



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“TECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN POR  
SOLDADURA DE ÁLABES DE TURBINAS  
HIDRÁULICAS CONSTRUIDAS DE ACERO  
INOXIDABLE MARTENSÍTICO ASTM A743 CA-6NM  
(UNS J91540)”**

**CAÑIZARES SILVA CRISTHIAN FABIÁN  
QUINCHUELA PAUCAR JUAN CARLOS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**  
**TIPO: PROPUESTAS TECNOLÓGICAS**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2017**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2015-10-08

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparada por:

**CAÑIZARES SILVA CRISTHIAN FABIÁN**

Titulado:

**“TECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN POR SOLDADURA DE  
ÁLABES DE TURBINAS HIDRÁULICAS CONSTRUIDAS DE ACERO  
INOXIDABLE MARTENSÍTICO ASTM A743 CA-6NM (UNS J91540)”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos José Santillán Mariño  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

Ing. Julio César Villavicencio Cevallos  
**ASESOR DE TESIS**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2015-10-08

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparada por:

**QUINCHUELA PAUCAR JUAN CARLOS**

Titulado:

**“TECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN POR SOLDADURA DE  
ÁLABES DE TURBINAS HIDRÁULICAS CONSTRUIDAS DE ACERO  
INOXIDABLE MARTENSÍTICO ASTM A743 CA-6NM (UNS J91540)”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos José Santillán Mariño  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

Ing. Julio César Villavicencio Cevallos  
**ASESOR DE TESIS**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

## **EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** CAÑIZARES SILVA CRISTHIAN FABIÁN

**TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN:** **“TECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN POR SOLDADURA DE ÁLABES DE TURBINAS HIDRÁULICAS CONSTRUIDAS DE ACERO INOXIDABLE MARTENSÍTICO ASTM A743 CA-6NM (UNS J91540)”**

**Fecha de Examinación:** 2017-07-12

### **RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes <b>DIRECTOR DE TESIS</b>			
Ing. Julio César Villavicencio Cevallos <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

\_\_\_\_\_  
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

## EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** QUINCHUELA PAUCAR JUAN CARLOS

**TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN:** “TECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN POR SOLDADURA DE ÁLABES DE TURBINAS HIDRÁULICAS CONSTRUIDAS DE ACERO INOXIDABLE MARTENSÍTICO ASTM A743 CA-6NM (UNS J91540)”

**Fecha de Examinación:** 2017-07-12

### **RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes <b>DIRECTOR DE TESIS</b>			
Ing. Julio César Villavicencio Cevallos <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

\_\_\_\_\_  
Ing. Geovanny Guillermo Novillo Andrade  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El Trabajo de Titulación que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Cañizares Silva Cristhian Fabián**

---

**Quinchuela Paucar Juan Carlos**

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a la persona quien me ha encaminado y me ha brindado un sincero y cálido cariño, sin esperar nada a cambio, el único ser que podría amarme de esa manera tan única e incondicional. Mechita esto es para ti, gracias por todo lo que me has brindado, espero nunca fallarte. El hombre que me enseñó todo lo que necesitaba para ser un verdadero hombre de bien y mi ejemplo a seguir, gracias don Bolívar. Finalmente, gran Zack, ahora ya soy un señorón, gracias por todo hermano, te extraño mucho. “Maybe one day i’ll fly next to you...”

**Cristhian Cañizares Silva**

El presente Trabajo de Titulación lo dedico a toda mi familia y amigos ya que de una u otra manera han aportado para poder alcanzar este objetivo el cual solo me impulsa a seguir adelante y comprometerme a la realización de nuevos retos que impulsen mi crecimiento personal y profesional.

**Juan Carlos Quinchuela Paucar**

## **AGRADECIMIENTO**

Un agradecimiento muy profundo a la ESPOCH, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, a su personal docente y administrativo que conjuntamente tuvieron el afán de ayudarnos a cumplir con el sueño de ser profesionales. Agradezco a mis padres Mechita y Fabián, les debo todo y los amo con todo el corazón, gracias también a ti Criss por darme fuerzas cuando empezaba a bajar los brazos, siempre alentarme y saber comprenderme de la forma que soy. Al Ing. Mario Pástor por ser el mentalizador de este sueño y una fuente de inspiración, al Ing. Isaías Caicedo por haber sido tan excelente ser humano y amigo, de igual manera al Ing. Julio Villavicencio e Ing. Luis Tierra, por habernos apoyado y ayudado en la culminación del presente trabajo. Un sincero y profundo agradecimiento para todo el personal del CIRT, en particular al Ing. Marcelo Toapanta por ser nuestro guía durante toda la ejecución de este proyecto, y más que nada un hombre sincero y gran amigo. Finalmente, agradecerte a ti Juan Carlos, que supiste tener la paciencia suficiente para soportarme y poder realizar este arduo trabajo juntos, de igual manera Paúl por estar siempre presente y ayudarnos o hacernos reír. Ustedes amigos que tal vez estén leyendo esto, de verdad muchas ¡gracias por su amistad sincera!

**Cristhian Cañizares Silva**

En primer lugar, agradecerle a Dios y a la Virgen Dolorosa por concederme la salud y la vida, además a mis padres Juan y Consuelo, mi hermana Paola, mi nana Juana y toda mi familia por ser el motor que me impulsa a seguir adelante y ser el ejemplo de respeto, responsabilidad, amor y unión para toda mi vida, este objetivo alcanzado es fruto de mucho sacrificio que sin lugar a duda no hubiera sido posible plasmarlo sin el apoyo de mis amigos y mi compañero del Trabajo de Titulación Cristhian, con los cuales palmo a palmo me han apoyado incondicionalmente durante esta etapa y se han creado lazos de amistad que durarán para siempre, es imposible no sentirme agradecido con La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica que me han formado tanto académica como personalmente a lo largo de la carrera dándome una profesión y rumbo a mi vida, además un agradecimiento sincero a todo el personal del CIRT ya que sin su apoyo no hubiera sido posible el desarrollo de esta investigación. ¡Muchas Gracias!

**Juan Carlos Quinchuela Paucar**

## RESUMEN

El principal objetivo de esta propuesta tecnológica es desarrollar los procedimientos de soldadura e inspección para la recuperación de álabes de turbinas hidráulicas construidas de acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM. El método de recuperación es por soldadura, ya que permite rellenar grandes volúmenes, unir elementos separados por fractura o incorporar nuevos elementos de reemplazo. Esta investigación estudia el control de los cambios severos producidos en las microestructuras y, por lo tanto, en las propiedades mecánicas del material, debido a las variaciones importantes de temperatura. Para la recuperación se empleó tres procedimientos de soldadura, que incluyen combinaciones SMAW-GMAW-GTAW. Se usaron materiales de aporte austenítico (ER309LMo) para los primeros pases y martensítico (E410NiMo-15 o ER410NiMo) para los pases siguientes. Se realizó precalentamiento y PWHT para el alivio de tensiones residuales, además del control de temperatura entre pases, con un aporte de energía por debajo de 1 KJ/mm. El máximo ancho de la ZAT fue 3 mm, similar al obtenido de 2.94 mm de las ecuaciones derivadas de la de Rosenthal. Ensayos no destructivos (END) de tipo VT, PT, MT y UT se realizaron en todos los cupones. Posteriormente se realizaron ensayos de tensión y doblez lateral guiado, cumpliendo con los requerimientos mínimos de la especificación del material, con valores de resistencia mínima a la tensión de 829 MPa. Se evaluó la dureza y microdureza, mostrando una reducción máxima de 23.5% luego del PWHT. Finalmente se evaluó la microestructura, encontrándose un refinamiento en el tamaño de la martensita revenida, ligera presencia de islas de ferrita delta y austenita retenida; además de la formación de carburos en menor proporción en los límites de grano. Los WPS fueron calificados con los ensayos mecánicos obteniéndose sus respectivos PQR, validando la calidad de los procedimientos de soldadura. Se recomienda continuar con el estudio del ciclo térmico para la disolución de carburos, análisis fractográficos en las probetas de tensión para entender mejor los mecanismos de falla producidos y la influencia del aporte austenítico en la resistencia a carga cíclica y absorción de energía (impacto) de los cupones de soldadura.

PALABRAS CLAVES: <TURBINAS HIDRÁULICAS> <RECUPERACIÓN>  
<ACERO INOXIDABLE MARTENSÍTICO> <TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA> <ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS> <ENSAYOS MECÁNICOS>  
<METALOGRAFÍA> <MICRODUREZA>

## ABSTRACT

The main objective of this technological proposal is to develop the welding and inspection procedures for the recovery of blades of hydraulic turbines constructed of martensitic stainless steel ASTM A743 CA-6NM. The method of recovery is by welding, as it allows filling large volumes, joining elements separated by fracture or incorporating new replacement elements. This research studies the control of the severe changes produced in the microstructures, and therefore, in the mechanical properties of the material, due to the important variations of temperature. For the recovery, three welding processes were employed, including combinations SMAW-GMAW-GTAW. Austenitic materials were used (ER309LMo) for the first passes and martensitic (E410NiMo-15 or ER410NiMo) for the forthcoming passes. Preheating and PWHT were carried out for the relief of residual stresses, in addition to temperature control among passes, with an energy input below 1 KJ/mm. The maximum width of the HAZ was 3 mm, similar to the target of 2.94 mm of the equations derived from Rosenthal. Nondestructive tests (NDT) of VT, PT, MT and UT type were performed on all coupons. Subsequently, tensile and lateral guide bend tests were performed, complying with the minimum requirements of the material specification, with minimum tensile strength values of 829 MPa. Hardness and microhardness were evaluated, showing a maximum reduction of 23.5% after PWHT. Finally, the microstructure was evaluated, finding a refinement in the size of the martensite, slight presence of islands of delta ferrite and retained austenite; in addition to the formation of carbides in a lower proportion in the grain boundaries. The Welding Procedure Specifications were scored with the mechanical tests obtaining its respective PQR, validating the quality of the welding procedures. It is recommended to continue the study of the thermal cycle for the dissolution of carbides, fractographic analyses in the tensile specimens to better understand the mechanisms of produced failure and the influence of the austenitic contribution in the resistance to cycle load and energy absorption (impact) of welding coupons.

KEY WORDS: <HYDRAULIC TURBINES> <RECOVERY> <MARTENSITIC STAINLESS STEEL> <POST WELD HEAT TREATMENT> <NONDESTRUCTIVE TESTS> <MECHANICAL TESTS> <METALLOGRAPHY> <MICROHARDNESS>

## CONTENIDO

	Pág.
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Problema .....	4
1.3 Justificación .....	4
1.4 Objetivos .....	5
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	5
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	5
<b>2. MARCO REFERENCIAL DE LAS TECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN POR SOLDADURA DE ÁLABES DE TURBINAS HIDRÁULICAS DE ACERO ASTM A743 CA-6NM</b>	
2.1 Características geométricas, tipos y funcionamiento de los álabes .....	7
2.1.1 <i>Tipos de álabes</i> .....	7
2.1.2 <i>Geometría y funcionamiento según el tipo</i> .....	8
2.2 Propiedades físicas, químicas y mecánicas del acero ASTM A743 CA-6NM .....	11
2.2.1 <i>Aceros Inoxidables Martensíticos</i> .....	12
2.2.2 <i>Principales fases presentes dentro de los aceros inoxidables</i> .....	16
2.2.2.1 <i>Martensita (<math>\alpha'</math>)</i> .....	16
2.2.2.2 <i>Ferrita (<math>\delta</math>)</i> .....	18
2.2.2.3 <i>Austenita (<math>\gamma</math>)</i> .....	18
2.2.2.4 <i>Carburos (<math>M_xC_y</math>)</i> .....	19
2.2.3 <i>Aceros ASTM A743 CA-6NM</i> .....	19
2.3 Características de trabajo y tipos de desgaste en los álabes .....	23
2.3.1 <i>Características de trabajo</i> .....	23
2.3.2 <i>Tipos de desgaste en los álabes</i> .....	24
2.3.2.1 <i>Erosión</i> .....	25
2.3.2.2 <i>Abrasión</i> .....	25
2.3.2.3 <i>Cavitación</i> .....	26
2.4 Métodos de recuperación aplicados en los álabes y rodetes.....	26

2.5	Características de los procesos de soldadura empleados en la recuperación.	28
2.5.1	<i>Metalurgia de la soldadura</i>	28
2.5.1.1	<i>Zonas metalúrgicas presentadas en el pozo de soldadura</i>	29
2.5.1.2	<i>Soldabilidad</i>	32
2.5.1.3	<i>Cálculo de la distribución de calor en el pozo de soldadura</i>	33
2.5.1.4	<i>Composición del pozo de soldadura</i>	36
2.5.1.5	<i>Efectos de los pases múltiples de soldadura</i>	37
2.5.2	<i>Métodos y parámetros de soldadura empleados en la recuperación</i>	38
2.5.2.1	<i>Técnicas de soldadura más comunes</i>	39
2.5.2.2	<i>Parámetros de soldadura</i>	40
2.5.2.3	<i>Tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT)</i>	40
2.5.3	<i>Especificaciones, registros y calificación de los procesos de soldadura</i>	41
2.5.3.1	<i>Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)</i>	41
2.5.3.2	<i>Registro de calificación del procedimiento de soldadura (PQR)</i>	43
2.5.3.3	<i>Calificación de habilidad de soldadores (WPQ)</i>	44
2.6	Códigos y especificaciones que guían, regulan y validan los resultados de la recuperación	44
2.6.1	<i>Códigos y especificaciones para el proceso de soldadura</i>	45
2.6.2	<i>Códigos y especificaciones para el control de calidad del proceso</i>	45
2.6.3	<i>Códigos y especificaciones para la validación de los resultados del proceso</i>	49
2.7	Conclusiones parciales del marco referencial de las tecnologías para la recuperación por soldadura de álabes de turbinas hidráulicas de acero ASTM A743 CA-6NM	50
<b>3.</b>	<b>TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DE EXPERIMENTACIÓN</b>	
3.1	Caracterización de material	56
3.2	Evaluación de los defectos presentes en los elementos hidráulicos	58
3.2.1	<i>Daños en álabes móviles de la central San Francisco</i>	59
3.2.2	<i>Daños en el rodete Pelton</i>	60
3.3	Dimensionamiento de los cupones de soldadura	62
3.3.1	<i>Selección del espesor de los cupones de soldadura</i>	62
3.3.2	<i>Diseño de probetas para ensayos de tensión</i>	63
3.3.3	<i>Diseño de probetas para ensayos de doblez lateral</i>	63

3.3.4	<i>Diseño del cupón de soldadura.</i>	64
3.4	Elaboración de las especificaciones de los procedimientos de soldadura	65
3.4.1	<i>Diseño de la junta de unión</i>	66
3.4.2	<i>Especificaciones del metal base</i>	67
3.4.3	<i>Especificación de los metales de aporte</i>	68
3.4.4	<i>Posición</i>	71
3.4.5	<i>Precalentamiento y temperatura entre pases</i>	72
3.4.6	<i>Tratamiento térmico post soldadura (PWHT)</i>	72
3.4.7	<i>Gas de protección.</i>	73
3.4.8	<i>Características eléctricas</i>	75
3.4.9	<i>Técnica</i>	75
3.5	Procedimientos para la inspección de los cupones de soldadura	76
3.5.1	<i>Hojas de especificaciones de calidad</i>	76
3.5.1.1	<i>Especificaciones de calidad para turbinas hidráulicas</i>	76
3.5.2	<i>Inspección visual</i>	80
3.5.2.1	<i>Preparación de la superficie</i>	80
3.5.2.2	<i>Método de ensayo</i>	80
3.5.2.3	<i>Parámetros para la realización del ensayo</i>	80
3.5.2.4	<i>Evaluación de las discontinuidades superficiales</i>	81
3.5.2.5	<i>Criterios de aceptación</i>	81
3.5.2.6	<i>Elaboración del formato y reporte de ensayo visual</i>	82
3.5.3	<i>Inspección por líquidos penetrantes</i>	82
3.5.3.1	<i>Parámetros y condiciones de ensayo</i>	83
3.5.3.2	<i>Ejecución del ensayo</i>	83
3.5.3.3	<i>Evaluación de las indicaciones</i>	84
3.5.3.4	<i>Criterios de aceptación</i>	85
3.5.3.5	<i>Elaboración del formato y reporte de ensayo por líquidos penetrantes</i>	85
3.5.4	<i>Inspección por partículas magnéticas</i>	85
3.5.4.1	<i>Preparación de la superficie</i>	86
3.5.4.2	<i>Parámetros de magnetización</i>	86
3.5.4.3	<i>Medios de detección</i>	87
3.5.4.4	<i>Procedimiento del ensayo</i>	87
3.5.4.5	<i>Evaluación de las indicaciones</i>	87
3.5.4.6	<i>Criterios de aceptación</i>	88

3.5.4.7	<i>Desmagnetización</i> .....	89
3.5.4.8	<i>Elaboración del formato y reporte de ensayo por partículas magnéticas</i> ....	89
3.5.5	<i>Inspección por ultrasonido</i> .....	89
3.5.5.1	<i>Inspección mediante barrido con haz angular</i> .....	89
3.5.5.2	<i>Equipo</i> .....	89
3.5.5.3	<i>Revisión del equipo</i> .....	90
3.5.5.4	<i>Parámetros del método DGS</i> .....	91
3.5.5.5	<i>Características del ensayo</i> .....	91
3.5.5.6	<i>Procedimiento del ensayo y detección de defectos</i> .....	94
3.5.5.7	<i>Caracterización de las indicaciones</i> .....	95
3.5.5.8	<i>Criterios de aceptación</i> .....	97
3.5.5.9	<i>Elaboración del formato y reporte de ensayo por ultrasonido</i> .....	100
3.6	Ensayos mecánicos para la calificación de los procedimientos de soldadura .....	100
3.6.1	<i>Ensayo de tensión</i> .....	100
3.6.2	<i>Ensayo de dobléz</i> .....	101
3.6.3	<i>Preparación metalográfica</i> .....	102
3.6.3.1	<i>Corte</i> .....	103
3.6.3.2	<i>Desbaste y pulido</i> .....	103
3.6.3.3	<i>Ataque químico</i> .....	104
3.6.3.4	<i>Microscopía óptica</i> .....	105
3.6.4	<i>Ensayo de dureza</i> .....	105
3.6.5	<i>Ensayo de microdureza</i> .....	107
3.7	Conclusiones Parciales .....	108
<b>4.</b>	<b>FUENTES DE DATOS, ESTUDIO DE HIPÓTESIS Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS</b>	
4.1	Mecanización y obtención de cupones de soldadura .....	110
4.1.1	<i>Procedimiento de mecanización</i> .....	110
4.1.2	<i>Resultados</i> .....	112
4.2	Ensayos de soldadura y experimentación .....	113
4.2.1	<i>Soldadura de prueba en acero AISI 410</i> .....	113
4.2.1.1	<i>Resultados</i> .....	114
4.2.2	<i>Soldadura definitiva en cupones de ASTM A743 CA-6NM</i> .....	115

4.2.2.1	<i>Estimaciones de las propiedades del pozo de soldadura</i> .....	115
4.2.2.2	<i>Procedimiento de soldadura</i> .....	122
4.2.2.3	<i>Resultados</i> .....	125
4.3	Tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT) .....	129
4.3.1	<i>Procedimiento del PWHT</i> .....	130
4.3.2	<i>Resultados</i> .....	131
4.4	Ensayos no destructivos posterior a la soldadura .....	132
4.4.1	<i>Procedimientos de END</i> .....	132
4.4.1.1	<i>Ensayo visual</i> .....	132
4.4.1.2	<i>Ensayo por líquidos penetrantes</i> .....	134
4.4.1.3	<i>Ensayo por partículas magnéticas</i> .....	135
4.4.1.4	<i>Ensayo por ultrasonido</i> .....	137
4.4.2	<i>Resultados</i> .....	139
4.4.2.1	<i>Ensayo visual</i> .....	140
4.4.2.2	<i>Ensayo por líquidos penetrantes</i> .....	140
4.4.2.3	<i>Ensayo por partículas magnéticas</i> .....	141
4.4.2.4	<i>Ensayo por ultrasonido</i> .....	141
4.5	Ensayos mecánicos .....	142
4.5.1	<i>Ensayos de tensión</i> .....	142
4.5.1.1	<i>Procedimiento del ensayo de tensión</i> .....	142
4.5.2	<i>Resultados</i> .....	144
4.5.3	<i>Ensayos de doblez lateral guiado</i> .....	146
4.5.3.1	<i>Procedimiento el ensayo de doblez lateral guiado</i> .....	146
4.5.4	<i>Resultados</i> .....	148
4.6	Ensayos de dureza y microdureza .....	150
4.6.1	<i>Ensayos de dureza</i> .....	150
4.6.1.1	<i>Procedimiento del ensayo de dureza</i> .....	150
4.6.1.2	<i>Resultados</i> .....	152
4.6.2	<i>Ensayos de microdureza</i> .....	158
4.6.2.1	<i>Procedimiento del ensayo de microdureza</i> .....	159
4.6.2.2	<i>Resultados</i> .....	160
4.7	Ensayos de metalografía .....	166
4.7.1	<i>Procedimiento de metalografía</i> .....	166
4.7.2	<i>Resultados</i> .....	168

4.7.2.1	<i>Análisis de inclusiones no metálicas</i> .....	169
4.7.2.2	<i>Microestructura presente en el metal base</i> .....	170
4.7.2.3	<i>Microestructura presente en el procedimiento CIRT/16-WPS-001</i> .....	170
4.7.2.4	<i>Microestructura presente en el procedimiento CIRT/16-WPS-002</i> .....	172
4.7.2.5	<i>Microestructura presente en el procedimiento CIRT/16-WPS-003</i> .....	176
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	
5.1	Resultados por inspección no destructiva .....	182
5.2	Resultados del ensayo de dureza .....	183
5.2.1	<i>Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-001</i> .....	183
5.2.2	<i>Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-002</i> .....	184
5.2.3	<i>Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-003</i> .....	186
5.3	Resultados del ensayo de microdureza .....	187
5.3.1	<i>Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-001</i> .....	187
5.3.2	<i>Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-002</i> .....	189
5.3.3	<i>Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-003</i> .....	190
5.4	Resultados en los ensayos mecánicos .....	192
5.4.1	<i>Resultados en el ensayo de tensión</i> .....	192
5.4.2	<i>Resultados en el ensayo de dobléz</i> .....	194
5.5	Calificación de los procedimientos .....	194
5.6	Resultados del análisis de metalografía .....	195
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1	Conclusiones .....	197
6.2	Recomendaciones .....	200

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1	Características de la denominación del acero CA-6NM..... 20
2	Requerimientos de composición química nominal en wt% ..... 20
3	Requerimientos de propiedades mecánicas ..... 21
4	Comparación de características de tipos de relleno empleados en la reparación de álabes y rodets hidráulicos ..... 27
5	Características de las principales técnicas de soldadura empleadas en la recuperación de álabes y rodets ..... 39
6	Lista de variables esenciales, esenciales suplementarias y no esenciales para el diseño del procedimiento de soldadura (WPS)..... 42
7	Características de tipos de ensayos no destructivos más empleados para inspección de soldaduras ..... 46
8	Resumen de códigos y especificaciones empleados durante la recuperación por soldadura de los álabes..... 49
9	Resultados ensayo de espectrometría ..... 57
10	Composición química de los álabes móviles especificada por el fabricante .... 58
11	Profundidad de los daños..... 59
12	Procedimientos de soldadura ..... 62
13	Ensayos de tensión y doblez transversal para ranuras soldadas ..... 63
14	Número P para metales base ferrosos y no ferrosos ..... 68
15	Composición química del metal de aporte martensítico..... 69
16	Número F para metal de aporte ..... 69
17	Número – A Clasificación de los metales soldados ferrosos para la calificación del procedimiento..... 69
18	Composición química del metal de aporte austenítico ..... 70
19	Tratamiento térmico post soldadura para aceros inoxidable martensíticos .... 72
20	Propiedades mecánicas y tratamiento térmico del metal de aporte ..... 73
21	Parámetros recomendados del gas protector para soldadura GTAW ..... 74
22	Especificaciones del gas de protección para el proceso GMAW ..... 74
23	Características eléctricas de soldadura para proceso GTAW ..... 75
24	Características eléctricas de soldadura para proceso SMAW y GMAW ..... 75
25	Técnica aplicada durante la soldadura..... 75

26	Propiedades del material para turbinas hidráulicas .....	76
27	Niveles de calidad para la inspección por END .....	77
28	Criterios de aceptación para superficies fundidas .....	82
29	Criterios de aceptación para superficies mecanizadas.....	82
30	Niveles de calidad para la condición superficial .....	83
31	Calidad superficial del área ensayada de acuerdo a su rugosidad .....	86
32	Características del tipo de corriente.....	86
33	Criterios de aceptación .....	88
34	Diámetro del reflector con forma de disco en función de la profundidad explorada .....	91
35	Método DGS: niveles de registro y niveles de aceptación (2 MHz) .....	98
36	Método DGS: niveles de registro y niveles de aceptación (4 MHz) .....	99
37	Ensayos mecánicos realizados.....	100
38	Características de la máquina universal de ensayos .....	100
39	Ataque químico para acero inoxidable martensítico .....	105
40	Ataque electrolítico para acero inoxidable austenítico.....	105
41	Características del equipo para dureza Brinell .....	106
42	Parámetros para ensayo de microdureza Vickers .....	107
43	Procedimiento de mecanizado para la obtención de los cupones para soldadura.....	111
44	Resultados del ensayo de soldadura del procedimiento 1 en cupón de prueba .....	114
45	Resultados del ensayo de soldadura del procedimiento 2 en cupón de prueba .....	114
46	Resultados del ensayo de soldadura del procedimiento 3 en cupón de prueba .....	115
47	Variables empleadas para el cálculo de la distribución de calor .....	116
48	Valores de criterio de cálculo para la distribución de calor.....	117
49	Temperaturas de transformación de fase de ASTM A743 CA-6NM.....	117
50	Posición de los picos de temperatura en los cupones para cada proceso.....	118
51	Cálculo del ancho de la ZAT para cada proceso .....	120
52	Coordenadas empleadas en el diagrama de Schaeffler.....	120
53	Microestructuras presentes obtenidas del diagrama de Schaeffler.....	121
54	Procedimiento de soldadura en cupones de ASTM A743 CA-6NM.....	122

55	Variables del procedimiento 1 en el lado superior del cupón 1.....	125
56	Variables del procedimiento 1 en el lado inferior del cupón 1.....	126
57	Variables del procedimiento 1 en el lado superior del cupón 2.....	126
58	Variables del procedimiento 1 en el lado inferior del cupón 2.....	127
59	Variables del procedimiento 2 en el lado superior del cupón 3.....	127
60	Variables del procedimiento 2 en el lado inferior del cupón 3.....	127
61	Variables del procedimiento 2 en el lado superior del cupón 4.....	128
62	Variables del procedimiento 2 en el lado inferior del cupón 4.....	128
63	Variables del procedimiento 3 en el lado superior del cupón 5.....	128
64	Variables del procedimiento 3 en el lado inferior del cupón 5.....	128
65	Variables del procedimiento 3 en el lado superior del cupón 6.....	129
66	Variables del procedimiento 3 en el lado inferior del cupón 6.....	129
67	Procedimiento del PWHT en cupones de ASTM A743 CA-6NM.....	130
68	Procedimiento de END por VT .....	132
69	Procedimiento de END por PT .....	134
70	Procedimiento de END por MT.....	136
71	Procedimiento de END por UT .....	138
72	Resultados de los ensayos por VT en cupones de soldadura de ASTM A743 CA-6NM .....	140
73	Resultados de los ensayos por PT en cupones de soldadura de ASTM A743 CA-6NM .....	140
74	Resultados de los ensayos por MT en cupones de soldadura de ASTM A743 CA-6NM .....	141
75	Resultados de los ensayos por MT en cupones de soldadura de ASTM A743 CA-6NM .....	141
76	Procedimiento del ensayo de tensión.....	142
77	Variables obtenidas de los ensayos de tensión en las probetas de ASTM A743 CA-6NM .....	145
78	Procedimiento del ensayo de doblez lateral guiado.....	146
79	Resultados obtenidos en los ensayos de doblez lateral guiado en probetas ASTM A743 CA-6NM .....	148
80	Procedimiento de ensayos de dureza en muestras de ASTM A743 CA- 6NM.....	150

81	Procedimiento de ensayos de microdureza en muestras de ASTM A743 CA-6NM.....	159
82	Procedimiento de preparación de muestras y análisis metalográfico en muestras de ASTM A743 CA-6NM.....	166
83	Medición del tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZAT para el procedimiento CIRT/16-WPS-001 .....	180
84	Medición del tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZF para el procedimiento CIRT/16-WPS-001 .....	180
85	Medición del tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZAT para el procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	180
86	Medición de tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZAT para el procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	181
87	Medición de tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZF para el procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	181
88	Resultados de inspección no destructiva en los cupones de soldadura .....	182
89	Reducción de dureza en el procedimiento CIRT/16-WPS-001 .....	184
90	Reducción de dureza en el procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	186
91	Reducción de dureza en el procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	187
92	Tamaño del ZAT y reducción del microdureza en el procedimiento CIRT/ 16-WPS-001 .....	189
93	Tamaño del ZAT y reducción del microdureza en el procedimiento CIRT/ 16-WPS-002 .....	190
94	Tamaño del ZAT y reducción de microdureza en el procedimiento CIRT/ 16-WPS-003 .....	191
95	Comparación de los valores del esfuerzo máximo entre procedimientos.....	192
96	Comparación de los valores del esfuerzo de fluencia entre procedimientos ..	193
97	Resultados y calificación del ensayo de tensión.....	194
98	Resultados y calificación del ensayo de doblez.....	194
99	Calificación de los procedimientos de soldadura .....	195
100	Microestructuras presentes en los procedimientos de soldadura.....	195
101	Porcentaje de disminución del tamaño de las agujas de martensita después del PWHT .....	196

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1	Rodete Pelton..... 8
2	Geometría de álabes de turbina Pelton ..... 9
3	Rodete Francis ..... 9
4	Sección de rodete Francis lento ..... 10
5	Álabe directriz de turbina Francis ..... 10
6	Rodete Kaplan ..... 11
7	Mecanismo de reparación de la capa de óxido del acero inoxidable..... 11
8	Diagrama de fase binario en equilibrio de Fe-Cr, base para las transformaciones en aceros inoxidables ..... 13
9	Diagrama pseudobinario Fe-Cr-C con 13% Cr. C <sub>1</sub> es un carburo (Cr, Fe) <sub>23</sub> C <sub>6</sub> y C <sub>2</sub> es un carburo (Cr, Fe) <sub>7</sub> C <sub>3</sub> ..... 14
10.	Influencia de los principales elementos aleantes en el acero inoxidable..... 15
11	Influencia de los elementos aleantes en el bucle gamma. (a) influencia del Cr (b) influencia del Ni (c) influencia del C..... 15
12	Esquema del cizallamiento e inclinación de la superficie asociado con la formación de martensita en placas..... 16
13	Temperatura Ms en función del contenido de carbono, además de zonas de morfología de la martensita ..... 17
14	Ilustración de componentes y morfología de martensita en forma de listones. 18
15	Diagrama de relación de Cr y Ni para aceros inoxidables fundidos tipo C..... 20
16	Diagrama de fases pseudobinario para relaciones Cr:Ni de 3:1, y cambios estructurales que ocurren dentro de la zona afectada térmicamente..... 21
17	Diagrama de transformación de enfriamiento continuo del acero CA-6NM ... 22
18	Representación de la distribución de presión en la geometría de los álabes del rodete Francis. (a) lado de succión (b) lado de presión ..... 23
19	Representaciones más comunes de mecanismos de desgaste en la superficie de álabes. (a) abrasión (b) fatiga (c) deformación plástica (d) erosión por fragilidad..... 24
20	Efectos de la erosión en los álabes móviles y rodete de una turbina Francis ... 25

21	Principales tipos de cavitación detectadas en turbinas Francis. (a) en borde de ataque (b) en borde de arrastre (c) remolino en el tubo de aspiración (d) vórtice entre los álabes .....	26
22	Esquema moderno de las regiones de una soldadura de fusión heterogénea de un solo pase.....	29
23	Relación entre el tamaño de grano de las distintas zonas con respecto a las temperaturas a las que están sometidas para un acero al carbono .....	31
24	Relación entre las zonas que aparecen en función de la distancia del eje de soldadura acorde a las temperaturas que alcanzan para un acero con 13% Cr y 4% Ni.....	32
25	Diagrama del proceso de soldadura de un sistema de coordenadas que tiene su eje en el centro de la fuente de calor .....	34
26	Condiciones en las que se presenta el flujo de calor. (a) bidimensional (placa delgada) (b) tridimensional (placa gruesa) .....	34
27	Curvas de temperatura calculadas a varias distancias desde el centro de la fuente de calor en función del tiempo .....	35
28	Distribución de temperatura y velocidad de enfriamiento a varias distancias de la ZF en una placa soldada.....	36
29	Diagrama de composición de Schaeffler para soldaduras de aceros inoxidables.....	36
30	Esquema de zonas producidas por la aplicación de soldadura de pases múltiples .....	38
31	Diagrama de procedimiento para calificación de un WPS .....	44
32	Equipos de END de VT, PT, MT, UT en ese orden correspondiente a las imágenes .....	48
33	Diagrama del procedimiento para el desarrollo de la investigación.....	55
34	Equipo portátil para ensayos de espectrometría .....	56
35	Estandarización del equipo de espectrometría.....	56
36	Limpieza de la superficie del álabe directriz .....	57
37	Realización del ensayo de espectrometría en álabe directriz.....	57
38	Desgaste superficial en el lado de presión del álabe directriz .....	58
39	Desgaste superficial en el lado de succión del álabe directriz.....	58
40	Daños sobre el lado lateral de la bandera de un álabe directriz.....	59
41	Rodete Pelton fracturado .....	60

42	Canjilón fracturado .....	60
43	Esquematación de la dirección de agrietamiento sobre el rodete Pelton fracturado.....	61
44	Identificación de micropartículas por medio de microscopio electrónico de barrido (SEM).....	61
45	Dimensiones de probetas para ensayo de tensión.....	63
46	Dimensiones de probetas para ensayo de doblez lateral.....	64
47	Localización de los especímenes de calificación para el procedimiento en placa de 19 mm.....	64
48	Formato QW-482 con los datos generales para el WPS del procedimiento 1..	65
49	Formato QW-482 con los datos generales para el WPS del procedimiento 2..	65
50	Formato QW-482 con los datos generales para el WPS del procedimiento 3..	65
51	Diseño de junta a tope recomendada para soldadura GMAW/GTAW.....	66
52	Detalle del diseño de la junta para los procedimientos de soldadura. ....	67
53	Datos generales de la junta tipo V doble sin respaldo.....	67
54	Especificaciones del metal base .....	68
55	Especificaciones del metal de aporte contenidas en el procedimiento de soldadura N°1 .....	70
56	Especificaciones del metal de aporte contenidas en el procedimiento de soldadura N°2 .....	71
57	Especificaciones del metal de aporte contenidas en el procedimiento de soldadura N°3 .....	71
58	Posiciones de soldadura para placa plana con ranura.....	72
59	Ciclo térmico del PWHT .....	73
60	Zonas de inspección en el rodete Francis .....	78
61	Zonas de inspección en los álabes del rodete Francis.....	78
62	Zonas de inspección en los cangilones del rodete Pelton.....	79
63	Zonas de inspección en los álabes del rodete Kaplan.....	79
64	Evaluación de discontinuidades superficiales .....	81
65	Evaluación de desniveles superficiales.....	81
66	Representación de indicaciones redondeadas.....	84
67	Representación de indicaciones lineales.....	84
68	Representación de indicaciones alineadas .....	85
69	Junta soldada con bordes .....	92

70	Soldadura de costura con penetración completa entre dos partes .....	92
71	Soldadura de costura con penetración parcial y soldadura de costura con refuerzo .....	92
72	Soldadura de producción y reparación de soldadura de costura.....	93
73	Curva de corrección de distancia amplitud.....	94
74	Ensayo en soldadura sin mecanizar .....	95
75	Ensayo en soldadura mecanizada .....	95
76	Probeta para ensayo de tensión en el cupón de soldadura .....	101
77	Montaje de la probeta para doblez lateral.....	102
78	Máquina de corte en frío.....	103
79	Procedimiento de desbaste.....	104
80	Equipo de pulido y desbaste .....	104
81	Distribución de las indentaciones para el ensayo de dureza.....	106
82	Equipo de microdureza .....	107
83	Distribución de las indentaciones para el ensayo de microdureza .....	108
84	Visualización de resultados para el ensayo de microdureza Vickers .....	108
85	Cupones de soldadura obtenidos .....	113
86	Cupones de prueba para soldadura .....	113
87	Curvas de distribución de temperaturas en función del tiempo para el proceso SMAW .....	118
88	Curvas de distribución de temperaturas en función del tiempo para el proceso GMAW.....	119
89	Curvas de distribución de temperaturas en función del tiempo para el proceso GTAW.....	119
90	Diagrama de Schaeffler para la composición del pozo de soldadura .....	121
91	Curvas de esfuerzo-deformación de los cupones del procedimiento 1.....	144
92	Curvas de esfuerzo-deformación de los cupones del procedimiento 2.....	144
93	Curvas de esfuerzo-deformación de los cupones del procedimiento 3.....	145
94	Resultado del ensayo de tensión de la probeta 2 del cupón 5.....	146
95	Resultado del ensayo de doblez lateral guiado de la probeta 1 y 2 respectivamente del cupón 1.....	149
96	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT .....	152

97	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT .....	153
98	Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT .....	153
99	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT .....	153
100	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT .....	154
101	Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT .....	154
102	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT .....	154
103	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT .....	155
104	Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT .....	155
105	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT .....	155
106	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT .....	156
107	Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT .....	156
108	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 sin PWHT .....	156
109	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 3 sin PWHT .....	157
110	Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 3 sin PWHT.....	157
111	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT .....	157
112	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT .....	158
113	Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT .....	158

114	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT .....	161
115	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT .....	161
116	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT .....	161
117	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT .....	162
118	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT .....	162
119	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT .....	162
120	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT .....	163
121	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT .....	163
122	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 sin PWHT .....	163
123	Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 3 sin PWHT .....	164
124	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT .....	164
125	Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT .....	164
126	Mediciones de dureza HBW30 en el eje vertical de la muestra del procedimiento 1 .....	165
127	Mediciones de dureza HBW30 en el eje vertical de la muestra del procedimiento 2 .....	165
128	Mediciones de dureza HBW30 en el eje vertical de la muestra del procedimiento 3 .....	165
129	Inclusiones no metálicas en el metal base .....	169
130	Inclusiones no metálicas en el material después de someterse a soldadura ...	169
131	Microestructura del acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM ..	170
132	Microestructura de la ZAT sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-001 ..	171

133	Microestructura de la ZAT con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-001 ..	171
134	Microestructura de la ZF sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-001 .....	172
135	Microestructura de la ZF con del PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-001	172
136	Microestructura de la ZAT sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002 ...	173
137	Microestructura de la ZAT con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002 ..	173
138	Microestructura de la ZF sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	174
139	Microestructura de la ZF con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	174
140	Microestructura de la ZF del material de aporte austenítico sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	175
141	Microestructura de la ZF del material de aporte austenítico con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	175
142	Microestructura de la ZAT sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003 ...	176
143	Microestructura de la ZAT con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003 ..	177
144	Microestructura de la ZF sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	177
145	Microestructura de la ZF con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	178
146	Microestructura de la ZF del material de aporte austenítico sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	178
147	Microestructura de la ZF del material de aporte austenítico con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	179
148	Esquema de mediciones de tamaño de las agujas de martensita .....	179
149	Dureza sobre la línea 1 para el procedimiento CIRT/16-WPS-001 .....	183
150	Dureza sobre la línea 2 para el procedimiento CIRT/16-WPS-001 .....	183
151	Dureza sobre la línea 3 para el procedimiento CIRT/16-WPS-001 .....	184
152	Dureza sobre la línea 1 para el procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	184
153	Dureza sobre la línea 2 para el procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	185
154	Dureza sobre la línea 3 para el procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	185
155	Dureza sobre la línea 1 para el procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	186
156	Dureza sobre la línea 2 para el procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	186
157	Dureza sobre la línea 3 para el procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	187
158	Perfil de microdureza en la línea 1 con el procedimiento CIRT/16-WPS- 001 .....	188
159	Perfil de microdureza en la línea 2 con el procedimiento CIRT/16-WPS- 001 .....	188

