37	103,46	91,26
60	88,15	89,60	94,78	86,77
64	76,92	78,18	84,64	74,95
68	67,23	68,19	73,14	64,54
72	52,83	53,46	58,79	51,49
76	49,18	50,73	54,62	48,39
80	46,24	47,23	51,27	44,73
84	43,76	44,61	47,98	41,22
88	38,38	39,32	42,59	36,40
92	36,39	37,39	39,87	34,56
96	34,93	35,97	37,46	32,37
100	32,42	33,85	36,29	30,78

(Fuente: propia)

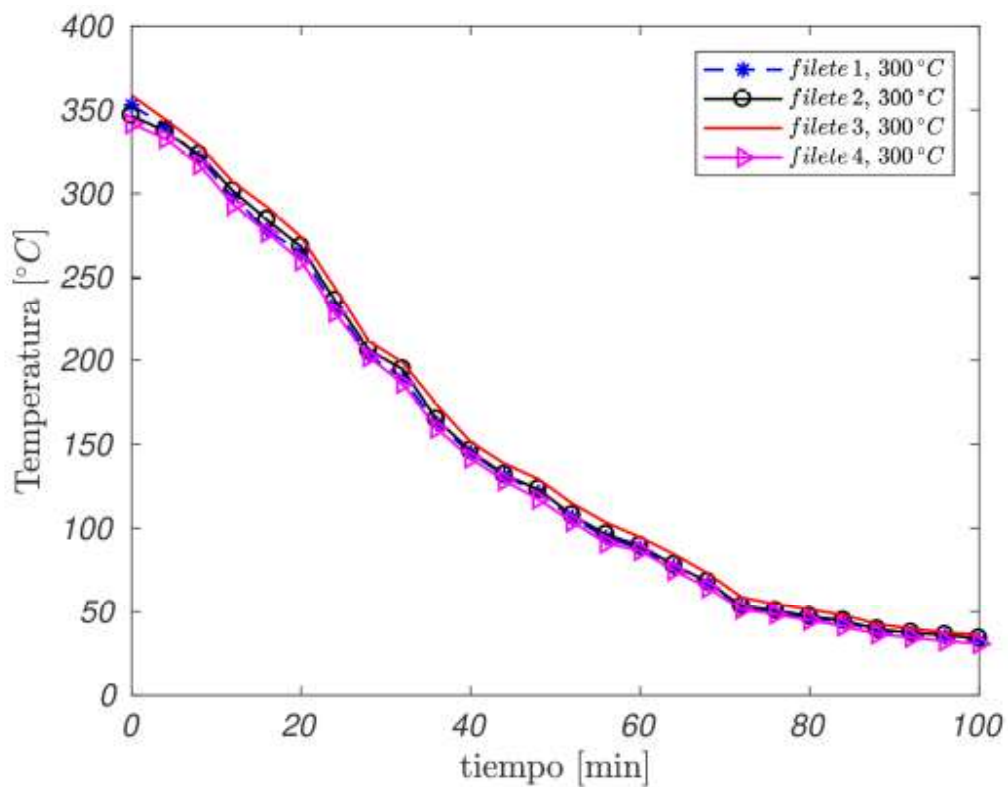


Figura 3.9. Tasa de enfriamiento de la probeta *Cruciform 2*.

(Fuente: propia)



En la Figura 3.8 se presenta la variación de la temperatura de enfriamiento en función del tiempo para los cuatro filetes de una probeta soldada para el ensayo *Cruciform*, la misma que fue precalentada a 200°C. En el inicio de la medición los filetes identificados como 1 y 3 tienen la mayor diferencia de temperatura, aproximadamente 30°C. Sin embargo, después de 100 minutos las temperaturas de los cuatro filetes convergen en un valor de temperatura medio de 30,50°C. En la Figura 3.9 se grafican los datos de las temperaturas de enfriamiento para una probeta precalentada a 300°C. Los cuatro filetes tienen una temperatura promedio de 350°C en el tiempo cero. Al igual que en la probeta de precalentamiento a 200°C, las temperaturas de los cuatro filetes alcanzan una temperatura constante transcurridos 100 minutos. La temperatura final de los cuatro filetes converge en una media de 33°C. De las curvas graficadas para las dos temperaturas de enfriamiento se pueden encontrar las tasas promedio de enfriamiento 2,4 °C/min para la probeta precalentada a 200°C y 3,15°C/min para la probeta precalentada a 300°C.

### 3.3.2. Expansión térmica

Al calentar el acero AISI D3, este se expande y cuando se enfría, se contrae. La cantidad de expansión y contracción se relaciona a una propiedad física propia de un material conocida como coeficiente de expansión térmica, la Tabla 3.32 señala el valor de esta propiedad física para el acero en análisis.

Tabla 3.32. Coeficiente de expansión térmica del acero AISI D3.

Propiedad física	Temperatura		
	20°C	200°C	400°C
Coeficiente de expansión térmica por [°C]	-----	11,0 * 10 <sup>-6</sup>	10,8 * 10 <sup>-6</sup>

(Fuente: (UDDEHOLM, UDDEHOLM SVERKER 3, 2011))

El calentamiento y enfriamiento no uniforme de la soldadura resulta en una expansión y contracción no uniforme que deriva en la creación de tensiones residuales y distorsiones en las soldaduras (Phillips, 2016).

### 3.3.3. Tensión residual y distorsión

La tensión residual se refiere a la tensión que permanece en una soldadura después de excluir todas las cargas externas. En la soldadura por arco metálico protegido es típico un calentamiento no uniforme de la pieza lo que crea tensiones residuales. La tensión permanente que queda se conoce como distorsión, y la tensión permanente es la tensión residual, los patrones de esta varían y están en función de la cantidad de aporte de calor, el diseño de la junta y el grado de restricción. Los aceros con coeficientes de expansión térmica elevados se encogerán más a medida que se enfríen lo que provoca mayores cantidades de distorsión (Phillips, 2016). Para comprender la distorsión producida en las probetas de los ensayos de soldabilidad, se hace uso de instrumentos de medida para poder registrar y cuantificar la distorsión sufrida por los especímenes. En el caso de las probetas del ensayo de soldabilidad *Varestraint*, se comprobó con la probeta que sirvió de prueba preliminar que si no se mantenía aplicada la fuerza de doblado la tensión residual contenida en la soldadura provoca que la probeta se distorsione en dirección contraria (ver Figura 2.9). La magnitud de deformación en las probetas impuesta por la aplicación de una carga externa que fue mantenida durante el enfriamiento de los especímenes, se visualiza en la Figura 3.10. y se tabula en la Tabla 3.33.