160	Perfil de microdureza en la línea 1 con el procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	189
161	Perfil de microdureza en la línea 2 con el procedimiento CIRT/16-WPS-002 .....	189
162	Perfil de microdureza en la línea 1 con el procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	190
163	Perfil de microdureza en la línea 2 con el procedimiento CIRT/16-WPS-003 .....	191
164	Resultados del esfuerzo máximo para los tres procedimientos .....	192
165	Resultados del esfuerzo de fluencia para los tres procedimientos.....	193

## SIMBOLOGÍA

$k$	Conductividad térmica del material	$J m^{-1} s^{-1} K^{-1}$
$v$	Volumen	$m^3$
$\rho$	Densidad	$Kg m^{-3}$
$C_p$	Calor específico	$J kg^{-1} K^{-1}$
$s$	Calor Generado	J
$T$	Temperatura	$^{\circ}K$
$\alpha$	Difusividad Térmica	$m^2 s^{-1}$
$r$	Calor específico por volumen unitario	$J m^{-3} K^{-1}$
$q$	Flujo de calor	MJ/m
$t$	Tiempo	S
$T_o$	Temperatura inicial	$^{\circ}K$
$T_p$	Temperatura pico del ciclo térmico	$^{\circ}K$
$d$	Espesor de la placa	m
$d'$	Espesor límite para criterio de placa	m
$M_f$	Final de la Martensita	
$M_s$	Inicio de la Martensita	
$\gamma'$	Austenita retenida	
$M_xC_y$	Carburos	
$\delta$	Ferrita delta	

## LISTA DE ABREVIACIONES

AC	Corriente Alterna
AFNOR	Asociación Francesa de Normalización
ASM	Sociedad Americana de Materiales
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
ASTM	Sociedad Americana de Ensayos de Materiales
AWS	Sociedad Americana de Soldadura
BCC	Cúbico Centrado en el Cuerpo
BCT	Tetragonal Centrado en el Cuerpo
CCT	Transformación de Enfriamiento Continuo
CE	Carbono Equivalente
DC	Corriente Continua
DCEN	Corriente Continua electrodo negativo
DCEP	Corriente Continua electrodo positivo
DIN	Instituto Alemán de Estandarización
END	Ensayos No Destructivos
FCC	Cúbico Centrado en las Caras
GMAW	Soldadura por arco de gas metálico
GTAW	Soldadura por arco de gas tungsteno
HBW	Dureza Brinell con indentador de carburo de tungsteno
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
MA	Metal de aporte
MB	Metal Base
MIG	Soldadura metálica con gas inerte
MSS	Acero Inoxidable Martensítico
NDT	Ensayos no destructivos
PQR	Registro de calificación del procedimiento de soldadura
SCC	Agrietamiento por corrosión bajo tensión
SEM	Microscopía electrónica de barrido
SMAW	Soldadura por arco de metal protegido
UNS	Sistema Numérico Unificado
WPS	Especificación del procedimiento de soldadura
ZAT	Zona Afectada Térmicamente
ZF	Zona fundida
ZPF	Zona parcialmente fundida

## LISTA DE ANEXOS

<b>A</b>	Reporte de ensayo de espectrometría para un álabe directriz de la Central Hidroeléctrica San Francisco
<b>B</b>	Hoja técnica del fabricante de álabes móviles
<b>C</b>	Figura QW-462.1(a) sección reducida para probetas de tensión en placa plana
<b>D</b>	Dimensiones para probetas de tensión
<b>E</b>	Figura QW-462.2 probetas para ensayos de doblez lateral
<b>F</b>	Dimensiones para probetas de doblez lateral
<b>G</b>	Figura QE-463.1(b) distribución de las probetas en los cupones de soldadura para la calificación del procedimiento
<b>H</b>	Ficha técnica del material de aporte Selectar Inox 13/4 E410NiMo-15
<b>I</b>	Ficha técnica del material de aporte Selectar Inox TIG 13/4 Er410NiMo
<b>J</b>	Ficha técnica del material de aporte Selectar Inox TIG 24/12 Er309LMo
<b>K</b>	Ficha técnica del material de aporte Selectar Inox MIG 24/12m Er410NiMo
<b>L</b>	Especificaciones del procedimiento de soldadura N°1
<b>M</b>	Especificaciones del procedimiento de soldadura N°2
<b>N</b>	Especificaciones del procedimiento de soldadura N°3
<b>O</b>	Hoja de especificaciones de calidad del rodete Francis.
<b>P</b>	Hoja de especificaciones de calidad de los álabes del rodete Francis
<b>Q</b>	Hoja de especificaciones de calidad de los cangilones del rodete Pelton
<b>R</b>	Hoja de especificaciones de calidad de los álabes del rodete Kaplan
<b>S</b>	Formato para el reporte de ensayo visual
<b>T</b>	Criterios de aceptación para indicaciones encontradas mediante ensayo de tintas penetrantes
<b>U</b>	Formato para el reporte de ensayo de tintas penetrantes
<b>V</b>	Formato para el reporte de ensayo de partículas magnéticas
<b>W</b>	Formato para el reporte de ensayo por ultrasonido
<b>X</b>	Dimensiones del JIG para ensayo de doblez lateral guiado
<b>Y</b>	Formato para reporte ensayo de doblez
<b>Z</b>	Formato para reporte ensayo de metalografía
<b>AA</b>	Formato para reporte de ensayo de dureza
<b>AB</b>	Formato para reporte de ensayo de microdureza
<b>AC</b>	Reporte del ensayo del PWHT
<b>AD</b>	Registro ensayo VT placa 1 procedimiento CIRT/16-WPS-001
<b>AE</b>	Registro ensayo VT placa 2 procedimiento CIRT/16-WPS-001
<b>AF</b>	Registro ensayo VT placa 3 procedimiento CIRT/16-WPS-002
<b>AG</b>	Registro ensayo VT placa 4 procedimiento CIRT/16-WPS-002
<b>AH</b>	Registro ensayo VT placa 5 procedimiento CIRT/16-WPS-003
<b>AI</b>	Registro ensayo VT placa 6 procedimiento CIRT/16-WPS-003

**AJ** Registro ensayo PT placa 1 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**AK** Registro ensayo PT placa 2 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**AL** Registro ensayo PT placa 3 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**AM** Registro ensayo PT placa 4 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**AN** Registro ensayo PT placa 5 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**AO** Registro ensayo PT placa 6 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**AP** Registro ensayo MT placa 1 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**AQ** Registro ensayo MT placa 2 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**AR** Registro ensayo MT placa 3 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**AS** Registro ensayo MT placa 4 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**AT** Registro ensayo MT placa 5 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**AU** Registro ensayo MT placa 6 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**AV** Registro ensayo UT placa 1 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**AW** Registro ensayo UT placa 2 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**AX** Registro ensayo UT placa 3 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**AY** Registro ensayo UT placa 4 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**AZ** Registro ensayo UT placa 5 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**BA** Registro ensayo UT placa 6 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**BB** Registro ensayo de tensión cupón 1 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**BC** Registro ensayo de tensión cupón 2 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**BD** Registro ensayo de tensión cupón 3 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**BE** Registro ensayo de tensión cupón 4 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**BF** Registro ensayo de tensión cupón 5 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**BG** Registro ensayo de tensión cupón 6 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**BH** Registro ensayo de doblez cupón 1 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**BI** Registro ensayo de doblez cupón 2 procedimiento CIRT/16-WPS-001  
**BJ** Registro ensayo de doblez cupón 3 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**BK** Registro ensayo de doblez cupón 4 procedimiento CIRT/16-WPS-002  
**BL** Registro ensayo de doblez cupón 5 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**BM** Registro ensayo de doblez cupón 6 procedimiento CIRT/16-WPS-003  
**BN** Registro de calificación del procedimiento de soldadura CIRT/16-WPS-001  
**BO** Registro de calificación del procedimiento de soldadura CIRT/16-WPS-002  
**BP** Registro de calificación del procedimiento de soldadura CIRT/16-WPS-003

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Las turbinas hidráulicas son conjuntos de elementos mecánicos los cuales cumplen funciones específicas de acuerdo a sus características de diseño, entre otras. Debido a que son elementos deformables, y están sometidos a regímenes de operación donde se encuentran sujetos a esfuerzos transitorios de tipo mecánico, térmico, desgaste, etc., los cuales producen un deterioro de sus componentes a corto o largo plazo. Uno de los componentes clave en el funcionamiento de las turbinas hidráulicas son los álabes.

Los álabes al ser parte del rodete o impulsor se encuentran siempre en movimiento durante el funcionamiento y reciben directamente todas las cargas producidas por el choque del agua, además de los efectos abrasivos ocasionados por sedimentos, arena, sales y residuos que se encuentran contenidos en la misma. Entre los fenómenos más graves en este tipo de máquinas hidráulicas se encuentran la cavitación, erosión, abrasión y vibraciones, los cuales producen un desgaste superficial o incluso volumétrico, el cual puede afectar a su rendimiento reduciendo su espesor y acumulando tensiones, resultando extremadamente perjudicial para su adecuado funcionamiento.

En el Ecuador alrededor del 52% de la producción eléctrica total se obtiene a través de la generación hidroeléctrica (CELEC E.P., 2015a), siendo la principal fuente de generación eléctrica en el país. El elemento motriz fundamental para la conversión de energía cinética en energía mecánica es la turbina hidráulica, al ser un elemento indispensable para el funcionamiento de la central requiere una operación y mantenimiento con controles de calidad adecuados, especialmente de los álabes, cuya geometría específica está diseñada para así mantener su alta eficiencia, la cual bordea el 93%. (ZHAÑAY, 2006 pág. 31)

El Ecuador actualmente a través de la red de CELEC E.P. cuenta con 12 turbinas Pelton, 6 Francis y 2 Kaplan entre todas las distintas centrales que conforman la mencionada empresa durante el 2015. Para el año 2017 se prevé implementar 23 turbinas Pelton y 12

Francis que funcionarán en las nuevas centrales hidroeléctricas que se están construyendo, de las cuales algunas de ellas ya se encuentran en funcionamiento. (CELEC E.P., 2015b)

Debido a que las centrales hidroeléctricas tienen un proceso de producción eléctrica continúa trabajando las 24 horas, sus partes móviles se desgastan progresivamente de acuerdo a lo mencionado anteriormente. En una diálogo mantenido el día 15 de septiembre del 2015 con el Ing. Eduardo Ruales, Jefe de Mantenimiento Mecánico Central Agoyán, indicó que, cuando se realiza el overhaul<sup>1</sup> se analiza el estado completo de la turbina y si existen discontinuidades que superan un límite crítico fallan, lo que provocaba que sean retiradas y almacenadas, como el caso de la Central Agoyán que cuenta con 4 turbinas Francis en espera de ser recuperadas; debido a que no se contaba con el personal, equipos y procedimientos con el suficiente carácter técnico para realizar las recuperaciones integrales necesarias y adecuadas.

En el año 2009 CELEC E.P. realizó una investigación de las empresas ecuatorianas que brinden el servicio de reconstrucción o rehabilitación de elementos hidromecánicos, concluyendo mediante la investigación del Dr. Jorge Luis González, director ejecutivo del Instituto Nacional de Contratación Pública que “...no se ha identificado producción nacional competitiva de acuerdo a las características técnicas”. Por lo tanto, en el Ecuador hasta ese momento no existían empresas que brinden el servicio de reconstrucción de partes hidromecánicas de turbinas, por lo que se optó por recurrir al mercado internacional. (SAGÑAY, y otros, 2012)

Según manifiesta el Ing. Eduardo Ruales los países que realizan este tipo de servicio de reparación son Alemania, Suecia, Italia, Chile, entre otros. Siendo Chile la mejor opción debido a costos de transporte, logística, tiempo, etc. La empresa ANDRITZ CHILE LTDA., la cual es una filial de la multinacional ANDRITZ HYDRO S.A., que tiene un gran prestigio en el desarrollo de este servicio, razón por la cual se optó por contratarla para llevar a cabo la reconstrucción de los rodetes, álabes directrices, tapa superior e inferior y el tubo de aspiración de una turbina Francis de la Central Hidroeléctrica

---

<sup>1</sup> Mantenimiento mayor que realiza la central aproximadamente cada siete años y consiste en el desmontaje total de las partes de las turbinas para su reparación y reposición, se determina individualmente el daño y si los componentes pueden ser reconstruidos o deben ser reemplazados.

Agoyán, la cual se encuentra operando actualmente. El costo de adquisición de una turbina Francis nueva es aproximadamente 6 veces mayor al costo de su recuperación, lo cual dificulta la compra de este tipo de máquina hidráulica; pero el costo de recuperación sigue siendo relativamente elevado debido a que se realiza fuera del país. De acuerdo con Sánchez (2011) el costo aproximado de la recuperación fuera del país tiene un costo de \$1.228.200,00, mientras que la recuperación en instalaciones ecuatorianas tendría un costo cercano a \$493.724,60; lo cual significaría un ahorro de alrededor de \$734.475,40. Por otro lado según indica Zhañay (2006), el costo del juego completo de los 20 álabes móviles sería de \$880.000,00, para lo cual habría que anticipar el pedido al fabricante japonés con tres años de anticipación, en contra parte la recuperación de dichos elementos en el país podría costar alrededor de \$302.000,00; lo cual es un margen de ahorro de casi tres veces el monto de compra, resultando altamente rentable y beneficioso para el país.

El elevado costo de producción de una turbina hidráulica se concentra en las altas especificaciones de diseño, construcción y operación a las cuales deben funcionar. El material del cual están fabricadas debe ser resistente a la abrasión, corrosión, esfuerzos mecánicos, etc., y generalmente es acero inoxidable martensítico ASTM A743 Grado CA-6NM obtenido mediante procesos de fundición, arrojando resultados muy buenos para esta aplicación. Los procedimientos y registros para la reparación de los álabes deben ser realizados bajo parámetros y especificaciones guiados por las normas correspondientes. CELEC E.P. se encuentra actualmente adecuando sus instalaciones para contar con los laboratorios y equipos necesarios para atender las reparaciones con estándares de calidad internacionales en un futuro cercano.

Existen diversos métodos para la recuperación de los perfiles hidrodinámicos de los componentes de las turbinas, dependiendo de la magnitud de la discontinuidad, entre ellos el rectificado, relleno y reemplazo. Los métodos de relleno más usados son el metalizado, la soldadura y la aplicación de recubrimientos cerámicos; comúnmente empleándose combinaciones de estos métodos para recuperaciones integrales. (SÁNCHEZ, 2011)

La reparación mediante procesos de soldadura abarca un mayor campo de defectos posibles de reparar, ya que permite un relleno de profundidades considerables para lo cual los otros métodos se ven limitados, además de ser un método más económico y práctico en el momento de las reparaciones. Éstas junto a otras características han hecho que la

soldadura sea el método más efectivo para reparar los defectos más comunes que se producen en los álabes y debido a ello se lo empleará en la presente investigación.

## **1.2 Problema**

Las condiciones de trabajo de los álabes de turbinas hidráulicas provocan el desgaste y deterioro de los mismos, y debido a la falta de empresas que brinden el servicio de reparación de componentes hidráulicos en el país, asociado con el elevado costo de reparación extranjera por transporte, logística y tiempo generan un problema y retraso en el desarrollo tecnológico en el campo de la generación hidroeléctrica, pero gracias a las nuevas y futuras adecuaciones por parte de CELEC E.P. en cuanto a laboratorios, equipos y personal, permiten avanzar y sustentar parcialmente este problema; sin embargo persiste la carencia de investigación tecnológica para realizar los procesos de recuperación.

La falta de tecnología suficiente en el tema de recuperación de álabes de turbinas hidráulicas fabricadas a partir de acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM, así como el elevado costo de adquisición de información referente, crean dificultades para realizar estos procesos adecuadamente en el país. Al ser estos elementos fabricados mediante procesos de fundición de alta precisión resulta muy costoso y complicado la adquisición de nuevas turbinas hidráulicas, por lo cual las que presentan fallas necesitan ser reparadas para continuar con su funcionamiento.

Las reparaciones mediante soldadura incluyen procesos metalúrgicos muy importantes y delicados, debido a las transformaciones de fase que se producen en la microestructura por las grandes variaciones de temperatura y velocidades de enfriamiento, originando tendencia a agrietamientos y fragilización de los álabes reparados. Es debido a ello que se debe tener especial cuidado en la preparación previa y posterior de los procesos de soldadura, los cuales deben tener condiciones determinadas basadas en especificaciones y códigos referentes a esos procesos para garantizar la calidad integral.

## **1.3 Justificación**

La creación de nuevas centrales hidroeléctricas en el Ecuador con el fin de promover el cambio en la matriz energética, impulsa el uso de fuentes de energía renovables

mejorando la producción y el desarrollo de nuevas tecnologías, productos y servicios generados dentro del país. Mediante estos cambios se busca independizarse de las fuentes extranjeras y no renovables, las cuales tienen un costo elevado para realizar la recuperación de los elementos hidrodinámicos de las turbinas hidráulicas, y realizar estas reparaciones dentro del país de manera eficiente, segura y bajo estándares internacionales que controlen y aseguren su calidad.

Con el objetivo de cumplir estas nuevas metas y retos propuestos se están acondicionando laboratorios y equipos que sirvan para realizar investigaciones con el fin de llevar a cabo estas reparaciones, por ello surge la necesidad de la creación de procedimientos y especificaciones tecnológicas que permitan la recuperación de los álabes de turbinas hidráulicas construidas de acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM que garanticen una posterior operación y mantenibilidad segura, estandarizando, regulando y calificando estos procedimientos.

La reparación mediante procesos de soldadura se establece como una solución viable para reparar las fallas más comunes que se presentan en los álabes de turbinas, por lo cual es necesario la elaboración de procedimientos y especificaciones bajo parámetros técnicos, empleando normas internacionales y aplicando los conocimientos técnicos y científicos del Ingeniero Mecánico que garanticen la calidad de los mismos, evitando reparaciones reiteradas y paradas innecesarias que conducen a pérdidas de tiempo y producción de energía hidroeléctrica al país.

## **1.4       Objetivos**

### *1.4.1       Objetivo general*

Desarrollar los procedimientos de soldadura e inspección para la recuperación de álabes de turbinas hidráulicas construidas de acero inoxidable martensítico ASTM A 743 CA-6NM.

### *1.4.2       Objetivos específicos*

Estudiar el material bibliográfico referente a los tipos de fallas en los álabes de turbinas hidráulicas y sus métodos de recuperación.

Estudiar la aplicabilidad de los procesos de soldadura SMAW – GMAW – GTAW para la recuperación de los álabes de turbinas hidráulicas y comparar la calidad de los resultados de sus combinaciones.

Elaborar los WPS y PQR correspondientes para la recuperación de álabes de turbinas hidráulicas construidas de acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM.

Elaborar las especificaciones para los tratamientos térmicos y ensayos no destructivos que garanticen la calidad del procedimiento.

Evaluar las transformaciones producidas en la microestructura para cada procedimiento y medir su dureza.

## CAPITULO II

### **2. MARCO REFERENCIAL DE LAS TECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN POR SOLDADURA DE ÁLABES DE TURBINAS HIDRÁULICAS DE ACERO ASTM A743 CA-6NM**

El presente capítulo tiene como objetivo recopilar y analizar toda la información posible que sea de acceso público referente a las tecnologías para la recuperación por soldadura del objeto de estudio de esta investigación, el cual son los álabes de turbinas hidráulicas de acero ASTM A743 CA-6NM, para poder determinar los parámetros más adecuados, las cuales servirán de punto de partida para el desarrollo y elaboración de los procedimientos y especificaciones propuestos dentro de esta investigación.

#### **2.1 Características geométricas, tipos y funcionamiento de los álabes**

Las turbinas hidráulicas son máquinas cuya principal función es convertir la energía hidráulica en energía mecánica, el agua intercambia su energía con un conjunto mecánico que gira alrededor de su eje de simetría, el cual se encuentra provisto de elementos que direccionan el fluido llamados álabes, los cuales generalmente se encuentran unidos a una rueda motriz que se conoce como rodete. Las turbomáquinas elementales están formadas por una serie de álabes fijos (distribuidor), y otra de álabes móviles (rodete); además de otros elementos importantes como los difusores, anillos de desgaste, tapas, entre otros. (FERNÁNDEZ DÍEZ, 2002) Siendo el rodete y los álabes los elementos más sensibles debido a su geometría, funcionalidad e importancia dentro del conjunto de la turbina, por ello requieren mayor atención y mantenimiento adecuado para su preservación durante la producción hidroeléctrica. Se analizarán principalmente tres modelos de turbinas hidráulicas dentro de esta investigación, las cuales corresponden a los modelos Pelton, Francis y Kaplan, que son con las que se cuenta actualmente en el país dentro de las centrales hidroeléctricas.

##### *2.1.1 Tipos de álabes*

Existen diversos modelos de álabes los cuales variarán de acuerdo a la clase de turbina

que pertenezcan, cambiando en su geometría, pero conservando sus principios básicos de funcionamiento. Principalmente los álabes pueden ser de dos tipos, fijos y móviles; los álabes fijos se encuentran unidos al rodete mediante uniones permanentes como fundiciones de una sola pieza o soldadas, también existen uniones empernadas aunque son poco frecuentemente usadas para formar el conjunto motriz de la turbina; mientras los álabes móviles o directrices se caracterizan por encontrarse separados del rodete en la mayoría de los casos y pueden ser orientados en un ángulo específico para regular el caudal cuando la carga de la turbina disminuye conservando la mejor eficiencia posible para esa condición.

### 2.1.2 *Geometría y funcionamiento según el tipo*

Los característicos álabes de la turbina Pelton también conocidos como cangilones o cucharones tienen precisamente esa forma de cuchara, los cuales reciben la entrada del chorro de agua de manera tangencial a través de los inyectores, en la Figura 1 puede observarse la geometría de un rodete Pelton. Son empleados donde existe grandes saltos de agua y caudales relativamente pequeños.

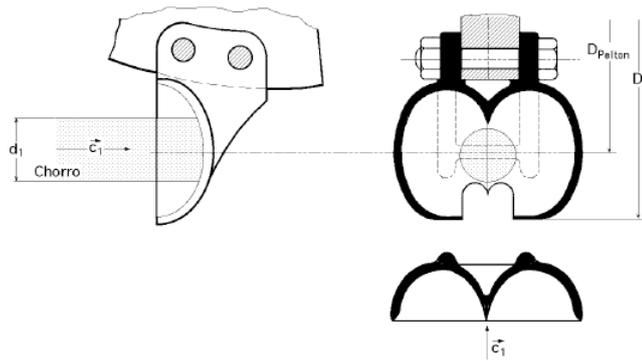
Figura 1. Rodete Pelton



Fuente: (DORJI, y otros, 2014)

La parte más importante de la geometría de este tipo de álabes es la unión de las mitades simétricas de los cangilones en un elemento conocido como tricúspide, el cual tiene una forma alargada, como se muestra en la Figura 2. Esto podría representar un probable desgaste o lugar donde existiría una concentración de tensiones, al igual que la unión que existe entre el cangilón y el rodete, debido al impacto del fluido para hacer girar la turbina.

Figura 2. Geometría de álabes de turbina Pelton



Fuente: (FERNÁNDEZ DÍEZ, 2002)

Los álabes fijos de las turbinas Francis reciben el fluido de manera radial, ya que, el agua entra perpendicular al eje, en la Figura 3 se puede observar la geometría del rodete Francis junto a sus álabes fijos. Son usualmente empleados ya que poseen un amplio rango de funcionamiento para grandes saltos hasta pequeños saltos con grandes velocidades.

Figura 3. Rodete Francis



Fuente: (DORJI, y otros, 2014)

En la Figura 4 puede apreciarse el corte de la sección de un álabes fijo Francis, debido a su manufactura de una sola pieza lo vuelve complicado para una reposición en caso de producirse una fractura, por ello sus secciones tienen un espesor considerable.

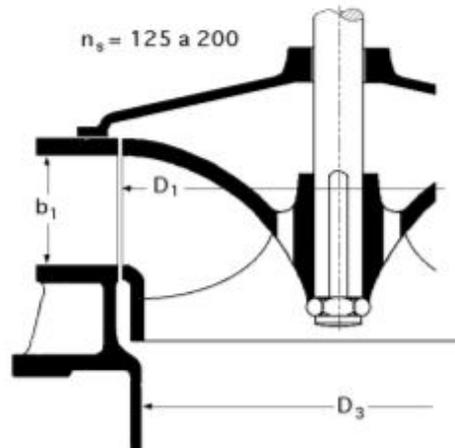
Los álabes directrices por otro lado tienen una geometría que se asemeja a una bandera, formados por una sección tipo airfoil<sup>2</sup> y un eje encamisado que encaja en los agujeros del cuerpo de la turbina, para direccionar el fluido al rodete y regular el caudal como se

---

<sup>2</sup> Forma de un ala, álabes en sección transversal usado en aerodinámica para producir una fuerza de elevación perpendicular al sentido de movimiento.

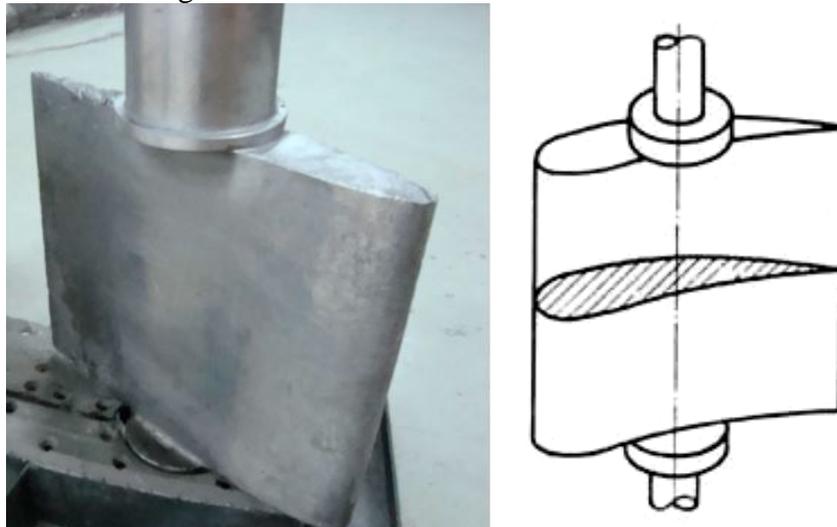
mencionó anteriormente. Están sometidos a grandes esfuerzos mecánicos, por ello poseen un lado que se encuentra a succión y otro a presión. La Figura 5 ilustra la geometría de un álabe directriz de una turbina Francis.

Figura 4. Sección de rodete Francis lento



Fuente: (FERNÁNDEZ DÍEZ, 2002)

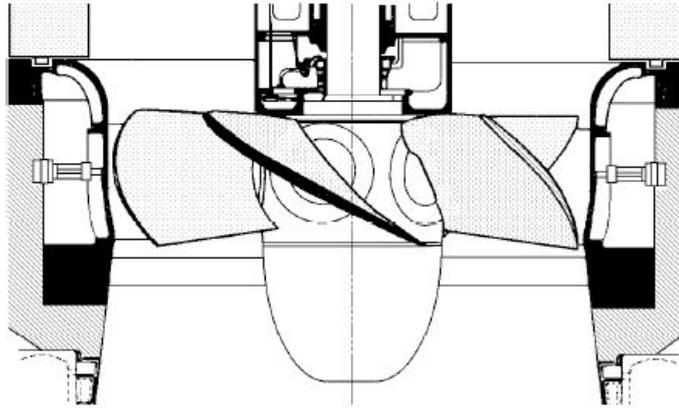
Figura 5. Álabe directriz de turbina Francis



Fuente: (SAGÑAY, y otros, 2012)

Finalmente, los álabes de las turbinas Kaplan poseen la geometría de los impulsores de los barcos, contrariamente de los Francis el flujo entra paralelamente al eje. Este tipo de turbinas suelen ser usadas en situaciones donde existe gran caudal y pequeños saltos de fluido, debido a ello no se encuentran muy comúnmente en centrales hidroeléctricas. En la Figura 6 se observa el esquema de un rodete Kaplan con sus álabes móviles, los cuales pueden ser orientados para regular la entrada del fluido a la turbina.

Figura 6. Rodete Kaplan

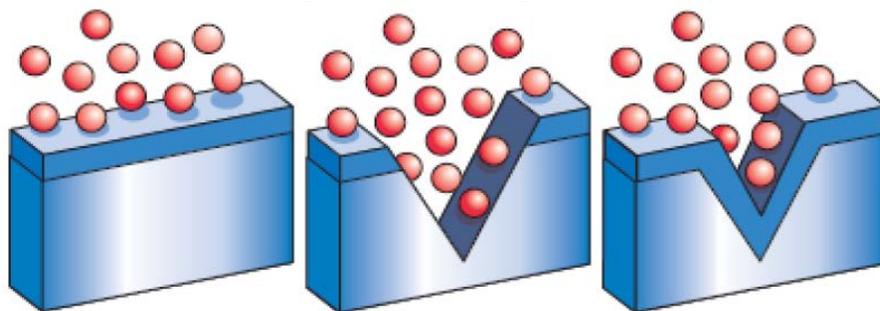


Fuente: (FERNÁNDEZ DÍEZ, 2002)

## 2.2 Propiedades físicas, químicas y mecánicas del acero ASTM A743 CA-6NM

Los aceros inoxidable son materiales resistentes a la corrosión, de alta resistencia mecánica y ductilidad, los cuales son aleaciones de base hierro que contienen como principal elemento aleante al cromo, el cual se encuentra en un porcentaje en peso mínimo de 10,5%, esta condición les brinda su principal característica de formar una delgada capa de óxido de cromo, duradera y adherente mediante el proceso de pasivación. Esta capa protectora vuelve a formarse en caso de que se raye la superficie, permitiendo que inicie el proceso de pasivación como se ilustra en la Figura 7, con lo cual se consigue su título de inoxidable. Dentro de los aceros inoxidable se pueden reconocer varios grupos fundamentales como los ferríticos, austeníticos, martensíticos, dúplex, entre otros. El acero ASTM A743 grado CA-6NM se encuentra dentro del grupo de los aceros inoxidable martensíticos debido a su composición química y junto a otros factores, los cuales le dan sus características microestructurales. (KALPAKJIAN, y otros, 2008)

Figura 7. Mecanismo de reparación de la capa de óxido del acero inoxidable



Fuente: (ZHAÑAY, 2006)

### 2.2.1 Aceros Inoxidables Martensíticos

Están basados en los sistemas ternarios Fe-Cr-C, contienen pequeñas cantidades de Cr relativamente (12-18%) y altas cantidades de C (0,1-0,25%) para la mayoría de las aleaciones de este tipo, son endurecibles por precipitación y magnéticos; se encuentran sometidos a una transformación alotrópica que forma austenita cuando sobrepasan temperaturas cercanas a 650°C y luego forman martensita a partir de eso, además de pequeñas cantidades de ferrita y carburos. La martensita se forma fácilmente en estas aleaciones aun a velocidades de enfriamiento relativamente lentas, debido a ello el uso de diagramas CCT no es tan esencial como en los otros tipos de aceros inoxidables. El revenido es requerido para alcanzar tenacidad y ductilidad aceptables para la mayoría de aplicaciones, altas durezas también pueden obtenerse para mejorar la resistencia a la abrasión. (PHILLIPS, 2016)

La resistencia a la corrosión de este tipo de aceros no es tan buena como la de los otros tipos debido a su bajo contenido de Cr, lo cual los hace también más económicos, y son generalmente seleccionadas para aplicaciones donde se necesita buena resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. Entre las aplicaciones más comunes se encuentran álabes de turbinas de gas, vapor y motores de propulsión que operan a temperaturas bajas relativamente, además de tuberías de vapor, turbinas hidráulicas, válvulas y accesorios para aplicaciones petroleras. (LIPPOLD, y otros, 2005) Los diagramas de fase en equilibrio son empleados para describir las transformaciones de fase y estabilidad de las mismas, siempre y cuando se encuentren dentro de las condiciones de equilibrio termodinámico, por lo tanto, no son aplicables para condiciones como la soldadura donde existen grandes variaciones de temperatura en intervalos de tiempo relativamente cortos.

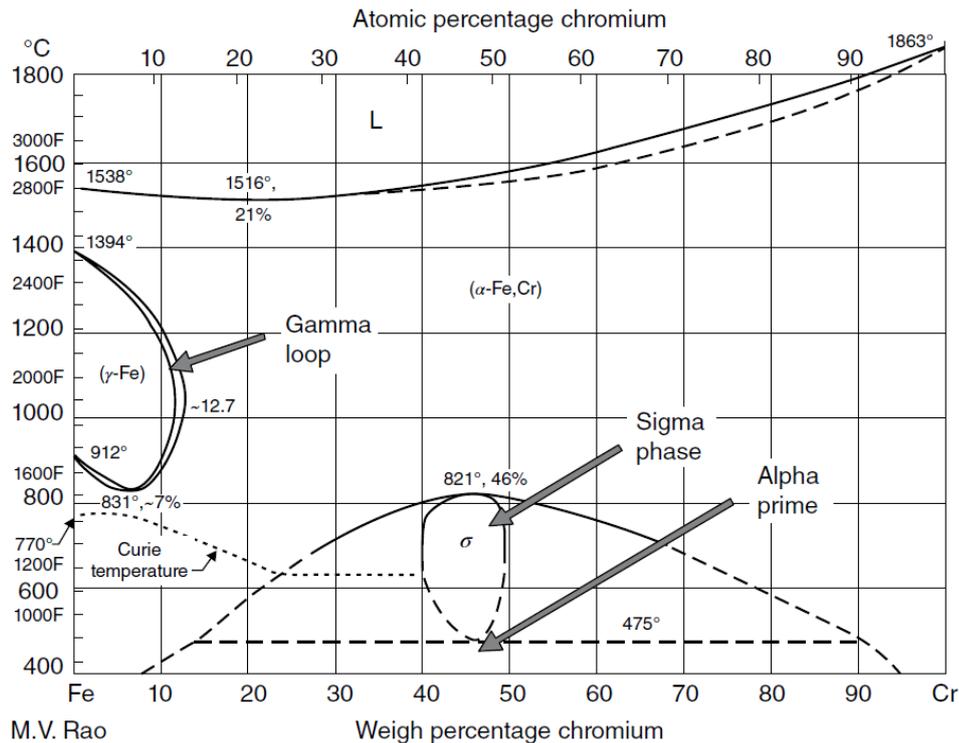
La Figura 8 muestra las condiciones de equilibrio de las fases para las aleaciones Fe-Cr, debido a que el Cr es el principal elemento de aleación del acero inoxidable este diagrama resulta de gran utilidad para proporcionar una noción de las transformaciones de fase que se producen a distintas temperaturas, debe notarse que el Cr es completamente soluble en el Fe a elevadas temperaturas. Contenidos de Cr superiores a 12,7 wt%<sup>3</sup> producirá completamente ferrita a elevadas temperaturas, mientras que contenidos de hasta 12 wt% producirá completamente austenita a las temperaturas dentro del bucle gamma, y a

---

<sup>3</sup> Porcentaje en peso del elemento

elevados rangos de enfriamiento ésta puede transformarse en martensita. Un compuesto intermetálico de Fe y Cr que se forma a temperaturas bajas llamada fase sigma  $\sigma$  en aleaciones que exceden 20 wt% Cr y por la presencia de ferrita cuando se mantiene entre temperaturas de 600 y 900 °C durante periodos prolongados de tiempo, resulta indeseable debido a su fragilidad y alta dureza. (LIPPOLD, y otros, 2005)

Figura 8. Diagrama de fase binario en equilibrio de Fe-Cr, base para las transformaciones en aceros inoxidable

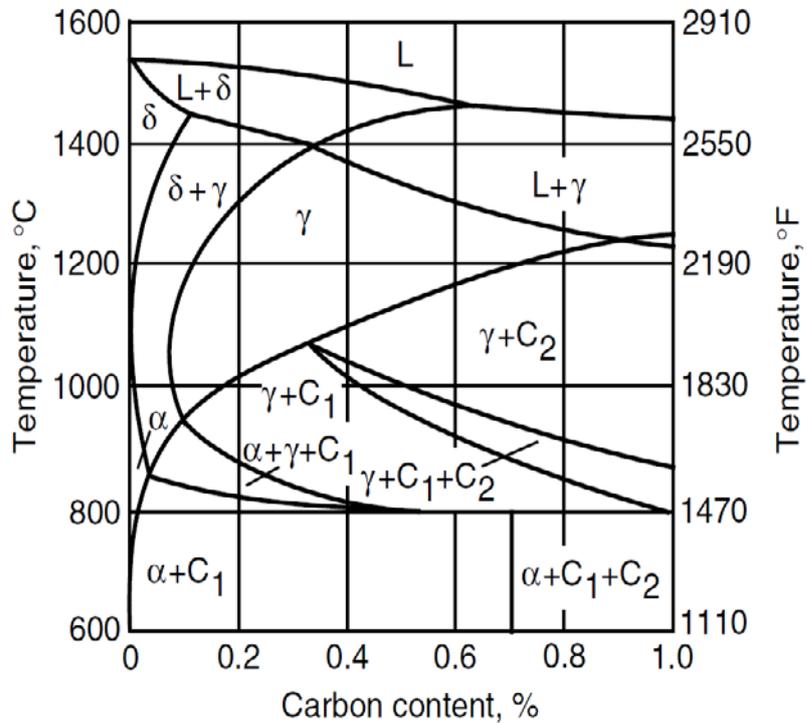


Fuente: (PHILLIPS, 2016)

Los diagramas pseudobinarios son proyecciones bidimensionales de un sistema tridimensional, por lo cual no deben ser usados de la misma manera que un diagrama bifásico. Son bastante útiles para entender el equilibrio de las fases y sus transformaciones en sistemas de tres componentes. La Figura 9 representa el diagrama pseudobinario para un acero compuesto de Fe-Cr-C con 13 wt% de Cr, este diagrama es más complicado que el diagrama Fe-Cr ya que introduce la presencia de nuevas fases como el carbono y los carburos  $C_1$  y  $C_2$ . La adición de Ni al diagrama Fe-Cr expande el campo austenítico lo cual permite que la austenita sea una fase estable aún a temperatura ambiente, como sucede en los aceros inoxidable austeníticos y dúplex. (LIPPOLD, y otros, 2005) Los elementos aleantes tienen influencia directa en las propiedades del acero inoxidable y modifican el área de las fases del diagrama, produciendo diferentes microestructuras en

función de la temperatura, siendo esto muy importante para mantener la estabilidad de las fases y evitar cambios no deseados durante el funcionamiento del material.

Figura 9. Diagrama pseudobinario Fe-Cr-C con 13% Cr. C<sub>1</sub> es un carburo (Cr, Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> y C<sub>2</sub> es un carburo (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>

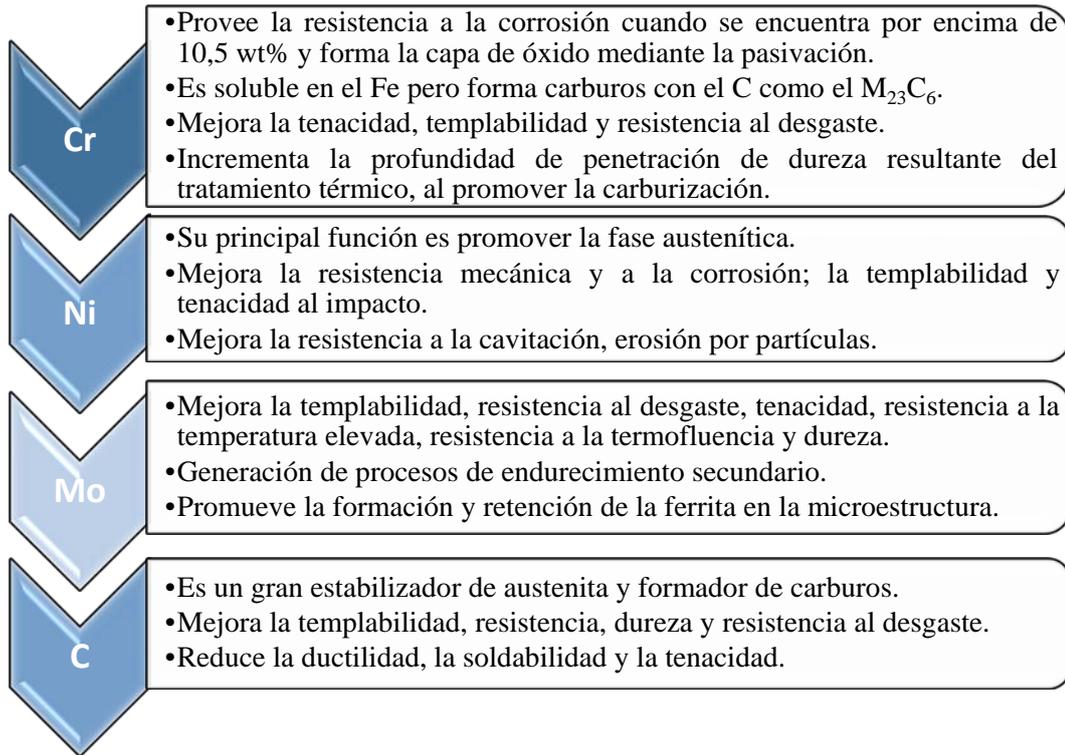


Fuente: (KOU, 2003)

Las principales influencias de los elementos aleantes en las propiedades de los aceros inoxidables se pueden resumir mediante la Figura 10, la cual es una compilación basada en autores como Kalpakjian, Lippold, entre otros. Continuando con lo que se había mencionado acerca de la influencia de los elementos aleantes en las fases de los diagramas de equilibrio, se puede notar el importante incremento del bucle gamma con la adición progresiva de C y Ni, para así promover la formación completa de austenita a elevadas temperaturas con lo cual podrá transformarse en casi su totalidad en martensita, lo cual es lo más deseado en los aceros inoxidables martensíticos (MSS<sup>4</sup>), otra característica para que esto sea posible es el bajo contenido de Cr relativamente (debajo de 12 wt%), ya que el Cr tiende a reducir el campo de estabilidad de la austenita. En la Figura 11 se indican los diagramas de equilibrio del acero inoxidable, en los cuales sus elementos aleantes varían para ilustrar el cambio de tamaño del bucle gamma.