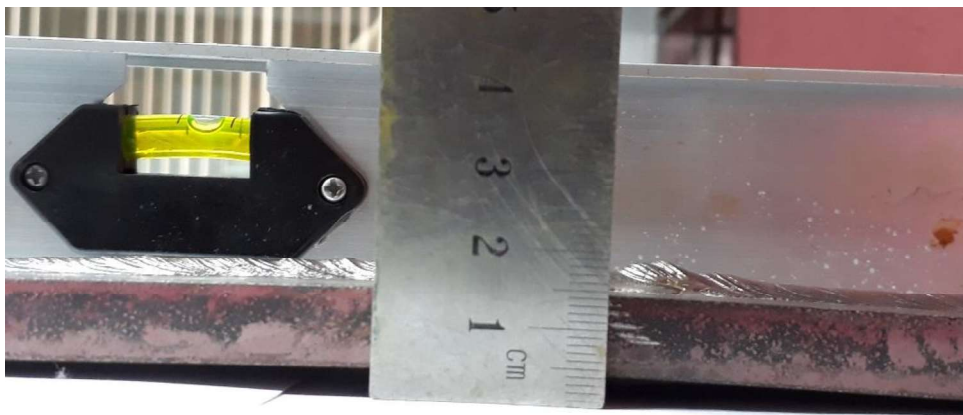


Figura 3.10. Deformación en la probeta P4 ensayo *Varestraint*.

(Fuente: propia)

Tabla 3.33. Magnitudes de deformación en las probetas del ensayo *Varestraint*.

Deformación impuesta			
Probeta 1 [mm]	Probeta 2 [mm]	Probeta 3 [mm]	Probeta 4 [mm]
6	4	5	4

(Fuente: propia)

La deformación obtenida en las probetas por la restricción extrínseca impuesta coincide con el cálculo de fuerza necesaria para flejar a la probeta de acero en configuración en voladizo, al imponer una mayor fuerza de doblado se estimaría que la deformación resultante sea mayor. (Lippold, 2015)

En la ejecución del ensayo de soldabilidad *Cruciform*, para después de realizar el depósito del material de aporte en el primer filete de los dos ensambles, se puede observar que la probeta sufre una expansión térmica (ver Figura 2.17), que deriva en una distorsión angular consecuencia de la tensión residual permanente, que pudo ser cuantificada con la ayuda de un graduador en las placas que conforman los cuatro filetes (ver Figura 3.11 y Tabla 3.34).



Figura 3.11. Distorsión del ensamble *Cruciform 2*.

(Fuente: propia)

Tabla 3.34. Cuantificación de la distorsión de las probetas *Cruciform*.

	Distorsión en [°]	
	<i>Cruciform 1</i>	<i>Cruciform 2</i>
<b>Filete 1</b>	2	7
<b>Filete 2</b>	3	6
<b>Filete 3</b>	3	6
<b>Filete 4</b>	2	7

(Fuente: propia)

La distorsión angular es mayor para el *Cruciform 2* consecuencia de las tensiones residuales provocadas por el cambio de temperatura no uniforme que fue sometido durante el proceso de soldadura. El diseño de una junta doble T, el espesor de las placas aumenta la cantidad de material de soldadura depositado y los patrones de secuencia del cordón en la soldadura multipases, influyen ampliamente al aumento de las tensiones residuales y el efecto final de una mayor distorsión angular (Lippold, 2015) (Kou, 2003).

### 3.3.4. Ensayos no destructivos complementarios

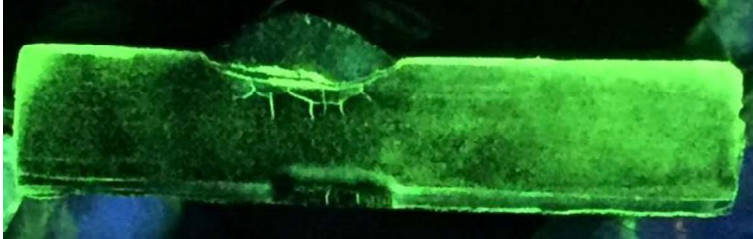

En las probetas del ensayo *Varestraint* al realizar el análisis por medio de macrográficas y micrográficas, se pudo comprobar la presencia de fisuras transversales internas en las zonas de soldadura y al evaluar los resultados de inspección del ensayo de RX, se llega a la conclusión que sobre las placas radiográficas no se visualiza ninguna clase de discontinuidad interna ni externa en las cuatro probetas evaluadas, en teoría el ensayo de RX al ser una técnica de evaluación volumétrica debería mostrar estas discontinuidades, para saciar esta contradicción presentada se decidió realizar una nueva inspección por radiografía industrial, para lo cual se recurre a los servicios de la empresa Ensayos No Destructivos Del Ecuador (ENDE), se decide hacer esta nueva inspección no destructiva a las secciones sobrantes de las probetas P1 y P3, que cada una representan las dos condiciones de  $T_p$ .

#### 3.3.4.1. Partículas magnéticas en vía húmeda ensayo *Varestraint*

Para corroborar la existencia de fisuras internas, sobre las secciones de corte de las probetas se realizó un ensayo de partículas magnéticas en vía húmeda, este método es

más sensible para encontrar grietas muy finas, la suspensión húmeda utilizada tiene partículas fluorescentes proporcionando un alto contraste para el ojo humano cuando son expuestas a luz ultravioleta. Para magnetizar las probetas se utilizó el yugo magnético descrito en el ANEXO I, la aplicación de las partículas húmedas fluorescentes fue en forma manual bombeada a través de una boquilla, el registro de las indicaciones es mediante fotografías las cuales son mostradas e interpretadas en la Tabla 3.35.

Tabla 3.35. Resultados de inspección por partículas magnéticas en vía húmeda de las probetas P1 y P3 del ensayo *Varestraint*.

Identificación	Registro fotográfico	Inspección
P1		Discontinuidad cóncava de 11,22 mm, discontinuidades transversales de: 1,13mm, 2,12 mm, 1,68mm, 2,47mm, 0,85mm y 2,45mm.
P3		Discontinuidad cóncava de 13,50 mm discontinuidades transversales 1,8mm, 0,77mm, 2,14mm, 2,09mm, 1,41mm, 1,45mm y 0,78mm.

(Fuente: propia)

Las partículas magnéticas fluorescentes en vía húmeda atrapadas en las discontinuidades de las probetas resaltan a simple vista y se notan la existencia de fisuras cóncavas y transversales, dimensionar la longitud de estas resulta más fácil por el contraste fluorescente, dando soporte al dimensionamiento hecho en las probetas preparadas macrográficas, el ancho de estas fisuras es mínimo por lo que no pudo ser cuantificado.

### 3.3.4.2. Radiografía industrial ensayo *Varestraint* (RG)

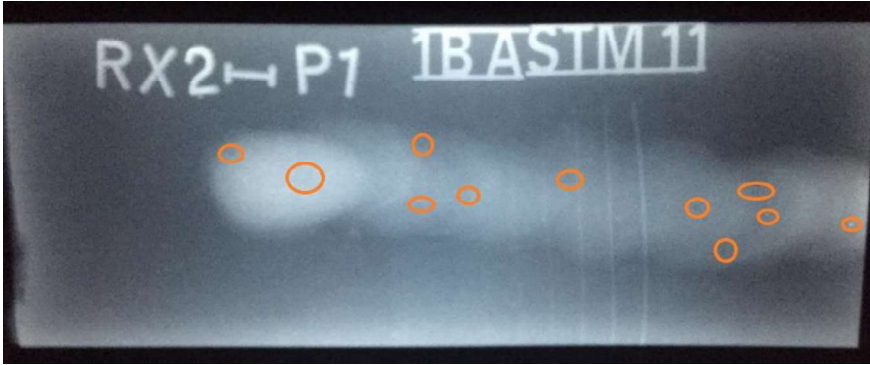

La inspección radiográfica en primera instancia revela la ausencia de discontinuidades sobre las probetas del ensayo *Varestraint*, para descartar cualquier factor de mal manejo de las variables de trabajo en las que se ejecutó el ensayo y del tratamiento posterior de la película radiográfica, se repitió este ensayo haciendo uso de cápsulas de fuentes radioactivas de RG (ver Figura 3.12), con distancia entre placas y colimador de 57 cm, y tiempo de exposición aproximado de 3 minutos (equipo proporcionado por ENDE). Con estas condiciones de trabajo se realizó la exposición radiográfica, en el procesamiento de la películas se tomó en consideración el control de la temperatura del revelador y medir la densidad radiográfica, los resultados de inspección del ensayo de RG se muestra en la Tabla 3.36.



Figura 3.12. Cápsula de fuente radioactiva de RG.

(Fuente: propia)

Tabla 3.36. Resultados de inspección por radiografía industrial (RG) de las probetas P1 y P3 del ensayo *Varestraint*.

Identificación	Registro permanente
P1	 <p><b>Inspección:</b> Se observa una serie de indicaciones que se podría interpretar como poros, exceptuando las del comienzo del cordón que son poros externos, las demás indicaciones son el inicio de las fisuras transversales existentes.</p>
P3	 <p><b>Inspección:</b> El registro permanente deja ver unas indicaciones que pueden ser confundidas como poros, pero por el resto de ensayos realizados se sabe que se está visualizando la parte superior de las fisuras transversales.</p>

(Fuente: propia)

La presencia de fisuras internas en las probetas *Varestraint* fue corroborada con una segunda inspección radiográfica, la ubicación de estas por debajo del cordón de soldadura y la cantidad de este material encima de las fisuras ocasiona que no se las pueda apreciar fácilmente, el ancho es mínimo lo que contribuye a que no se las ha detectado en primera instancia, las indicaciones resultantes en el registro permanente podrían ser confundidas como poros, pero por los resultados de los anteriores ensayos no destructivos y destructivos corroboran que se visualiza el inicio de la propagación de las fisuras transversales.

### 3.3.5. Soplo magnético del arco

Cuando se realizaba el proceso de soldadura del *Cruciform 2* específicamente en el tercer filete para el instante del depósito de sus últimos pases de soldadura se produjo un soplo magnético como se lo ha evidenciado en la Figura 2.19, dicha dificultad de la soldadura por arco de corriente continua se explica a continuación.

Cuando los electrodos fluyen crean líneas de flujo magnético, cuando estas no son uniformes es por la corriente de soldadura que fluye a través de la placa, lo que ocasiona que el arco se mueva durante la soldadura. Este movimiento repentino del arco se llama soplo magnético del arco y se hace más evidente en esquinas y extremos de placas, disminuyendo la velocidad de avance, tal como sucedió en la probeta *Cruciform 1* (ver Figura 2.19) y cuando el cable de trabajo está conectado a un solo lado de las placas. Un esquema del soplo magnético se presenta en la Figura 3.13 (Jeffus, 2009).

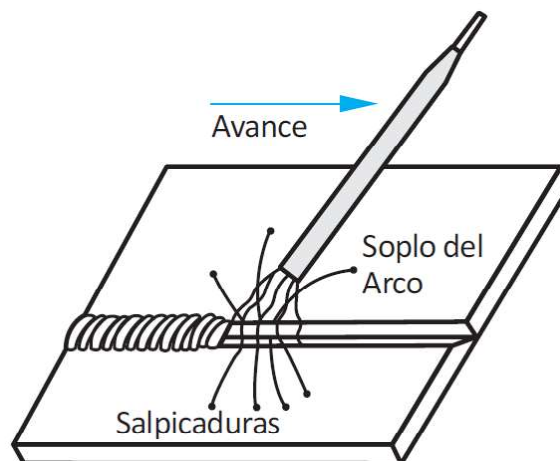


Figura 3.13. Representación del soplo magnético del arco.

(Fuente: Adaptado de (Soldexa, 2012) )

Para mitigar los efectos del soplo magnético podemos recurrir a técnicas como: utilizar corriente alterna, la cual no permite que se creen líneas de flujo lo suficientemente grandes para desviar el arco, reducir la corriente de soldadura, inclinar el electrodo contra la pieza en dirección del soplo de arco, conectar el cable de trabajo al final de la junta o hacer la soldadura en dirección al cable de trabajo.



## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

Los objetivos propuestos para estudiar la soldabilidad del acero de alto porcentaje de carbono y cromo, con la aplicación de material de aporte austenítico-ferrítico por el procedimiento SMAW, fueron ejecutados de acuerdo a lo establecido, permitiendo sustentar un análisis del nivel de soldabilidad que posee este acero, basados en los resultados de los ensayos con restricciones impuestas.

Los indicadores de soldabilidad generados de la evaluación al fisuramiento en caliente y frío, ratifican que por los altos porcentajes de carbono y cromo que posee el acero AISI D3 condicionan negativamente el desarrollo de un procedimiento de soldadura sobre este, confirmando su bajo nivel de soldabilidad.

La aplicación del material de aporte E312-16 si bien es para el tipo de aceros con escasa soldabilidad no influyó significativamente para reducir el agrietamiento del material base en la zona afectada por el calor, pero a la par, se debe mencionar que sobre los cordones depositados no se evidencia la presencia de discontinuidades significativas lo que potencialmente orienta a recomendar su uso.

Las dos condiciones de temperatura de precalentamiento practicadas en las probetas soldadas influyen directamente en el tamaño del área de afectación térmica y de las fisuras contenidas en esta área, es así, que para las probetas *Varestraint* en condiciones  $T_p$  de 300°C la longitud, longitud total y longitud combinada de las fisuras es mayor para estos especímenes como el área de afectación térmica, la misma tendencia siguen las probetas *Cruciform* soldadas bajo estas condiciones de precalentamiento ya que el área de la ZAC es mayor y la presencia de fisuras es mayoritaria en comparación de los especímenes de  $T_p$  de 200°C.

El fisuramiento en caliente ocurrido en las probetas *Varestraint* se debe a la correlación de dos factores: la restricción extrínseca impuesta mediante la fuerza de doblado y la microestructura susceptible al fisuramiento del metal base.

El fisuramiento en frío producido en las probetas *Cruciform* se interrelaciona directamente con la microestructura susceptible al agrietamiento del acero de alta resistencia AISI D3, la tensión residual producto del espesor del material y de la configuración de la junta en doble T, un nivel umbral de hidrógeno proveniente de fuentes como: la descomposición del recubrimiento del electrodo E312-16 o el recubrimiento de protección del material base que no fue removido en su totalidad de las placas.

De la evaluación no destructiva en las probetas *Varestraint* el cordón de soldadura depositado no presenta discontinuidades relevantes, pero del análisis metalográfico se reporta la existencia de fisuras producto de la solidificación de la soldadura en la zona afectada por el calor.

La primera evaluación por radiografía industrial sobre las probetas *Varestraint* no revela la existencia de discontinuidades internas, generando contradicción con los resultados generados de los ensayos metalográficos, para descartar cualquier mal manejo de las condiciones de trabajo o del procesamiento de las películas, se realizó una segunda evaluación radiográfica, en la cual se pudo evidenciar en los registros permanentes indicaciones en forma de poros los cuales son el inicio de las fisuras transversales internas.