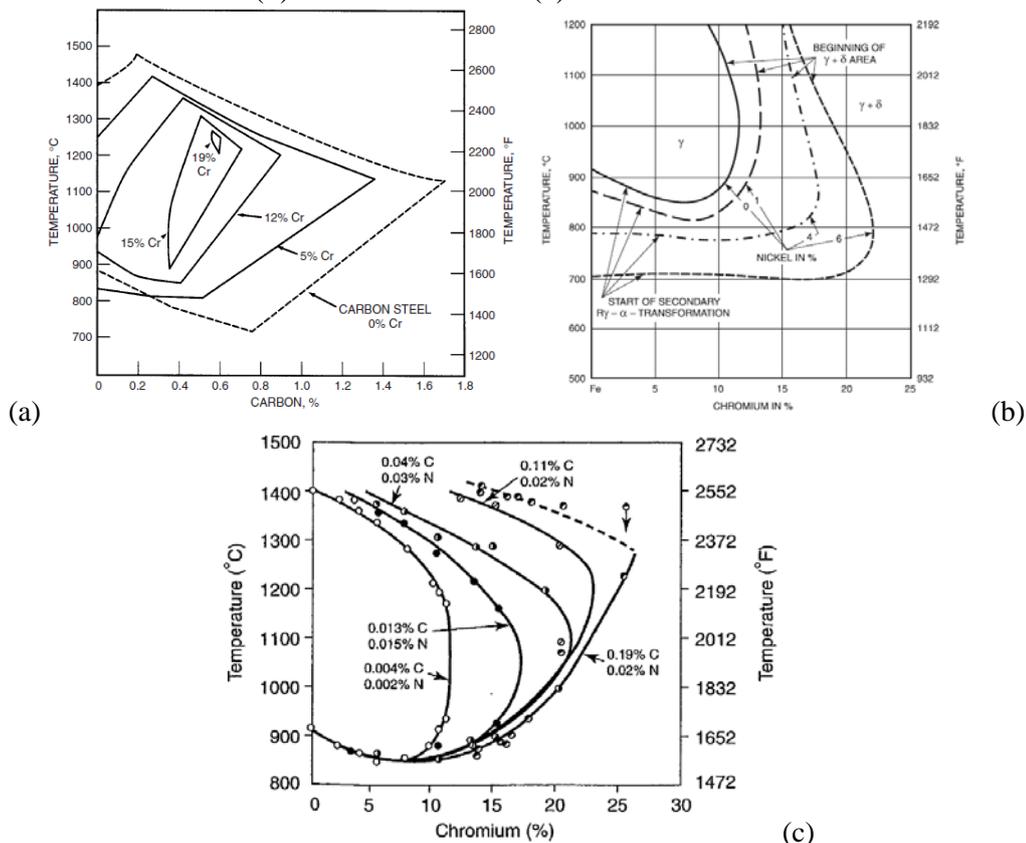
<sup>4</sup> Martensitic Stainless Steels o Aceros inoxidables martensíticos.

Figura 10. Influencia de los principales elementos aleantes en el acero inoxidable



Fuente: Autores.

Figura 11. Influencia de los elementos aleantes en el bucle gamma. (a) influencia del Cr. (b) influencia del Ni. (c) influencia del C



Fuente: (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011), (LIPPOLD, y otros, 2005)

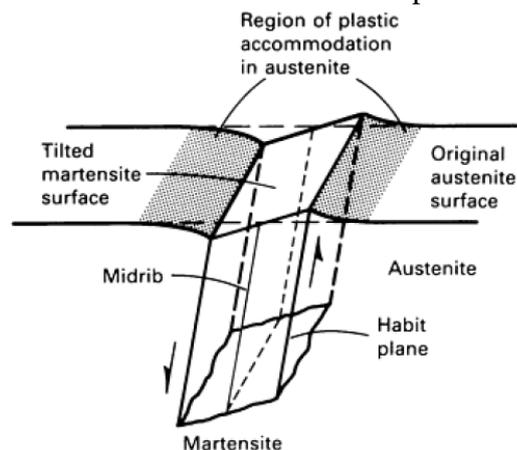
## 2.2.2 Principales fases presentes dentro de los aceros inoxidables

Los MSS presentan una gran cantidad de fases, siendo las principales en orden de formación descendente de acuerdo a la temperatura a la que se forman acorde al diagrama de equilibrio pseudobinario: fase líquida o liquidus (L), ferrita o hierro delta ( $\delta$ ), austenita o hierro gamma ( $\gamma$ ), ferrita o hierro alfa ( $\alpha$ ), martensita ( $\alpha'$ ), sigma ( $\sigma$ ); además de otros elementos complementarios como la austenita retenida ( $\gamma'$ ) y los carburos ( $M_xC_y$ ), entre otros.

### 2.2.2.1 Martensita ( $\alpha'$ )

Es la fase predominante y más deseada en los MSS debido a que produce la mayor resistencia y dureza; se produce mediante la transformación no difusional de la austenita durante el enfriamiento a temperatura ambiente, la cantidad que se forma de martensita depende de que el enfriamiento se realice por debajo de  $M_s^5$ , mas no del tiempo que se encuentre a esa temperatura. Sucede mediante un mecanismo de cizallamiento o el movimiento cooperativo de una gran cantidad de átomos. En la Figura 12 se esquematiza la formación de un cristal de martensita; el corte actúa paralelo a un plano cristalográfico fijo y produce una inclinación no uniforme en la superficie libre.

Figura 12. Esquema del cizallamiento e inclinación de la superficie asociado con la formación de martensita en placas



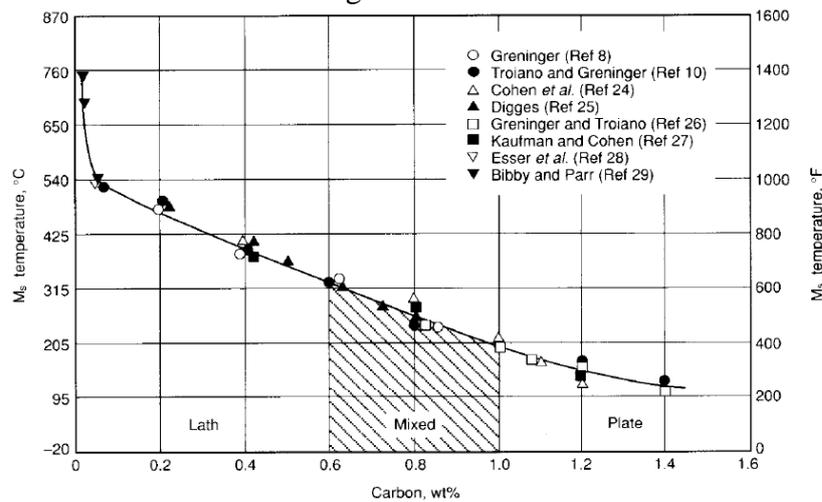
Fuente: (ASM INTERNATIONAL, 1998c)

La martensita es deformada por las restricciones creadas y produce una gran densidad de

<sup>5</sup>  $M_s$ : Martensite start, es la temperatura a la que la fase gamma empieza a transformarse en martensita; mientras  $M_f$ : Martensite finish, es la temperatura a la que acaba de transformarse.

dislocaciones, junto a los átomos de carbono atrapados en los espacios intersticiales de la estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) es lo que produce alta resistencia mecánica de la martensita. (ASM INTERNATIONAL, 1997) Las deformaciones plásticas producidas en la estructura cristalina distorsionada generan tensiones residuales, las cuales aumentan elevadamente la dureza y a la vez la fragilidad, produciendo la llamada martensita fresca. Es debido a esto que se vuelve mandatorio brindar un tratamiento térmico que produzca el alivio de tensiones residuales, permitiendo tener una estructura cristalina más regular que conlleve a una menor dureza y resistencia, pero continúe siendo de grandes características, esta es la llamada martensita revenida, la cual es indispensable en los aceros para ser sometidos a un funcionamiento adecuado. La morfología de la martensita se divide principalmente en dos tipos, en forma de listones o placas, los cuales varían de acuerdo a su contenido de carbono, el cual también influye en la temperatura de formación o  $M_s$  como se indica en la Figura 13.

Figura 13. Temperatura  $M_s$  en función del contenido de carbono, además de zonas de morfología de la martensita

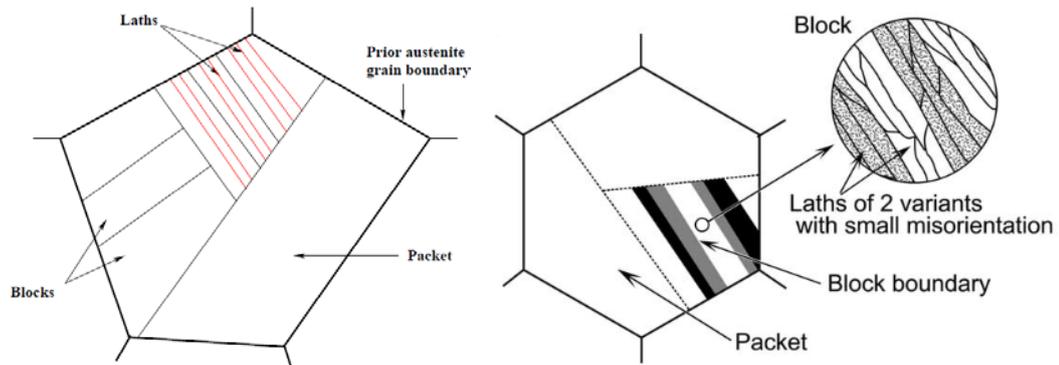


Fuente: (ASM INTERNATIONAL, 1997)

La martensita tiene forma de listones para bajos y medios contenidos de carbono en el acero, se caracterizan por sus cristales con forma de listones alineados paralelos unos a otros, los cuales tienen una estructura interna de dislocaciones enredadas y pequeñas cantidades de austenita retenida entre los listones. Se encuentran agrupados en largas estructuras llamadas bloques o paquetes, como se puede observar en la Figura 14. La microestructura de la martensita en listones es usualmente muy fina para ser revelada empleando microscopía óptica, por lo cual la microscopía electrónica es necesaria. En los aceros de alto contenido de carbono se forma martensita en forma de placas y tiende a no

ser paralela, con grandes contenidos de austenita retenida debido a la baja temperatura de  $M_s$ , además de una zona mezclada donde pueden coexistir ambas morfologías de la martensita. (ASM INTERNATIONAL, 1997)

Figura 14. Ilustración de componentes y morfología de martensita en forma de listones



Fuente: (CARROUGE, 2002) (MIRAKHORLI, y otros, 2017)

#### 2.2.2.2 Ferrita ( $\delta$ )

Es una de las formas alotrópicas del hierro la cual a temperaturas inferiores cercanas a los  $700^{\circ}\text{C}$  tiene su denominación  $\alpha$  y por encima de los  $1300^{\circ}\text{C}$  tiene su forma  $\delta$ , las cuales poseen una estructura cristalina BCC<sup>6</sup>, siendo su principales diferencias el tamaño del parámetro de su red cristalina y microestructura. Por otro lado, ambas son fases del acero que se caracterizan por ser suaves, altamente dúctiles y magnéticas, lo cual mejora ampliamente la maleabilidad del acero, pero su presencia resulta perjudicial si se desea tener buenas propiedades mecánicas de resistencia y dureza, las cuales resultan clave para evitar problemas de desgaste superficial como el caso de los elementos hidráulicos, por ello su presencia en los MSS resulta indeseable.

#### 2.2.2.3 Austenita ( $\gamma$ )

Es la fase conocida también como hierro gamma en el acero, la cual tiene buenas propiedades de resistencia mecánica y dureza, mucho mayores que la ferrita, aunque menores que las de la martensita, siendo menor su dureza, pero mayor su ductilidad, debido a ello resulta conveniente en proporciones adecuadas para las propiedades del acero; sin embargo, es una fase inestable que puede transformarse durante el enfriamiento,

<sup>6</sup> Body Center Cubic o Cúbica centrada en el cuerpo.

y si no es controlada puede resultar perjudicial. Se caracteriza por ser no magnética y tener una estructura cristalina de tipo FCC<sup>7</sup>. Durante el calentamiento puede existir una transformación incompleta de la martensita, lo cual conlleva a la presencia de austenita retenida que puede mantenerse aún a temperatura ambiente debido a la baja temperatura de Ms. (CARROUGE, 2002) (HOYOS PULGARÍN, 2009) (BHADESHIA, 1979)

#### 2.2.2.4 Carburos ( $M_xC_y$ )

Los carburos son compuestos intermetálicos que se forman por la unión de varios elementos como el Cr, Fe y otros con el C, pueden formar desde carburos simples como el  $Cr_xC_y$  o  $Fe_xC_y$  hasta carburos complejos como  $M_xC_y$  donde M es un compuesto de varios elementos. De acuerdo al diagrama de equilibrio de la figura 9, los carburos complejos más comunes en los aceros inoxidable son  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  y  $(Cr, Fe)_7C_3$ , siendo el predominante para el acero ASTM A743 CA-6NM el  $M_{23}C_6$  debido a su bajo contenido de carbono. Los carburos tienen la característica de poseer alta dureza, lo cual puede ser perjudicial cuando se ubican en los límites de grano debido a que tienden a crear fragilidad por donde puede ocurrir un agrietamiento causado por fatiga, u otras causas; además de reducir el contenido libre de Cr para crear la capa de pasivación, disminuyendo la protección contra la corrosión, siendo la corrosión intergranular un factor a tener muy en cuenta al igual que el HIC<sup>8</sup>.

#### 2.2.3 Aceros ASTM A743 CA-6NM

La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM) bajo su especificación A743 cubre las Fundiciones de Hierro Cromo Níquel para aplicaciones generales resistentes a la corrosión (ASTM INTERNATIONAL, 2013), dentro de los cuales se encuentra entre otros el grado CA-6NM, el cual se identifica así debido las características que se presentan en la Tabla 1, de acuerdo a High Alloy Product Group of the Steel Founders' Society of America. Este material se obtiene mediante un proceso de fundición, de ahí también que su designación se relacione con la letra C, lo cual hace referencia a su resistencia a la corrosión, pero también a la palabra "Cast", lo cual significa fundido o fundición.

---

<sup>7</sup> Face Center Cubic o Cúbica centrada en el cuerpo.

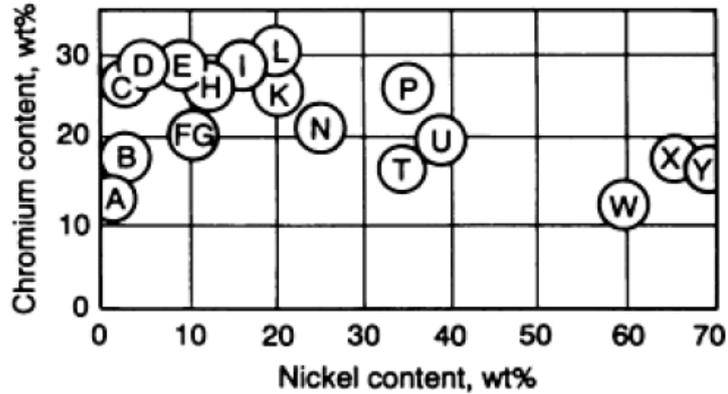
<sup>8</sup> Hydrogen Induced Cracking o Agrietamiento por hidrógeno inducido.

Tabla 1. Características de la denominación del acero CA-6NM

Denominación	Característica
C	Servicio para ambientes corrosivos líquidos menores a 650°C
A	Relación entre los contenidos de Cr y Ni como se indica en la Figura 15
6	Contenido de carbono en porcentaje en peso multiplicado por 100
N	Presencia de Níquel
M	Presencia de Molibdeno

Fuente: (STEEL FOUNDERS' SOCIETY OF AMERICA, 2004)

Figura 15. Diagrama de relación de Cr y Ni para aceros inoxidable fundidos tipo C



Fuente: (ASM INTERNATIONAL, 1998b)

Las aplicaciones comunes de este material incluyen rodetes, impulsores, diafragmas, difusores de bombas y turbinas, válvulas y componentes relacionados, debido a su buena resistencia mecánica y dureza, además de su tenacidad, la cual reduce su susceptibilidad a la cavitación, erosión y agrietamiento, permitiendo llevar a cabo procesos de soldadura con mayor facilidad. Su poco contenido de Cr junto a su bajo contenido de C le brindan protección moderada contra la corrosión, ya que no hay excesiva formación de *carburos*, manteniendo el Cr en estado libre. En la Tabla 2 se indican los wt% de los elementos principales de este acero, mientras que la

Tabla 3 indica las propiedades mecánicas mínimas con las que debe cumplir el material de acuerdo a su especificación ASTM A743. (STEEL FOUNDERS' SOCIETY OF AMERICA, 2004)

Tabla 2. Requerimientos de composición química nominal en wt%

Grado (UNS)	Tipo	Composición química en wt%							
		%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
CA6NM (J91540)	12 Cr, 4 Ni	<0,06	<1	<1	<0,04	0,03	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1

Fuente: (ASTM INTERNATIONAL, 2013)

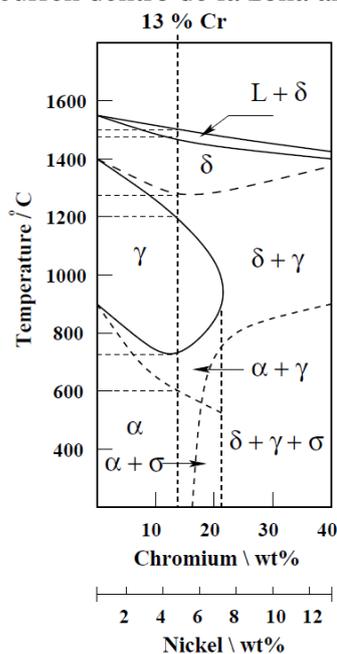
Tabla 3. Requerimientos de propiedades mecánicas

Norma	Grado	Resistencia a la tracción, mín.		Resistencia a la fluencia, mín.	
		Ksi	[MPa]	ksi	[MPa]
ASTM	CA6NM	110	[755]	80	[550]
DIN	G-X5 Cr Ni 13 4	Elongación en 2 in.	Reducción de Área	Dureza máx.	Impacto mín.
AFNOR	Z4 CND 13.4 M	[50 mm], mín., %	mín., %	HBW	J/cm2
UNS	J91540	15	35	285	60

Fuente: (ASTM INTERNATIONAL, 2013)

El estado de suministro del material se encuentra normalizado luego de un calentamiento mínimo a 1010°C y enfriamiento en aire calmado hasta 95°C o por debajo, para luego ser revenido a una temperatura entre 565°C y 620°C. Este ciclo térmico se realiza para obtener una estructura mayoritariamente martensítica en estado revenido, la cual puede contener pequeñas cantidades de austenita retenida y ferrita delta. De acuerdo al diagrama de la Figura 16, se muestran las transformaciones que sufren las fases durante el calentamiento en equilibrio, pasando por la fase austenítica para luego transformarse a ferrita delta; indicando que por encima de los 620°C hay la posibilidad de obtener austenita inestable que transformaría a martensita fresca durante el enfriamiento, resultando indeseable en el material, ya que aumentaría la dureza y fragilidad, por ello el revenido no debe superar esta temperatura. (ASTM INTERNATIONAL, 2013)

Figura 16. Diagrama de fases pseudobinario para relaciones Cr:Ni de 3:1, y cambios estructurales que ocurren dentro de la zona afectada térmicamente



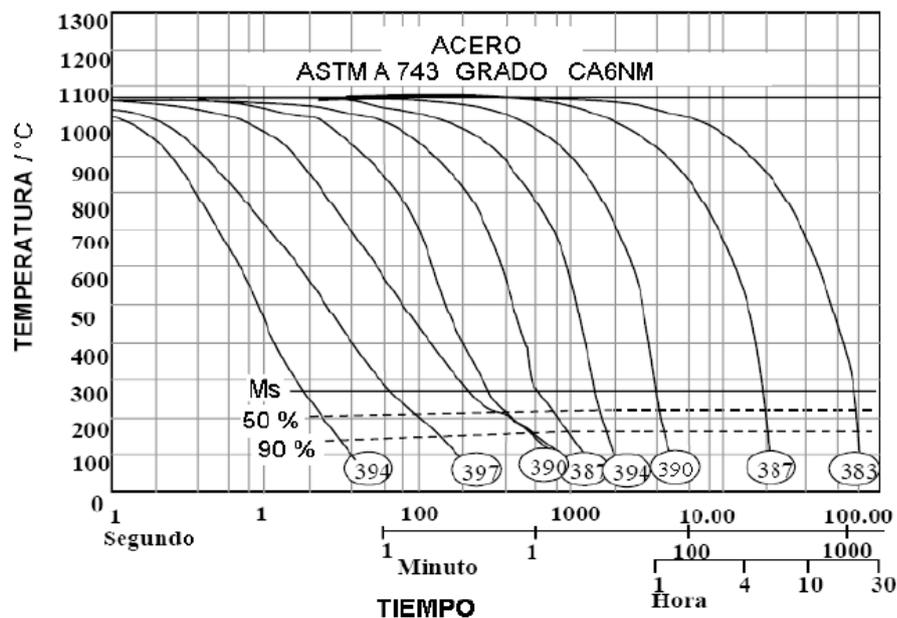
Fuente: (CARROUGE, 2002)

Mientras el diagrama de la figura 16 indica las transformaciones de fase en estado de equilibrio, no es el adecuado para estimar la microestructura resultante después del enfriamiento, ya que este se realiza en condiciones fuera de equilibrio, por ello el empleado para esa tarea es el diagrama de enfriamiento de transformación continua (CCT<sup>9</sup>) de la Figura 17. Este diagrama muestra que, a pesar de tasas de enfriamiento relativamente lentas la martensita se forma con facilidad gracias a la buena templabilidad del material obtenida por su composición química, por ello algunos autores como Phillips (2016) incluso sostienen que no es necesario el uso de estos diagramas CCT para analizar las fases resultantes. Puede notarse mediante el diagrama que la dureza de la martensita resultante varía en mínimas proporciones en función del tiempo. La temperatura Ms de inicio de transformación puede ser calculada mediante la expresión:

$$M_s = 492 - 125C - 65,5Mn - 10Cr - 29Ni \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

De acuerdo a la composición química del CA-6NM esta temperatura podría llegar hasta 260°C, mientras el final de la transformación Mf se estima que puede encontrarse a unos 100°C por debajo de Ms, aunque estas temperaturas pueden variar en función del enfriamiento desde la austenitización. (ROJAS MARÍN, 2009)

Figura 17. Diagrama de transformación de enfriamiento continuo del acero CA-6NM



Fuente: (CRAWFORD, 1974)

<sup>9</sup> Continuous Cooling Transformation

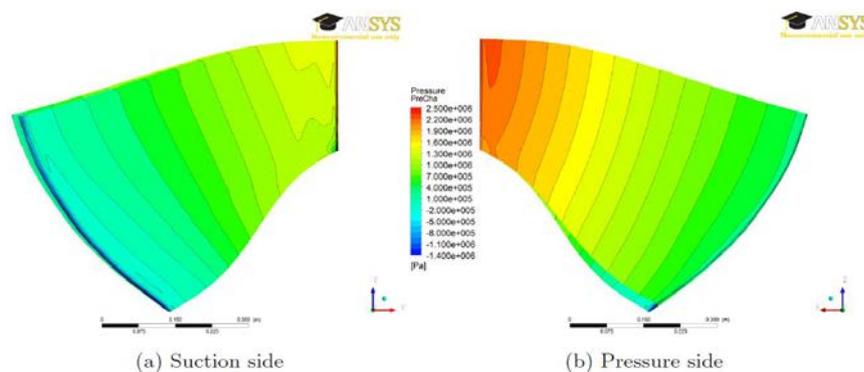
## 2.3 Características de trabajo y tipos de desgaste en los álabes

Los álabes son elementos mecánicos de acero inoxidable que lo protegen de los efectos de la corrosión y se encuentran provistos de un proceso de metalizado, el cual mejora su resistencia al desgaste superficial; sin embargo, se encuentran sometidos a efectos de abrasión, erosión, cavitación; los cuales desgastan el material y generan discontinuidades que si superan un límite tolerable conocido como criterios de aceptación deberán ser reparados para volver a encontrarse dentro de parámetros de funcionamiento adecuados.

### 2.3.1 Características de trabajo

Las características de trabajo a las cuales se encuentran sometidos los elementos hidráulicos son variaciones de presión que existen por la forma del perfil de los álabes, los cuales poseen un lado de presión, el cual se ve más afectado por los efectos del desgaste en comparación con el lado de succión como se muestra en la Figura 18. Estos elementos se encuentran en contacto directo con el agua y los sólidos en suspensión que acarrea, los cuales producen un desgaste ligero pero constante, el cual socava la superficie. Otro factor importante para el trabajo de estos componentes es la puesta en marcha, ya que en ella se generan aceleraciones en intervalos relativamente cortos de tiempo para alcanzar la velocidad de operación de la turbina, durante la cual existen fuertes vibraciones que pueden generar fisuras o grietas que conlleven a fracturas mediante procesos de cargas cíclicas o fatiga del material. (CARPINTERI, y otros, 2011) (FLORES, y otros, 2012) (FRUNZAVARDE, y otros, 2010) (MARKOVIC, 2006) (NEGRU, y otros, 2011) (NEOPANE, y otros, 2011)

Figura 18. Representación de la distribución de presión en la geometría de los álabes del rodete Francis. (a) lado de succión (b) lado de presión

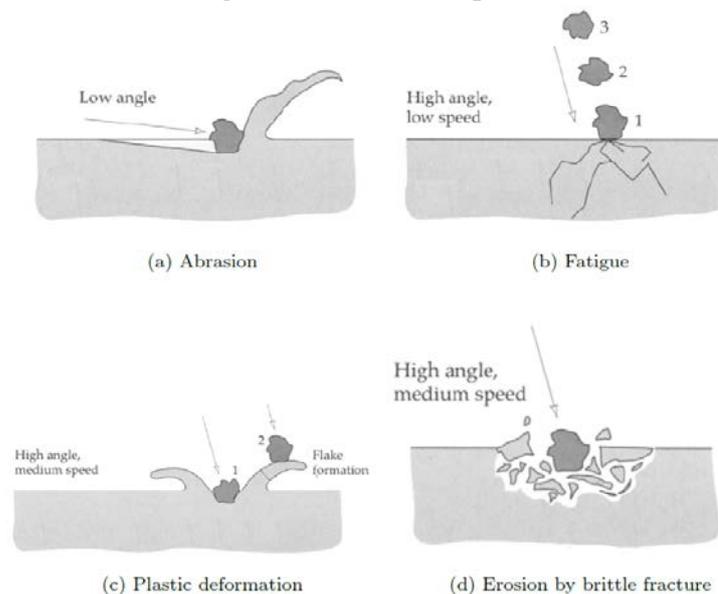


Fuente: (GOGSTAD, 2012)

### 2.3.2 Tipos de desgaste en los álabes

El desgaste puede definirse como el daño superficial sufrido después de determinadas condiciones de trabajo a las que se someten los materiales, pudiendo llegar a afectar a la sub-superficie. El resultado de este desgaste es la pérdida de material y la subsiguiente disminución de las dimensiones y por ende la pérdida de las tolerancias. De acuerdo a varios trabajos de investigación realizados por parte de la universidad de Noruega y otros, se estudiaron los desgastes más comunes y con mayor afectación dentro de las turbinas hidráulicas con énfasis especial en los álabes, estos desgastes consisten básicamente en abrasión, erosión y cavitación, los cuales producen el desgaste superficial principal, el cual repercute directamente en la eficiencia de la turbina, disminuyendo progresivamente conforme se pierde el perfil hidrodinámico original; pudiendo generar pequeñas grietas que al combinarse con la carga cíclica a la que se encuentran sometidos los componentes se produce fatiga y posteriormente una fractura. (DAHL, 2014) (DORJI, y otros, 2014) (ELTVIK, 2009) (ESCALER, y otros, 2006). (GOGSTAD, 2012) (KHURANA, y otros, 2012) (MARKOVIC, 2006) (NEOPANE, 2010) (NEOPANE, y otros, 2011) (PEDRO, 2004) (POTTER, 2013) (SAGÑAY, y otros, 2012) La Figura 19 esquematiza los principales mecanismos de desgaste a los que están sometidos los álabes, indicando la importancia de la dirección y velocidad durante el impacto de las partículas, produciendo abrasión, fatiga, deformación plástica y erosión por fractura frágil respectivamente.

Figura 19. Representaciones más comunes de mecanismos de desgaste en la superficie de álabes. (a) abrasión (b) fatiga (c) deformación plástica (d) erosión por fragilidad



Fuente: (GOGSTAD, 2012)

### 2.3.2.1 Erosión

Es el proceso gradual de remoción de material causado por el impacto de partículas en contra de una superficie sólida. Cuando un material dúctil es impactado, se forman cráteres en su superficie, alrededor de los cuales aparece una pequeña proa constituida de material removido, debido a deformación plástica inicialmente, la cual luego es removida debido al continuo impacto de múltiples partículas contra la superficie como se indica en la figura 19 (c). En los componentes de la turbina esto ocurre como resultado del flujo de alta velocidad y sedimentos de material abrasivo en la superficie. La severidad de la erosión suele determinarse por el tipo de sedimento y sus propiedades como forma, tamaño y cantidades. Otros factores importantes son las condiciones de operación como velocidad, aceleración, ángulo de impacto, concentración, etc. (DORJI, y otros, 2014) (GOGSTAD, 2012) La Figura 20 muestra los efectos de la erosión producida en componentes hidráulicos de una turbina Francis de la central Cahua en Perú.

Figura 20. Efectos de la erosión en los álabes móviles y rodete de una turbina Francis



Fuente: (NEOPANE, y otros, 2011)

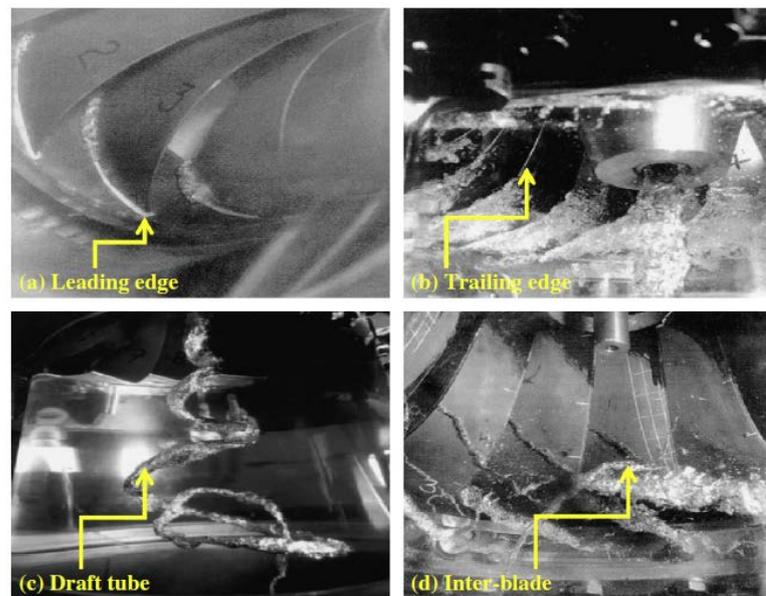
### 2.3.2.2 Abrasión

Es la pérdida de material debido al contacto de partículas duras sobre una superficie y el movimiento a lo largo de ella, esto ocurre cuando las partículas de un material de igual o mayor dureza que la superficie del sólido interactúan. Estas partículas se encuentran como sólidos en suspensión en el fluido que atraviesa la turbina durante la producción de energía eléctrica. Este tipo de desgaste puede causar arañazos en la superficie, corte cuando una partícula afilada golpea en una superficie más suave y se desprende material como desecho; la acumulación de grietas con el tiempo puede resultar en desprendimientos largos del material de la superficie. (GOGSTAD, 2012)

### 2.3.2.3 Cavitación

Es un fenómeno que ocurre usualmente en máquinas hidráulicas, en el cual el agua que ingresa a la turbina está sometida a variaciones de presión y velocidad, lo cual produce la formación de burbujas de vapor en las zonas de baja presión y el posterior estallido de las mismas una vez que alcanzan nuevamente zonas de mayor presión, ocasionando grandes esfuerzos en la superficie y presión transitoria con valores tan altos como 1500 MPa, por lo cual su efecto es altamente perjudicial en el material. (DORJI, y otros, 2014) (GOGSTAD, 2012) (MARKOVIC, 2006) Los principales tipos de cavitación estudiados en turbinas Francis de acuerdo con Gogstad (2012) y Dorji et al (2014) son los que se muestran en la Figura 21, los cuales son cavitación en el borde de ataque, en el borde de arrastre, formación de remolino en el tubo de aspiración y, de vórtice entre los álabes.

Figura 21. Principales tipos de cavitación detectadas en turbinas Francis. (a) en borde de ataque (b) en borde de arrastre (c) remolino en el tubo de aspiración (d) vórtice entre los álabes



Fuente: (DORJI, y otros, 2014)

## 2.4 Métodos de recuperación aplicados en los álabes y rodetes

Recuperar hace referencia a volver a poner en servicio algo que se encontraba en un estado de deterioro o era inservible debido a las características actuales de dicho objeto. Existen diversos métodos de recuperación para obtener un resultado eficiente en cuanto a la calidad final del componente y devolverlo a su estado de funcionamiento, esto es

realizado de acuerdo a las discontinuidades presentadas. En función de la magnitud de las discontinuidades pueden realizarse dos tipos de reparaciones generales, las cuales son el *Rectificado* y el *Relleno*, caracterizadas cada una por lo que se describe a continuación. (SÁNCHEZ, 2011)

- **Rectificado.** – Es un proceso de mecanización, el cual consiste en el desbaste superficial para reducir las dimensiones de los álabes y rodets para alcanzar sus tolerancias dimensionales finales y acabados superficiales, acorde a lo que especifique el fabricante. Es empleado para corregir y eliminar discontinuidades superficiales que no sobrepasen un límite permisible, por ello solo es aplicable a pequeñas fallas, en las cuales exista una sobredimensión o la raíz de la falla no comprometa las propiedades de los componentes durante su operación.
  
- **Relleno.** – Consiste en el aporte volumétrico de material para alcanzar la geometría original de los álabes y rodets, con el cual se recupera el desgaste gravimétrico sufrido por los efectos de la erosión y cavitación, los cuales son lo suficientemente profundos para ser reparados mediante mecanizado. El relleno puede ser realizado a través del aporte de materiales de diferente origen en función de la cantidad que se desea rellenar, los principales usados en álabes y rodets de turbinas hidráulicas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de características de tipos de relleno empleados en la reparación de álabes y rodets hidráulicos

Tipo de Relleno	Material de Aporte	Dureza	Volumen	R. al desgaste	Aplicación	Costo
Recubrimiento	Cerámico	Medio +	Medio	Medio +	Fácil	Bajo
Soldadura	Metálico	Bajo	Alto	Medio –	Difícil	Medio
Metalizado	Metálico/Cerámico	Alto	Bajo	Alto	Difícil	Alto

Fuente: Autores

Cada tipo de relleno mostrado en la tabla 4 presenta características que los hacen útiles para aplicaciones específicas, siendo su combinación lo más empleado en la recuperación de los álabes y rodets hidráulicos. El recubrimiento cerámico resulta de gran utilidad cuando existen pequeños desgastes producidos por erosión, los cuales deben ser corregidos durante el mantenimiento preventivo. Este recubrimiento permite ser fácilmente moldeado y posee buenas características de dureza y resistencia al desgaste con un costo relativamente reducido. El relleno por soldadura abarca grandes volúmenes

de aporte de material, lo cual resulta ideal cuando el desgaste superficial es severo y se necesita que el material aportado sea de características químicas similares al material original para mantener sus propiedades mecánicas; siendo su desventaja su baja resistencia al desgaste, por lo cual el metalizado resulta la solución de esa deficiencia, además de aportar una mayor dureza, colocando una capa de espesor muy pequeño que va desde micrómetros hasta espesores menores a un centímetro.

Una vez revisadas las características principales de cada método de recuperación, es el relleno o manufactura aditiva la cual cumple en mayor proporción acorde a los objetivos presentes en esta investigación, resultando la combinación de este tipo de rellenos lo más adecuado para una recuperación integral de los componentes hidráulicos; pero, siendo la soldadura la más esencial debido a todos los cambios metalúrgicos que en ella se producen, además de ser el único método que permite aportar material para rellenar grandes volúmenes en el caso de ser necesario, y también crear juntas que permitan la unión de componentes que hayan sido separados por algún tipo de fractura o se incorporen nuevos elementos para reemplazar partes que hayan sufrido fatiga en el material. Es por eso que este será el único método estudiado y empleado posteriormente para el desarrollo de los procesos de recuperación de los álabes en esta investigación.

## **2.5 Características de los procesos de soldadura empleados en la recuperación**

Debido a los cambios microestructurales que afectan a las propiedades mecánicas de los componentes como efecto de los procesos metalúrgicos que ocurren durante la soldadura y su posterior enfriamiento, estos procesos se realizan bajo estrictos controles de calidad mediante múltiples *Ensayos no destructivos* (END), siendo los parámetros o variables esenciales de la soldadura estudiadas y probadas experimentalmente para lograr resultados satisfactorios en cuanto a la homogeneización del material después de ser aplicados y tratados térmicamente.