De los resultados de la evaluación por ensayos no destructivos y destructivos de las probetas *Cruciform* se evidencia la presencia mayoritariamente de fisuras en el pie de soldadura, que afectaron al metal base en la zona afectada por el calor, región donde la concentración de tensiones residuales es alta y que potencialmente sirvió para la concentración de altos niveles de hidrógeno, de la predicción establecida por la norma AWS B4.0 el fisuramiento mayoritario se produce en el tercer filete, esto sucede en ambas probetas donde esta discontinuidad se propaga por toda la longitud de las mismas.

Por la naturaleza del acero y requisitos de la norma en el ensayo *Cruciform* fue necesario realizar un tratamiento térmico post soldadura de alivio de tensiones, el mismo que provoca un agrietamiento retrasado debido a la propagación de hidrógeno en regiones de concentración de tensiones, esto en concordancia con la

aparición de fisuras en el pie de soldadura con mayor longitud en la probeta *Cruciform 2* en los filetes segundo, tercero y cuarto, mientras, que para el *Cruciform 1* la generación de una fisura en el pie de la soldadura en estado sólido cercana a los 200°C del tercer filete permitió la liberación de tensión de la configuración y la no concentración de hidrógeno en un nivel umbral.

La expansión térmica del material base es mayoritaria en la probeta *Cruciform 2* que tiene un precalentamiento de 300°C, lo que deriva en la generación de tensiones residuales y una mayor distorsión de las placas de la configuración soldada.

Analizando la propia definición de soldabilidad que indica la capacidad de soldarse bajo condiciones impuestas por las estructuras, se puede concluir que este material a pesar de soldabilidad baja sí se recomienda para soldar juntas libres o sin restricción, es decir que no generan esfuerzos residuales. Sin embargo, se debe adoptar procedimientos especiales que incluyan tratamientos térmicos pre y post soldadura, secuencia de soldadura, etc.

## **4.2. Recomendaciones**

Aplicar un tratamiento térmico pre soldadura uniforme en toda la superficie del acero de alto porcentaje de carbono y cromo, reduciría la generación de tensiones residuales y una menor tasa de enfriamiento previniendo la generación de estructuras frágiles.

Reducir la distorsión que se genera en el acero AISI D3, adoptando técnicas que van desde: la estimación de la cantidad de distorsión que puede ocurrir durante el proceso de soldadura y realizar un ensamblaje de las juntas que pueda compensar la distorsión, aplicar unos correctos tratamientos térmicos pre y post soldadura que pueden reducir la distorsión y aplicar métodos para disminuir las tensiones residuales.

Tentativamente para un proceso de soldadura posterior, aplicar un electrodo de características de depósito austeníticas que serían las series de electrodos

revestidos de acero inoxidable E307 y E308, para evaluar las prestaciones que pueden brindar estos sobre aceros de alta resistencia.

Con la técnica correcta para aplicar un precalentamiento uniforme sobre toda la superficie del acero para herramientas, evaluar los resultados que se obtendrían si el tratamiento térmico previo incluye una temperatura superior a 250°C.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


- A5 Committee on Filler Metals and Allied Materials. (2018). *A5 Committee on Filler Metals and Allied Materials*. MIAMI: AWS.
- American Society for Metals (ASM). (1997). *Weld Integrity and Performance*. Ohio: ASM International.
- American Welding Society (AWS). (2011). *Welding Handbook. Materials and Applications, part 1*. Miami: Welding Handbook Committee.
- American Welding Society. (2001). *Welding Handbook, Welding Science and Technology* (Novena ed., Vol. 1). Miami: AWS.
- ASM. (1997). *ASM HANDBOOK, Volume 9, Metallography and Microstructures*. USA: ASM INTERNATIONAL.
- ASM. (1997). *Weld Integrity and Performance* . USA: ASM INTERNATIONAL .
- Avner, S. H. (1988). *Introducción a la Metalurgia Física*. México: McGraw-Hill.
- AWS A5.4. (2006). *AWS A5.4 Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. Miami: AWS.
- Böhler. (2010). *Böhler K100 Acero para trabajar en frío*. Austria: Böhler Edelstahl.
- END, L. (2019). *Reporte de inspeccion radiografica*. Quito.
- James M. Gere, Barry J. Goodno. (2009). *Mecanica de Materiales*. Mexico: Cengage Learning Latin America.
- Jeffus, L. (2009). *SOLDADURA Principios y aplicaciones*. Madrid : PARAINFO.
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. Hoboken, New Jersey.: Wiley.
- Lippold, J. C. (2015). *Welding Metallurgy and Weldability*. Hoboken, New Jersey: WILEY.
- Palmer, F. R., Luerssen, G., & Pendleton, J. (1986). *Acero Para Herramientas*. México: Representaciones y Servicios de Ingeniería, S. A.
- Phillips, D. H. (2016). *Welding Engineering*. United Kingdom: Wiley.
- Ruiz, A. (2009). *Discontinuidades del metal base y de la soldadura*. Lima: HUNT LNG OPERATING S.A.C.
- Shackelford, J. (1992). *Cinecia de materiales para ingenieros. 3ra. ed.* . México: Prentice Hall Hispanoamerica.
- Soldexa. (2012). *Manual de Soldadura & Catálogo de Productos* . Lima: Soldexa Oerlikon.
- Sotomayor, V. (2017). *Radiografía Industrial 2017A*. Quito .
- UDDEHOLM. (2011). *UDDEHOLM SVERKER 3*. Hagfors, Suecia: TRYCKERI KNAPPEN.
- UDDEHOLM. (2012). *Welding of tool steel* . Hagfors, Suecia: UDDEHOLM .

## **ANEXOS**


## **ANEXO I**

### **Detalle técnico de equipos utilizados**

**Detalle técnico de equipo de soldadura.**


Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Marca	Lincoln Electric	
Modelo	Invertec V350-Pro	
Potencia de entrada	200/220/380/415/440/1/3/50-60	
Salida nominal	350 [A] /34 [V]@ 60% 300 [A]/32 [V]@ 100%	
Corriente de entrada	32 [A]	
Rango de salida	5 - 425 [A]	
Dimensiones (ALXANXL)	376 x 338 x 709 [mm]	
Peso neto	37,50 [kg]	

**Detalle técnico de pirómetro.**


Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Marca	Fluke	
Modelo	68	
Rango de temperatura	-32 – 760 [°C]	
Superior a 510 [°C]	± 1 [°C]	
23 a 210 [°C]	± 1[°C]	
-18 a 23 [°C]	± 2[°C]	
-26 a -18 [°C]	± 2,5 [°C]	
-32 a -26 [°C]	± 3[°C]	
Tiempo de respuesta	500 [ms]	
Dimensiones	200 x 160 x 55 [mm]	
Peso neto	320 [g]	



### Detalle técnico de horno tratamiento térmico post soldadura.

Características	Especificaciones técnicas	Descripción gráfica
Marca Voltage Poder nominal [W] Capacidad de la cámara[l] peso [kg] rango de temperatura [°C] Controlador	Pol-EkoAparatura 230V 50 Hz 2400 112 65 +5°C por encima de la temperatura ambiente... +300°C microprocesador con pantalla LCD gráfica externa	


### Detalle técnico de desbastadora de pulido grueso.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo Marca Amperaje Voltaje HP Frecuencia RPM Dimensiones (ALXANXL) Peso neto	Metallurgical Apparatus BUEHLER LTD 8.2 [A] 220 [V] 60 [Hz] 3 1720 95 x 67 x 71 [cm] 75 [kg]	

### Detalle técnico de pulidora automática.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	FORCIMAT- FORCIPOL 2V	
Voltaje	230 [V]	
Marca	Metkon	
Capacidad	6 probetas	
Potencia	150 [W]/600 [W]	
Frecuencia	50/60 [Hz]	
RPM	50-600	
Dimensiones (ALXANXL)	95 x 69 x 70 [cm]	
Peso neto	27kg-75 [kg]	

### Detalle técnico de equipo microscópico.

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	GX41	
Marca	OLYMPUS	
Sensor de imágenes	CMOS color	
Tamaño del sensor	13 [mm]	
Resolución (máx.)	2048 x 1532 [píxeles]	
Tamaño del píxel	3,2 x 3,2 [µm]	
Convertor A/D	10 [bits]	
Tiempos de exposición	60 [µs] - 1,75 [s]	
Control de PC	32 [bit] y 64 [bit]	

**Detalle técnico de durómetro.**

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Modelo	HR-150A	
Marca	HARDROCKER	
Escalas de dureza	HRB, HRC	
Rango de medición	0-100 [HRB], 0-100 [HRC]	
Dimensiones (ALXANXL)	700 x 240 x 520 [mm]	
Tipo	Manual	
Color	Blanco	

**Detalle técnico de equipo de RX.**

Características	Especificación técnica	Descripción gráfica
Marca	BALTEAU	
Modelo	BALTOGRAPHE BF 200-10	
Voltaje	200 - 240 V / 10A / 50 Hz	
Alto voltaje minimo util	40 kV	
Alto voltaje maximo util	220 kV - 10 mA	
Angulo de haz	40°	



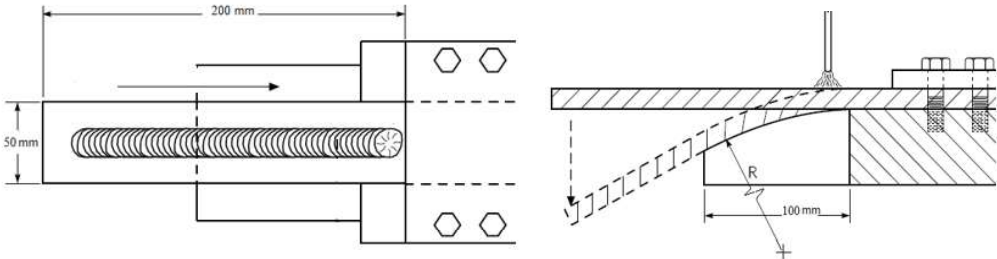
**Detalle técnico de yugo magnético.**

Características	Especificaciones técnicas	Descripción gráfica
<p>Modelo</p> <p>Peso</p> <p>Amplitud de las patas</p> <p>Longitud del cable</p> <p>Ciclo de servicio</p> <p>Requisitos eléctricos</p>	<p>Magnaflux</p> <p>115 V: 7.4 lb / 3.4 kg</p> <p>230 V: 7.2 lb / 3.3 kg</p> <p>0-12 pulg. / 0-30 cm</p> <p>12 ft / 3.7 m</p> <p>115V - 60 Hz: 6.0 A</p> <p>230V - 50/60 Hz: 2.7 A</p>	



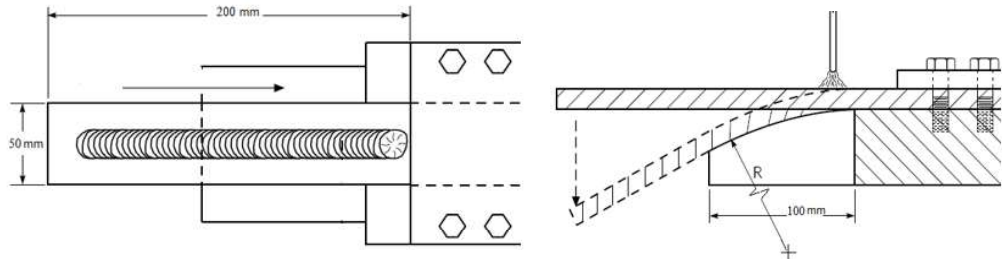
**ANEXO II**

**WPS**



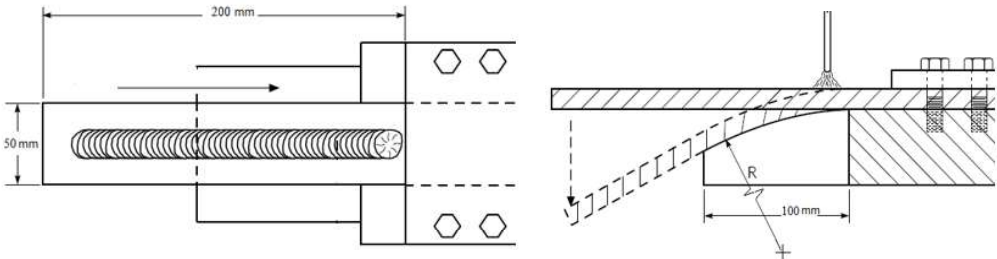
**WPS. Ensayo Varestraint P1.**

 <b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> <b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)</b>				WPS No. 1				
<b>Nombre de compañía:</b> Escuela Politécnica Nacional <b>Según norma:</b> AWS B4.0-2007 <b>PQR Soporte N.º:</b> N/A			<b>N.º Identificación:</b> Varestraint P1 <b>Fecha:</b> 22/05/19 <b>Realizado por:</b> Alvarez Jimmy <b>Organización:</b> Escuela Politécnica Nacional					
<b>Artículo II. Junta utilizada</b> Tipo de junta: N/A Cordón de respaldo: N/A Placa de respaldo: N/A Preparación de la junta: N/A Separación entre juntas: N/A		<b>Artículo II. Técnica de soldadura</b> Proceso de soldadura: SMAW Tipo de soldadura: Manual (X) Semiautomática ( ) Automática ( ) Soldadura a: Un lado (X) Dos lados ( ) Cordón de respaldo: Si ( ) No (X) Limpieza: Pase raíz: Cepillo metálico Pase siguiente: Cepillo metálico						
<b>Artículo III. Metal base</b> Especificación y grado: AISI D3 Espesor nominal: 10 mm Longitud: 300 mm Ancho: 50 mm		<b>Artículo V. Posición de soldadura</b> Posición soldadura: 1G Progresión: De derecha a izquierda Técnica: Un pase (X) Varios pases ( )						
<b>Artículo IV. Metal de aporte</b> Especificación: AWS A5.4 Clasificación: E312-16 Diámetro: 3,2 mm Casa comercial: Kiswel Denominación comercial: E312		<b>Artículo VI. Tratamiento Térmico</b> Pre soldadura: Pre calentamiento Temperatura: 234 °C Tiempo: 781 s Post soldadura: N/A Temperatura: N/A Tiempo: N/A						
<b>Artículo VII. Notas</b> Asegurar limpieza Calentar uniformemente la probeta Verificar perpendicularidad en la configuración								
Número de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (V)	Velocidad de avance mm/s	Técnica de soldadura	
	Clase	∅	Tipo de polaridad	Intensidad (A)			Oscilado	Recto
1	E312-16	3,2	DC +	120		1,65		X