### **2.5.1 Metalurgia de la soldadura**

La soldadura se define de acuerdo a AWS como una coalescencia localizada del metal, que se produce por el calentamiento a temperaturas adecuadas con aplicación de presión o sin ella y con la adición o no de metal de aporte para producir la unión a través de fusión



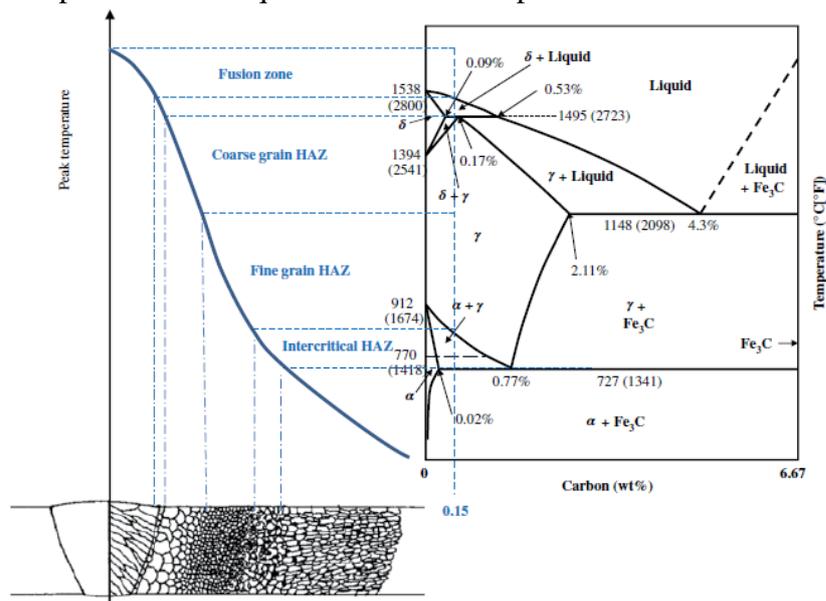
volver a solidificarse, mediante la nucleación y recristalización de su microestructura. (PÁSTOR, 2004)

- *Zona no mezclada (ZNM)*. – Región estrecha que rodea la zona compuesta, la cual es una capa límite de metal base fundido que se solidifica antes de experimental cualquier tipo de mezcla en la zona compuesta; su composición es en esencia igual a la del metal base, y puede observarse con mayor claridad en soldaduras heterogéneas. El espesor de esta zona puede ir desde decenas de micrómetros y alcanzar tamaños de alrededor de 2,5 mm en función de las variables del proceso de soldadura. (PÁSTOR, 2004)
- *Intercara de la soldadura*. – Región donde se delimita el metal base no fundido y el metal de soldadura, puede ser observada gracias al ataque químico en soldaduras con alto contenido de aleación y rango de solidificación. (PÁSTOR, 2004)
- *Zona parcialmente fundida (ZPF)*. – Región adyacente a la intercara de la soldadura, donde ocurre frecuentemente fusión localizada, ya que muchas aleaciones contienen inclusiones de bajo punto de fusión o segregaciones en los límites de grano, debido a ello las temperaturas alcanzadas son lo suficientemente altas para producir la fusión de estos componentes, pero no de toda la zona. (PÁSTOR, 2004)
- *Zona térmicamente afectada (ZAT)*. – Región que experimenta temperaturas pico tan altas que producen cambios en la microestructura en estado sólido, pero no alcanzan el estado de fusión. Generalmente esta zona tiene dimensiones desde casi 1 hasta 3 mm, lo cual dependerá mucho de las condiciones del proceso de soldadura, especialmente el aporte de energía antes y durante la soldadura. Puede dividirse en subregiones como ZAT de grano grueso, de grano fino e intercrítico. (PÁSTOR, 2004)
- *Zona no afectada (MB)*. – Región en la que no se produce ningún cambio en la microestructura, pero pueden producirse importantes tensiones residuales de contracción debido al ciclo térmico que genera la soldadura.

Mediante el diagrama de la Figura 23 se puede apreciar la variación del tamaño de grano

que se produce debido a la cantidad de calor aportada en función de la distancia que se encuentre con respecto al eje de la soldadura para aceros al carbono, existiendo un aumento de tamaño de grano en la ZAT, y la posterior disminución conforme se aleja del eje de la soldadura debido a que las tasas de enfriamiento son más rápidas al haber alcanzado menores temperaturas. Como se indicó anteriormente la ZAT puede dividirse en tres subregiones principales las cuales tienen importante variación en el tamaño de sus granos, pasando de un crecimiento en la Zona de grano grueso, para luego reducirse a los valores mínimos de tamaño de grano de la ZAT en la Zona de grano fino, y posteriormente regresando a un tamaño de grano intermedio de ambas zonas, el cual es muy similar al del MB. Mientras en la ZF existe presencia de granos alargados que siguen la dirección del eje de la soldadura, ya que es la fuente de calor hacia la cual se orientan los granos nucleados para empezar a crecer.

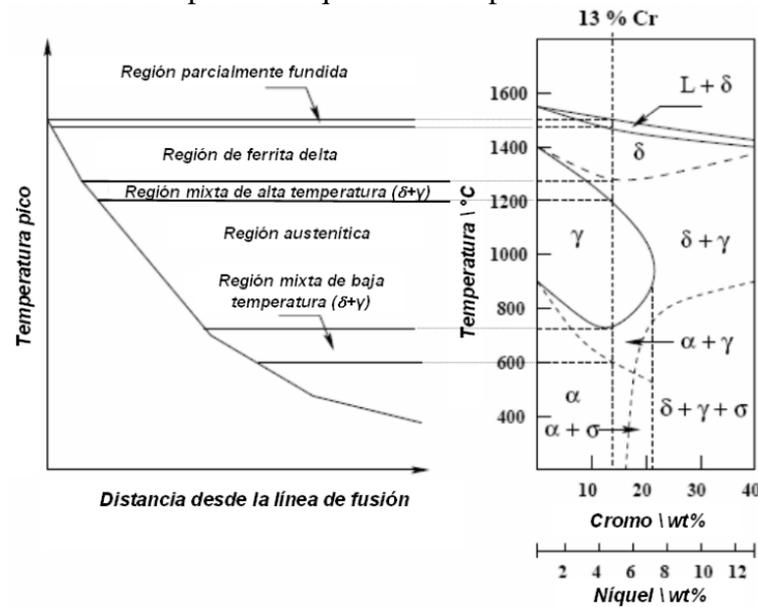
Figura 23. Relación entre el tamaño de grano de las distintas zonas con respecto a las temperaturas a las que están sometidas para un acero al carbono



(LIPPOLD, 2015)

La Figura 24 ilustra los rangos de temperatura en los cuales se crean las zonas diferenciadas anteriormente para un acero con un contenido de 13% Cr y 4% Ni, cabe recalcar que esta representación no es la adecuada para predecir la estructura final después del enfriamiento, ya que está considerado dentro de condiciones de equilibrio, con velocidades de calentamiento y enfriamiento supremamente pequeñas, por lo cual solo brinda una suposición de las transformaciones que ocurren en la microestructura.

Figura 24. Relación entre las zonas que aparecen en función de la distancia del eje de soldadura acorde a las temperaturas que alcanzan para un acero con 13% Cr y 4% Ni



Fuente: (HOYOS PULGARÍN, 2009)

### 2.5.1.2 Soldabilidad

Es la capacidad de un material para ser soldado, la cual depende principalmente de su composición química. Generalmente la soldabilidad se considera muy buena para aceros de bajo contenido de carbono ( $\%C \leq 0,15$ ), buena para aceros dulces ( $0,15 < \%C \leq 0,30$ ), razonable para aceros de medio carbono ( $0,30 < \%C \leq 0,50$ ) y cuestionable para aceros de alto carbono ( $0,50 < \%C \leq 1,00$ ). Debido a que la soldabilidad disminuye con el aumento del contenido de carbono, se deben tomar precauciones especiales como precalentamiento, controlar la entrada de calor y tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT). Este tipo de consideraciones suelen emplearse en aceros que sobrepasen el 0,30 %C. Adicionalmente al contenido de carbono, la presencia de otros elementos aleantes tendrá un efecto en la soldabilidad. (UZUNALI, y otros, 2015)

Precalentamiento o PWHT pueden ser necesarios con el incremento de carbono y elementos aleantes, debido a esta razón, la fórmula de carbono equivalente es usada para determinar si los materiales pueden ser soldados sin la necesidad de realizar cualquiera de los mencionados ciclos térmicos. El Instituto Internacional de Soldadura (IIW) adoptó una forma simplificada, de la propuesta por Dearden y O'neill, la cual se convirtió en la medición general para la soldabilidad de los aceros. La ecuación para el cálculo del carbono equivalente (2) se muestra a continuación. (UZUNALI, y otros, 2015)

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (2)$$

La fórmula de *Carbono Equivalente* cuantifica los wt% de los principales elementos aleantes presentes en la mayoría de aceros, cada uno modifica el diagrama de equilibrio de fases del acero y, por lo tanto, tiene una influencia directa en las propiedades del material.

### 2.5.1.3 Cálculo de la distribución de calor en el pozo de soldadura

Los efectos producidos por el aporte de calor durante el proceso de soldadura y el posterior enfriamiento son muy importantes, debido a que la distribución del flujo de calor en la placa es algo que debe ser tomado en cuenta, para estimar el ancho y la penetración de la soldadura, cambios microestructurales en el MB y esfuerzos residuales. (PÁSTOR, 2004 pág. 80) Rosenthal (1946) resolvió analíticamente la ecuación del flujo de calor (3) usando las consideraciones de que el fenómeno se encuentra en condiciones cercanas al equilibrio, la fuente de calor es un punto en la superficie de la placa, las características del material son independientes de la temperatura y las dimensiones de la placa se consideran infinitas en uno o más ejes dependiendo el caso aplicable correspondiente. (PÉREZ CARGUA, y otros, 2010 pág. 76)

$$\rho \partial \frac{\partial}{\partial t} (c_p T) + \rho v \nabla (c_p T) = \nabla (k \nabla T) + s \quad (3)$$

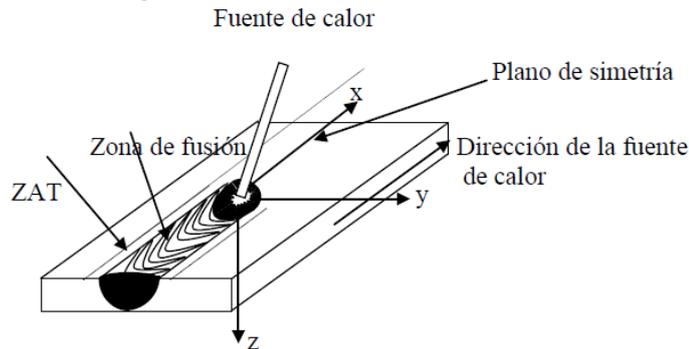
Posteriormente tomando como base el trabajo de Rosenthal, Ashby y Easterling derivaron las ecuaciones (4 y 5) teniendo como consideraciones que dichas ecuaciones son válidas para fuentes puntuales de calor y temperaturas inferiores a la de fusión de la aleación, por lo cual son aplicables solamente para calcular las temperaturas de la soldadura y de la ZAT en un instante posterior a la aplicación de la fuente puntual de calor. También para ese análisis se considera que la fuente de calor se mueve con una velocidad constante ( $v$ ) a lo largo del eje  $x$  de un sistema fijo de coordenadas, esto se representa mediante la Figura 25. El aporte de calor suministrado durante el proceso de soldadura por fusión puede aproximarse mediante los parámetros de corriente y voltaje, además de la eficiencia del arco eléctrico producido, como indica la ecuación (6). El parámetro de eficiencia del arco depende fundamentalmente del tipo de técnica de soldadura empleado. (PÁSTOR, 2004)

$$T = T_0 + \frac{q/v}{d\sqrt{4\pi k\rho c_p t}} e^{\left(-\frac{r^2}{4at}\right)} \quad (4)$$

$$T = T_0 + \frac{q/v}{2\pi kt} e^{\left(-\frac{r^2}{4at}\right)} \quad (5)$$

$$q = \eta VI \quad (6)$$

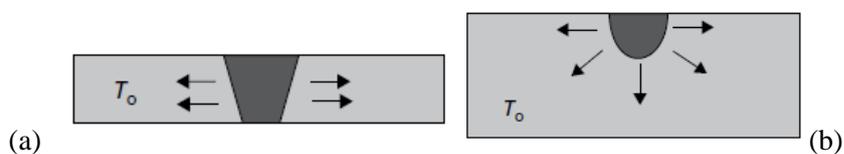
Figura 25. Diagrama del proceso de soldadura de un sistema de coordenadas que tiene su eje en el centro de la fuente de calor



Fuente: (PÁSTOR, 2004 pág. 82)

El flujo de calor en la placa se considera bidimensional para el caso de placa delgada como indica la ecuación (4), mientras que para placa gruesa se usa el caso tridimensional como indica la ecuación (5) y se asume que las pérdidas de calor en la superficie son despreciables; en la Figura 26 se ilustra ambos casos. Pero no es evidente cuando considerar a una placa como gruesa o delgada, para ello se fundamenta no solo en función del espesor de la placa sino también en el tipo de material y proceso de soldadura empleado. Mediante la igualdad de ambas ecuaciones se obtiene un espesor crítico  $d'$ , el cual se muestra en la ecuación (7), que sirve para delimitar a que caso corresponde. Siendo considerada una placa como gruesa si su espesor supera el valor de  $d'$ , en caso contrario, cuando el espesor de la placa sea menor que  $d'$  se deberá aplicar el criterio de placa delgada. (PÁSTOR, 2004)

Figura 26. Condiciones en las que se presenta el flujo de calor. (a) bidimensional (placa delgada) (b) tridimensional (placa gruesa)

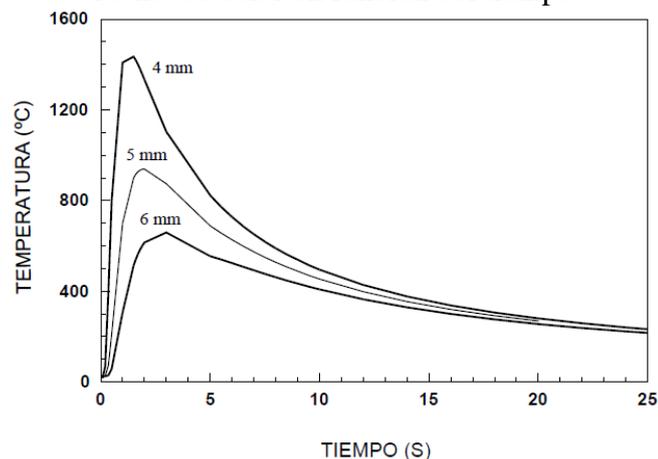


Fuente: (PHILLIPS, 2016)

$$d' = \sqrt{\frac{q/v}{2\rho c_p} \left( \frac{1}{773-T_o} + \frac{1}{1073-T_o} \right)} \quad (7)$$

Estas ecuaciones producen aproximaciones muy buenas de las curvas de temperatura, sin embargo, difieren de los resultados experimentales debido a que se asume un flujo de calor por conducción y no se toma en cuenta los efectos de la radiación ni la convección, propiedades térmicas constantes (varían significativamente en función de la temperatura), no se considera el calor latente de transformación de fase. Las curvas de temperatura suelen graficarse en función del tiempo, indicando la variación de las temperaturas pico para diferentes distancias medidas desde el centro de la fuente de calor, como se indica en la Figura 27. (PÉREZ CARGUA, y otros, 2010 pág. 79)

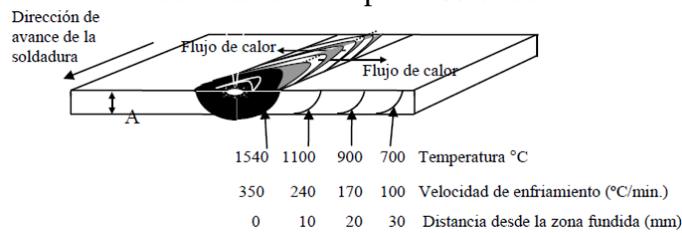
Figura 27. Curvas de temperatura calculadas a varias distancias desde el centro de la fuente de calor en función del tiempo



Fuente: (PÁSTOR, 2004 pág. 87)

El ciclo térmico establece un estado térmico estacionario en cada punto del MB, los cuales dependen de la temperatura pico y la velocidad de enfriamiento, lo cual produce las transformaciones en el material. En la soldadura puede diferenciarse una *zona de sobrecalentamiento* en la cual existe el mayor crecimiento de grano, una *zona de recocido* donde ocurre la recristalización y disminución del tamaño de grano (cercano a 1100 °C), una *zona de transformación parcial* (750 – 900 °C), una *zona de formación de carburos globulares* (700 – 750 °C), y el MB no afectado que se encuentra por debajo de estas temperaturas. La Figura 28 ejemplifica una placa soldada donde se muestra de manera ilustrativa las diferentes zonas mencionadas, indicando la temperatura y velocidad de enfriamiento producidas debido a la distancia que posean con respecto a la ZF. (PÁSTOR, 2004 pág. 88)

Figura 28. Distribución de temperatura y velocidad de enfriamiento a varias distancias de la ZF en una placa soldada

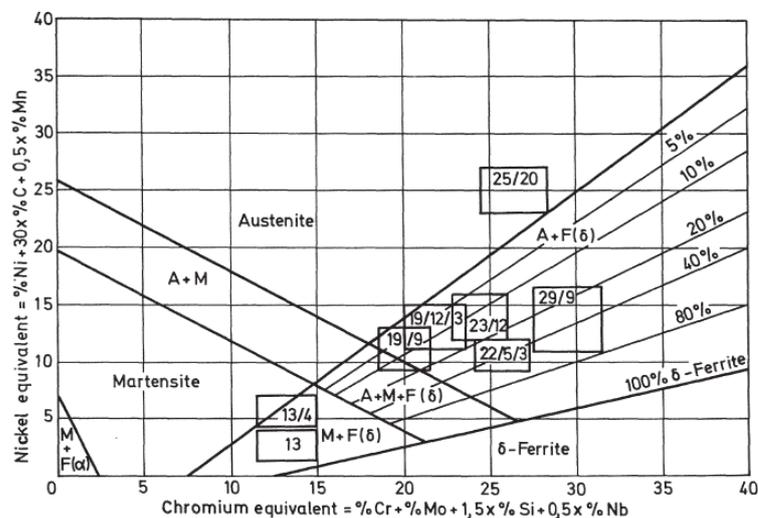


Fuente: (PÁSTOR, 2004 pág. 88)

#### 2.5.1.4 Composición del pozo de soldadura

Los diagramas de constitución se han desarrollado por casi 100 años, desde los primeros bosquejos de Maurer et al, para luego ser progresivamente mejorados con la adición de nuevos elementos y su influencia directa en la formación de fases presentes dentro de los aceros inoxidables. Siendo el diagrama desarrollado por Schaeffler el más aceptado y que continua en vigencia, ya que a pesar de sus grandes limitaciones con las que se planteó, sigue brindando una buena aproximación de la composición de la microestructura para soldaduras de aceros inoxidables, en la Figura 29 se observa el diagrama mencionado, el cual muestra las zonas de varios metales soldados con electrodos revestidos, incluyendo el 13/4. Existen otros importantes diagramas que han sido modificaciones o complementos para el de Schaeffler, como son los diagramas de Delong y WRC-1992 que se centraron en la medición de ferrita para zonas determinadas de composición. (FOLKHARD, 1988 págs. 88-94) (LIPPOLD, y otros, 2005 págs. 25-42)

Figura 29. Diagrama de composición de Schaeffler para soldaduras de aceros inoxidables



Fuente: (FOLKHARD, 1988 pág. 90)

Dentro del diagrama de Schaeffler se distinguen diferentes zonas de las posibles fases que pueden formarse en los aceros inoxidables, como el hierro alfa, gamma, delta y martensita; la composición del pozo de soldadura, de acuerdo al diagrama, estará en función directa de la composición química de los elementos base y la mezcla que forme con el material de aporte, de acuerdo al porcentaje de disolución de cada parte. Es así, que los ejes representan los elementos que contribuyen con la formación del hierro alfa (alfágenos) representados por el  $Cr_{eq}$  y la ecuación (8), y hierro gamma (gammágenos) representados por el  $Ni_{eq}$  y la ecuación (9), se han incluido nuevos elementos que contribuyen con la formación de estas fases en posteriores diagramas. Para el acero ASTM A743 CA-6NM el porcentaje de ferrita se encuentra entre 5 a 10 aproximadamente, lo cual de acuerdo con Pástor (2004) es muy bueno, ya que este acero carecería prácticamente de tendencia al agrietamiento, por otro lado la presencia de esta fase en una mayor cantidad puede reducir la resistencia al impacto hasta en un 50% y el contenido de Cr en regiones cercanas debido a la formación de carburos.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb \quad (8)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn \quad (9)$$

#### 2.5.1.5 Efectos de los pases múltiples de soldadura

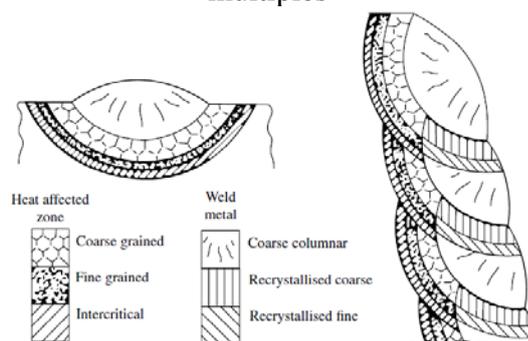
Existe una variación a lo mencionado anteriormente con respecto a las soldaduras que poseen múltiples pases, en las cuales la ZF y ZAT modifican sus microestructuras y, por lo tanto sus propiedades en función de la ubicación a lo largo de la sección transversal del eje de soldadura; debido a que reciben un efecto de ciclo térmico con la adición del pase subsecuente que se realiza durante la soldadura, lo cual produce un refinamiento en el tamaño de grano, además de un efecto de revenido en alguna medida dependiendo de la cantidad de calor que pueda ingresar a cada capa anterior.

Este efecto es pequeño debido a la corta duración del ciclo térmico, y debido a ello las soldaduras con pases múltiples presentan una microestructura en la ZF que tiene una apariencia repetitiva, esto puede ser visualizado en el esquema de la Figura 30. Se presenta inmediatamente fuera de la ZF el grano más grueso con apariencia equiaxial, a diferencia de la forma columnar que poseen los granos dentro de la ZF, luego existe la

presencia de granos finos con una apariencia similar a los que se encuentran junto a ellos; y conforme se aleja de la zona de la soldadura empiezan a tomar la apariencia de los granos del MB no afectado, en cuanto a morfología y dimensiones. (LIPPOLD, 2015) (PÁSTOR, 2004)

Pueden presentarse partículas de segunda fase en los límites de grano de la austenita previa, durante el recalentamiento intercrítico la austenita nuclea y crece de manera preferencial a lo largo de los límites de grano de esta austenita previa y entre las placas de martensita, que son los lugares de mayor nivel de energía. Con el crecimiento de la austenita toma lugar la partición de carbono, con un enriquecimiento dentro de la austenita y un empobrecimiento de carbono en los alrededores, resultando beneficioso para la presencia del Cr en estado libre. Durante el enfriamiento desde la temperatura intercrítica, la austenita puede ser estable a temperatura ambiente, o transformarse a un agregado de ferrita y carburo, o martensita dependiendo del tamaño de la partícula de austenita, la templabilidad y la tasa de enfriamiento. La presencia de partículas de martensita gruesa a lo largo de los límites de grano de la austenita previa resultan en zonas frágiles localizadas que pueden llegar a ser muy susceptibles al agrietamiento asistido por hidrógeno (HIC), por ello un PWHT que permita aliviar las tensiones internas acumuladas dentro de las estructuras cristalinas y refinar estos granos de martensita resulta necesario. (GIRALDO BARRADA, 1999)

Figura 30. Esquema de zonas producidas por la aplicación de soldadura de pases múltiples



Fuente: (LIPPOLD, 2015)

### 2.5.2 Métodos y parámetros de soldadura empleados en la recuperación

Dentro de los métodos de soldadura más comúnmente empleados en la recuperación de los elementos de turbinas hidráulicas, se encuentran las soldaduras de tipo SMAW,

GMAW y GTAW, las cuales han sido ampliamente experimentadas con buenos resultados. Existen otras técnicas de soldadura que incluyen FCAW, SAW y HLAW, pero debido a que no son muy comunes en la industria ecuatoriana en cuanto a los equipos necesarios y otros requerimientos, no serán tomadas en cuenta en esta investigación.

### 2.5.2.1 Técnicas de soldadura más comunes

Las soldaduras de arco eléctrico de tipo SMAW, GMAW y GTAW presentan características y beneficios que las hacen adecuadas para ser empleadas en la recuperación de los álabes, una compilación de estas principales características se presenta en la Tabla 5. (CAISAGUANO VEGA, 2014) (PHILLIPS, 2016)

Tabla 5. Características de las principales técnicas de soldadura empleadas en la recuperación de álabes y rodetes

Técnica	Aporte	Ventajas	Desventajas
SMAW	Electrodo revestido	Gran versatilidad	Bajas tasas de deposición
		Bajo costo de operación	Remoción de escoria
SMAW	Electrodo revestido	No requiere gas de protección ni un fundente granular	Cambio de electrodos debido a su limitado tamaño
		Puede ser utilizado en áreas de acceso limitado, como la unión de los cangilones con el rodete	Cuidado especial de los electrodos
SMAW	Electrodo revestido	Fácil acceso a personal calificado	Gases y humos generados en el proceso
GMAW	Alambre sólido	Alto factor de operación, producción en serie	Difícil transporte por el gas
		Altas tasas de deposición	Costo de equipo elevado comparado con otros procesos
GMAW	Alambre sólido	Varios grados de penetración en función del gas de protección	Mayor número de parámetros que se deben controlar
		Casi no produce escoria sobre el cordón de soldadura	Personal con mayor capacitación
GMAW	Alambre sólido	Proceso semiautomático o automático (menor habilidad operador)	Mayor consumo de energía eléctrica
			Difícil usar en lugares con acceso limitado
GTAW	Varilla	Sensibilidad a corrientes de aire	
GTAW	Varilla	Soldadura de calidad superior en todas las posiciones, sin distorsión	Alto costo del equipo y mano de obra
		Con o sin metal de relleno	Dificultades para trabajar al aire libre
GTAW	Varilla	No se necesita limpieza entre los pases	Enfriamiento más rápido en comparación de otros métodos
		Control preciso de las variables de soldadura	Requiere mayor destreza por parte del soldador
GTAW	Varilla	Facilita la soldadura en lugares de difícil acceso	Bajos índices de deposición

Fuente: Autores

### 2.5.2.2 *Parámetros de soldadura*

Las reparaciones de álabes por soldadura más comunes se centran en los procesos SMAW – GTAW, y en pocos casos GMAW/FCAW. Empleándose para ello como *material de aporte* el E410NiMo-15 y ER410NiMo respectivamente, para reparaciones integrales o también conocidas como generales, debido a la compatibilidad química con el MB, y la mínima producción de ferrita en la mezcla resultante. Se recomienda también un *aporte de energía* entre 0,8 a 2 kJ/mm y una temperatura de *precalentamiento* en el rango de 100°C a 180°C. (ASM INTERNATIONAL, 1998b pág. 1667) (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011 pág. 278) (MANDINA, y otros, 2013) (GOOCH, 1995) (SÁNCHEZ, 2011) (ZHAÑAY, 2006) Como alternativa para reparaciones puntuales, cuando la reparación no excede el 10% del espesor del componente y, sobre todo in situ donde resulta complicado la realización del PWHT, se emplea materiales de base austenítica como el E308L, ER309L, ERNiCr-3 (Inconel 82), junto a una técnica de pases de revenido para obtener mejores resultados en las propiedades de la zona de soldadura, aunque esto no es recomendado para reparaciones grandes, adicionalmente se suele aplicar una capa (overlay) de algún recubrimiento duro de base de alguna aleación de alto contenido de cobalto, entre otras. (DUNCAN, 2000) (HOYOS PULGARÍN, 2009) (SAGÑAY, y otros, 2012)

### 2.5.2.3 *Tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT)*

El PWHT se emplea para producir una estructura más homogénea en la zona de la soldadura con respecto al MB no afectado, y de esta manera, las propiedades mecánicas del pozo de soldadura se encuentren dentro de los límites permitidos del material, por ello es necesario la aplicación de un PWHT después de haber finalizado el proceso de soldadura. La aplicación de este ciclo térmico que tiene varias etapas, empezando por un calentamiento controlado para luego alcanzar una temperatura de sostenimiento, en la cual se homogeniza la distribución de temperatura en todo el componente, durante un tiempo establecido en función del espesor, para luego enfriarse progresivamente y también de manera controlada hasta la temperatura ambiente o inclusive a temperaturas cercanas a 0°C, con el objetivo de permitir la transformación martensítica en su totalidad, es por esta misma razón que el PWHT debe realizarse una vez que el componente luego de ser reparado, haya alcanzado estas temperaturas del ambiente.

La realización del precalentamiento antes de la soldadura se vuelve necesario para evitar problemas de agrietamiento por hidrógeno, a pesar de que esto aumenta el ancho de la ZAT, un problema común en la soldadura de MSS. El efecto del PWHT tiene mayor influencia con la variación de la temperatura de sostenimiento, mas no del tiempo que se aplique, como recomendación general el tiempo de sostenimiento debe ser de 2 min/mm (1 h/in). La tasa de calentamiento y enfriamiento no debe ser muy alta (menor a 80°C/h) para asegurar la distribución uniforme de temperatura en el componente durante el ciclo del tratamiento térmico. Adicionalmente no debe sobrepasarse los 620°C si se realiza un único PWHT, ya que puede producir martensita fresca posteriormente, lo cual resultaría muy perjudicial. Los rangos comunes para la temperatura de sostenimiento oscilan entre los 580°C a 620°C, resultando en 615°C el valor de temperatura donde se obtiene el máximo porcentaje de austenita retenida (28%), lo cual mejora la ductilidad y tenacidad de la soldadura, pero reduce la resistencia a la tracción. (AMREI, y otros, 2016a) (ASTM INTERNATIONAL, 2013) (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011) (FOLKHARD, 1988) (GOOCH, 1995) (LÓPEZ PÉREZ, y otros, 2011) (OSORIO RAMÍREZ, y otros, 2007) (ZAPPA, y otros, 2017) (ZHAÑAY, 2006)

### 2.5.3 *Especificaciones, registros y calificación de los procesos de soldadura*

Los documentos que se elaboran para el proceso de soldadura tienen como objetivo garantizar que las propiedades mecánicas de la junta soldada sean las requeridas de acuerdo con el diseñador, siendo comprobadas mediante ensayos mecánicos y brinden una guía en un formato estándar para que los operadores y técnicos de soldadura puedan usarla como guía, durante la aplicación de la soldadura. Los principales documentos que se emplean en el proceso de soldadura suelen ser:

#### 2.5.3.1 *Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)*

Es el documento que contiene las instrucciones y parámetros (también llamadas variables) del procedimiento a llevar a cabo durante la soldadura, así como también la preparación previa y posterior a la soldadura. Son las condiciones que el operador debe cumplir durante la realización de la soldadura para obtener las propiedades necesarias para las cuales fue diseñada la junta o el tipo de soldadura a emplearse. Existen procedimientos precalificados, los cuales han sido comprobados y son aptos para ser

usados, en caso de ser nuevos deberán ser comprobados mediante ensayos mecánicos de acuerdo lo indique el código o especificación más adecuado. La Tabla 6 indica las variables esenciales, esenciales suplementarias y no esenciales que se incluyen en el WPS conforme lo indica ASME IX. (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2015b)

Tabla 6. Lista de variables esenciales, esenciales suplementarias y no esenciales para el diseño del procedimiento de soldadura (WPS)

	Parámetro	Esenciales	Esenciales Suplementarias	No Esenciales
Juntas	Diseño de Ranura			X
	Refuerzo			X
	Espacio de Pase de Raíz			X
	Retenedor			X
Metal Base	Número de Grupo		X	
	Límites para T		X	
	Calificación T	X		
	Pase t 1/2 in. (13mm)	X		
	Límites para T (S. cir. Arc.)	X		
	Número P	X		
Material de Relleno	Número F	X		
	Número A	X		
	Diámetro			X
	Clasificación		X	
	Forma del Material de Relleno ó Suplementario	X		
	Elementos de Aleación	X		
	T	X		
	Límites para t	X		
Posición	Clasificación			X
	Posición			X
	Posición		X	
Precalentamiento	Avance de Soldadura			X
	Decrecimiento 100°F (55°C)	X		
	Precalentamiento			X
PWHT	Crecimiento 100°F (55°C)		X	
	PWHT	X		
	PWHT (T & T_alcance)		X	
Gas	Límites para T	X		
	Composición			X
	Mezcla	X		
	Taza de Flujo ó Flujo de soporte			X
	Refuerzo o composición	X		
	Gas protector	X		

Fuente: (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2015b)

Tabla 6. (Continuación) Lista de variables esenciales, esenciales suplementarias y no esenciales para el diseño del procedimiento de soldadura (WPS)

	Parámetro	Esenciales	Esenciales Suplementarias	No Esenciales
Características Eléctricas	Calor Inicial		X	
	Modo de Transferencia	X		
	Corriente y Polaridad		X	X
	Alcance de I & E			X
Técnica	Armadura			X
	Tamaño de Boquilla			X
	Método de Limpieza			X
	Método de Refuerzo			X
	Oscilación			X
	Ditancia del Trabajo de ambiente			X
	Múltiple a único pase		X	X
	Único a múltiple uso de Electrodo		X	X
	Espacio para el electrodo			X
	Manual o Automática			X
	Peening			X
	Uso de un proceso Térmico	X		

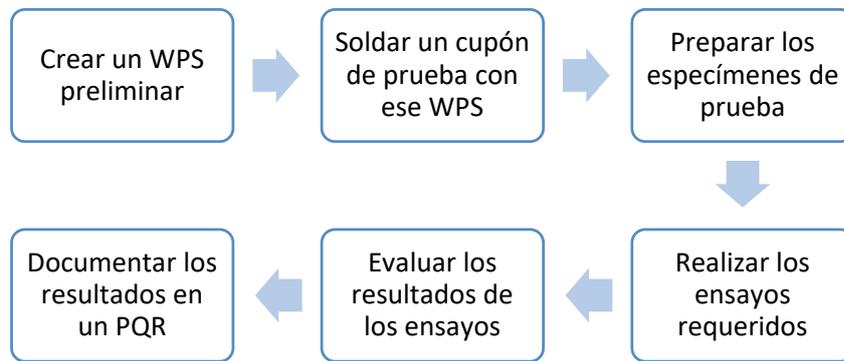
Fuente: (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2015b)

### 2.5.3.2 Registro de calificación del procedimiento de soldadura (PQR)

Cuando se realiza un nuevo WPS, es necesario proceder a calificar el mismo mediante un PQR, el cual es un documento que contiene las variables esenciales, información específica referente al procedimiento y los ensayos destructivos aplicados en el cupón de soldadura, solicitados de acuerdo al código pertinente. Las principales funciones del PQR son validar, respaldar, modificar o soportar el WPS, garantizando que lo especificado en ese documento ha sido experimentalmente probado y se han alcanzado las propiedades mecánicas para las que fue diseñado. (CAISAGUANO VEGA, 2014 pág. 55)

Los tres principales ensayos mecánicos que exige el PQR son los ensayos de tracción, doblado e impacto, los cuales son usados para medir la resistencia mecánica última (MPa o ksi), ductilidad (apareamiento de grietas o porosidades) y la energía que puede absorber (kJ) respectivamente la junta soldada. (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2015b) El diagrama de la Figura 31 esquematiza el procedimiento que se debe realizar para la obtención del PQR de la especificación de un procedimiento de soldadura. (CAISAGUANO VEGA, 2014 págs. 55-56)

Figura 31. Diagrama de procedimiento para calificación de un WPS



Fuente: Autores

### 2.5.3.3 Calificación de habilidad de soldadores (WPQ)

Es un documento que certifica la habilidad, conocimiento y experiencia del soldador, necesarias para realizar las especificaciones de un procedimiento de soldadura en particular. Para comprobar la capacidad del soldador de producir una soldadura de buena calidad usando los procesos, materiales y procedimientos descritos en el WPS, se emplean ensayos destructivos y no destructivos (END) en un cupón soldado. Ciertas variables no esenciales dentro del WPS se convierten en esenciales para el WPQ, por lo cual el soldador que aprueba los requerimientos se calificaría para el procedimiento descrito en el WPS, para una determinada posición, espesor, entre otras. Esta calificación se convertiría en el *Registro de calificación de habilidad del soldador (WPQR)* una vez que haya alcanzado satisfactoriamente los requerimientos del procedimiento, esta calificación tiene un tiempo de vigencia, la cual deberá ser renovada para permitir que el soldador cuente aún con su calificación correspondiente. (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2015b)

## 2.6 Códigos y especificaciones que guían, regulan y validan los resultados de la recuperación

Existen diversos estándares, códigos y especificaciones que brindan parámetros de guía para la calidad de la realización de determinados productos o servicios. En el caso del material base es regulado por ASTM, mediante la especificación A743/A743M

denominada “*Standard Specification for Castings, Iron- Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application*”, la cual indica los rangos de los contenidos de los componentes químicos que deben estar presentes en el material, así como sus propiedades mecánicas mínimas que debe cumplir, parámetros de precalentamiento, PWHT, consideraciones de reparación y dureza máxima permitida.

#### 2.6.1 *Códigos y especificaciones para el proceso de soldadura*

Con respecto a los parámetros e indicaciones para la realización y calificación del proceso de soldadura, existen recomendaciones generales y algunas un poco más específicas como las que se muestran dentro de la colección de AWS “*Welding Handbooks*”, en la cual constan guías para el diseño y selección de la junta, selección del metal de aporte adecuado, parámetros energéticos, gases de protección, entre otros; los cuales sirven de base para el diseño más adecuado del proceso de soldadura. Por otra parte, como complemento del diseño y calificación del proceso de soldadura existe el código ASME en su sección IX denominada “*Welding, Brazing, and Fusing Qualifications*”, el cual indica los parámetros para el desarrollo del proceso de soldadura (WPS) y su posterior registro de calificación (PQR), así también como la calificación para soldadores (WPQ).

#### 2.6.2 *Códigos y especificaciones para el control de calidad del proceso*

Posteriormente, una vez realizado y probado el WPS, se realizan los ensayos mecánicos necesarios que indica ASME IX para obtener el PQR correspondiente, con lo cual se califique el proceso de soldadura y posteriormente se desarrolle el WPQ, permitiendo de esta manera generar un sistema de calidad que garantice que el procedimiento y los operadores del mismo se encuentran dentro estándares internacionales respecto a soldadura. Dentro del control de calidad que se realiza para el proceso de soldadura se emplean frecuentemente los *Ensayos no destructivos (END)*, los cuales consisten en diferentes técnicas aplicables para inspeccionar la presencia de indicaciones que pueden provenir de discontinuidades, las cuales afecten al rendimiento final y propiedades mecánicas de las juntas soldadas, una recopilación de las principales técnicas empleadas actualmente se describe en la Tabla 7, y se esquematizan en la Figura 32. Existen diversos estándares para la realización de los END, entre los principales ASTM E y ASME V, los cuales poseen similitudes en los requisitos y guías para su aplicación.