**WPS. Ensayo Varestraint P2.**



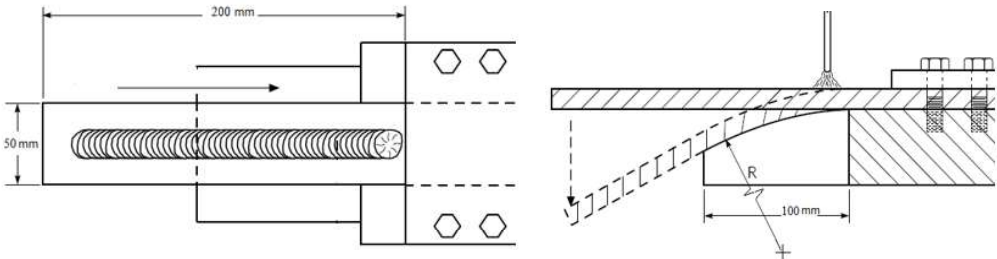
 <b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> <b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)</b>				WPS No. 2				
<b>Nombre de compañía:</b> Escuela Politécnica Nacional <b>Según norma:</b> AWS B4.0-2007 <b>PQR Soporte N.º:</b> N/A			<b>N.º Identificación:</b> Varestraint P2 <b>Fecha:</b> 22/05/19 <b>Realizado por:</b> Alvarez Jimmy <b>Organización:</b> Escuela Politécnica Nacional					
<b>Artículo II. Junta utilizada</b> Tipo de junta: N/A Cordón de respaldo: N/A Placa de respaldo: N/A Preparación de la junta: N/A Separación entre juntas: N/A		<b>Artículo II. Técnica de soldadura</b> Proceso de soldadura: SMAW Tipo de soldadura: Manual (X) Semiautomática ( ) Automática ( ) Soldadura a: Un lado (X) Dos lados ( ) Cordón de respaldo: Si ( ) No (X) Limpieza: Pase raíz: Cepillo metálico Pase siguiente: Cepillo metálico						
<b>Artículo III. Metal base</b> Especificación y grado: AISI D3 Espesor nominal: 10 mm Longitud: 300 mm Ancho: 50 mm		<b>Artículo V. Posición de soldadura</b> Posición soldadura: 1G Progresión: De derecha a izquierda Técnica: Un pase (X) Varios pases ( )						
<b>Artículo IV. Metal de aporte</b> Especificación: AWS A5.4 Clasificación: E312-16 Diámetro: 3,2 mm Casa comercial: Kiswel Denominación comercial: E312		<b>Artículo VI. Tratamiento Térmico</b> Pre soldadura: Pre calentamiento Temperatura: 220 °C Tiempo: 758 s Post soldadura: N/A Temperatura: N/A Tiempo: N/A						
<b>Artículo VII. Notas</b> Asegurar limpieza Calentar uniformemente la probeta Verificar perpendicularidad en la configuración								
								
Número de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (V)	Velocidad de avance mm/s	Técnica de soldadura	
	Clase	∅	Tipo de polaridad	Intensidad (A)			Oscilado	Recto
1	E312-16	3,2	DC +	130		1,56		X

**WPS. Ensayo Varestraint P3.**



 <b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> <b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)</b>				WPS No. 3				
<b>Nombre de compañía:</b> Escuela Politécnica Nacional <b>Según norma:</b> AWS B4.0-2007 <b>PQR Soporte N.º:</b> N/A			<b>N.º Identificación:</b> Varestraint P3 <b>Fecha:</b> 22/05/19 <b>Realizado por:</b> Alvarez Jimmy <b>Organización:</b> Escuela Politécnica Nacional					
<b>Artículo II. Junta utilizada</b> Tipo de junta: N/A Cordón de respaldo: N/A Placa de respaldo: N/A Preparación de la junta: N/A Separación entre juntas: N/A		<b>Artículo II. Técnica de soldadura</b> Proceso de soldadura: SMAW Tipo de soldadura: Manual (X) Semiautomática ( ) Automática ( ) Soldadura a: Un lado (X) Dos lados ( ) Cordón de respaldo: Si ( ) No (X) Limpieza: Pase raíz: Cepillo metálico Pase siguiente: Cepillo metálico						
<b>Artículo III. Metal base</b> Especificación y grado: AISI D3 Espesor nominal: 10 mm Longitud: 300 mm Ancho: 50 mm		<b>Artículo V. Posición de soldadura</b> Posición soldadura: 1G Progresión: De derecha a izquierda Técnica: Un pase (X) Varios pases ( )						
<b>Artículo IV. Metal de aporte</b> Especificación: AWS A5.4 Clasificación: E312-16 Diámetro: 3,2 mm Casa comercial: Kismet Denominación comercial: E312		<b>Artículo VI. Tratamiento Térmico</b> Pre soldadura: Pre calentamiento Temperatura: 336 °C Tiempo: 920 s Post soldadura: N/A Temperatura: N/A Tiempo: N/A						
<b>Artículo VII. Notas</b> Asegurar limpieza Calentar uniformemente la probeta Verificar perpendicularidad en la configuración								
								
Número de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (V)	Velocidad de avance mm/s	Técnica de soldadura	
	Clase	∅	Tipo de polaridad	Intensidad (A)			Oscilado	Recto
1	E312-16	3,2	DC +	120		1,58		X