Tabla 7. Características de tipos de ensayos no destructivos más empleados para inspección de soldaduras

Método de Inspección	Equipo Requerido	Puede detectar	Ventajas	Limitaciones	Observaciones
Visual (VT)	Lente de aumento Calibrador de tamaños de soldadura Galgas y reglas de medición de ángulos, desalineamiento y separaciones Brigdecam Micrómetro Boroscopio Marcador térmico Linterna de luz blanca	Fallas superficiales como grietas, porosidad, cráteres no rellenados, inclusiones de escoria, socavamiento, sobremonta, cordones de formación deficiente, desalineamientos, adaptación incorrecta	Bajo costo Aplicable durante el proceso de la pieza de trabajo, lo cual permite corregir las fallas Da indicación de los procedimientos incorrectos o mal aplicados	Aplicable a defectos superficiales únicamente No proporciona registros permanentes	Debe ser siempre el método primario de inspección, sin importar que otras técnicas se requieran Constituye el único tipo de inspección durante la producción Es la función necesaria de todo el que contribuya en alguna forma a la ejecución de la soldadura
Líquidos Penetrantes (PT)	Kit de componentes que contiene limpiador, tinta y revelador Puede ser de tintas fluorescentes o coloreantes Equipo de aplicación en el caso de ser spray, inmersión u otros Fuente de luz blanca o ultravioleta según sea necesario	Fallas superficiales no apreciables a simple vista como grietas o pequeños poros Excelente para localizar fugas en conjuntos soldados	Aplicable a materiales magnéticos y no magnéticos Fácil de usar Bajo costo	Solo son detectables los defectos superficiales No puede usarse con eficacia en los ensambles calientes (poseen una temperatura máxima de trabajo) Es usado en materiales no porosos Se necesita acceso a la superficie	En recipientes de pared delgada revela fugas que no se detectan de ordinario por las pruebas usuales con aire Las condiciones superficiales (humo, escoria) pueden dar indicaciones falsas

Fuente: Autores

Tabla 7. (Continuación) Características de tipos de ensayos no destructivos más empleados para inspección de soldaduras

Método de Inspección	Equipo Requerido	Puede detectar	Ventajas	Limitaciones	Observaciones
Partículas Magnéticas (MT)	Equipo de magnetización (yugo, puntas, otros) Fuente de AC o DC Polvos magnéticos secos o húmedos Fuente de luz blanca o ultravioleta según sea necesario Medidor de magnetización Medidor de luminosidad adecuado	Excelente para detectar discontinuidades superficiales, y en particular grietas	Más simple de realizar que la inspección radiográfica Permite sensibilidad controlada Método de costo relativamente bajo	Aplicable sólo a materiales ferromagnéticos Requiere destreza en la interpretación de las indicaciones y en el reconocimiento de las indicaciones no relevantes Difícil de usar en superficies rugosas No se indica la profundidad de la falla	Los defectos alargados paralelos al campo magnético pueden no dar indicaciones, por tal motivo debe aplicarse el campo desde dos direcciones cercanas a los 90° entre ambas
Ultrasonido (UT)	Equipo especial del tipo Pulso-Eco o Arreglo de Fases Zapatillas de haz recto y angulares Gel acoplante Bloques de calibración y sensibilidad	Fallas superficiales y subsuperficiales, inclusive aquellas que son demasiado pequeñas para ser detectadas por otros métodos Especialmente para detectar defectos similares a los de laminación subsuperficial	Muy sensible Permite el escaneo de juntas inaccesibles a la radiografía Método altamente moderno de caracterización volumétrica de las discontinuidades Aplicable a metales, no metales y compuestos	Requiere de un alto grado de destreza para la interpretación de las curvas de pulso-eco, así como del dimensionamiento a través del arreglo de fases Más costoso que los demás métodos	El equipo está altamente desarrollado para fines de inspección de soldaduras de una manera no invasiva El modelo de arreglo de fases facilita la interpretación y caracterización de los defectos, como su dimensionamiento

Fuente: Autores

Tabla 7. (Continuación) Características de tipos de ensayos no destructivos más empleados para inspección de soldaduras

Método de Inspección	Equipo Requerido	Puede detectar	Ventajas	Limitaciones	Observaciones
Radiografía (RT)	Equipos de emisión de rayos X o rayos Gamma, construidos especialmente para inspección de soldaduras, piezas fundidas y forjadas Facilidades fotográficas y de procesamiento de películas Equipo fluoroscópico visor Protección Personal	Fallas microscópicas interiores como grietas, porosidades, huecos cargados de gas, inclusiones no metálicas, penetración incompleta en la raíz, socavamiento, falta de fusión, áreas quemadas pasantes	Cuando las indicaciones son registradas en película, se cuenta con un registro permanente Cuando se ve en una pantalla fluoroscópica, se tiene un método de inspección interna de bajo costo	Requiere destreza para escoger los ángulos de exposición, el equipo de trabajo y para interpretar las indicaciones Requiere precauciones de seguridad No es adecuado en general para la inspección de soldaduras de filete	Muchos códigos y especificaciones requieren la inspección por rayos X Es útil para para la calificación de soldadores y procesos de soldadura Debido a su costo, su utilización tiene que limitarse a aquellas zonas en las que no se logre por otros métodos la seguridad deseada

Fuente: Autores

Figura 32. Equipos de END de VT, PT, MT, UT en ese orden correspondiente a las imágenes



Fuente: (MAGNAFLUX, 2016) (OLYMPUS CORPORATION, 2016)

### 2.6.3 Códigos y especificaciones para la validación de los resultados del proceso

Finalmente, para garantizar la calidad del resultado final, es decir que las soldaduras posean la aprobación necesaria para continuar con el siguiente proceso dentro de la recuperación, se emplea la especificación CCH 70-4 denominada “Cahier des Charges. Specification for Inspection of Steel Casting for Hydraulic Machines”, la cual contiene los criterios de aceptación para decidir si una discontinuidad relevante debe ser considerada como defecto. En caso de encontrarse uno o varios defectos en un área establecida por CCH 70-4, se procederá a aplicar la hoja de especificación de calidad correspondiente para cada zona de los componentes de máquinas hidráulicas, indicando la densidad o tamaños aceptables. Estos criterios de aceptación se hacen en función de la técnica de END empleada, dando CCH 70-4 las indicaciones de los ensayos que deben realizarse y los niveles de calidad para los mismos en función de la zona inspeccionada. En la Tabla 8 se resume los códigos y especificaciones empleados para controlar el proceso de soldadura antes, durante y después en la recuperación de los álabes. (CAHIER DES CHARGES, 2014)

Tabla 8. Resumen de códigos y especificaciones empleados durante la recuperación por soldadura de los álabes.

Código/Norma	Especificación	Año	Aplicación	Alcance
ASTM	A743/A743M	2013	Material	Rango de contenido químico Propiedades mecánicas mín. Dureza máx., PWHT, Precalentamiento, Tipo de reparación
ASME	IX	2015	Soldadura	Especificaciones del proceso de soldadura (WPS) Registro y calificación del proceso de soldadura (PQR) Calificación de soldadores (WPQ)
OHSAS	18001	2007	SGSST	Equipos de protección personal y consideraciones para evitar riesgos laborales
ASME	V	2015	END	Requerimientos y guía para la realización de END
CCH	70-4	2014	Calidad	Especificaciones de calidad Guía para inspección y realización de END Criterios de aceptación

Fuente: Autores

## 2.7 Conclusiones parciales del marco referencial de las tecnologías para la recuperación por soldadura de álabes de turbinas hidráulicas de acero ASTM A743 CA-6NM

Finalmente, luego de haber sido realizada una revisión bibliográfica consistente respecto a las tecnologías de recuperación por soldadura de álabes de turbinas hidráulicas de acero ASTM A743 CA-6NM, se concluyó lo siguiente:

- Existen álabes fijos unidos al rodete y álabes directrices (móviles), los cuales poseen geometrías específicas que cumplen con su perfil hidrodinámico característico, siendo las principales características geométricas y las reparaciones necesarias de acuerdo al tipo de turbina que pertenecen las siguientes:
  - *Pelton.* – Forma de cangilones o cucharas unidas, de manera simétrica y con una punta de borde de ataque (tricúspide), presentan desgaste dentro de las superficies interiores y poco en las exteriores. Además del desgaste en la tricúspide, el cual resulta difícil de reparar, al igual que las caras internas, por ello se emplea soldadura manual para esa tarea. Debido a la concentración de esfuerzos, entre otras causas, puede producirse fractura frágil en la unión de los cangilones con el rodete, y debe realizarse una junta de soldadura para unir el elemento nuevamente.
  - *Francis.* – Poseen álabes fijos de espesor bastante robusto unidos al rodete, los cuales sufren poco desgaste, principalmente abrasión. Mientras la parte superior exterior del rodete (corona) tienen un desgaste bastante marcado debido a la erosión, abrasión y en parte a la cavitación. Los álabes directrices que tienen forma de bandera, tienen un mayor desgaste en el lado de presión en comparación con el de succión, esta mayor presión produce acumulado desgaste erosivo y abrasivo en comparación con el producido en los álabes fijos, además de ser más fáciles de soldar por ser elementos independientes del rodete, los cuales junto con la corona pueden ser recuperados usando procesos de mayor producción de soldadura como los semi-automáticos o automáticos.
  - *Kaplan.* – Forma similar al de los impulsores de barco, las características de los álabes fijos del rodete y los directrices que permiten el control del flujo de líquido

que ingresa al rodete, son de características similares a las de los álabes de la turbina Francis en cuanto a su desgaste, pero con una geometría de mayor curvatura en los álabes fijos, lo cual dificulta más la realización del proceso de soldadura en esas superficies.

- Los álabes son elementos mecánicos de acero inoxidable, el cual los protege de los efectos de la corrosión y, además se encuentran provistos de un proceso de metalizado, lo cual mejora su resistencia al desgaste superficial; sin embargo, de acuerdo a varios trabajos de investigación realizados por parte de la universidad de Noruega y otros, encontraron que los tipos de desgaste principales en estos elementos son *abrasión, erosión y cavitación*, lo cual repercute directamente en la eficiencia de la turbina, disminuyendo progresivamente conforme se va perdiendo el perfil hidrodinámico del diseño original.
- Las aplicaciones más comunes de este material incluyen rodetes, impulsores de bombas y turbinas, etc., debido a su buena resistencia mecánica y dureza, además de su tenacidad, la cual reduce su susceptibilidad a la cavitación, erosión y agrietamiento, permitiendo llevar a cabo procesos de soldadura con mayor facilidad. Su poco contenido de Cr junto a su bajo contenido de C le brindan protección moderada contra la corrosión, ya que no hay excesiva formación de *carburos*, manteniendo el Cr en estado libre.
- Los MSS presentan una gran cantidad de fases, siendo las principales: ferrita o hierro delta ( $\delta$ ), austenita o hierro gamma ( $\gamma$ ), ferrita o hierro alfa ( $\alpha$ ), martensita ( $\alpha'$ ), entre otros. Se encuentran sometidos a una transformación alotrópica que forma austenita cuando sobrepasan temperaturas cercanas a  $650^{\circ}\text{C}$  y luego forman martensita a partir de eso, además de pequeñas cantidades de ferrita y carburos. La martensita se forma fácilmente en estas aleaciones aún a velocidades de enfriamiento relativamente lentas, debido a ello el uso de diagramas CCT no es tan esencial como en los otros tipos de aceros inoxidables; resultando en una matriz martensítica de la microestructura y con características importantes como dureza, tenacidad, resistencia mecánica, elasticidad; las cuales determinan las propiedades mecánicas del material, por ello debe ser controlada después de realizarse los procesos de soldadura para garantizar valores adecuados de las propiedades de acuerdo indica la especificación ASTM

A743/A743M-13. El revenido es requerido para alcanzar tenacidad y ductilidad aceptables para la mayoría de aplicaciones, altas durezas también pueden obtenerse para mejorar la resistencia a la abrasión.

- En función de la magnitud de las discontinuidades pueden realizarse dos tipos de reparaciones generales, las cuales son el *Rectificado* y el *Relleno*. Es el relleno o manufactura aditiva la cual cumple en mayor proporción acorde a los objetivos presentes en esta investigación, resultando la combinación de los tipos de rellenos lo más adecuado para una recuperación integral de los componentes hidráulicos; pero, siendo la *soldadura* la más esencial debido a todos los cambios metalúrgicos que en ella se producen, además de ser el único método que permite aportar material para rellenar grandes volúmenes en caso de ser necesario, y también crear juntas que permitan la unión de componentes que hayan sido separados por algún tipo de fractura o se incorporen nuevos elementos para reemplazar partes que hayan sufrido fatiga en el material. Es por eso que este será el único método estudiado y empleado posteriormente para el desarrollo de los procesos de recuperación de los álabes en esta investigación.
- Durante la soldadura se producen variaciones de temperatura importantes, las cuales conllevan a distintas velocidades de enfriamiento, resultando en una mezcla heterogénea en el pozo de soldadura y sus alrededores, por ello las transformaciones metalúrgicas que tienen lugar en la zona de soldadura son severas. Se producen hasta seis zonas diferentes dentro del pozo de soldadura, cada una con marcadas diferencias en su microestructura, dando como resultado la variación en sus propiedades mecánicas. Para producir una estructura más homogénea con respecto al MB, y las propiedades del pozo de soldadura se encuentren dentro de los límites permitidos del material, es necesario la aplicación de un PWHT después de haber finalizado el proceso de soldadura.
- Las reparaciones de álabes por soldadura más comunes se centran en los procesos SMAW – GTAW, y en pocos casos GMAW/FCAW. Empleándose para ello como *material de aporte* el E410NiMo-15 y ER410NiMo respectivamente, para reparaciones integrales o también conocidas como generales, debido a la compatibilidad química con el MB, y la mínima producción de ferrita en la mezcla

resultante. Se recomienda también un *aporte de energía* entre 0,8 a 2 kJ/mm y una temperatura de *precalentamiento* en el rango de 100°C a 180°C. Como alternativa para reparaciones puntuales, cuando la reparación no excede el 10% del espesor del componente y, sobre todo in situ donde resulta complicado la realización del PWHT, se emplea materiales de base austenítica como el E308L, ER309L, ERNiCr-3 (Inconel 82), junto a una técnica de pases de revenido para obtener mejores resultados en las propiedades de la zona de soldadura, aunque esto no es recomendado para reparaciones grandes, adicionalmente se suele aplicar una capa (overlay) de algún recubrimiento duro de base de alguna aleación de alto contenido de cobalto, entre otras.

- La realización del precalentamiento antes de la soldadura se vuelve necesario para evitar problemas de agrietamiento por hidrógeno, a pesar de que esto aumenta el ancho de la ZAT, un problema común en la soldadura de MSS. El efecto del PWHT tiene mayor influencia con la variación de la temperatura de sostenimiento, mas no del tiempo que se aplique, como recomendación general el tiempo de sostenimiento debe ser de 2 min/mm (1 h/in). La tasa de calentamiento y enfriamiento no debe ser muy alta (menor a 80°C/h) para asegurar la distribución uniforme de temperatura en el componente durante el ciclo del tratamiento térmico. Adicionalmente no debe sobrepasarse los 620°C si se realiza un único PWHT, ya que puede producir martensita fresca posteriormente, lo cual resultaría muy perjudicial. Los rangos comunes para la temperatura de sostenimiento oscilan entre los 580°C a 620°C, resultando en 615°C el valor de temperatura donde se obtiene el máximo porcentaje de austenita retenida (28%), lo cual mejora la ductilidad y tenacidad de la soldadura, pero reduce la resistencia a la tracción.
- Existen diversos estándares, códigos y especificaciones que brindan parámetros de guía para la calidad y estandarización de los procesos durante la reparación de los álabes. En el caso de las propiedades mecánicas del material base, son reguladas por ASTM, mediante la especificación A743/A743M. Con respecto a los parámetros e indicaciones para la realización del diseño del proceso de soldadura, existen guías por parte de AWS en los “Welding Handbooks”; pero con respecto a la calificación del proceso de soldadura se utiliza el código ASME Sección IX. Dentro del control de calidad que se realiza para el proceso de soldadura se emplean frecuentemente los

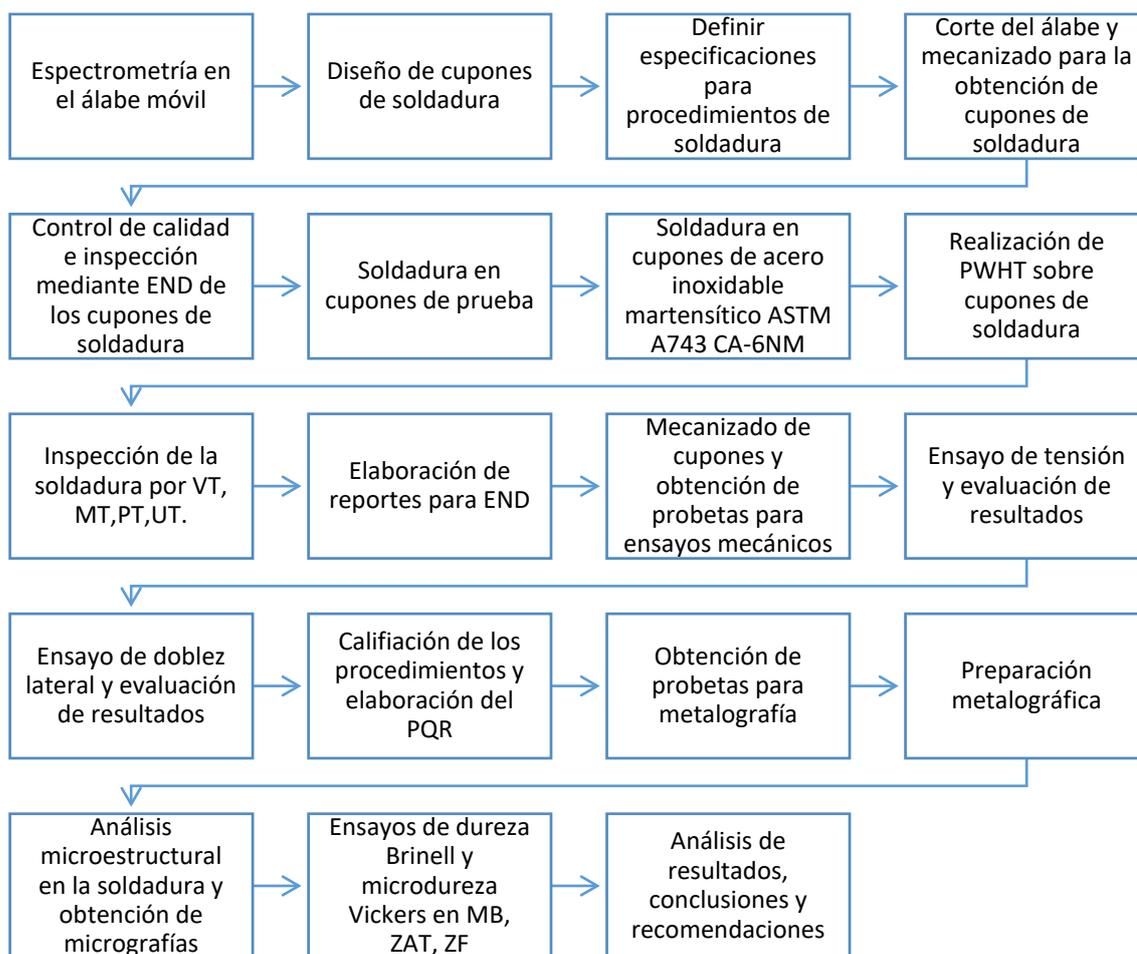
*Ensayos no destructivos (END)*, para ello existen diversos estándares, entre los principales ASTM E y ASME V, los cuales poseen similitudes en los requisitos y guías para su aplicación. Posteriormente, para garantizar la calidad del resultado final, es decir que las soldaduras posean la aprobación necesaria para continuar con el siguiente proceso dentro de la recuperación, se emplea la especificación CCH 70-4, la cual contiene los criterios de aceptación para decidir si una discontinuidad relevante debe ser considerada como defecto, en función de la calidad de la zona del álabe o rodete.

## CAPÍTULO III

### 3. TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DE EXPERIMENTACIÓN

Este capítulo tiene como finalidad indicar el procedimiento llevado a cabo para la selección de los parámetros empleados en la elaboración de los procedimientos de soldadura, empezando por el ensayo de espectrometría, dimensionamiento de cupones, desarrollo de las especificaciones para el WPS, inspección por ensayos no destructivos de la junta soldada, especificaciones para pruebas mecánicas, procedimiento para preparación metalográfica y ensayos de dureza en la soldadura que permitirán calificar los procedimientos propuestos. El diagrama de la Figura 33 muestra el procedimiento llevado a cabo para el desarrollo de esta investigación tanto en la fase investigativa como experimental.

Figura 33. Diagrama del procedimiento para el desarrollo de la investigación



Fuente: Autores

### 3.1 Caracterización de material

Debido a la nula disponibilidad del acero ASTM A743 CA-6NM en el mercado nacional la única forma posible de acceder a este material fue de un álabe directriz de la central hidroeléctrica San Francisco, el cual se encontraba en desuso por el deterioro que presentaba y nunca antes había sido sometido a ningún tipo de reparación. Para verificar la composición del material se realizó un ensayo de espectrometría sobre el álabe directriz, empleando un espectrómetro portátil de emisión óptica por chispa marca BRUKER, el cual se observa en la Figura 34, llevando a cabo un procedimiento de preparación tanto de la superficie a ensayar como la estandarización del equipo para garantizar la fiabilidad del ensayo.

Figura 34. Equipo portátil para ensayos de espectrometría



Fuente: Autores

En la Figura 35 se puede observar la estandarización del equipo, que consiste en realizar ensayos de espectrometría sobre distintos bloques patrones de acero con la finalidad de obtener valores con un porcentaje de error menor al 5% para ser aceptados para así el equipo se encuentre listo para ser utilizado, a continuación en la Figura 36 se puede observar la limpieza de la superficie a ensayar, con amoladora y disco de zirconio para extraer todo tipo de suciedad.

Figura 35. Estandarización del equipo de espectrometría



Fuente: Autores

Figura 36. Limpieza de la superficie del álabe directriz



Fuente: Autores

Finalmente en la Figura 37 se muestra la realización del ensayo de espectrometría sobre la bandera del álabe móvil asignado para la realización de la investigación, se tomaron un total de 5 muestras cuyos valores arrojados no diferían entre si y mantenían un porcentaje de error menor al 5%.

Figura 37. Realización del ensayo de espectrometría en álabe directriz



Fuente: Autores

Los resultados del ensayo de espectrometría se muestran en la Tabla 9, cuyo reporte se adjunta en el Anexo A, mientras que la composición del material de los álabes móviles especificado por el fabricante se indican en la Tabla 10 y su hoja de especificaciones en el Anexo B.

Tabla 9. Resultados ensayo de espectrometría

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
0.044	0.6	0.587	0.025	<0.0035	12.02	3.805	0.507

Fuente: Autores

Tabla 10. Composición química de los álabes móviles especificada por el fabricante

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Min.	-	-	-	-	-	3.50	11.50	0.40
Max.	0.06	1.00	1.00	0.040	0.030	4.50	14.00	1.00

Fuente: Autores

Al comparar los valores obtenidos se pudo concluir que efectivamente el material de fabricación del álabe directriz corresponde a un acero inoxidable martensítico ASTM A743 grado CA6NM.

### 3.2 Evaluación de los defectos presentes en los elementos hidráulicos

En base a una inspección visual llevada a cabo para evaluar los daños presentes en los álabes móviles que se encuentran fuera de servicio, se evidenció claramente un desgaste superficial más severo en el lado de presión y en menor medida en el lado de succión como se puede observar en la Figura 38 y Figura 39 respectivamente.

Figura 38. Desgaste superficial en el lado de presión del álabe directriz



Fuente: Autores

Figura 39. Desgaste superficial en el lado de succión del álabe directriz



Fuente: Autores

### 3.2.1 Daños en álabes móviles de la central San Francisco

Con el fin de cuantificar la profundidad de los daños y obtener un valor promedio de los mismos, se realizó un registro de la severidad del desgaste principalmente sobre el lado de presión y sobre el lado lateral de la bandera mostrado en la Figura 40, los resultados de las mediciones realizadas se los puede observar en la Tabla 11.

Figura 40. Daños sobre el lado lateral de la bandera de un álabe directriz



Fuente: Autores

Tabla 11. Profundidad de los daños

Álabe con mayor presencia de daños	Lado	
	Presión	Lateral
Profundidad [mm]	4.6	6.6
	4	6.2
	2.2	7.2
	6.4	13
	8.5	7.9
	3.7	5.8
	10	7.2
	1.2	10
	2.8	18.3
	3.2	5.5
8	7.5	

Fuente: Autores

Analizando los datos se concluye que el daño que presenta la mayor profundidad se encuentra en el lado lateral de la bandera y tiene un valor de 18.3 mm.

### 3.2.2 Daños en el rodete Pelton

Al realizar la inspección de los defectos existentes en los rodetes Pelton se evidenció que a más de presentarse un desgaste superficial puede presentarse un daño mucho más crítico que involucra la separación total del elemento como se observa en la Figura 41, que representa la fractura de uno de los canchilones de un rodete Pelton perteneciente a la central hidroeléctrica Pucará.

Figura 41. Rodete Pelton fracturado



Fuente: Autores

Figura 42. Canchilón fracturado



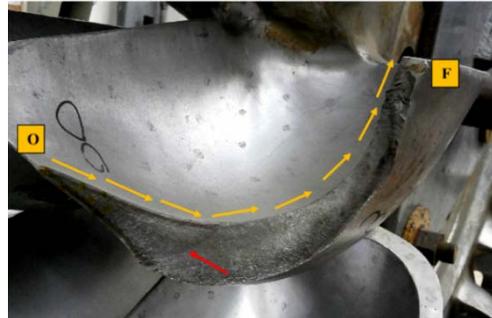
Fuente: Autores

En la Figura 42 se puede observar el pedazo desprendido del canchilón producto de la fractura frágil, cuya sección transversal más ancha posee 36 mm de espesor y su recuperación debe llevarse a cabo por soldadura de unión.

En un análisis desarrollado por Hitachi High Technologies Canada, Inc. para determinar las causas de la falla del rodete mediante las técnicas de replicado fractográfico, replicado de extracción y observación en microscopía electrónica de barrido (SEM) establece que, según las características macrofractográficas se trata de un proceso de agrietamiento progresivo, dado por un proceso de agrietamiento de fatiga de alto ciclaje como puede observarse en la Figura 43, donde las líneas amarillas representan la dirección de

propagación del agrietamiento y la flecha de color rojo indica la zona de avance y propagación progresiva por el mecanismo de fatiga. (CABALLERO, 2017)

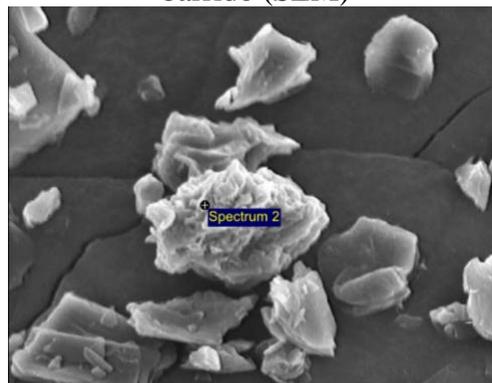
Figura 43. Esquematación de la dirección de agrietamiento sobre el rodete Pelton fracturado



Fuente: (CABALLERO, 2017)

Las micropartículas obtenidas del proceso de replicado de extracción fueron procesadas en el microscopio electrónico de barrido, Figura 44, y después del análisis químico se determinó que corresponden a escoria producto de los procesos de soldadura con gas inerte (MIG), de igual manera en la interface del material de aporte y el metal base se determinó la presencia de microdiscontinuidades y micropartículas atrapadas provenientes de la contaminación de escoria que generaban discontinuidades superficiales compuestas de microporosidades. (CABALLERO, 2017)

Figura 44. Identificación de micropartículas por medio de microscopio electrónico de barrido (SEM)



Fuente: (CABALLERO, 2017)

En conclusión, la falla por fatiga temprana del rodete fue producto de discontinuidades originadas por el proceso de reparación por soldadura y no por defectos de fabricación por fundición-colado, es por esto la gran importancia de desarrollar procedimientos que garanticen la adecuada calidad de la soldadura de los componentes.

### 3.3 Dimensionamiento de los cupones de soldadura

Antes de realizar el corte del álabe móvil es importante definir la cantidad de cupones para soldadura requeridos tomando en cuenta sus características geométricas y dimensionales.

#### 3.3.1 Selección del espesor de los cupones de soldadura

Tomando como referencia la evaluación de los daños producidos por el impacto del agua, se pudo concluir que el caso más crítico ocurre cuando el elemento hidráulico ha sufrido una fractura total y por ende su reparación se debe llevar a cabo bajo parámetros de soldadura de unión, esta es la razón por la que se planteó desarrollar *tres* procedimientos de soldadura combinados, cuyas características se indican en la Tabla 12, con la finalidad de obtener 2 muestras de cada uno, es decir un total de 6 cupones de soldadura.

Tabla 12. Procedimientos de soldadura

	Codificación	Proceso	Tipo	Material de aporte
Procedimiento 1	CIRT/16-WPS-001	GTAW	Raíz/Caliente	ER410NiMo
		SMAW	Relleno/Capa	E410NiMo-15
Procedimiento 2	CIRT/16-WPS-002	GTAW	Raíz/Caliente	ER309LMo
		SMAW	Relleno/Capa	E410NiMo-15
Procedimiento 3	CIRT/16-WPS-003	GTAW	Raíz/Caliente	ER309LMo
		GMAW	Relleno/Capa	ER410NiMo-15

Fuente: Autores

Para el dimensionamiento y elaboración de los cupones de soldadura se tomó como referencia lo descrito en el código ASME sección IX, en el párrafo QW-451 se detallan los *límites de espesores calificados y especímenes de prueba para las juntas soldadas*, además como se puede observar en la Tabla 13, se resumen las especificaciones tomadas de QW-451.1, donde indica los requerimientos para ensayos de *tensión y doblado transversal de ranuras soldadas*. Considerando la disponibilidad del material, la evaluación de los daños y en base al espesor de los elementos más comunes que requieran reparación por soldadura de unión se optó por emplear cupones de soldadura con espesor T de  $\frac{3}{4}$  in (19 mm) que califica para un metal base de espesor desde  $\frac{3}{16}$  in (5 mm) hasta 2T, es decir  $\frac{3}{2}$  in (38 mm), con un espesor t de  $\frac{3}{4}$  in de material de aporte depositado. Los ensayos requeridos para comprobar la calidad de la soldadura y calificar el procedimiento son: 2 probetas para tensión y 4 para doblado guiado lateral.

Tabla 13. Ensayos de tensión y dobléz transversal para ranuras soldadas

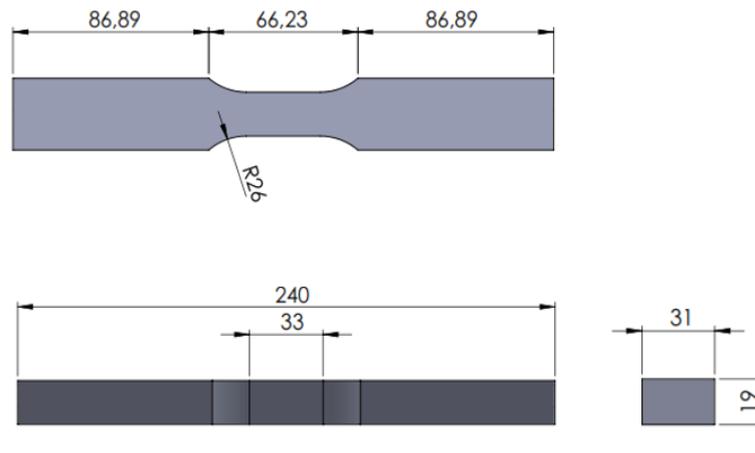
Espesor T del cupón de soldadura in. (mm)	Rango de espesor T del metal base calificado in. (mm)		Máximo espesor t del metal de soldadura calificado, in. (mm)	Tipo y cantidad de ensayos requeridos (Tensión y Doblez Guiado)			
	Mín	Máx		Tensión QW-150	Doblez Lateral	Doblez de Cara	Doblez de Raíz
$\frac{3}{4}$ (19) y menores que $1\frac{1}{2}$	3/16 (5)	2T	2T cuando $t \geq \frac{3}{4}$ (19)	2	4	---	---

Fuente: Autores

### 3.3.2 *Diseño de probetas para ensayos de tensión*

Considerando lo indicado en el código ASME sección IX, en el párrafo QW-462.1(a) donde se establecen las especificaciones que deben cumplir los especímenes para pruebas de tensión (ver Anexo C), se optó por el diseño de probetas planas de sección rectangular de 31mm x 19 mm y una longitud total de 240 mm, con una sección reducida de 19 mm y 33 mm de longitud tal como se indica en la Figura 45 y cuyos planos generales se adjuntan en el Anexo D.

Figura 45. Dimensiones de probetas para ensayo de tensión



Fuente: Autores

### 3.3.3 *Diseño de probetas para ensayos de dobléz lateral*

Bajo las especificaciones indicadas en el párrafo QW-462.2 adjunto en el Anexo E, se desarrolló el diseño de probetas planas de sección rectangular de 10 x 19 mm con un redondeo de radio 2 mm en cada una de los vértices y una longitud total de 240 mm, estas

dimensiones se indican en la Figura 46 y los planos generales para las probetas de doblez se adjuntan en el Anexo F.

Figura 46. Dimensiones de probetas para ensayo de doblez lateral

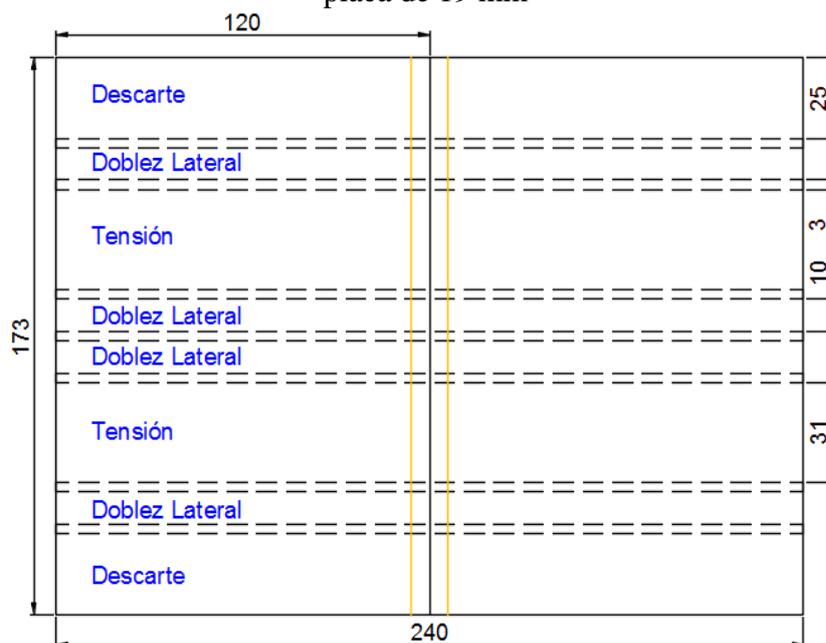


Fuente: Autores

### 3.3.4 Diseño del cupón de soldadura.

Una vez definida la cantidad de especímenes requeridos y las medidas de cada uno de ellos, en base a QW-463.1 (b) (ver Anexo G), se estableció la dimensión total de los cupones después que se haya realizado la soldadura de unión considerando los descartes laterales y una holgura de 3 mm necesaria para la realización de los cortes como se observa en la Figura 47, es así que se tuvieron que extraer un total de 12 placas planas de 120 x 173 mm con un espesor de 19 mm.

Figura 47. Localización de los especímenes de calificación para el procedimiento en placa de 19 mm



Fuente: Autores

### 3.4 Elaboración de las especificaciones de los procedimientos de soldadura

Para la elaboración de las Especificaciones del Procedimiento de Soldadura (WPS) se empleó como referencia el formato QW-482 sugerido por el código ASME sección IX, a continuación como se puede observar en la Figura 48 se muestran los datos generales para el procedimiento de soldadura N°1 CIRT/16-WPS-001, en la Figura 49 para el procedimiento de soldadura N°2 CIRT/16-WPS-002 y finalmente en la Figura 50 para el procedimiento N°3 CIRT/16-WPS-003 de acuerdo a la información indicada anteriormente en la Tabla 12.

Figura 48. Formato QW-482 con los datos generales para el WPS del procedimiento 1

	<b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA</b> <i>Welding Procedure Specifications (WPS)</i> QW-482 WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS. ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.				
	<b>Cliente:</b> CELEC EP-CIRT	<b>WPS N°:</b> CIRT/16-WPS-001		<b>Revisión:</b> A	<b>Fecha:</b> 4/8/2016
	<b>Proyecto:</b> RECUPERACIÓN DE ÁLABES	<b>PQR de apoyo:</b> N/A		Pág. 1 de 2	
<b>Proceso(s) de soldadura:</b> <u>          GTAW / SMAW          </u>		<b>Tipo (s):</b> <u>          MANUAL / MANUAL          </u> (Automático, Semi-automático, Manual, Con máquina)			

Fuente: Autores

Figura 49. Formato QW-482 con los datos generales para el WPS del procedimiento 2

	<b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA</b> <i>Welding Procedure Specifications (WPS)</i> QW-482 WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS. ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.				
	<b>Cliente:</b> CELEC EP-CIRT	<b>WPS N°:</b> CIRT/16-WPS-002		<b>Revisión:</b> A	<b>Fecha:</b> 4/8/2016
	<b>Proyecto:</b> RECUPERACIÓN DE ÁLABES	<b>PQR de apoyo:</b> N/A		Pág. 1 de 2	
<b>Proceso(s) de soldadura:</b> <u>          GTAW / SMAW          </u>		<b>Tipo (s):</b> <u>          MANUAL / MANUAL          </u> (Automático, Semi-automático, Manual, Con máquina)			

Fuente: Autores

Figura 50. Formato QW-482 con los datos generales para el WPS del procedimiento 3

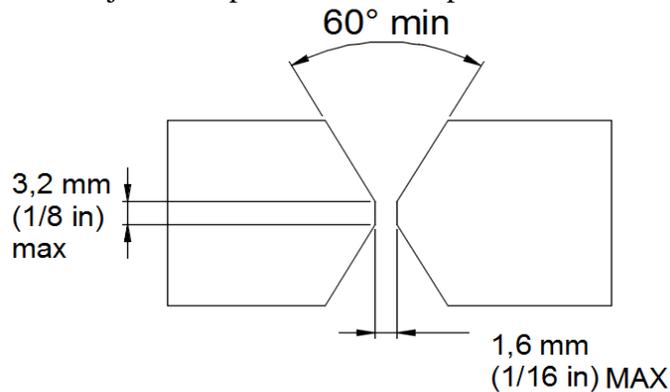
	<b>ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA</b> <i>Welding Procedure Specifications (WPS)</i> QW-482 WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS. ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.				
	<b>Cliente:</b> CELEC EP-CIRT	<b>WPS N°:</b> CIRT/16-WPS-003		<b>Revisión:</b> A	<b>Fecha:</b> 4/8/2016
	<b>Proyecto:</b> RECUPERACIÓN DE ÁLABES	<b>PQR de apoyo:</b> N/A		Pág. 1 de 2	
<b>Proceso(s) de soldadura:</b> <u>          GTAW / GMAW          </u>		<b>Tipo (s):</b> <u>          MANUAL / SEMI-AUTOMÁTICO          </u> (Automático, Semi-automático, Manual, Con máquina)			

Fuente: Autores

### 3.4.1 Diseño de la junta de unión

Es de suma importancia determinar el adecuado diseño y dimensionamiento de la junta de soldadura ya que se considera un parámetro fundamental para obtener cordones de soldadura sin defectos, su diseño adecuado facilitará la penetración del metal de aporte y la fusión completa con el metal base, es por esto que el diseño de la junta para los cupones de soldadura se basó en la recomendación del *AWS Welding Handbook Vol. 2* donde indica la geometría y dimensiones de la junta tipo V doble, este tipo de junta es sugerida debido al gran espesor de los componentes a soldar (mayor a 19 mm), esta junta es empleada para soldadura de aceros mediante el proceso GMAW/GTAW como se puede observar en la Figura 51.

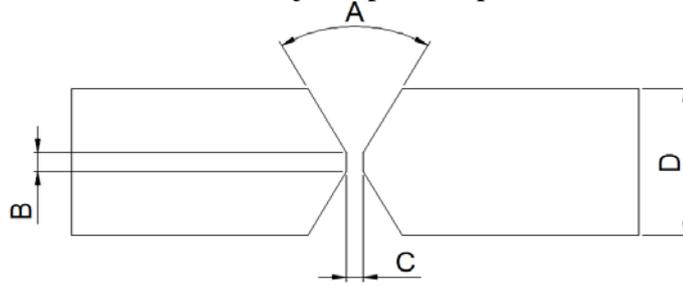
Figura 51. Diseño de junta a tope recomendada para soldadura GMAW/GTAW



Fuente: Autores

Considerando lo descrito anteriormente y además el espesor seleccionado para la elaboración de los cupones, se estableció que el diseño será junta tipo V doble con el fin de disminuir la excesiva afectación térmica sobre el material durante el proceso de soldadura y evitar la generación de excesivas distorsiones sobre las placas soldadas. La Figura 52 muestra el diseño y características dimensionales de la junta para los tres procedimientos de soldadura, el espesor  $T$  del cupón es de 19 mm, para el dimensionamiento de la abertura de raíz se consideró que se empleará proceso GTAW en los tres procedimientos de soldadura es por eso que la abertura deberá estar comprendida entre 1,8 mm – 2,2 mm para facilitar el posicionamiento de la boquilla y electrodo de tungsteno durante los pases de raíz y caliente, la cara de raíz deberá ser entre 1,5 mm - 2 mm y el ángulo de ranura es de  $60^\circ - 70^\circ$  cuyos valores se encuentran acorde a las recomendaciones establecidas en la Figura 51 indicada anteriormente.

Figura 52. Detalle del diseño de la junta para los procedimientos de soldadura.



Nota: A 60°-80°; B:1,5- 2mm; C: 1,8- 2,2 mm; D: 19 mm

Fuente: Autores

Según el formato sugerido para la elaboración del WPS, el registro de esta información se lleva a cabo en la sección QW- 402 referente a *juntas*, donde se especifica el diseño de la junta tipo V doble sin respaldo, la misma que implica una preparación mediante mecanizado y pulido de aristas vivas, la Figura 53 muestra la información contenida en esta sección, la misma que fue empleada en el desarrollo de los tres procedimientos.

Figura 53. Datos generales de la junta tipo V doble sin respaldo.

JUNTAS (QW-402)	
<b>Diseño de Junta</b>	V Doble con abertura de raíz 1,8 - 2,2 mm y altura 1,5 - 2 mm, ángulo de bisel 60° - 80°
<b>Respaldo</b>	<input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> NO
<b>Tipo de material de respaldo</b>	<input type="checkbox"/> Metálico <input type="checkbox"/> No metálico <input type="checkbox"/> Metal no fundible <input type="checkbox"/> Otro
<b>Preparación de la junta</b>	Mecanizado y pulido de aristas vivas
<b>Método de preparación y limpieza</b>	Máquina-herramienta y pulido

Fuente: Autores

### 3.4.2 Especificaciones del metal base

El Metal base es considerado como una variable esencial dentro del proceso de soldadura es por eso que el código ASME IX en el párrafo QW-403 establece las características y especificaciones que debe cumplir, clasificando los tipos de materiales de acuerdo a su soldabilidad, composición química y propiedades mecánicas asignándoles un número P y un grupo con la finalidad de reducir el número de procedimientos que requieran calificación. La Tabla 14 resume la información contenida en QW/QB-422 referente al grupo y número P para la calificación de metales base ferrosos/no ferrosos.

Tabla 14. Número P para metales base ferrosos y no ferrosos

Spec. No.	Tipo o Grado	UNS No.	Welding	Brazing
			P-No.	Grupo No. P-No.
A/SA-352	CA6NM	J91540	6	4 102
Grupo ISO 15608	Tensión mínima especificada ksi (MPa)	Composición nominal	Forma de producción	
7.2	110 (760)	13Cr - 4 Ni	Fundición	

Fuente: Autores

Para el acero inoxidable martensítico ASTM A743 grado CA6NM ha sido asignado un número P de 6 y clasificado dentro del grupo 4, esta información debe estar contenida en la sección referente al metal base según el formato sugerido, donde se incluye la composición química del material cuyos valores han sido indicados anteriormente en la Tabla 10 y además el rango de espesores calificados que aplica desde los 5 mm hasta los 38 mm según las especificaciones descritas en la Tabla 13. Al tratarse de una soldadura similar, estas mismas especificaciones fueron aplicadas para los tres procedimientos de soldadura que se desarrollaron, la información descrita en esta sección se indica en la Figura 54 mostrada a continuación.

Figura 54. Especificaciones del metal base

*METALES BASE (QW-403)								
N° P	6	N° de Grupo	4	a	N° P	6	N° de Grupo	4
o								
Especif. material	ASTM A743			Tipo/grado o N° UNS	CA-6NM (J91540)			
hasta	Especif. material ASTM A743			Tipo/grado o N° UNS	CA-6NM (J91540)			
				o				
Análisis Químico y Prop. Mecánicas	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%Mn	%Fe	
	<0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	<1	<1	78,4-84,6	
hasta	Análisis Químico y Prop. Mecánicas			%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si
	<0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	<1	<1	78,4-84,6	
	Metal Base Calificado (mm)			Rango de Espesores:		Filete:		N/A
	Ranura:	5 / 38						
	Metal de relleno. Espesor máximo de pase ≤ 3 mm			<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	Dimension:		N/A
Otra información:								

Fuente: Autores

### 3.4.3 Especificación de los metales de aporte

En el párrafo QW-404 se especifica el metal de aporte empleado, donde tomando en cuenta sus características de soldadura y composición se los clasifica dentro de un grupo específico asignándoles un número F y un número A. Para el desarrollo del procedimiento de soldadura N°1 se empleará como material de aporte en la soldadura de raíz y pase caliente varilla de soldar ER410NiMo de 2.4 mm de diámetro ya que según la información contenida en la Tabla 15 extraída del AWS A5.9/A5.9M:2012 "Specification for bare

*Stainless Steel Welding Electrodes and Rods*” su composición química es muy similar al metal base, debido a esto es ampliamente utilizado para reparaciones de este tipo, en el Anexo H se adjunta la ficha técnica del fabricante para este material de aporte.

Tabla 15. Composición química del metal de aporte martensítico

		Wt %				
Clasificación AWS	Número UNS	C	Cr	Ni	Mo	
		0,06	11,0 - 12,5	4,0-5,0	0,4-0,7	
ER410NiMo	S41086	Mn	Si	P	S	Cu
		0,6	0,5	0,3	0,3	0,75

Fuente: Autores

Para el relleno y capa se empleará el mismo material de aporte en presentación de electrodo revestido E410NiMo-15 de 3.2 mm de diámetro para el proceso SMAW cuyas características se encuentran en *AWS A5.4/A5.4M:2006 “Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding”*, y su ficha técnica se puede observar en el Anexo I. La información que se muestra en la Tabla 16 fue extraída de QW-432 del código ASME sección IX, donde se indica que el electrodo revestido se encuentra dentro de la especificación ASME SFA-5.4 y su número F es 4, de igual manera la varilla de soldar se especifica bajo ASME SFA-5.9 y su número F corresponde a 6.

Tabla 16. Número F para metal de aporte

No. F	Especificación ASME	Clasificación AWS	No. UNS
4	SFA-5.4 Austenítico, duplex u otro	EXXX(X)-15	----
6	SFA-5.9	Todas las clasificaciones	----

Fuente: Autores

El número A se obtuvo de la tabla QW-442 del Código ASME sección IX, referente a la clasificación de los metales soldados ferrosos para la calificación del procedimiento, Tabla 17, donde de acuerdo al análisis de composición química el tipo de depósito de soldadura es *romo - martensítico* y le corresponde un número A de 6.

Tabla 17. Número – A Clasificación de los metales soldados ferrosos para la calificación del procedimiento

No. A	Tipos de depósito de soldadura	Análisis %					
		C	Cr	Mo	Ni	Mn	Si
6	Cromo - Martensítico	0,15	11,0 - 15,00	0,7	0,8	2	2

Fuente: Autores

Toda la información referente a los metales de aporte empleados para el procedimiento de soldadura N°1 CIRT/16-WPS-001, debe ser incluida en esta sección, la misma que se muestra a continuación en la Figura 55.

Figura 55. Especificaciones del metal de aporte contenidas en el procedimiento de soldadura N°1

*METALES DE APORTE (QW-404)			
	GTAW	SMAW	
N° Espec. (SFA)	5.9	5.4	
N° AWS (Clase)	ER410NiMo	E410NiMo-15	
N° F	6	4	
N° A	6	6	
Tamaño de Metales de Aporte	2,4 mm	3,2 mm	
<b>Metales de Soldadura</b>			
<b>Rango de Espesor depositado:</b>			
Ranura	≤ 2 mm	≤ 3 mm	
Filete	N/A	N/A	
Fundente del Aporte (clase)	N/A	N/A	
Nombre Comercial del Aporte	SELECTARC M13/4	SELECTARC INOX 13/4	
Inserto consumible	N/A	N/A	
<b>Otra información:</b>			
* Otra combinación de metal base y metal de aporte se deberá registrar individualmente.			

Fuente: Autores

Para la elaboración del procedimiento N°2 se empleará como metal de aporte en los pases de raíz y caliente varilla de soldar austenítica ER309LMo de 2.4 mm de diámetro, su composición química se muestra a continuación en la Tabla 18 de acuerdo a AWS A5.9/A5.9M:2012 (ver ficha técnica en Anexo J), le corresponde un número F de 6 de acuerdo a la información citada anteriormente; al igual que en el procedimiento N°1 el metal de aporte para el relleno y capa fue electrodo revestido E410NiMo-15 de 3.2 mm de diámetro.

Tabla 18. Composición química del metal de aporte austenítico

		Wt %				
Clasificación AWS	Número UNS	C	Cr	Ni	Mo	
		0,03	23,0-25,0	12-14	2-3	
		Mn	Si	P	S	Cu
ER309LMo	S30986	1-2,5	0,3-0,65	0,3	0,3	0,75

Fuente: Autores

El total de los datos contenidos en esta sección para el procedimiento de soldadura N°2 se muestra a continuación en la Figura 56.

Figura 56. Especificaciones del metal de aporte contenidas en el procedimiento de soldadura N°2

*METALES DE APORTE (QW-404)			
	GTAW	SMAW	
N° Espec. (SFA)	5.9	5.4	
N° AWS (Clase)	ER309LMO	E410NiMo-15	
N° F	6	4	
N° A	6	6	
Tamaño de Metales de Aporte	2,4 mm	3,2 mm	
<b>Metales de Soldadura</b>			
<b>Rango de Espesor depositado:</b>			
Ranura	≤ 2 mm	≤ 3 mm	
Filete	N/A	N/A	
Fundente del Aporte (clase)	N/A	N/A	
Nombre Comercial del Aporte	SELECTARC 24/12M	SELECTARC INOX 13/4	
Inserto consumible	N/A	N/A	
<b>Otra información:</b>			
* Otra combinación de metal base y metal de aporte se deberá registrar individualmente.			

Fuente: Autores

Finalmente, el desarrollo del procedimiento de soldadura N° 3 es similar al anterior con la diferencia que la soldadura de relleno y capa se realiza mediante proceso GMAW, empleando el mismo tipo de metal de aporte es decir alambre de soldar ER410NiMo de 1.2 mm de diámetro cuya clasificación y especificaciones ya se dieron a conocer (ver ficha técnica en Anexo K). De esta manera la información detallada para este procedimiento se muestra a continuación en la Figura 57.

Figura 57. Especificaciones del metal de aporte para el procedimiento de soldadura N°3

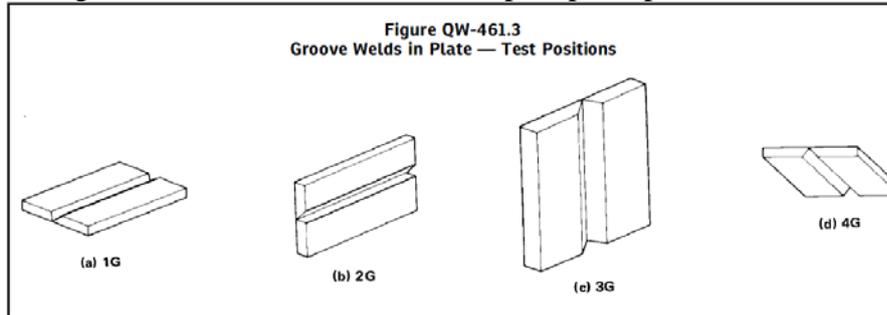
*METALES DE APORTE (QW-404)			
	GTAW	GMAW	
N° Espec. (SFA)	5.9	5.9	
N° AWS (Clase)	ER309LMO	ER410NiMo	
N° F	6	6	
N° A	6	6	
Tamaño de Metales de Aporte	2,4 mm	1,2 mm	
<b>Metales de Soldadura</b>			
<b>Rango de Espesor depositado:</b>			
Ranura	≤ 2 mm	≤ 5 mm	
Filete	N/A	N/A	
Fundente del Aporte (clase)	N/A	N/A	
Nombre Comercial del Aporte	SELECTARC 24/12M	SELECTARC M13/4	
Inserto consumible	N/A	N/A	
<b>Otra información:</b>			
* Otra combinación de metal base y metal de aporte se deberá registrar individualmente.			

Fuente: Autores

#### 3.4.4 Posición

Al ser los cupones placas planas con ranura, la posición de soldadura seleccionada para el desarrollo de los tres procedimientos fue 1G de acuerdo a las especificaciones que se indican en el párrafo QW-405 y la Figura 58 referente al QW-461.3 del código ASME sección IX donde se indican los diferentes tipos de posiciones de soldadura.

Figura 58. Posiciones de soldadura para placa plana con ranura



Fuente: (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2015b)

### 3.4.5 *Pre calentamiento y temperatura entre pases*

Esta sección del WPS corresponde al párrafo QW- 406 del código ASME sección IX, donde tomando en cuenta lo descrito en el *Supplement to the Welding Journal “Heat Treatment of Welded 13%Cr-4%Ni Martensitic Stainless Steels for Sour Service”* se ha determinado que la temperatura de pre calentamiento mínima para este acero debe estar comprendida entre los 85-120°C y la temperatura entre pases debe ser controlada entre los 100-150°C para evitar el agrietamiento por hidrógeno (HIC) en soldaduras de acero inoxidable martensítico. (AWS, 2011)

### 3.4.6 *Tratamiento térmico post soldadura (PWHT)*

El desarrollo de los parámetros del PWHT para los tres procedimientos de soldadura se los llevó a cabo considerando lo dispuesto en el *AWS Welding Handbook Vol. 4*, Tabla 19, donde indica que para un acero martensítico grado CA6NM la temperatura del PWHT debe ser entre 593-621°C.

Tabla 19. Tratamiento térmico post soldadura para aceros inoxidables martensíticos

Tipo	Rango de temperatura de PWHT		Rango de temperatura de recocido completo	
	°C	°F	°C	°F
CA-6NM	593-621	1100-1150	788-816	1450-1500
CA-15, CA-40	621-649	1150-1200	843-899	1550-1650
403,410,416	649-760	1200-1400	829-885	1525-1625

Nota: Al alcanzar el mayor valor de temperatura se obtienen menores valores de dureza.

Fuente: (AWS, 2011)

Además, la información que muestra la Tabla 20 extraída del *AWS A5.4/A5.4M*, indica

las propiedades mecánicas y el tratamiento térmico que requiere llevarse a cabo para los metales de aporte empleados.

Tabla 20. Propiedades mecánicas y tratamiento térmico del metal de aporte

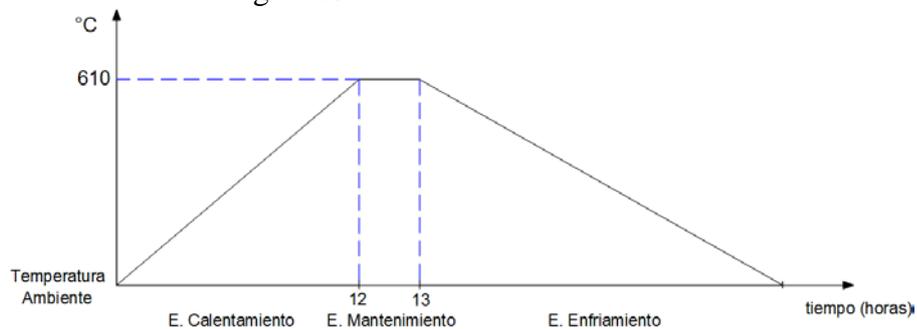
Clasificación AWS	Esfuerzo de Tensión, mín.		%Elongación, mín	Tratamiento Térmico
	ksi	MPa		
E309LMo	75	520	30	Ninguno
E410NiMo	110	760	15	Nota C

Nota C: Calentamiento a 595°C-620°C, una hora de mantenimiento (-0,+15 minutos) y enfriamiento al ambiente

Fuente: Autores

Otro aspecto a tomar en cuenta es el tiempo de mantenimiento el cual como se indicó en el capítulo anterior se recomienda que sea de 2 min/mm o 1 h/in siendo como mínimo 1 hora para espesores menores. Tomando en cuenta toda esta información y ya que, la aplicación de estos procedimientos tiene como objetivo utilizarse para la recuperación por soldadura de álabes de turbinas y elementos hidráulicos que se llevarán a cabo en el CIRT, se debe considerar las condiciones del horno para tratamiento térmicos disponible, el cual puede alcanzar temperaturas máximas de 620°C con una tasa de calentamiento de 50°C/ hora, es por esto que el PWHT para los cupones de soldadura se definió de la siguiente manera: Calentamiento hasta los 610±10°C con mantenimiento de 1 hora y posterior enfriamiento a temperatura ambiente y aire calmado, la curva del ciclo térmico puede observarse a continuación en la Figura 59.

Figura 59. Ciclo térmico del PWHT



Fuente: Autores

### 3.4.7 Gas de protección.

La sección QW-406 hace referencia a las especificaciones de los gases de protección

utilizados tanto para el proceso de soldadura GTAW como para el GMAW, para ambos casos la selección y todas las especificaciones mostradas a continuación se fundamentaron en información extraída del *AWS Welding Handbook, Vol 2*. La Tabla 21 indica los parámetros recomendados de soldadura para acero inoxidable mediante proceso GTAW.

Tabla 21. Parámetros recomendados del gas protector para soldadura GTAW

Tipo de metal	Espesor	Tipo de corriente	Electrodo	Gas protector
Acero inoxidable	Todos	DCEN	Toriado	Argón, Argón-helio, argón-hidrógeno
	Menor a 3,18 mm	AC	Puro o Zirconio	Argón, Argón-helio

Fuente: Autores

El gas de protección seleccionado fue argón con una pureza del 99.99% ya que permite obtener un arco más suave de fácil iniciación con menor penetración, brinda una excelente protección con bajos caudales y mayor disponibilidad por ser el más comúnmente usado (AWS, 2004), el cual se empleó con un gasto de 12-25 SCFH (6-12 l/min) recomendado según el fabricante del metal de aporte, Anexo H.

Antes de seleccionar el gas de protección para el proceso GMAW utilizado en el procedimiento N°3, debe indicarse que el modo de transferencia del metal es por *Arco Pulsado*, modo similar al de transferencia por spray, caracterizado por una pulsación de la corriente, logrando así que la energía necesaria para fundir el material base actúe durante intervalos cortos de tiempo permitiendo obtener una menor ZAT y una soldadura más eficiente sin pérdidas de calor hacia el MB. (ROMERO, 2012). Basándose en esta consideración en la Tabla 22 se especifica el gas de protección empleado con un caudal de 38-42 SCFH (18-20 l/m) recomendado por el fabricante del metal de aporte cuya hoja técnica se indica en el Anexo K.

Tabla 22. Especificaciones del gas de protección para el proceso GMAW

Tipo de metal	Gas protector	Características
Acero inoxidable	98% Argón-2%CO <sub>2</sub>	La adición de CO <sub>2</sub> al Argón produce una mejor estabilidad del arco y reducción de la tendencia chisporroteo.

Fuente: Autores

### 3.4.8 Características eléctricas

Las características eléctricas mostradas en la Tabla 23 fueron determinadas para el proceso GTAW basados en los parámetros del *AWS Welding Handbook, Vol 2*.

Tabla 23. Características eléctricas de soldadura para proceso GTAW.

Tipo	Clasificación AWS	Diámetro del electrodo	Boquilla del gas	Corriente directa
		in.	in.	Polaridad DCEN (A)
Electrodo de Tungsteno	EGW	3/32	½	120-220

Fuente: Autores

Las características empleadas en los procesos SMAW y GMAW se basaron en los datos técnicos de los catálogos del metal de aporte, los cuales se indican en la Tabla 24.

Tabla 24. Características eléctricas de soldadura para proceso SMAW y GMAW

Material de aporte	Diámetro (mm)	Tipo de corriente	Amperaje	Voltaje
E410NiMo-15	3,2	DCEP	110-130	23-30
ER410NiMo	1,2	DCEP	140-220	24-28

Fuente: Autores

### 3.4.9 Técnica

La técnica aplicada corresponde al párrafo QW-410 del código ASME sección IX, donde se han considerado los parámetros presentados en la Tabla 25 conforme a lo recomendado en el *AWS Welding Handbook, Vol 4* para el desarrollo de los tres procedimientos de soldadura a emplearse.

Tabla 25. Técnica aplicada durante la soldadura

Tipo de cordón	Orificio o taza de gas	Limpieza inicial o entre pases	Pases por lado	Electrodo
Recto	#10	Disco de corte, Cepillo, Grata de acero inoxidable	Múltiple	Múltiple

Fuente: Autores

Finalmente, definidos los parámetros de las variables esenciales y no esenciales, se desarrollaron los WPS que se muestran en los Anexo L, Anexo M, y Anexo N.

### 3.5 Procedimientos para la inspección de los cupones de soldadura

La evaluación e inspección del material y cupones de soldadura se debe realizar bajo lo indicado en la especificación CCH 70-4 donde se establecen los criterios de calidad que contemplan la realización de inspección por medio de ensayos de tipo *Visual, Líquidos Penetrantes, Partículas Magnéticas y Ultrasonido*.

#### 3.5.1 Hojas de especificaciones de calidad

Es el documento donde el diseñador define las condiciones de aceptación, requerimientos tecnológicos y pruebas de inspección para un componente de máquina hidráulica, en el que constan especificaciones como:

- Estándares Aplicados
- Verificación de la composición química y propiedades mecánicas
- Ubicación dentro del elemento donde realiza la prueba
- Condición superficial de la zona fundida
- Tipo de END para verificar la calidad de la zona y el alcance del ensayo
- Entre otras

##### 3.5.1.1 Especificaciones de calidad para turbinas hidráulicas.

- *Propiedades del material.* – Al ser el mismo material de fabricación tanto para rodets Francis, Pelton y Kaplan sus propiedades del material deben regirse a las propiedades mostradas en la Tabla 26.

Tabla 26. Propiedades del material para turbinas hidráulicas

Designación del material:		GX4CrNi13-4 + QT1					Acorde a:		EN 10283		
<b>Valores Límite Especificados</b>	Composición química	C %	Mn %	Si %	Cr %	Ni %	Mo %	S %	P %	S+P %	
		≤ 0,06	≤ 1,00	≤ 0,50	12-13	3,5-5	≤ 0,70	≤ 0,015	≤ 0,025	≤ 0,03	
	Propiedades mecánicas	Rm (MPa)	Rp - Re (MPa)	A %	Z %	CV CU	J bei t°C	Dureza (HB)	Aceptación acc. EN 10204 3.2		
		≥ 760	≥ 550	≥ 15	----	≥ 50	20	240-280			

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

- *Ensayos no destructivos.* – Dependiendo de la zona y el tipo de turbina hidráulica la inspección por END se debe realizar bajo las especificaciones técnicas indicadas en la Tabla 27

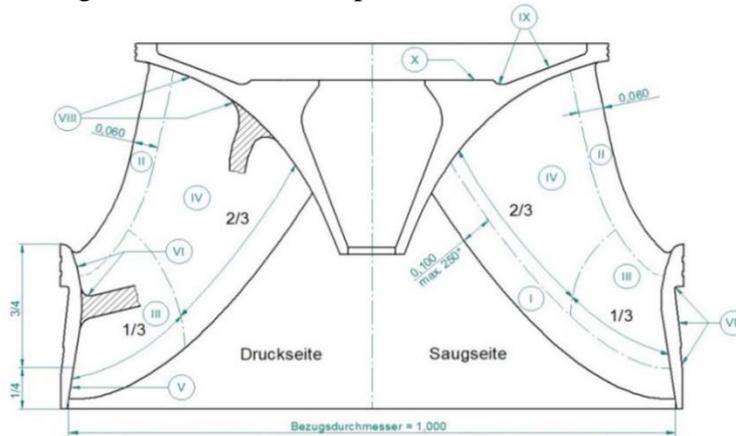
Tabla 27. Niveles de calidad para la inspección por END

Especificaciones de Técnicas de los Niveles de Calidad CCH 70-4		RODETE FRANCIS																					
		Zonas		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		IX		X	
		Ensayos		F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M
VT		1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	4	4	3	3	
PT		1		1			2		3		2		2				2						
MT		1		1		2		3		2	2	2	2	3			2	4			2		
UT 1 (Haz recto)																						3	
UT 2 (Haz angular)																							
RT																							
		ÁLABES DEL RODETE FRANCIS																					
		VT		2	1	2	2	2	2														
		PT			1		3																
MT		2	2	3	3		2																
UT 1 (Haz recto)		2	2	3	3																		
UT 2 (Haz angular)			3																				
RT																							
		CANGILONES DEL RODETE PÉLTON																					
		VT		1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	3	3						
		PT		1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3						
MT		2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2							
UT 1 (Haz recto)		2	2			2	2	2	2														
UT 2 (Haz angular)		2	2			2	2	2	2														
RT																							
		ÁLABES DEL RODETE KAPLAN																					
		VT		1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	3	2	3	2	3	3				
		PT			2		3		3		3		1										
MT		2		3		3		3		1	1	3	3	3	2	3	3						
UT 1 (Haz recto)		2		2		3		2				3	3	3	3	3	3						
UT 2 (Haz angular)								3															
RT																							
		F = Fundidor M = Fabricante																					

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

- *Zonas de inspección en el rodete Francis.* – En la Figura 60 se especifican las zonas de Inspección por ensayos no destructivos.

Figura 60. Zonas de inspección en el rodete Francis

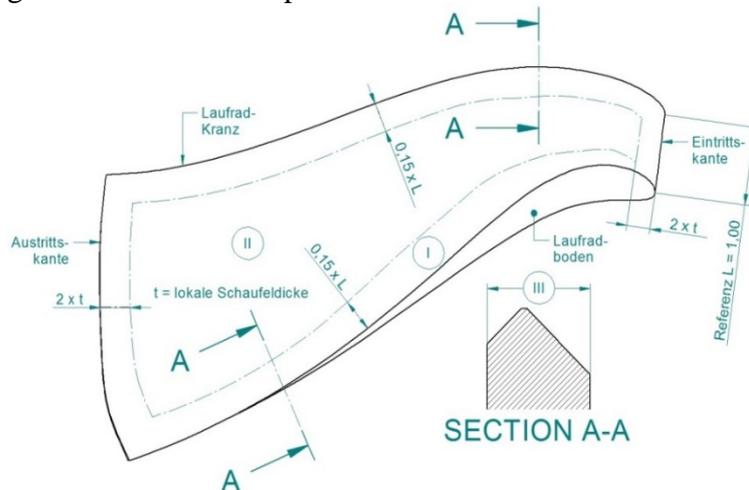


Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

La hoja de especificaciones de calidad para el rodete Francis se adjunta en el Anexo O.

- *Zonas de inspección en los álabes del rodete Francis.* – En la Figura 61 se especifican las zonas donde se debe llevar a cabo la Inspección por ensayos no destructivos.

Figura 61. Zonas de inspección en los álabes del rodete Francis

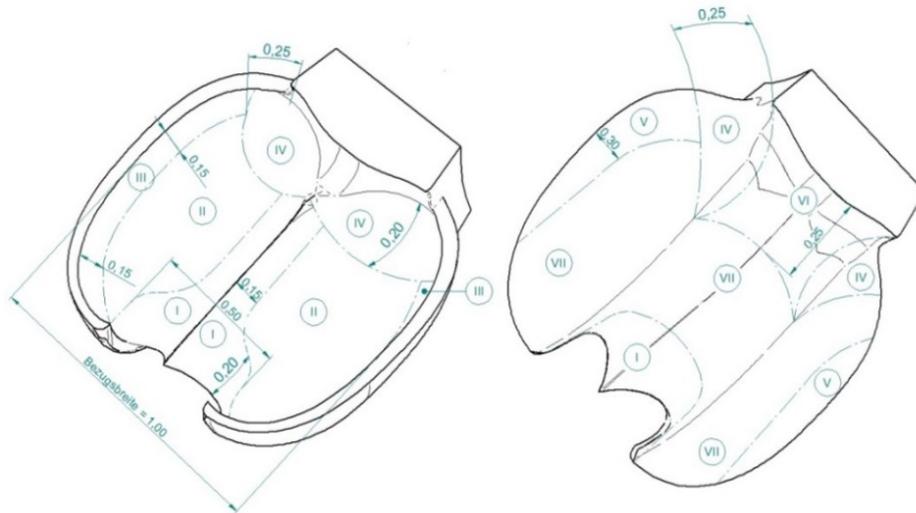


Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

El documento de especificaciones de calidad para los álabes del rodete Francis se adjunta en el Anexo P.

- *Zonas de inspección en los cangilones del rodete Pelton.* – En la Figura 62 se especifican las zonas donde se debe llevar a cabo la inspección por ensayos no destructivos.

Figura 62. Zonas de inspección en los cangilones del rodete Pelton

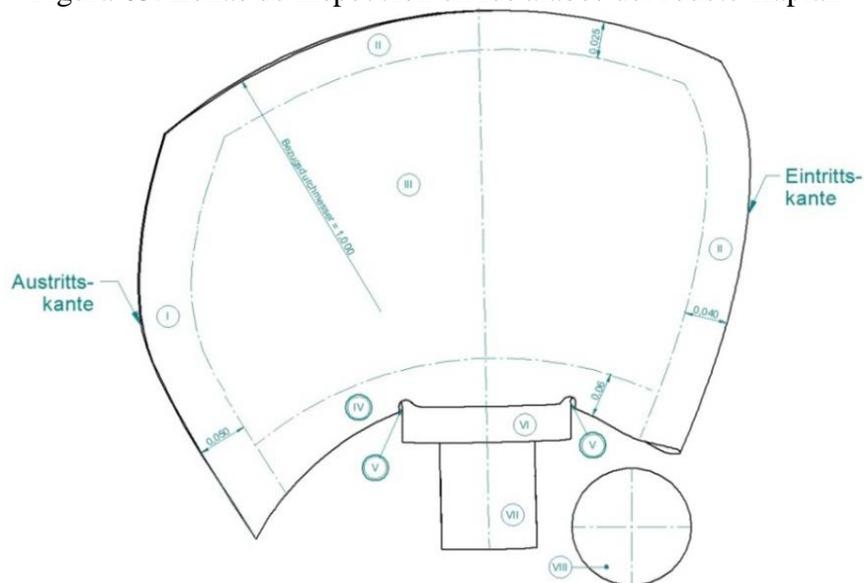


Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

El documento de especificaciones de calidad para los cangilones del rodete Pelton se adjunta en el Anexo Q.

- *Zonas de inspección en los álabes del rodete Kaplan.* – En la Figura 63 se especifican las zonas donde se debe llevar a cabo la inspección por ensayos no destructivos.

Figura 63. Zonas de inspección en los álabes del rodete Kaplan



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

El documento de especificaciones de calidad para los álabes del rodete Kaplan se adjunta en el Anexo R.

### 3.5.2 *Inspección visual*

- *Alcance.* – Identificar la presencia y ubicación de indicaciones como porosidades, socavaciones, salpicaduras o discontinuidades siempre y cuando estas sean superficiales.

#### 3.5.2.1 *Preparación de la superficie*

Realizar una limpieza total de la superficie para eliminar cualquier tipo de impureza, suciedad o irregularidad que interfiera en la inspección de la zona.

#### 3.5.2.2 *Método de ensayo*

La inspección puede llevarse a cabo mediante dos métodos:

- *Ensayo visual directo.* – Mediante observación directa desde el inspector hasta el área ensayada ya que es de fácil acceso y no existe ningún tipo de interrupción.
- *Ensayo visual remoto.* – Ya que existe alguna de interrupción que no permite una observación directa de la superficie ensayada, se hace uso de sistemas de video o fotografías que permitan su inspección.

#### 3.5.2.3 *Parámetros para la realización del ensayo*

Los parámetros mostrados a continuación aseguran el desarrollo correcto del ensayo:

- *Distancia y ángulo de inspección.* - La distancia desde el observador hasta la zona ensayada no debe ser mayor a 600 mm y el ángulo de visión no menor a 30°.
- *Iluminación.* – De ser necesario se puede emplear luz artificial con el fin de garantizar más de 160 lx para inspección visual general y más de 500 lx para inspección visual local.
- *Rugosidad superficial.* – Mediante comparadores táctiles u ópticos se debe determinar la rugosidad superficial del área ensayada para asignar un nivel de calidad de acuerdo

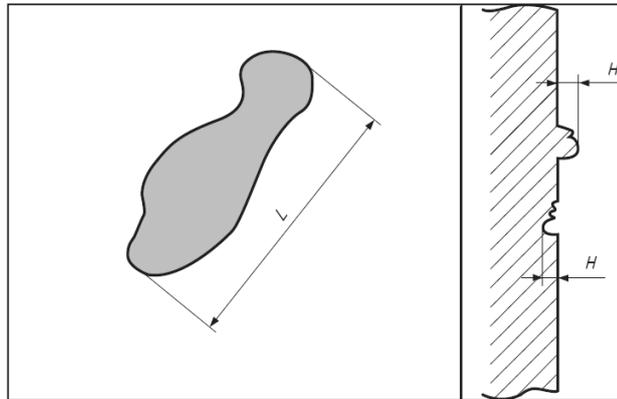
a las Tabla 28 y Tabla 29.

- *Área de inspección.* – El área de referencia es de  $100 \text{ cm}^2$  de forma rectangular o cuadrada dependiendo de las dimensiones de la superficie ensayada.

#### 3.5.2.4 Evaluación de las discontinuidades superficiales

Las discontinuidades superficiales encontradas se evalúan de acuerdo a sus dimensiones H y L como se observa en la Figura 64.

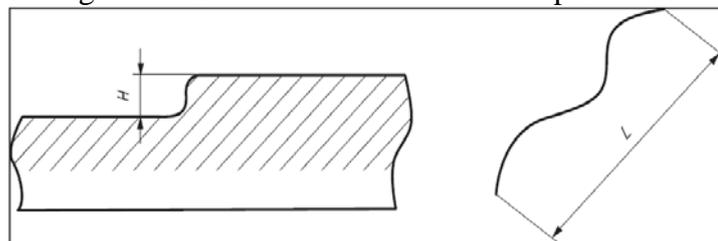
Figura 64. Evaluación de discontinuidades superficiales



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

Mientras tanto en la Figura 65 se presenta la evaluación de discontinuidades por desniveles encontradas en la superficie.

Figura 65. Evaluación de desniveles superficiales



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

#### 3.5.2.5 Criterios de aceptación

Tomando en cuenta las dimensiones de las indicaciones y la rugosidad superficial del área ensayada, se presentan los criterios de aceptación correspondientes para superficies fundidas, Tabla 28, y para superficies mecanizadas, Tabla 29 .

Tabla 28. Criterios de aceptación para superficies fundidas

Nivel de Calidad	Rugosidad de la superficie	Comparador de Rugosidad Superficial		Inclusiones, porosidad de gas, soldadura en frío, costras, marcas y soldaduras
	Ra [μm]	BNIF 359	ASTM A802 (SCRATA)	
1	≤ 6.3	1/0S1	A1	B1, C1, D1, F1, J1
2	≤ 6.3	1S1	A1	
3	≤ 12.5	2S1	A2	B2, C2, D2, F2, J2
4	≤ 12.5	3S1	A3	B4, C3, D5, E3, F3, J3
5	≤ 25	6S1	A4	B5, C4, E5, J5

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

Tabla 29. Criterios de aceptación para superficies mecanizadas

Nivel de Calidad	Tamaño de la discontinuidad		Área total discontinuidades [mm <sup>2</sup> ]	Rugosidad Superficial Ra [μm]	Comparador de Rugosidad Superficial	
	Área de altura o profundidad <i>H</i> [mm]	Max. Longitud <i>L</i> en el área o <i>H</i> o diámetro externo Ø [mm]			BNIF 359	ASTM A802 (SCRATA)
1	< 0.5	0.5	7	≤ 1.6	1/0S2	---
2	0.5 a 1.0	1.0	16	≤ 3.2	1S2	---
3	1.0 a 1.5	1.5	40	≤ 6.3	2S2	---
4	1.0 a 1.5	2.5	100	≤ 12.5	3S2	H1
5	1.0 a 2.0	5.0	250	≤ 25	5S2	H3
Nota	Si la altura o profundidad de la discontinuidad es menor al valor límite inferior en el área de H, la discontinuidad no tiene que ser evaluada. La mínima distancia de borde a borde entre dos indicaciones alineadas es 10L para niveles 1 y 2 (L = longitud o largo de la indicación), 8L para nivel 3, 5L para nivel 4, y 4L para nivel 5.					

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

### 3.5.2.6 Elaboración del formato y reporte de ensayo visual

El reporte debe contener las especificaciones de calidad, la preparación de la superficie, parámetros con los que se llevó a cabo el ensayo, zonas examinadas, resultados, responsables, entre otros datos sugeridos por la norma que han sido tomados en cuenta para elaborar el reporte de inspección visual mostrado en el Anexo S.

### 3.5.3 Inspección por líquidos penetrantes

- *Alcance.* – Revelar todo tipo de indicaciones como porosidades, grietas o fisuras que estén abiertas a la superficie, este ensayo es aplicable a todo tipo de materiales.

### 3.5.3.1 Parámetros y condiciones de ensayo

- *Condiciones superficiales.* – La superficie a ensayar debe estar completamente limpia, evitando cualquier desigualdad o irregularidad que interfiera en la medición de su rugosidad, la misma que será clasificada de acuerdo a los niveles de calidad mostrados en la Tabla 30.

Tabla 30. Niveles de calidad para la condición superficial

Nivel de Calidad	Rugosidad Superficial Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rugosidad de la Superficie – Comparador			
		BNIF 359	Prueba de Rugosidad Nr. 2 (LCA – CEA) Amolado	Prueba de Rugosidad Nr. 3 (LCA – CEA) Granallado	ASTM A802 (SCRATA)
1	$\leq 6.3$	1S2, 2S2	$\leq N9$	No permitido	No aplica
2 a 3	$\leq 12.5$	1S1, 2S1, 3S2, 4S2, 5S2	$\leq N10$	No Permitido	No aplica
4 a 5	$\leq 12.5$	4S1, 5S1, 6S1	$\leq N10$	Permitido (*)	No Aplica

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

- *Temperatura y humedad ambiental.* – Se recomienda almacenar bajo condiciones ambientales normales los materiales empleados para el ensayo.
- *Temperatura superficial.* – Debe estar comprendida entre 10-40°C.
- *Iluminación.* – La inspección debe realizarse con iluminación mayor a 500 lx.

### 3.5.3.2 Ejecución del ensayo

- *Limpieza.* – De ser necesario usar cepillo o amoladora para asegurar una superficie libre de pinturas o escorias, complementar con solvente y secar con franela o liencillo.
- *Aplicación del Penetrante.* – Puede ser de dos tipos, lavable con agua o removible con solvente y su aplicación se realizará por inmersión, cepillado o pulverización con un tiempo de penetración entre 10 y 20 minutos.
- *Remoción del exceso de penetrante.* – Si el penetrante es lavable con agua, usar un paño húmedo o pulverizador y enjuagar con agua cuya temperatura debe ser menor a 40°C, presión menor a 3.5 bar y distancia mayor a 50 cm. Si el penetrante es removible

con solvente rosear removedor/ limpiador sobre un paño y limpiar la superficie.

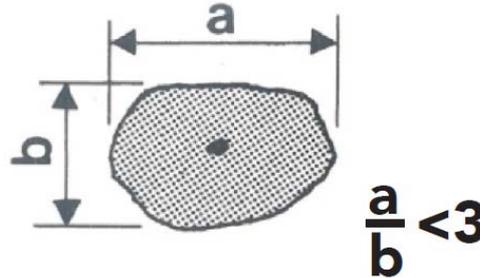
- *Aplicación del Revelador.* – Con la superficie seca y limpia, aplicar el revelador usando spray de una manera uniforme y evitando capas gruesas, a continuación, dejar secar naturalmente al ambiente.

### 3.5.3.3 Evaluación de las indicaciones

La inspección se debe realizar entre 10 a 20 min. después de la aplicación del revelador ya que hará visibles las indicaciones presentes las que se mostrarán en forma de sangrado y pueden ser de tipo:

- *Redondeada.* – Se presentan de forma circular o elíptica cuya longitud es menor a 3 veces su ancho principal, tal como se muestra en la Figura 66.

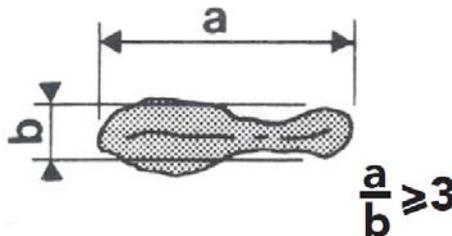
Figura 66. Representación de indicaciones redondeadas



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

- *Lineales.* – Se caracterizan por su longitud ya que es mayor a 3 veces su ancho principal, en la Figura 67 se observa este tipo de indicación.

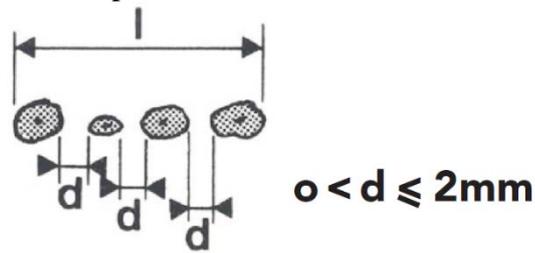
Figura 67. Representación de indicaciones lineales



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

- *Alineadas.* – Como se observa en la Figura 68 sobre una línea se ubican 3 o más indicaciones separadas a una distancia menor a 2mm de borde a borde.