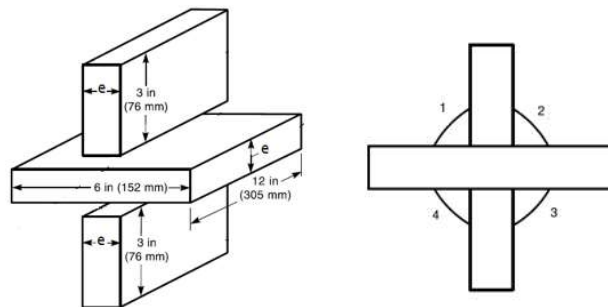


**WPS. Ensayo Varestraint P4.**

 <b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL INGENIERÍA MECÁNICA ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)</b> 		WPS No. 4						
<b>Nombre de compañía:</b> Escuela Politécnica Nacional <b>Según norma:</b> AWS B4.0-2007 <b>PQR Soporte N.º:</b> N/A			<b>N.º Identificación:</b> Varestraint P4 <b>Fecha:</b> 22/05/19 <b>Realizado por:</b> Alvarez Jimmy <b>Organización:</b> Escuela Politécnica Nacional					
<b>Artículo II. Junta utilizada</b> Tipo de junta: N/A Cordón de respaldo: N/A Placa de respaldo: N/A Preparación de la junta: N/A Separación entre juntas: N/A		<b>Artículo II. Técnica de soldadura</b> Proceso de soldadura: SMAW Tipo de soldadura: Manual (X) Semiautomática ( ) Automática ( ) Soldadura a: Un lado (X) Dos lados ( ) Cordón de respaldo: Si ( ) No (X) Limpieza: Pase raíz: Cepillo metálico Pase siguiente: Cepillo metálico						
<b>Artículo III. Metal base</b> Especificación y grado: AISI D3 Espesor nominal: 10 mm Longitud: 300 mm Ancho: 50 mm		<b>Artículo V. Posición de soldadura</b> Posición soldadura: 1G Progresión: De derecha a izquierda Técnica: Un pase (X) Varios pases ( )						
<b>Artículo IV. Metal de aporte</b> Especificación: AWS A5.4 Clasificación: E312-16 Diámetro: 3,2 mm Casa comercial: Kiswel Denominación comercial: E312		<b>Artículo VI. Tratamiento Térmico</b> Pre soldadura: Pre calentamiento Temperatura: 348 °C Tiempo: 908 s Post soldadura: N/A Temperatura: N/A Tiempo: N/A						
<b>Artículo VII. Notas</b> Asegurar limpieza Calentar uniformemente la probeta Verificar perpendicularidad en la configuración								
								
Número de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (V)	Velocidad de avance mm/s	Técnica de soldadura	
	Clase	∅	Tipo de polaridad	Intensidad (A)			Oscilado	Recto
1	E312-16	3,2	DC +	130		1,62		X



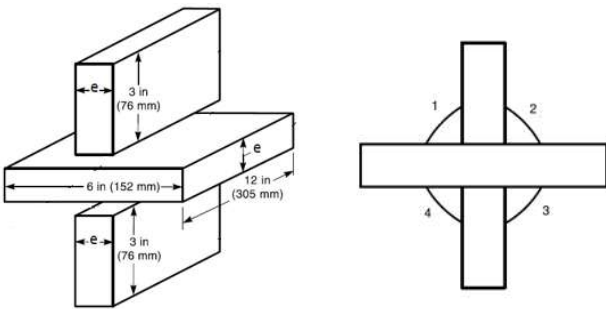
## WPS. Ensayo *Cruciform 1.*

 <b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> <b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)</b>				WPS No. 5
<b>Nombre de compañía:</b> Escuela Politécnica Nacional <b>Según norma:</b> AWS B4.0-2007 <b>PQR Soporte N.º:</b> N/A		<b>N.º Identificación:</b> <i>Cruciform 1</i> <b>Fecha:</b> 22/05/19 <b>Realizado por:</b> Alvarez Jimmy <b>Organización:</b> Escuela Politécnica Nacional		
<b>Artículo II. Junta utilizada</b> Tipo de junta: N/A Cordón de respaldo: N/A Placa de respaldo: N/A Preparación de la junta: N/A Separación entre juntas: N/A		<b>Artículo II. Técnica de soldadura</b> Proceso de soldadura: SMAW Tipo de soldadura: Manual (X) Semiautomática ( ) Automática ( ) Soldadura a: Un lado (X) Dos lados ( ) Cordón de respaldo: Si ( ) No (X) Limpieza: Pase raíz: Cepillo metálico		
<b>Artículo III. Metal base</b> Especificación y grado: AISI D3 Espesor nominal: 15 mm Longitud: 305 mm Ancho: 76 mm; 152 mm		<b>Artículo V. Posición de soldadura</b> Posición soldadura: 2F Progresión: De derecha a izquierda Técnica: Un pase ( ) Varios pases (X)		
<b>Artículo IV. Metal de aporte</b> Especificación: AWS A5.4 Clasificación: E312-16 Diámetro: 3,2 mm Casa comercial: Kíswel Denominación comercial: E312		<b>Artículo VI. Tratamiento Térmico</b> Pre soldadura: Pre calentamiento Temperatura: 214 °C Tiempo: 763 s Post soldadura: Alivio de esfuerzos Temperatura: 300 °C Tiempo: 2 h		
<b>Artículo VII. Notas</b> Asegurar limpieza Calentar uniformemente la probeta Verificar perpendicularidad en la configuración				



Número de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (V)	Velocidad de avance mm/s	Técnica de soldadura	
	Clase	∅	Tipo de polaridad	Intensidad (A)			Oscilado	Recto
1	E312-16	3,2	DC +	130		2,12		X
2	E312-16	3,2	DC +	120		1,94		X
3	E312-16	3,2	DC +	140		2,09		X
4	E312-16	3,2	DC +	130		2,13		X

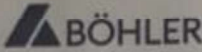
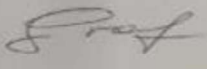
## WPS. Ensayo *Cruciform* 2.

 <b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b> <b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)</b>				WPS No. 6				
<b>Nombre de compañía:</b> Escuela Politécnica Nacional <b>Según norma:</b> AWS B4.0-2007 <b>PQR Soporte N.º:</b> N/A			<b>N.º Identificación:</b> <i>Cruciform 2</i> <b>Fecha:</b> 22/05/19 <b>Realizado por:</b> Alvarez Jimmy <b>Organización:</b> Escuela Politécnica Nacional					
<b>Artículo II. Junta utilizada</b> Tipo de junta: N/A Cordón de respaldo: N/A Placa de respaldo: N/A Preparación de la junta: N/A Separación entre juntas: N/A		<b>Artículo II. Técnica de soldadura</b> Proceso de soldadura: SMAW Tipo de soldadura: Manual (X) Semiautomática ( ) Automática ( ) Soldadura a: Un lado (X) Dos lados ( ) Cordón de respaldo: Si ( ) No (X) Limpieza: Pase raíz: Cepillo metálico Pase siguiente: Cepillo metálico						
<b>Artículo III. Metal base</b> Especificación y grado: AISI D3 Espesor nominal: 15 mm Longitud: 305 mm Ancho: 76 mm; 152 mm		<b>Artículo V. Posición de soldadura</b> Posición soldadura: 2F Progresión: De derecha a izquierda Técnica: Un pase ( ) Varios pases (X)						
<b>Artículo IV. Metal de aporte</b> Especificación: AWS A5.4 Clasificación: E312-16 Diámetro: 3,2 mm Casa comercial: Kiswel Denominación comercial: E312		<b>Artículo VI. Tratamiento Térmico</b> Pre soldadura: Pre calentamiento Temperatura: 308 °C Tiempo: 924 s Post soldadura: Alivio de esfuerzos Temperatura: 300 °C Tiempo: 2 h						
<b>Artículo VII. Notas</b> Asegurar limpieza Calentar uniformemente la probeta Verificar perpendicularidad en la configuración								
Número de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (V)	Velocidad de avance mm/s	Técnica de soldadura	
	Clase	∅ mm	Tipo de polaridad	Intensidad (A)			Oscilado	Recto
1	E312-16	3,2	DC +	120		2,04		X
2	E312-16	3,2	DC +	130		2,19		X
3	E312-16	3,2	DC +	160		1,54		X
4	E312-16	3,2	DC +	140		2,02		X

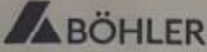
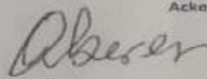
## **ANEXO III**