Figura 68. Representación de indicaciones alineadas



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

Las indicaciones poco claras deberán ser clasificadas como defectos y tienen que volver a ser ensayadas. El parámetro de evaluación es la densidad, la misma que representa la cantidad de indicaciones relevante encontradas en un área de referencia y se calcula mediante la expresión mostrada a continuación:

$$\frac{\text{Área total de indicaciones relevantes}}{\text{Área de Referencia (100cm}^2\text{)}}$$

#### 3.5.3.4 Criterios de aceptación

En el Anexo T se encuentran las 5 clases que han sido definidas como criterios de aceptación para las indicaciones relevantes en función de sus dimensiones y densidad.

#### 3.5.3.5 Elaboración del formato y reporte de ensayo por líquidos penetrantes

El reporte debe contener las especificaciones de calidad, la preparación de la superficie, parámetros con los que se llevó a cabo el ensayo, zonas examinadas, resultados, responsables, entre otros datos sugeridos por la norma que han sido tomados en cuenta para elaborar el reporte de inspección por tintas penetrantes mostrado en el Anexo U.

#### 3.5.4 Inspección por partículas magnéticas

- *Alcance.* – Revelar indicaciones superficiales o sub-superficiales como grietas, faltas de fusión, o porosidades; este ensayo es aplicable únicamente a materiales ferromagnéticos con excepción de aceros austeníticos.

### 3.5.4.1 Preparación de la superficie

- *Limpieza.* – La superficie debe estar completamente seca y libre de suciedades o grasas y ser totalmente uniforme libre de irregularidades.
- *Rugosidad superficial.* – El nivel de calidad superficial deberá ser clasificado conforme a lo indicado en la Tabla 31.

Tabla 31. Calidad superficial del área ensayada de acuerdo a su rugosidad

Niveles de calidad	Rugosidad de la Superficie $R_a$ [ $\mu m$ ]	Bloque de ensayo de referencia			
		BNIF 359-01	Prueba de Rugosidad Nr. 2 (LCA – CEA) Amolado	Prueba de Rugosidad Nr. 3 (LCA – CEA) (*) Granallado	ASTM A802
1	$\leq 6.3$	1S2, 2S2	$\leq N9$	Granallado posible, si $R_a$ es conocido	No Aplicable
2 a 4	$\leq 12.5$	1S1, 2S1, 3S2, 4S2, 5S2	$\leq N10$	$\leq N10$	A1, B1, C1, A2, B2, H1, J1
5	$\leq 25$	4S1, 5S1, 6S1, 1S3	$\leq N11$	$\leq N11$	$\leq C2, D1$ F1

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

### 3.5.4.2 Parámetros de magnetización

- *Intensidad de campo magnético.* – Se logra un nivel de saturación magnética completa con valores de 2000 A/m para aceros no aleados y de baja aleación, en tanto que para aceros martensíticos se requieren valores más elevados.
- *Tipo de corriente.* – Sus principales características se indican en la Tabla 32.

Tabla 32. Características del tipo de corriente

Tipo de Corriente	Características
Alterna	Efecto superficial, revela indicaciones no muy profundas.
Rectificada	Revela indicaciones más profundas en comparación a la corriente alterna, ya que alcanza una profundidad media.
Continua de onda completa	Posee mayor profundidad de penetración por lo tanto revela indicaciones más lejanas a la superficie.

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

- *Electroimanes.* – Para realizar magnetizaciones locales se deben emplear yugos manuales que deberán ser inspeccionados para asegurar que son capaces de levantar una masa de 4.5 kg y un espacio entre las puntas de 140 mm a 200 mm.

#### 3.5.4.3 Medios de detección

Mediante partículas ferromagnéticas que pueden ser de dos tipos:

- *Polvo magnético seco.* – Debido a su color oscuro crea un contraste totalmente visible en condiciones ambientales normales.
- *Polvo magnético en suspensión húmeda.* – El núcleo ferromagnético de las partículas tienen un recubrimiento que las hace visibles para luz blanca o ultravioleta, su concentración varía entre 0.1 y 0.4 ml/l.
- *Intensidad de luz ultravioleta.* – Recomendada mayor a  $1000\mu W/cm^2$
- *Intensidad de Luz blanca.* – Recomendada menor a 20 lx.

#### 3.5.4.4 Procedimiento del ensayo

- *Método de magnetización.* – La magnetización se debe llevar a cabo sobre la superficie a ensayar en dos direcciones distintas aproximadamente  $90^\circ$  una de otra.
- *Aplicación del Medio de Detección.* – En caso de ser polvo seco este se puede usar solamente en niveles de aceptación 3 a 5 sobre la superficie totalmente seca, de lo contrario al ser polvo magnético en suspensión húmeda se debe rosear sobre la superficie durante la magnetización.

#### 3.5.4.5 Evaluación de las indicaciones

Pueden presentarse falsas indicaciones causada por irregularidades, excesiva rugosidad, excesivos valores de intensidad de campo magnético, variaciones en la permeabilidad, fuerte magnetismo residual y en caso de duda puede repetirse el ensayo.

### 3.5.4.6 Criterios de aceptación

En la Tabla 33 se especifican los criterios de aceptación para cada nivel de calidad.

Tabla 33. Criterios de aceptación

Tipo de defecto	Máx. dimensión de la indicación o No. de referencia estándar acorde con ASTM E125					
	Niveles de calidad	1 <sup>(1)</sup>	2	3	4	5
Indicación relevante más pequeña (en mm)		0.5	1	1.5	2	3
Discontinuidades lineales		inadmisible				
- máxima longitud de la indicación		-	3 mm	5 mm	10 mm	15 mm
- máxima suma de las longitudes de las indicaciones en $\Sigma$ <sup>(2)</sup>		-	18 mm	30 mm	60 mm	90 mm
- mínima distancia de borde a borde entre dos indicaciones alineadas <sup>(3)</sup>		-	10 L	8 L	5 L	4 L
Porosidad		inadmisible				
- máxima dimensión de la indicación / $\Sigma$		-	3 mm	5 mm	5 mm	5 mm
- relación: suma de las superficies de las indicaciones / $\Sigma$		-	2%	5%	10%	20%
- mínimo distancia de borde a borde entre dos indicaciones adyacentes		-	9 mm	15 mm	15 mm	15 mm
Cavidades superficiales <sup>(4)</sup>		inadmisible	n° II- 1	n° II- 2	n° II- 3	n° II- 4
Inclusiones <sup>(4)</sup>		inadmisible	n° III- 1	n° III- 2	n° III- 2	n° III- 3

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

- (1) Nivel 1 = nivel especial (crítico, zonas de altos esfuerzos). Si numerosas, pequeñas y uniformes indicaciones con forma de punto están presentes, la superficie deberá ser reacondicionada para habilitar la identificación del tipo de indicación. Si intentan volverse más largas o unirse, deberá llevarse a cabo un trabajo de reparación.
- (2)  $\Sigma$ : Superficie de referencia, correspondiente a las fotografías acorde a ASTM E125, ej.: aproximadamente 100 mm x 160 mm.
- (3) L: Longitud de la indicación más larga.
- (4) En caso de duda y si el tipo de defecto no puede ser claramente identificado, la indicación deberá ser evaluada como una discontinuidad lineal.

#### 3.5.4.7 *Desmagnetización*

Requerida por el diseñador y aplicada a todas las piezas ensayadas especificando el magnetismo residual, el mismo que debe ser menor a 600 A/m para evitar que las virutas se adhieran durante el trabajo de mecanizado.

#### 3.5.4.8 *Elaboración del formato y reporte de ensayo por partículas magnéticas*

Debe contener las especificaciones de calidad, la preparación de la superficie, parámetros con los que se llevó a cabo el ensayo, zonas examinadas, resultados, responsables, entre otros datos sugeridos por la especificación que han sido considerados para elaborar el reporte de inspección por partículas magnéticas adjunto en el Anexo V.

#### 3.5.5 *Inspección por ultrasonido*

- *Alcance.* – Detectar defectos internos sub-superficiales y evaluar su tipo, dimensiones y posición dentro de la sección transversal.

##### 3.5.5.1 *Inspección mediante barrido con haz angular*

Ideal para examinar soldaduras estructurales y de producción con un espesor mayor a 12mm. Los métodos usados para el desarrollo de inspección mediante barrido con haz angular se describen a continuación:

- Corrección de amplitud, distancia de orificios laterales (DAC SDH)
- Método de tamaño, ganancia, distancia (DGS)

El palpador angular debe ser movido sobre toda la superficie ensayada y las discontinuidades internas actuarán como reflectores causando ecos que deberán ser examinadas.

##### 3.5.5.2 *Equipo*

Entre las principales características que debe cumplir el equipo están:

- Frecuencias nominales de 1MHz hasta 5 MHz para método de pulso eco.
- Rango de tiempo base ajustable entre 10mm hasta 2m para ondas longitudinales y transversales en acero.
- Ajuste de ganancia de máximo 2dB y rango de al menos 80dB con precisión de 1dB.
- Precisión de la linealidad horizontal y vertical del monitor.
- Los ángulos recomendados de refracción para el palpador son 45°, 60° y 70° con frecuencia de 2 a 5 MHz.
- El acoplante puede ser de tipo gel de agua celulosa, aceite, grasa, gel acoplante y su efectividad es verificada si uno o más ecos de pared posterior son recibidos en las superficies paralelas.

Las siguientes características deben ser verificadas que se cumplan en el equipo después de realizar cualquier tipo de trabajo de reparación sobre el elemento, en un tiempo de al menos cada año.

- Ganancia con desviación máxima de  $\pm 1$  dB.
- Linealidad del tiempo base máxima de 5% del rango de ajuste de la pantalla.

#### 3.5.5.3 *Revisión del equipo*

- Comprobar que se encuentra en servicio y completo (generador de pulso, palpadores, cables de conexión).
- Revisión de la perpendicularidad del plano de incidencia del haz sónico (máx. desviación angular entre el plano de incidencia y el plano perpendicular de simetría del palpador = 2°).
- Revisión del índice del palpador y el ángulo de refracción.

- Revisión de la resolución.

#### 3.5.5.4 Parámetros del método DGS

Deben emplearse las curvas especificadas por el fabricante del palpador, en ellas la correlación entre la longitud del camino sónico y ganancia están definidas como un parámetro para el diámetro del reflector con forma de disco perpendicular al haz sónico. Los diámetros de referencia del reflector dependen de la profundidad de la pieza a ser examinada, los mismos que se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34. Diámetro del reflector con forma de disco en función de la profundidad explorada

Zona de profundidad a ser examinada [mm]	Diámetro de referencia de reflector con forma de disco (DSR) [mm]
$\leq 25$	2
> 25 a 50	2,5
> 50 a 100	3
> 100 a 150	4
> 150 a 200	5
> 200 a 250	5
> 250 a 300	6
> 300 a 400	7
> 400 a 500	8

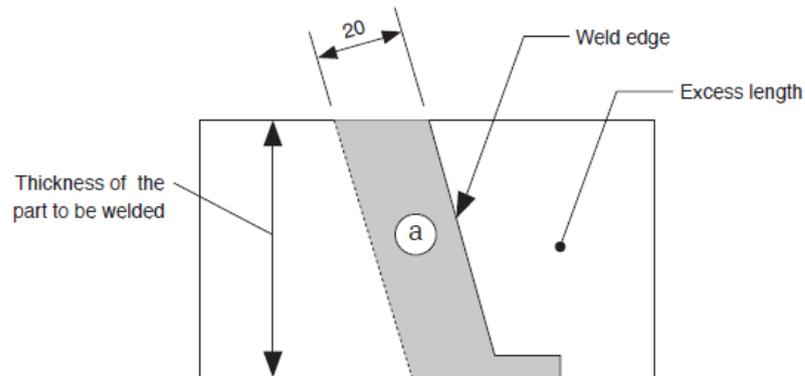
Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

#### 3.5.5.5 Características del ensayo

- *Estado del material.* – Para la inspección de soldaduras de producción o soldaduras de conexión el ensayo debe llevarse a cabo después del tratamiento térmico.
- *Zonas de inspección.* – Deben ser especificadas en la hoja de especificación de calidad, a continuación, se indican valores límite que deben ser verificados de ser necesario.

- *Juntas de soldadura con bordes.* – La zona de inspección comprende un área de 20 mm a lo largo del borde de la soldadura como se puede observar en la Figura 69.

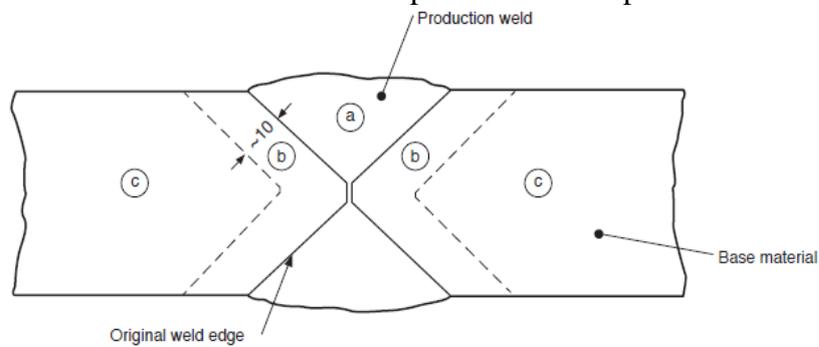
Figura 69. Junta soldada con bordes



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

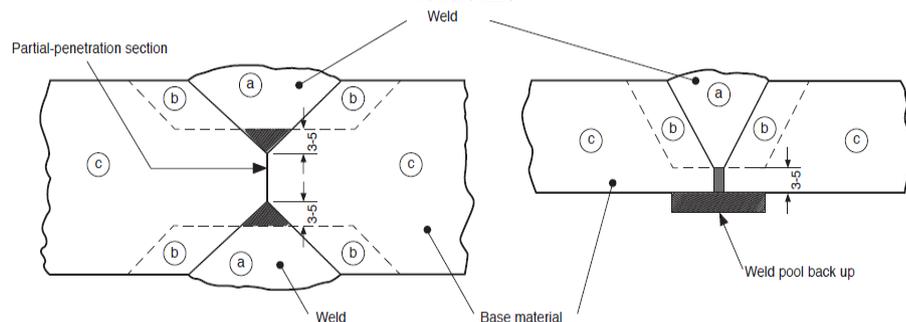
- *Soldaduras de construcción y soldaduras de producción.* – La inspección incluye el área de soldadura y el metal base contiguo, como muestra la Figura 70, Figura 71, Figura 72 bajo distintas condiciones.

Figura 70. Soldadura de costura con penetración completa entre dos partes



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

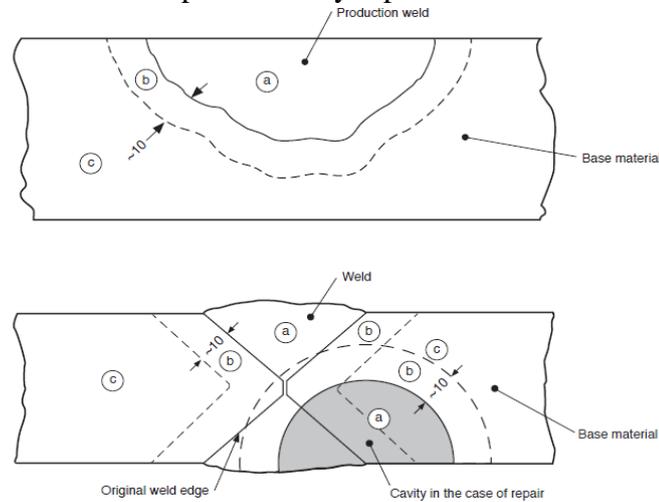
Figura 71. Soldadura de costura con penetración parcial y soldadura de costura con refuerzo



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

En las gráficas se puede observar unas zonas sombreadas las cuales indican que no es posible realizar el ensayo debido a los límites del método.

Figura 72. Soldadura de producción y reparación de soldadura de costura



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

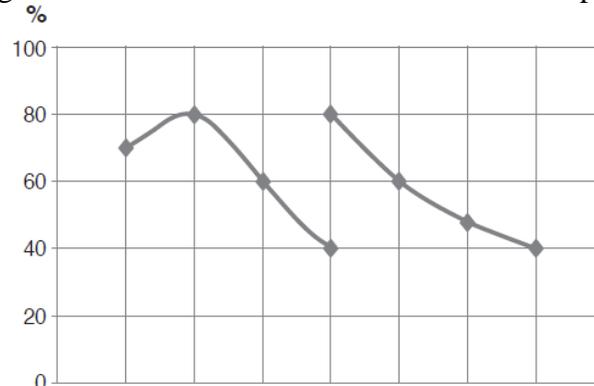
Área a+b: Uso del criterio de aceptación para la soldadura.

Área c: Uso del criterio de aceptación para el material base.

- *Condición superficial.* – Debe estar completamente limpia, libre de suciedad o irregularidades que impidan el desplazamiento libre del palpador. La rugosidad no debe exceder  $R_a = 6,3 \mu\text{m}$ .
- *Ajustes de distancia.* – Puede ser ajustado basado en:
  - *La longitud del camino sónico.* – Se debe emplear un bloque de calibración No. 1 de la ISO 2400 o el bloque de calibración No. 2 de la ISO 7963.
  - *La profundidad actual del reflector.* – Deben ser realizados usando reflectores artificiales del bloque de referencia, donde la posición relativa del eco en la pantalla permite la determinación de la profundidad real del reflector.
- *Ajustes de ganancia e intensidad de señal.* – Se emplean curvas teóricas que combinan la longitud del camino sónico, ganancia y diámetro del reflector posicionado perpendicular al haz sónico. La sensibilidad es ajustada basada en un eco de

referencia, donde, si la amplitud es menor al 40% de la altura de pantalla se debe emplear una curva de corrección de distancia amplitud, Figura 73.

Figura 73. Curva de corrección de distancia amplitud



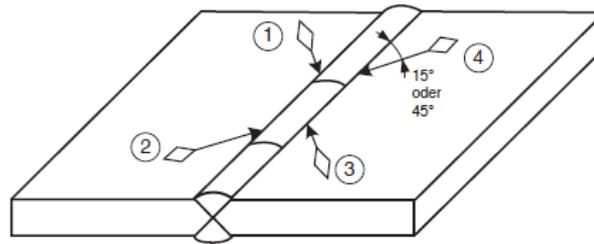
Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

#### 3.5.5.6 Procedimiento del ensayo y detección de defectos

El ángulo de refracción del haz ultrasónico está comprendido entre  $70^\circ$  y  $45^\circ$  cuya selección adecuada depende de parámetros como del espesor y forma geométrica de la pieza o junta soldada. El operador del equipo debe barrer el área de inspección con un traslape de al menos 10% del diámetro del palpador con una velocidad que no exceda los 150 mm/s.

- Indicaciones detectadas en soldaduras de construcción y producción. – para este tipo de requerimientos la inspección de estos elementos se recomienda que sea de dos tipos:
  - *Ensayo para defectos longitudinales.* – Están orientados en la dirección de la soldadura por lo cual deben usarse dos ángulos de refracción que difieran al menos  $10^\circ$  a  $15^\circ$ .
  - *Ensayo para defectos transversales.* – Están orientados aproximadamente en dirección perpendicular a la soldadura, si la junta no está mecanizada, Figura 74, el palpador debe rotarse contrario a la dirección de la soldadura y para juntas mecanizadas, Figura 75, la inspección se realiza en dos direcciones con un desplazamiento de  $180^\circ$ .

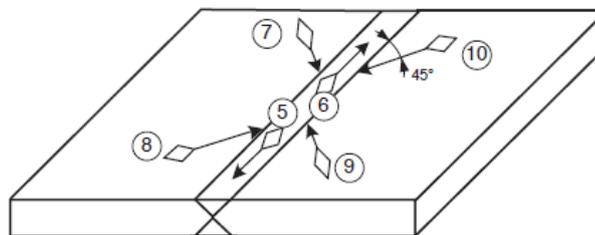
Figura 74. Ensayo en soldadura sin mecanizar



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

Ángulo de giro del palpador 15° o para soldadura por electro escoria 45° y direcciones de barrido 1,2,3,4.

Figura 75. Ensayo en soldadura mecanizada



Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014).

Para soldadura por electro escoria un ángulo de giro de 45° y direcciones de barrido 7,8,9,10.

- Indicaciones encontradas en extremos, bordes de soldadura.

Se debe realizar un barrido completo de toda el área a inspeccionar con el uso de varios tipos de palpadores para recibir la máxima amplitud de la indicación.

### 3.5.5.7 Caracterización de las indicaciones

Para caracterizar y evaluar indicaciones debe identificarse claramente entre la soldadura de producción, junta soldada y metal base.

- *Registro de ubicación.* – Mediante un sistema de fácil identificación registrar la ubicación de las indicaciones.
- *Evaluación de ecos de los defectos basado en la amplitud mediante la curva DAC*

*SDH.* – La máxima amplitud recibida de la indicación es comparada con el eje y de la curva de corrección de distancia de amplitud, el tamaño del defecto es expresado como porcentaje de su amplitud de referencia.

- *Evaluación basada en la amplitud mediante el método DGS.* - La amplitud máxima recibida de la indicación es comparada con la curva de la escala DGS para la longitud idéntica del camino sónico y condiciones originales de los ajustes. Los tamaños de los defectos se expresan por el diámetro del reflector con forma de disco equivalente.
  
- *Evaluación según los reflectores con dimensión medible.*
  - La forma del área del defecto deberá ser determinada por las posiciones respectivas del centro del palpador, que corresponden a la disminución de la altura del eco de la indicación a 50% de la máxima altura del eco.
  
  - La forma o longitud del reflector deberá ser determinado usando el llamado método de caída de 10 dB relativo a la línea de referencia.
  
- *Evaluación según los reflectores sin dimensión medible.*

Si la dimensión del reflector es más pequeña o igual al diámetro de referencia, la indicación es caracterizada como indicación tipo punto y puede ser asumida para corresponder al diámetro de referencia.

- *Indicaciones simples en reflectores agrupado.*

Si se detectan dos indicaciones usando dos métodos de barrido, serán consideradas como originarias desde el reflector bajo las siguientes condiciones:

- La distancia entre los centros de sus proyecciones sobre la superficie de ensayo es menor a 10 mm.
  
- La distancia entre los centros de sus proyecciones sobre una sección transversal a través de la junta soldada es menor a 10 mm.

En este caso, el menor de los valores de las dos profundidades y el valor más alto de área y amplitud son atribuidos a la indicación detectada.

- *Indicaciones desconectadas en reflectores agrupados.*

Al existir presencia de dos indicaciones, estas deberán ser agrupadas, si se cumplen las condiciones especificadas a continuación referente a las distancias que separa sus proyecciones:

- La distancia que separa sus proyecciones sobre la superficie de ensayo es menor o igual a seis veces la longitud de la más pequeña o 20 mm, si una tiene la forma de punto.
- La distancia que separa sus proyecciones sobre una sección transversal a través de la junta soldada es menor o igual a 20 mm.

#### 3.5.5.8 *Criterios de aceptación*

De acuerdo a lo indicado en la especificación mandatoria, los criterios de aceptación descritos a continuación se aplican para ensayos de:

- Transmisión a través del elemento de ensayo hacia el componente de prueba, ensayos de bordes y extremos de soldaduras
- Examinación de zonas susceptibles a agrietamiento en caliente, ensayos de soldaduras de producción.

Además, deben ser evaluadas todas las indicaciones que excedan los -10dB del eco de referencia, de estas serán inaceptables aquellas que:

- Independientemente de su longitud y amplitud, sean resultado de grietas, faltas de fusión en la soldadura o penetración incompleta.
- Usando el método DAC SDH, la altura del eco exceda el nivel de referencia definido de 6 dB independientemente de su longitud y forma.

Los criterios de aceptación para el método DGS que hacen referencia al tipo de defecto, diámetro del reflector con forma de disco y longitudes acumulativas se muestran en la Tabla 35 y Tabla 36 para frecuencias de 2 MHz y 4 MHz respectivamente.

Tabla 35. Método DGS: niveles de registro y niveles de aceptación (2 MHz)

Nivel de calidad	DSR(1)	Niveles de registro				Niveles Aceptables				Longitud máxima de una indicación	suma Longitud máx. acumulativa
		Zona de profundidad [mm]				Altura máxima del eco de defecto simple en la zona de profundidad [mm]					
		≤ 15(2)	> 15 - 50	> 50 - 100	> 100 - 250	≤ 15 (3)	> 15 - 50	> 50 - 100	> 100 - 250		
1	2	DSR 2 - 6 dB	DSR 2 ± 0 dB	No aplica		DSR 2	DSR 2 + 4 dB	No aplica		t	20% of 6t
						DSR 2 + 6 dB	DSR 2 + 10 dB			t/2	
2	2	DSR 2 - 2 dB	DSR 2 ± 0 dB	DSR 3 ± 0 dB	No aplica		DSR 2 + 2 dB	DSR 2 + 4 dB	DSR 3 + 4 dB	t	20% of 6t
							DSR 2 + 8 dB	DSR 2 + 10 dB	DSR 3 + 10 dB	t/2	
3	2	DSR 2 - 2 dB	DSR 2 + 2 dB	DSR 3 ± 0 dB	DSR 4 ± 0 dB	DSR 2 + 2 dB	DSR 2 + 6 dB	DSR 3 + 4 dB	DSR 4 + 4 dB	t	30% of 6t
						DSR 2 + 8 dB	DSR 2 + 12 dB	DSR 3 + 10 dB	DSR 4 + 10 dB	t/2	
4	2	DSR 2 - 1 dB	DSR 2 + 4 dB	DSR 3 + 1 dB	DSR 4 ± 0 dB	DSR 2 + 4 dB	DSR 2 + 6 dB	DSR 3 + 4 dB	DSR 4 + 4 dB	t	30% of 6t
						DSR 2 + 10 dB	DSR 2 + 12 dB	DSR 3 + 10 dB	DSR 4 + 10 dB	t/2	
5	2	DSR 2 - 1 dB	DSR 2 + 6 dB	DSR 3 + 4 dB	DSR 4 + 2 dB	DSR 2 + 4 dB	DSR 2 + 8 dB	DSR 3 + 6 dB	DSR 4 + 4 dB	t	40% of 6t
						DSR 2 + 10 dB	DSR 2 + 14 dB	DSR 3 + 12 dB	DSR 4 + 10 dB	t/2	

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

Tabla 36. Método DGS: niveles de registro y niveles de aceptación (4 MHz)

Nivel de calidad	DSR (1)	Niveles de registro				Niveles Aceptables				Longitud máxima de una	suma Longitud máx.
		Zona de profundidad [mm]				Altura máxima del eco de defecto simple en la zona de profundidad [mm]					
		≤ 15 (2)	> 15 - 50	> 50 - 100	> 100 - 250	≤ 15 (3)	> 15 - 50	> 50 - 100	> 100 - 250		
1	2	DSR 2 - 10 dB	DSR 2 - 6 dB	No aplica		DSR 2 - 6 dB	DSR 2 - 2 dB	No aplica		t (2)	20% of 6t
						DSR 2	DSR 2 + 4 dB			t/2	
2	2	DSR 2 - 9 dB	DSR 2 - 4 dB	DSR 3 - 6 dB	No aplica		DSR 2 - 4 dB	DSR 2 dB	DSR 3 - 2 dB	t	20% of 6t
							DSR 2 + 2 dB	DSR 2 + 6 dB	DSR 3 + 4 dB	t/2	
3	2	DSR 2 - 8 dB	DSR 2 - 2 dB	DSR 3 - 6 dB	DSR 4 - 6 dB	DSR 2 - 4 dB	DSR 2 + 2 dB	DSR 3 - 2 dB	DSR 4 - 2 dB	t	30% of 6t
						DSR 2 + 2 dB	DSR 2 + 8 dB	DSR 3 + 4 dB	DSR 4 + 4 dB	t/2	
4	2	DSR 2 - 7 dB	DSR 2 - 2 dB	DSR 3 - 4 dB	DSR 4 - 6 dB	DSR 2 - 3 dB	DSR 2 + 2 dB	DSR 3 - 2 dB	DSR 4 - 2 dB	t	30% of 6t
						DSR 2 + 3 dB	DSR 2 + 8 dB	DSR 3 + 4 dB	DSR 4 + 4 dB	t/2	
5	2	DSR 2 - 7 dB	DSR 2 ± 0 dB	DSR 3 - 2 dB	DSR 4 - 4 dB	DSR 2 - 2 dB	DSR 2 + 4 dB	DSR 3 dB	DSR 4 dB	t	40% of 6t
						DSR 2 + 4 dB	DSR 2 + 10 dB	DSR 3 + 6 dB	DSR 4 + 6 dB	t/2	

Fuente: (CAHIER DES CHARGES, 2014)

- (1) ØDSR (mm) corresponde al nivel de referencia (= diámetro equivalente del agujero de plano inferior)
- (2) t corresponde al límite superior de la profundidad a ser examinada; por ejemplo: t para profundidades “>100 - 150” = 150
- (3) Para componentes de espesores menores a 15 mm, t = espesor del componente.

### 3.5.5.9 *Elaboración del formato y reporte de ensayo por ultrasonido*

El reporte debe contener las especificaciones de calidad, la preparación de la superficie, parámetros con los que se llevó a cabo el ensayo, zonas examinadas, resultados, responsables, entre otros datos sugeridos por la norma que han sido tomados en cuenta para elaborar el reporte de inspección por ultrasonido adjunto en el Anexo W.

## 3.6 **Ensayos mecánicos para la calificación de los procedimientos de soldadura**

El total de ensayos mecánicos que deberán realizarse para la calificación de los procedimientos de soldadura se muestran en la Tabla 37.

Tabla 37. Ensayos mecánicos realizados

	# de ensayos por cupón	# total de ensayos
Tensión	2	12
Doblez	4	24

Fuente: Autores

### 3.6.1 *Ensayo de tensión*

- *Alcance.* – Determinar la resistencia a la tracción de la junta soldada bajo los procedimientos desarrollados.
- *Equipo.* – El ensayo se debe llevar a cabo cumpliendo con lo descrito en QW-150 del código ASME sección IX para probetas planas, el equipo empleado será una máquina universal de ensayos de 2 toneladas de capacidad, totalmente calibrada y certificada para asegurar la confiabilidad de los resultados, cuyos datos se muestran en la Tabla 38.

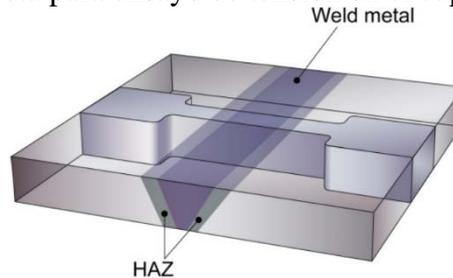
Tabla 38. Características de la máquina universal de ensayos

Equipo utilizado:	Máquina universal de ensayos -WAW600B
Marca:	JINAN LIANGONG TESTING TECHNOLOGY CO., LTD
Serie:	7136
Certificado:	LNM-F-2015-051

Fuente: Autores

- *Probeta de ensayo.* – Tomando en cuenta las especificaciones y dimensiones que fueron determinadas para las probetas de tensión, se obtendrán 2 muestras de cada uno de los cupones de soldadura como se observa en la Figura 76. Es de suma importancia un control dimensional especialmente en la sección reducida para evitar inconvenientes durante la ejecución del ensayo.

Figura 76. Probeta para ensayo de tensión en el cupón de soldadura



Fuente: (THE WELDING INSTITUTE, 2009)

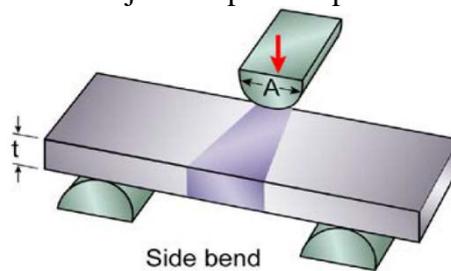
- *Montaje de la probeta.* – La sección reducida debe encontrarse completamente fuera de las mordazas y en esta se deberá colocar el deformímetro que permitirá adquirir datos para la elaboración de la gráfica esfuerzo deformación para cada probeta ensayada.
- *Ejecución del ensayo.* – Una vez montada la probeta se la somete a una fuerza de tensión continuamente creciente hasta provocar su fractura.
- *Criterios de aceptación.* – Según indica el código ASME sección IX, para que un espécimen de prueba califique satisfactoriamente el ensayo de tensión, la resistencia a la tracción no debe ser menor a la especificada para el metal base, la misma que para este material es de 110 ksi (760 MPa).

### 3.6.2 *Ensayo de dobléz*

- *Alcance.* – Se pondrá a prueba la ductilidad y homogeneidad de la junta soldada en base a lo especificado en el QW-161.1 del código ASME sección IX.
- *Equipo.* – Se empleará la máquina universal del laboratorio de resistencia de materiales de la ESPOCH y en base al QW- 466.1 se adoptarán las condiciones y dimensiones que debe cumplir el Jig que se describen en el Anexo X.

- *Probeta de ensayo.* – En base a las dimensiones que han sido especificadas se obtendrán 4 muestras por cada cupón de soldadura, realizando un control dimensional de cada una de ellas.
- *Montaje de la probeta.* – Colocar la probeta de una manera simétrica en relación con el mandril, asegurando que sus extremos se encuentren libres y apoyados sobre los rodillos, para que la sección transversal del cordón de soldadura se posicione frente al mandril, como se observa en la Figura 77.

Figura 77. Montaje de la probeta para doblez lateral



Fuente: (THE WELDING INSTITUTE, 2009)

- *Ejecución del ensayo.* – Una vez realizado el montaje de la probeta se aplica una carga sobre ella hasta producir un doblez de  $120^\circ$  a  $180^\circ$ , en caso de aparecer alguna grieta en el material se debe finalizar el ensayo y medir el ángulo de doblez alcanzado.
- *Criterios de aceptación.* – En el párrafo QW-163 del código establece que para aprobar satisfactoriamente el ensayo de doblez la soldadura y la zona afectada térmicamente deben estar dentro de la región que ha sido doblada y no presentar discontinuidades abiertas a la superficie mayores  $1/8$  in (3 mm) medidas en cualquier dirección del área convexa de la probeta ensayada. El formato para el reporte del ensayo de doblez lateral guiado se adjunta en el Anexo Y.

### 3.6.3 Preparación metalográfica

Las muestras para análisis metalográfico se obtendrán de los descartes realizados a los cupones de soldadura antes y después del PWHT, cuya preparación se llevará a cabo en base a la especificación “ASTM E3 Standar Practice for Preparation of Metallographic Specimens”, cuyo desarrollado se muestra a continuación.

- *Alcance.* - La metalografía es una técnica que con la ayuda de la microscopia óptica permite caracterizar la microestructura de un metal. Entre las características principales que pueden ser observadas se encuentran: las fases y la morfología, impurezas, porosidades, segregaciones, inclusiones no metálicas, precipitados, grietas, deformaciones, tamaño de grano, etc.

### 3.6.3.1 *Corte*

Se obtendrán muestras de aproximadamente una pulgada de sección, de tal manera que se encuentre contenida la totalidad del cordón de soldadura y un espesor que facilite su manipulación, para esto se empleará una máquina de corte en frío, Figura 78, que posee un sistema de refrigeración para evitar el calentamiento del material.

Figura 78. Máquina de corte en frío



Fuente: (STRUERS, 2016)

### 3.6.3.2 *Desbaste y pulido*

El desbaste de la superficie a analizar se debe realizar mediante discos abrasivos de diamante aglomerado en resina los mismo que son cambiados progresivamente hasta obtener una superficie totalmente regular. La numeración de los discos abrasivos está en función de la granulometría que poseen, empezando desde 80 hasta 1200.

La Figura 79 ilustra el procedimiento de desbaste, el que consiste en presionar la muestra contra el disco abrasivo giratorio hasta obtener todas las marcas en una sola dirección, una vez que se ha logrado se gira la muestra 90° y se repite el procedimiento, avanzando progresivamente entre los distintos discos. Se emplea agua como refrigerante para evitar el calentamiento de la muestra.

Figura 79. Procedimiento de desbaste



Fuente: Autores

A continuación, se debe llevar a cabo el pulido de la superficie con el uso de discos de paño de tela, algodón o satín, sobre los cuales se coloca pasta de diamante y óxido de alúmina con tamaños abrasivos desde 9 hasta 0,1  $\mu\text{m}$  hasta lograr una superficie totalmente libre de ralladuras con un acabado tipo espejo. El equipo mostrado en la Figura 80 es el empleado para estos procedimientos el cual posee una base rotatoria e imantada sobre los cuales se colocan los distintos discos.

Figura 80. Equipo de pulido y desbaste



Fuente: (STRUERS, 2016)

### 3.6.3.3 *Ataque químico*

Con la superficie totalmente limpia y seca se llevará a cabo el ataque químico que permitirá hacer visibles al microscopio las microestructuras presentes, por la existencia en la ZF de dos tipos de materiales de aporte se tiene que realizar un ataque distinto para cada uno de ellos, cuyos parámetros obtenidos de la especificación “*ASTM E407 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*” se muestran a continuación:

- *Ataque químico para aceros inoxidables martensíticos.* – Con el uso del reactivo Vilella’s se podrá revelar la microestructura del metal base y metal de aporte 410NiMo cuyas características se detallan en la Tabla 39:

Tabla 39. Ataque químico para acero inoxidable martensítico

Metal	Reactivo	Composición	Procedimiento
Fe + 12-30 Cr + <6Ni (serie 400)	Vilella´s	5ml HCL 1 g ácido Pírico 100 ml Ethanol (95%)	Usando un gotero dejar caer un par de gotas, esparcir por toda la superficie con un cotonete y dejar actuar por 30 segundos finalmente limpiar con agua y secar.

Fuente: Autores

- *Ataque electrolítico para acero inoxidable austeníticos.* – Para revelar la microestructura del metal de aporte austenítico 309LMo se debe hacer uso del ataque electrolítico bajo los parámetros indicados en la Tabla 40.

Tabla 40. Ataque electrolítico para acero inoxidable austenítico

Metal	Reactivo	Composición	Parámetros	
Fe + 15-30 Cr + 6-40Ni+5% otros elementos (serie 300)	Ataque Electrolítico	10 g ácido oxálico 100 ml agua	Voltaje:	12V
			Tiempo:	60 s.
			Flujo	15ml/s

Fuente: Autores

#### 3.6.3.4 Microscopía óptica

Con el uso del microscopio metalográfico invertido Olympus GX51 se analizará la microestructura de la muestra preparada; este equipo cuenta con una variedad de funciones como la adquisición de imágenes en tiempo real hacia un ordenador, múltiples objetivos oculares que van desde 5x hasta 100x, filtros de polarización, visualización de campo claro y oscuro para marcar el relieve de la microestructura cuando se requiera, alta calidad y nitidez en la visualización de imágenes. El formato para el reporte del ensayo de metalografía se adjunta en el Anexo Z.

#### 3.6.4 Ensayo de dureza

Se llevará a cabo ensayos de dureza Brinell bajo la especificación ASTM E10, sobre las muestras antes y después del PWHT con la finalidad de comprobar la homogeneidad del material y verificar el efecto del tratamiento térmico en la ZAT y ZF, otorgando a la soldadura y al material base las características descritas en el capítulo anterior.

- *Preparación de la superficie.* – Las superficies de la muestra deben ser totalmente paralelas y pulidas de ser posible para garantizar los resultados del ensayo.
- *Equipo.* – Se empleará un durómetro portátil bajo las características mostradas en la Tabla 41.

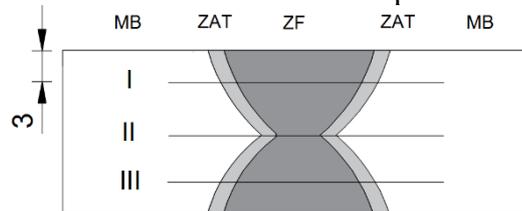
Tabla 41. Características del equipo para dureza Brinell

Dureza	Equipo	Marca	Registro
Brinell HBW	Durómetro Portátil	EMCOTEST	FM 1101/80 Sonder
Identador	Precarga	Carga	Tiempo
Bola de Tungsteno Diámetro 2,5 mm	10 kgf	187,5 kgf	10 s

Fuente: Autores

- *Procedimiento.* – Sobre las tres líneas mostradas en la Figura 81 se realizarán dos identaciones en cada zona a lo largo de todo el cordón de soldadura.

Figura 81. Distribución de las identaciones para el ensayo de dureza



Fuente: Autores

A continuación, con la ayuda del microscopio óptico se deberá medir el diámetro de las identaciones y el valor obtenido debe ser reemplazado en la ecuación 10 mostrada a continuación, para finalmente obtener el valor de dureza Brinell.