### **Certificación de origen del acero AISI D3**

# Certificación de origen del acero AISI D3, Ensayo Varestraint

		QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015 certification EN ISO 14001:2015 certification		WERKSZEUGNIS TEST REPORT EN 10204-2.2			
voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG Mariazellerstrasse 25 / 8605 Kapfenberg / AUSTRIA				Nr. / No.: 800179 / M5 / C10 / 2018.09.12 Seite / Page: 1 / 1			
<b>Besteller/Purchaser/Acheteur:</b> ACEROS BOEHLER DEL ECUADOR S.A. DE LAS AVELLANAS E1-112 Y PAN NORTE KM 5.1/2 H0103C QUITO ECUADOR			<b>Empfänger/Consignee/Destinaire:</b> ACEROS BOEHLER DEL ECUADOR S.A. DE LAS AVELLANAS E1-112 Y PAN NORTE KM 5.1/2 H0103C QUITO ECUADOR				
<b>Bestell-Nr./Purchaser order No./No. de commande:</b> LA 1733 / 2018.07.16			<b>Empfängerref.-Nr./Receiver reference-No./Référence destinataire:</b> -				
<b>Werksauftrags-Nr./Works order-No./No. de la commande de l'usine:</b> 4310293808 / -			<b>Lieferschein-Nr./Delivery note-No./Avis d'expédition du client:</b> 51545664. / 2018.07.27				
<b>Prüfgegenstand/Object of test/Object d'examen:</b> BÖHLER K100 W.Nr. 1.2080 bar, annealed max. 248 HB, sandblasted Endcondition: 2x hot abrasive cut			<b>Anforderungen/Requirements/Exigence:</b> -				
<b>Umfang der Lieferung/Volume of delivery/liste descriptive</b>							
Pos./Los	Abmessung Dimensions	Länge Length Longueur	Stückzahl No. of Pieces No. de Pièces	Gewicht kg Weight kgs Poids kg	Mat.-ID	Prüf-Nr. Test No. Eprouvette	Schmelze-Nr. Heat No. No. de coulée
90/1	FL 150 x 15 mm	3000-4000 mm		70,0	YF4L	1674639-3	D12765
<b>Chemische Zusammensetzung/Chemical Composition/Composition chimique (%)</b>						<b>Schmelze-Nr. Heat No. No. de coulée</b>	
<b>Schmelzanalyse/Chemical Composition</b> Erhmelzungsart/Steelmaking Process: Airmelt						D12765	
C	Si	Mn	P	S	Cr		
1,95	0,35	0,36	0,023	<0,0003	11,01		
<b>Mechanische Eigenschaften/Mechanical Properties/Caracteristiques mecaniques</b>						<b>Prüf-Nr. Test No. Eprouvette</b>	
Pos./Los	Härte / Zugfestigkeit Hardness / Tensile Strength Durete / Résistance à la traction						
90/1	246		HBW			1674639-3	
voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A.							
<b>Radioaktivitätskontrolle/Radioactivity inspection: Co-60&lt;0,1Bq/g</b> Hiermit kleiner als Grenzwert in der anzuwendenden Spezifikation IAEA RS-G-1.7 für unbedenkliche Stoffe. Therefore smaller than upper limit required according to specification IAEA RS-G-1.7 for inoffensive material. Wir bestätigen hiermit, dass die obengenannten Erzeugnisse den Bestellvorschriften entsprechen. We hereby certify that the above mentioned products are consistent with the order prescriptions.							
voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG Mariazellerstrasse 25 8605 Kapfenberg, AUSTRIA www.boehler-edelstahl.com REGISTRIERGERICHT LANDESGERICHT LEOBEN / FN 294435v			Abteilung / Department <b>B10CERMAT</b>  AUSSTELLER / ORIGINATOR / AUTEUR		 Abnahmebeauftragter Inspection Representative		

# Certificación de origen del acero AISI D3, Ensayo Cruciform

		QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015 certification EN ISO 14001:2015 certification		WERKSZEUGNIS TEST REPORT EN 10204-2.2			
voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG Mariazellerstrasse 25 / 8605 Kapfenberg / AUSTRIA				Nr. / No.: 799682 / M11 / C13 / 2019.02.04 Seite / Page: 1 / 1			
<b>Besteller/Purchaser/Acheteur:</b> voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A. DE LAS AVELLANAS E1-112 Y PAN NORTE KM 5.1/2 H0103C QUITO ECUADOR			<b>Empfänger/Consignee/Destinaire:</b> voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A. DE LAS AVELLANAS E1-112 Y PAN NORTE KM 5.1/2 H0103C QUITO ECUADOR				
<b>Bestell-Nr./Purchaser order No./No. de commande:</b> LA 1767 / 2019.01.02			<b>Empfängerref.-Nr./Receiver reference-No./Référence destinataire:</b> -				
<b>Werksauftrags-Nr./Works order-No./No. de la commande de l'usine:</b> 4310301090 / -			<b>Lieferschein-Nr./Delivery note-No./Avis d'expédition du client:</b> 51592387. / 2019.01.18				
<b>Prüfgegenstand/Object of test/Object d'examen:</b> BÖHLER K100 W.Nr. 1.2080 bar, annealed max. 248 HB, sandblasted Endcondition: 2x hot abrasive cut			<b>Anforderungen/Requirements/Exigence:</b>				
<b>Umfang der Lieferung/Volume of delivery/liste descriptive</b>							
Pos./Los	Abmessung Dimensions Dimensions	Länge Length Longueur	Stückzahl No. of Pieces No. de Pieces	Gewicht kg Weight kgs Poids kg	Mat-ID	Prüf-Nr. Test No. Eprouvette	Schmelze-Nr. Heat No. No. de coulée
10/1	FL 50 x 10 mm	3000-4000 mm		80,0	YD6G	1666957-1	D12496
<b>Chemische Zusammensetzung/Chemical Composition/Composition chimique (%)</b>							
<b>Schmelzanalyse/Chemical Composition</b> Erschmelzungsart/Steelmaking Process: Almet							Schmelze-Nr. Heat No. No. de coulée
C	Si	Mn	P	S	Cr		
2,05	0,26	0,41	0,023	<0,0003	11,35	D12496	
<b>Mechanische Eigenschaften/Mechanical Properties/Caractéristiques mécaniques</b>							
Pos./Los	Härte / Zugfestigkeit Hardness / Tensile Strength Dureté / Résistance à la traction					Prüf-Nr. Test No. Eprouvette	
10/1	241		HBW			1666957-1	
voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A.							
Radioaktivitätskontrolle/Radioactivity inspection: Co-60<0,1Bq/g Hiermit kleiner als Grenzwert in der anzuwendenden Spezifikation IAEA RS-G-1.7 für unbedenkliche Stoffe. Therefore smaller than upper limit required according to specification IAEA RS-G-1.7 for inoffensive material. Wir bestätigen hiermit, dass die obengenannten Erzeugnisse den Bestellvorschriften entsprechen. We hereby certify that the above mentioned products are consistent with the order prescriptions.							
voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG Mariazellerstrasse 25 8605 Kapfenberg, AUSTRIA www.bohler-edelstahl.com REGISTRIERGERICHT LANDESGERICHT LEOBEN / FN 294435v			Abteilung / Department <b>B10CERMAT</b>  AUSSTELLER / ORIGINATOR / AUTEUR		Ackerer  Abnahmebeauftragter Inspection Representative		