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2} \left( \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}} \right) \quad (10)$$

P: Carga aplicada, kg

d: Diámetro de la huella indentada, mm

D: Diámetro del identador, mm

Para el registro de resultados y parámetros de desarrollo se elaboró el formato para el reporte del ensayo de dureza presentado en el Anexo AA.

### 3.6.5 Ensayo de microdureza

Bajo las especificaciones de “ASTM E384 Standard Test Method for Microhardnes of Materials” se llevará a cabo el ensayo de microdureza Vickers sobre las muestras antes y después del PWHT, con la finalidad de cuantificar como varía la dureza en las transiciones entre las zonas de metal base, ZAT y ZF.

- *Preparación de la superficie.* – Las superficies de la muestra deben ser totalmente paralelas y pulidas de ser posible, para garantizar los resultados del ensayo.
- *Equipo.* – En la Figura 82 se muestra el microdurómetro usado bajo las especificaciones mostradas en la Tabla 42.

Figura 82. Equipo de microdureza



Fuente: (STRUERS, 2016)

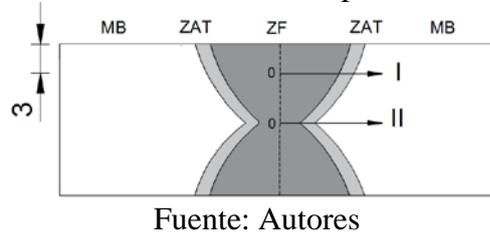
Tabla 42. Parámetros para ensayo de microdureza Vickers

Microdureza	Equipo	Marca	Registro
Vickers	Microdurómetro	EMCOTEST	ES 384896
Identador	Precarga	Carga	Tiempo
Pirámide de diamante 136°	0,05 kgf	0,3 kgf	10 s

Fuente: Autores

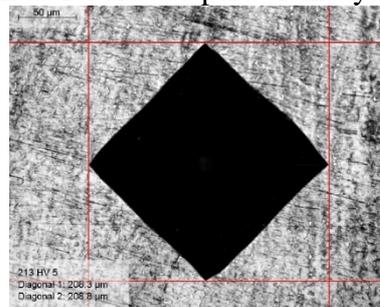
- *Procedimiento.* – Como se indica en la Figura 83 a lo largo de las líneas 1 y 2, para la ZF se realizaron identaciones cada 500  $\mu\text{m}$  mientras que en el ZAT cada 200  $\mu\text{m}$ .

Figura 83. Distribución de las identaciones para el ensayo de microdureza



Ya que el equipo es totalmente automatizado, tiene la capacidad de autoenfoco y medición automática de la huella indentada dando resultados de microdureza como se muestra en la Figura 84.

Figura 84. Visualización de resultados para el ensayo de microdureza Vickers



Para el registro de resultados y condiciones de ejecución se elaboró el formato para el reporte del ensayo de microdureza presentado en el Anexo AB.

### 3.7 Conclusiones Parciales

- Con la realización del ensayo de espectrometría sobre el álabe móvil se comprobó que efectivamente su material de fabricación es el acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM ya que su composición química se encuentra dentro de lo establecido en la norma y las especificaciones del fabricante.
- Se desarrollarán tres procedimientos combinados de soldadura para unión mediante junta tipo V doble, con los cuales se obtendrán dos cupones de soldadura para cada uno de ellos de las siguientes dimensiones ancho 173 mm, largo 240 mm, espesor 19

mm, a estos se les aplicará un PWHT de calentamiento hasta  $610\pm 10^{\circ}\text{C}$  con mantenimiento de 1 hora y posterior enfriamiento a temperatura ambiente y aire calmado.

- Para garantizar la calidad de la soldadura se realizará ensayos no destructivos mediante inspección visual, tintas penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido bajo los criterios de aceptación de la especificación CCH 70-4.
- Mediante corte en frío de cada cupón de soldadura se obtendrán 2 probetas para ensayo de tensión y 4 para ensayo de doblez lateral, las mismas que serán evaluadas de acuerdo a los criterios de aceptación del código ASME sección IX que establece que para las probetas de tensión la resistencia a la tracción debe ser superior a la especificada para el material base y después de ser ensayadas las probetas de doblez no debe existir discontinuidades abiertas a la superficie mayores  $1/8$  in (3mm).
- En los descartes obtenidos de los cupones de soldadura se llevará a cabo la preparación metalográfica bajo la norma ASTM E3 para el análisis microestructural de la soldadura, realizando un ataque químico por medio del reactivo Vilella's para el metal de aporte martensítico y ataque electrolítico para el metal de aporte austenítico, además se realizará ensayo de dureza Brinell y microdureza Vickers sobre el metal base, zona afectada térmicamente y zona fundida en probetas antes y después del tratamiento térmico.

## CAPÍTULO IV

### 4. FUENTES DE DATOS, ESTUDIO DE HIPÓTESIS Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Los objetivos principales sobre los cuales se centra este capítulo contemplan la ejecución de los ensayos y procedimientos definidos acorde a la metodología del capítulo anterior, lo cual permita la posterior cuantificación y evaluación de los mismos. Para la ejecución de los ensayos, estos se fundamentaron en los métodos de análisis-síntesis y experimentación, con la finalidad de lograr un desarrollo integral de calidad, fundamentado en el componente teórico, pero también bajo las consideraciones adquiridas mediante el conocimiento empírico, generando la praxis esencial del proyecto de investigación presentado.

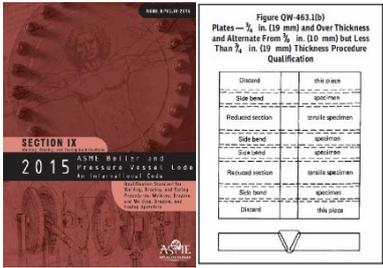
#### 4.1 Mecanización y obtención de cupones de soldadura

La obtención de los cupones de soldadura fue realizada mediante mecanizado por arranque de viruta empleando inicialmente máquinas herramientas de control manual y posteriormente un centro de mecanizado CNC para la geometría de la junta del cupón. Las dimensiones de los cupones de soldadura se obtuvieron mediante los requerimientos establecidos en el código ASME sección IX, dichas dimensiones se pueden observar en el apartado 3.3.4.

##### 4.1.1 *Procedimiento de mecanización*

Para la realización de la mecanización como primer paso se procedió a extraer bloques del material, proveniente del álabe proporcionado por Hidroagoyán, mediante mecanizado con torno horizontal de control manual, para luego proceder a ser seccionados con una cortadora de sierra de cinta y finalmente, para obtener sus dimensiones definitivas, acabado superficial y la geometría de la junta, fue realizado en un centro de mecanizado CNC de cuatro ejes, dentro de los talleres de mantenimiento de la central hidroeléctrica Agoyán y CIRT respectivamente. El procedimiento empleado durante el proceso de mecanización se indica con detalle en la Tabla 43.

Tabla 43. Procedimiento de mecanizado para la obtención de los cupones para soldadura

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de las dimensiones en el plano de especificación para la mecanización.	-Procedimiento CIRT-SD-MK-17	10 min	
2	Montaje del álabe directriz en la máquina cortadora de sierra de cinta. Seccionamiento del eje. Corte refrigerado con taladrina.	-Álabe directriz -Cortadora de sierra de cinta -Señalador -EPP	600 min	
3	Limpieza de recubrimientos cerámicos del álabe directriz.	-Álabe directriz -Amoladora -Disco de desbaste	120 min	
4	Montaje de la bandera en el torno horizontal de control manual. Torneado de las caras superior e inferior. Desprendimiento de la camisa del eje.	-Álabe directriz -Torno horizontal de control manual -Insertos para mecanizado de acero inox. -EPP	600 min	
5	Montaje de la bandera en la máquina cortadora de sierra de cinta. Seccionamiento de la bandera del álabe directriz. Corte refrigerado con taladrina de bloques rectangulares.	-Álabe directriz -Cortadora de sierra de cinta -Señalador -EPP	1800 min	

Fuente: Autores

Tabla 43. (Continuación) Procedimiento de mecanizado para la obtención de los cupones para soldadura

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
6	Mecanizado de geometría exterior (sin junta) de los bloques rectangulares mediante fresadora de control numérico.	-Bloques rectangulares de MSS -Fresadora de control numérico -EPP	1200 min	
7	Mecanizado de geometría final de la junta de cupones para soldadura mediante centro de mecanizado de 4 ejes.	-Bloques rectangulares de MSS -Centro de mecanizado de 4 ejes -EPP	30 min	
8	Limpieza de los cupones para soldadura. Revisión dimensional de los cupones para soldadura.	-Limpiador líquido -Paños o liencillo que no desprenda pelusas -Cepillo de acero o lima -Calibrador -Flexómetro -EPP	15 - 20 min	

Fuente: Autores

#### 4.1.2 Resultados

Después de la finalización del proceso de mecanizado descrito en la parte superior, se obtuvieron *seis* cupones de soldadura (divididos en doce placas), para la posterior realización de los *tres* procedimientos de soldadura desarrollados para la presente investigación (dos cupones de soldadura para cada procedimiento). Los cupones no presentaron ningún inconveniente después de haberse realizado el control dimensional y geométrico, encontrándose todos los parámetros dentro de las tolerancias requeridas en el WPS, por lo cual ningún reproceso fue requerido. La Figura 85 indica los cupones de soldadura obtenidos.

Figura 85. Cupones de soldadura obtenidos



Fuente: Autores

## 4.2 Ensayos de soldadura y experimentación

La experimentación de los procedimientos de soldadura fue realizada en primer lugar en placas de prueba de acero AISI 410, obtenidas del anillo de desgaste (facing plate) de una turbina Francis en estado para recuperación del CIRT. Este material fue utilizado debido a la similitud química y microestructural con el acero ASTM A743 CA-6NM, ya que comparten el mismo número P; esto también fue necesario ya que no se disponía de material suficiente para la extracción de más placas del álabe directriz por temas de logística. Después de afinar los parámetros eléctricos mediante la continua experimentación, se modificaron ligeramente para la conformación de los WPS a ser usados en los cupones de soldadura para ser calificados.

### 4.2.1 Soldadura de prueba en acero AISI 410

El procedimiento de obtención de los cupones de prueba fue muy similar al descrito en la Tabla 43, con la excepción de la fuente del material, en este caso el anillo de desgaste. Los cupones mencionados se muestran en la Figura 86.

Figura 86. Cupones de prueba para soldadura



Fuente: Autores

#### 4.2.1.1 Resultados

Los tres procedimientos descritos en cada WPS fueron aplicados en distintos cupones de prueba, para validar los parámetros físicos encontrados de manera teórica en estudios similares y las recomendaciones brindadas en las especificaciones del fabricante. Además de ser un punto de partida para la calibración de las máquinas soldadoras y el operador encargado de realizar la soldadura manual. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 44, Tabla 45 y Tabla 46 para los procedimientos 1, 2 y 3 correspondientemente. Para el cálculo del flujo de calor fueron tomados los valores de 0.4 para GTAW, 0.7 para GMAW y 0.8 para SMAW como eficiencias de los procesos de soldadura.

Tabla 44. Resultados del ensayo de soldadura del procedimiento 1 en cupón de prueba

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER410NiMo	20-24	135-140	75	0,864-1,075
2: Caliente	GTAW	ER410NiMo	20-24	155-160	96	0,775-0,960
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	20-24	135-140	200	0,648-0,806
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	20-24	135-140	184,6	0,702-0,874
5: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	20-24	135-140	200	0,648-0,806
6: Capa	SMAW	E410NiMo-15	20-24	135-140	120	1,080-1,344
7: Respaldo	SMAW	E410NiMo-15	20-24	135-140	164,4	0,788-0,981

Fuente: Autores

Tabla 45. Resultados del ensayo de soldadura del procedimiento 2 en cupón de prueba

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER309LMo	21-24	190-195	169,0	0,567-0,665
2: Caliente	GTAW	ER309LMo	21-24	190-195	144,6	0,662-0,777
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	26-28	114-117	181,8	0,782-0,865
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	26-28	114-117	130,4	1,091-1,206
5: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	26-28	114-117	134,8	1,055-1,166
6: Capa	SMAW	E410NiMo-15	26-28	114-117	190,5	0,747-0,826

Fuente: Autores

Tabla 46. Resultados del ensayo de soldadura del procedimiento 3 en cupón de prueba

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER309LMo	10,5-11,5	127-131	101,7	0,315-0,356
2: Caliente	GTAW	ER309LMo	10,6-12	165-167	80,0	0,525-0,601
3: Relleno	GMAW	ER410NiMo	24-27	275-300	363,6	0,762-0,936
4: Relleno	GMAW	ER410NiMo	24-27	250-280	352,9	0,714-0,900
5: Relleno	GMAW	ER410NiMo	24-27	250-280	324,3	0,777-0,979
6: Respaldo	GMAW	ER410NiMo	22-25	260-280	375,0	0,641-0,784
7: Extra	GMAW	ER410NiMo	24-27	260-280	400,0	0,655-0,794
8: Extra	GMAW	ER410NiMo	26-29	300-320	521,7	0,628-0,747
9: Extra	GMAW	ER410NiMo	26-29	300-330	521,7	0,628-0,770

Fuente: Autores

#### 4.2.2 Soldadura definitiva en cupones de ASTM A743 CA-6NM

Previo a la realización del proceso de soldadura, fueron determinadas las características aproximadas que podrían encontrarse en los cupones, como la distribución de calor, lo cual permitió obtener una longitud aproximada de la ZAT, y las fases microestructurales presentes debido a la composición del pozo de soldadura. Posteriormente se procedió a realizar los tres procedimientos de soldadura descritos en los WPS y evaluar las características encontradas en los mismos.

##### 4.2.2.1 Estimaciones de las propiedades del pozo de soldadura

Dentro de las propiedades que pueden estimarse mediante aproximaciones numéricas se presentan la soldabilidad, distribución de calor y composición del pozo de soldadura.

##### – Soldabilidad

La soldabilidad obtenida para el acero ASTM A743 CA-6NM mediante la ecuación 2 (pág. 33), presentó los siguientes resultados de carbono equivalente basado en la composición química obtenida del ensayo de espectrometría (ver Anexo A).

$$CE_{IIW} = 2.92$$

Este valor comprueba la dificultad de la realización de los procesos de soldadura, por lo cual se vuelve necesario la aplicación del precalentamiento y el PWHT para garantizar la calidad del resultado. De la misma manera se estimó el valor del inicio y final de transformación de la martensita empleando la ecuación 1 (pág. 22).

$$M_s = 215^{\circ}C$$

$$M_f \approx 115^{\circ}C$$

– Distribución de calor

En la aproximación de la distribución de calor en los cupones de soldadura, se emplearon los valores máximos de energía aportada de cada uno de los tres procesos practicados (SMAW-GMAW-GTAW), con la finalidad de obtener las posibles máximas longitudes de la ZAT para cada proceso. Sin embargo, debe aclararse que esta aproximación de cálculo, derivada de las ecuaciones de Rosenthal obedece a las consideraciones indicadas en el apartado 2.5.1.3, siendo la más importante que no se consideran múltiples pases en los modelos matemáticos, por lo cual los resultados obtenidos pueden diferir en proporciones considerables con respecto a los obtenidos experimentalmente; a pesar de esto, siguen siendo un buen referente durante el proceso anterior a la ejecución de la soldadura, como indicativo de la calidad de los parámetros de las variables esenciales. En la Tabla 52 se muestran los valores de las variables empleadas para el cálculo de la distribución de calor.

Tabla 47. Variables empleadas para el cálculo de la distribución de calor

Material	Proceso	Variable	Valor	Unidades
x		Densidad ( $\rho$ )	7695	kg/m <sup>3</sup>
x		Calor específico ( $c_p$ )	460	J/kgK
x		Conductividad térmica (K)	25	J/smK
x		Difusividad térmica ( $\alpha$ )	0.00000706	m <sup>2</sup> /s
x		Espesor de la placa (d)	0.019	m
	SMAW	Energía aportada (q)	2668	J/s
	SMAW	Velocidad de avance (v)	0.003226	m/s
	SMAW	Eficiencia ( $\eta$ )	0.8	
	GMAW	Energía aportada (q)	4732	J/s
	GMAW	Velocidad de avance (v)	0.005263	m/s
	GMAW	Eficiencia ( $\eta$ )	0.7	

Fuente: Autores

Tabla 47. (Continuación) Variables empleadas para el cálculo de la distribución de calor

Material	Proceso	Variable	Valor	Unidades
	GTAW	Energía aportada (q)	1075.2	J/s
	GTAW	Velocidad de avance (v)	0.001613	m/s
	GTAW	Eficiencia ( $\eta$ )	0.4	
	Todos	Temperatura inicial ( $T_i$ )	393	K

Fuente: Autores

Mediante la ecuación 7 (pág. 35) y empleando los valores de la tabla anterior, se obtuvieron los valores de espesor crítico para determinar bajo cual criterio se debe calcular la distribución de calor; estos valores de espesor crítico ( $d'$ ) para cada proceso se muestran en la Tabla 48.

Tabla 48. Valores de criterio de cálculo para la distribución de calor

	Espesor crítico (m)	Criterio a emplear	Tipo de flujo
SMAW	0,0219	Placa delgada	Bidimensional
GMAW	0,0228	Placa delgada	Bidimensional
GTAW	0,0197	Placa delgada	Bidimensional

Fuente: Autores

De acuerdo al diagrama de equilibrio de la Figura 24, las temperaturas a las cuales se producen las transformaciones de fase se resumen en la Tabla 49, esos valores de temperatura fueron empleados como temperatura pico ( $T_p$ ) en la ecuación 11, para estimar la posición de dichos picos de temperatura en los cupones, medidos desde el eje de soldadura como centro de referencia, los resultados se muestran en la lo cual permite conocer el inicio del límite de la ZF y ZAT, de igual manera el límite entre la ZAT y MB; dando como resultado la estimación del ancho de la ZAT.

Tabla 49. Temperaturas de transformación de fase de ASTM A743 CA-6NM

Fase	Temperatura (K)	Zona
Solidus	1773	ZF
Líquidus	1748	ZF - ZAT
delta + gamma (i)	1547	ZAT
gamma (i)	1473	ZAT
gamma (f)	1000	ZAT - MB
alfa + gamma (f)	873	MB

Fuente: Autores

$$r = \left(\frac{2}{\pi \cdot e}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{q/v}{2 \cdot d \cdot \rho \cdot c_p (T_p - T_o)} \quad (11)$$

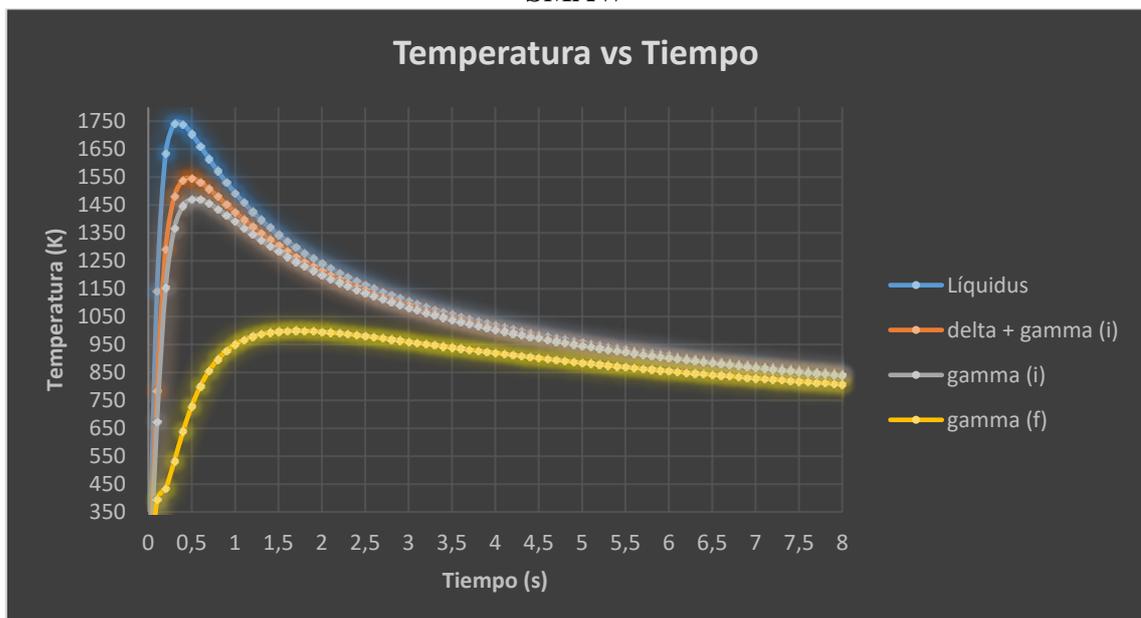
Tabla 50. Posición de los picos de temperatura en los cupones para cada proceso

Proceso	Fase	Distancia (mm)	Tiempo (s)
SMAW	Líquidus	2.196	0.3
SMAW	delta + gamma (i)	2.578	0.5
SMAW	gamma (i)	2.755	0.5
SMAW	gamma (f)	4.902	1.7
SMAW	alfa + gamma (f)	6.200	2.7
GMAW	Líquidus	2.387	0.4
GMAW	delta + gamma (i)	2.803	0.6
GMAW	gamma (i)	2.995	0.6
GMAW	gamma (f)	5.329	2
GMAW	alfa + gamma (f)	6.739	3.2
GTAW	Líquidus	1.770	0.2
GTAW	delta + gamma (i)	2.078	0.3
GTAW	gamma (i)	2.221	0.4
GTAW	gamma (f)	3.951	1.1
GTAW	alfa + gamma (f)	4.996	2.4

Fuente: Autores

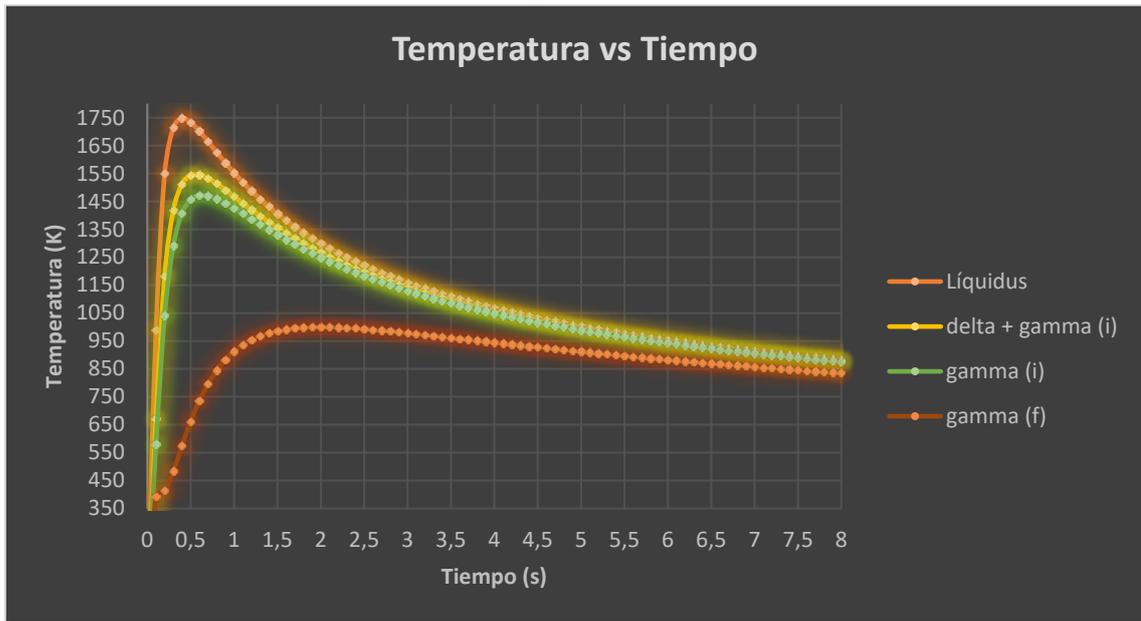
La distribución de temperaturas en función del tiempo fueron calculadas mediante un método iterativo empleando la ecuación 4 (pág. 34) del criterio de flujo bidimensional, para las principales transformaciones de fase producidas en las correspondientes distancias listadas en la tabla anterior, las curvas resultantes se muestran en la Figura 87, Figura 88 y Figura 89 para los procesos SMAW, GMAW y GTAW correspondientemente.

Figura 87. Curvas de distribución de temperaturas en función del tiempo para el proceso SMAW



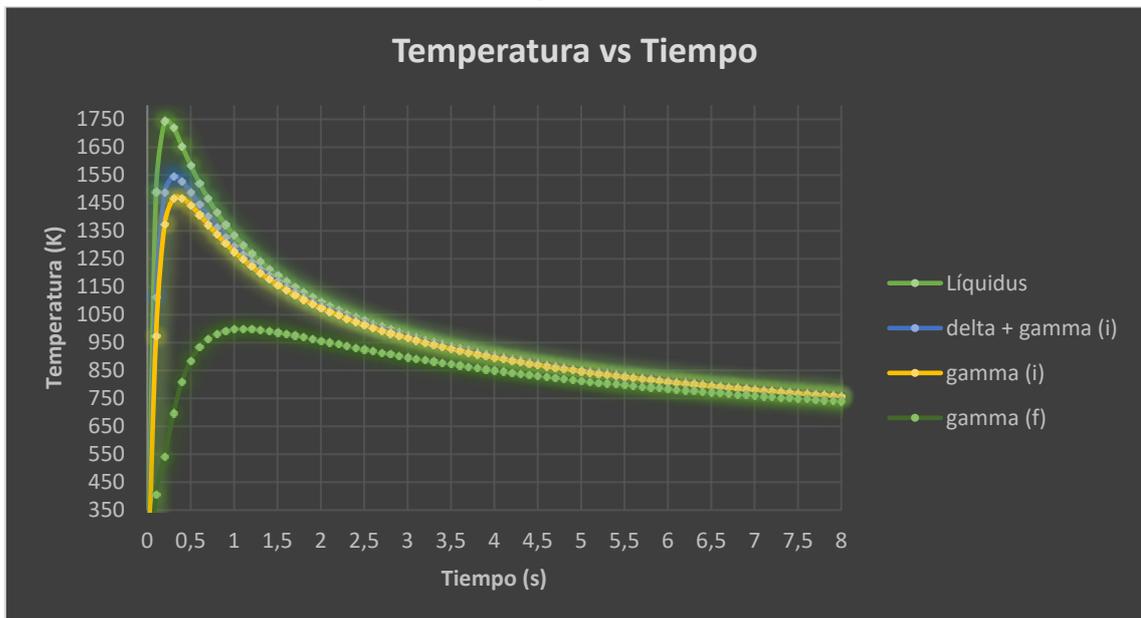
Fuente: Autores

Figura 88. Curvas de distribución de temperaturas en función del tiempo para el proceso GMAW



Fuente: Autores

Figura 89. Curvas de distribución de temperaturas en función del tiempo para el proceso GTAW



Fuente: Autores

Como puede notarse, las curvas poseen similitud entre ellas, pero las pendientes de las mismas no son idénticas, esto puede notarse por el tiempo que tarda cada proceso en alcanzar las temperaturas pico, lo cual posteriormente influirá en la velocidad de enfriamiento y los posibles cambios microestructurales que se produzcan. Las diferencias entre los tres procesos empleados son pequeñas, la Tabla 51 indica los posibles anchos

de la ZAT para cada proceso empleado. Debe notarse que debido a la cantidad de aporte de calor y baja eficiencia energética del proceso GTAW, es el que produce el menor ancho de ZAT; pero ya que los pases subsecuentes se realizaron con otros procesos de mayor cantidad de energía, el ancho dominante de la ZAT estará dado por esos otros procesos. Otro punto a ser considerado es la zona donde se unen dos procesos distintos, ya que el análisis se realizó para procesos independientes, por lo tanto, existirá una variación del ancho real en comparación con el obtenido mediante el modelo matemático en esta zona de transición de un proceso con el siguiente, debido a las limitaciones del modelo empleado.

Tabla 51. Cálculo del ancho de la ZAT para cada proceso

Proceso	Ancho de ZAT (mm)
SMAW	2,706
GMAW	2,942
GTAW	2,181

Fuente: Autores

Finalmente, por lo ya mencionado, se estima que el ancho de la ZAT del proceso SMAW será similar al encontrado después de realizar el proceso de soldadura del WPS 1 y 2; mientras que, el ancho de la ZAT del proceso GMAW corresponderá al del WPS 3, tomando en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente.

#### – Composición del pozo de soldadura

La composición estimada de las fases presentes del pozo de soldadura se obtuvo mediante el diagrama de Schaeffler de la Figura 90, empleando los valores de la Tabla 52 para ubicar los distintos puntos de acuerdo a la composición química de los materiales empleados durante la soldadura, los valores de  $Cr_{eq}$  y  $Ni_{eq}$  se obtuvieron de acuerdo a las ecuaciones 8 y 9 respectivamente (pág. 37). Esta estimación de la microestructura es realizada sin tomar en cuenta los parámetros energéticos.

Tabla 52. Coordenadas empleadas en el diagrama de Schaeffler

	Metal Base	E410NiMo-15	ER410NiMo (GMAW)	ER410NiMo (GTAW)	ER309LMo
$Cr_{eq}$	13,41	12,95	13,48	13,48	24,93
$Ni_{eq}$	5,43	5,7	5,15	5,05	15,7

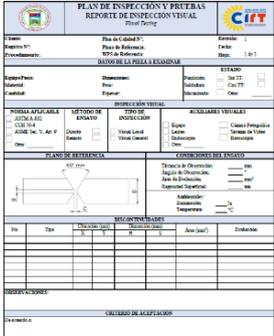
Fuente: Autores



#### 4.2.2.2 Procedimiento de soldadura

El procedimiento de soldadura empleado consiste principalmente en tres etapas; la primera que consiste en todas las adecuaciones necesarias previas al inicio de la soldadura, la posterior realización del procedimiento y finalmente la revisión o control de calidad del resultado. Este control y aseguramiento de la calidad debe llevarse también a cabo dentro de las etapas anteriores para garantizar los resultados finales. En la Tabla 54 se muestra el procedimiento empleado para los tres WPS desarrollados.

Tabla 54. Procedimiento de soldadura en cupones de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Especificación del procedimiento de soldadura.	-Procedimiento CIRT/16-WPS-001 -Registro del ensayo digital o impreso	10 min	
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura, humedad y velocidad del viento adecuada, luminosidad mínima).	-Termohigrómetro -Anemómetro -Luxómetro	5 min	
3	Limpieza superficial del componente y zonas a inspeccionar (remoción de grasa, arena, moho, polvo, etc; desigualdades o irregularidades).	-Limpiador líquido -Paños o liencillos que no desprendan hilos o pelusas -Cepillo de acero o amoladora	2 - 15 min	

Fuente: Autores

Tabla 54. (Continuación) Procedimiento de soldadura en cupones de ASTM A743 CA-6NM.

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
4	Revisión, comprobación y calibración de la(s) máquina(s) soldadora(s) y sus componentes.	-Máquina(s) soldadora(s) -Cronómetro -Multímetro o pinza amperimétrica	5 - 20 min	
5	Revisión de la temperatura del material de aporte en el horno y colocación en termo portátil.	-Horno de calentamiento para electrodos -Material de aporte -Pirómetro -EPP	5 - 10 min	
6	Comprobación geométrica y dimensional de la junta de soldadura.	-Galga Bridge-Cam -Galga Hi-Lo -Transportador o goniómetro -Flexómetro o calibrador	2 - 5 min	
7	Medición de alineamiento entre las placas u objetos a soldar.	-Galga Hi-Lo	1 - 3 min	
8	Colocación de soportes y puntos de soldadura a los cupones para fijación.	-Cupones para soldadura -Máquina soldadora -Material de soporte -EPP	5 - 15 min	
9	Pre calentamiento de los cupones hasta la temperatura especificada en el WPS.	-Antorcha de gas -Cupones para soldadura -Pirómetro -EPP	10 - 20 min	

Fuente: Autores

Tabla 54. (Continuación) Procedimiento de soldadura en cupones de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
10	Inicio del proceso de soldadura, con los parámetros de acuerdo a CIRT/16-WPS-001. Pase de raíz con proceso GTAW ER410NiMo. Medición de temperatura entre pases.	-Cupones para soldadura -Máquina soldadora -Material de soporte -Pirómetro o marcador térmico -EPP	5 - 10 min	
11	Pase caliente posterior a la raíz con proceso GTAW ER410NiMo. Medición de temperatura entre pases.	-Cupones para soldadura -Máquina soldadora -Material de soporte -Pirómetro o marcador térmico -EPP	5 - 10 min	
12	Pases de relleno para alcanzar el espesor de la junta con proceso SMAW E410NiMo-15. Medición de temperatura entre pases.	-Cupones para soldadura -Máquina soldadora -Material de soporte -Pirómetro o marcador térmico -EPP	15 - 25 min	
13	Pase final o capa superficial con proceso SMAW E410NiMo-15. Medición de temperatura entre pases.	-Cupones para soldadura -Máquina soldadora -Material de soporte -Pirómetro o marcador térmico -EPP	5 - 10 min	
14	Medición de los espesores de los cordones de soldadura, sobremontas, concavidades o convexidades de la soldadura.	-Galga de profundidad digital	1 - 3 min	

Fuente: Autores

Tabla 54. (Continuación) Procedimiento de soldadura en cupones de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
15	Realización del ensayo de inspección visual. Medición y evaluación de las discontinuidades presentes.	-Guantes de latex -EPP -Instrumentos de ampliación -Boroscopio -Instrumentos de medición -Hoja de registro de VT	3 - 5 min/zona	
16	Realización del registro fotográfico de las zonas inspeccionadas.	-Cámara digital -Lámpara o linterna de ser necesario	2 - 5 min	
17	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo VT.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico	15 - 30 min	

Fuente: Autores

#### 4.2.2.3 Resultados

Las variables medidas en los ensayos de soldadura de los cupones de acero ASTM A743 CA-6NM se muestran cuantificados en las tablas siguientes, indicándose dos tablas por cada cupón de soldadura, la primera muestra las variables la parte superior del cupón, mientras que la segunda las variables de la parte inferior. De esta manera se cuenta con cuatro tablas por cada procedimiento de soldadura desarrollado.

Tabla 55. Variables del procedimiento 1 en el lado superior del cupón 1

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER410NiMo	12-13	114-122	104,3	0,315-0,365
2: Caliente	GTAW	ER410NiMo	13-14	165-167	113,2	0,455-0,496

Fuente: Autores

Tabla 55. (Continuación) Variables del procedimiento 1 en el lado superior del cupón 1

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-26	115-117	218,2	0,607-0,669
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-27	115-117	218,2	0,607-0,695
5: Capa	SMAW	E410NiMo-15	25-28	115-117	214,3	0,644-0,734
6: Capa	SMAW	E410NiMo-15	25-29	115-117	218,2	0,633-0,746

Fuente: Autores

Tabla 56. Variables del procedimiento 1 en el lado inferior del cupón 1

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Caliente	GTAW	ER410NiMo	12-14	165-171	114,3	0,416-0,503
2: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	23-28	115-118	206,9	0,614-0,767
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-28	115-117	196,7	0,673-0,799
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	25-28	115-117	206,9	0,667-0,760
5: Capa	SMAW	E410NiMo-15	24-30	115-117	206,9	0,640-0,814
6: Capa	SMAW	E410NiMo-15	25-28	115-117	200,0	0,690-0,786

Fuente: Autores

Tabla 57. Variables del procedimiento 1 en el lado superior del cupón 2

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER410NiMo	11,5-12,5	130-135	96,0	0,374-0,422
2: Caliente	GTAW	ER410NiMo	12-13,5	160-165	102,6	0,449-0,521
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	23-27	115-117	218,2	0,582-0,695
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	25-28	115-117	214,3	0,644-0,734
5: Capa	SMAW	E410NiMo-15	25-28	115-117	222,2	0,621-0,708
6: Capa	SMAW	E410NiMo-15	25-30	115-117	210,5	0,656-0,800

Fuente: Autores

Tabla 58. Variables del procedimiento 1 en el lado inferior del cupón 2

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER410NiMo	12-13	130-140	78,9	0,474-0,553
2: Caliente	GTAW	ER410NiMo	13-14	165-170	99,2	0,516-0,576
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	22-26	115-117	196,7	0,617-0,742
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	22-26	115-117	214,3	0,567-0,681
5: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	22-26	115-117	214,3	0,567-0,681
6: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-28	115-117	222,2	0,596-0,708
7: Capa	SMAW	E410NiMo-15	24-28	115-117	342,9	0,386-0,459

Fuente: Autores

Tabla 59. Variables del procedimiento 2 en el lado superior del cupón 3

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER309LMo	11-13	135-136	96,0	0,371-0,442
2: Caliente	GTAW	ER309LMo	12-14	171-174	98,4	0,501-0,594
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-28	115-117	214,3	0,618-0,734
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-29	115-117	206,9	0,640-0,787
5: Capa	SMAW	E410NiMo-15	23-28	112-117	200,0	0,618-0,786
6: Capa	SMAW	E410NiMo-15	24-28	116-117	218,2	0,612-0,721

Fuente: Autores

Tabla 60. Variables del procedimiento 2 en el lado inferior del cupón 3

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Caliente	GTAW	ER309LMo	12-14	190-192	96,8	0,565-0,667
2: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-28	111-113	193,5	0,661-0,785
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-28	111-113	196,7	0,650-0,772
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	23-27	111-113	193,5	0,633-0,757
5: Capa	SMAW	E410NiMo-15	24-28	111-113	196,7	0,650-0,772
6: Capa	SMAW	E410NiMo-15	23-28	111-113	196,7	0,623-0,772

Fuente: Autores

Tabla 61. Variables del procedimiento 2 en el lado superior del cupón 4

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER309LMo	12-13	135-155	88,9	0,437-0,544
2: Caliente	GTAW	ER309LMo	13,5-15	185-190	104,3	0,574-0,656
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	25-27	110-115	210,5	0,627-0,708
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	26-29	110-115	193,5	0,709-0,827
5: Capa	SMAW	E410NiMo-15	25-28	110-115	200,0	0,660-0,773
6: Capa	SMAW	E410NiMo-15	25-28	115-120	210,5	0,656-0,766

Fuente: Autores

Tabla 62. Variables del procedimiento 2 en el lado inferior del cupón 4

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Caliente	GTAW	ER309LMo	12-14	195-200	150,0	0,374-0,448
2: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-28	110-115	196,7	0,644-0,786
3: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	24-28	110-115	193,5	0,655-0,799
4: Relleno	SMAW	E410NiMo-15	27-30	110-115	218,2	0,653-0,759
5: Capa	SMAW	E410NiMo-15	25-29	115-120	210,5	0,656-0,793
6: Capa	SMAW	E410NiMo-15	26-30	115-120	218,2	0,658-0,792

Fuente: Autores

Tabla 63. Variables del procedimiento 3 en el lado superior del cupón 5

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER309LMo	11-12	135-140	104,3	0,342-0,386
2: Caliente	GTAW	ER309LMo	12,5-14,5	185-190	116,5	0,476-0,568
3: Relleno	GMAW	ER410NiMo	24-25	200-225	324,3	0,622-0,728
4: Capa	GMAW	ER410NiMo	23-24	190-205	375,0	0,489-0,551
5: Capa	GMAW	ER410NiMo	23-24	175-190	292,7	0,578-0,654

Fuente: Autores

Tabla 64. Variables del procedimiento 3 en el lado inferior del cupón 5

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
---------	---------	--------------------	---------	----------	------------------------------	------------------------

Fuente: Autores

Tabla 64. (Continuación) Variables del procedimiento 3 en el lado inferior del cupón 5

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Caliente	GTAW	ER309LMo	12,5-14,5	185-190	100,0	0,555-0,661
2: Relleno	GMAW	ER410NiMo	24-26	240-260	315,8	0,766-0,899
3: Capa	GMAW	ER410NiMo	22,5-23,5	170-190	342,9	0,469-0,547
4: Capa	GMAW	ER410NiMo	22,5-23,5	170-190	285,7	0,562-0,656

Fuente: Autores

Tabla 65. Variables del procedimiento 3 en el lado superior del cupón 6

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Raíz	GTAW	ER309LMo	11-14	138-40	90,9	0,401-0,517
2: Caliente	GTAW	ER309LMo	12-14	198-200	113,2	0,504-0,594
3: Relleno	GMAW	ER410NiMo	22-25	180-200	240,0	0,693-0,875
4: Capa	GMAW	ER410NiMo	22-25	160-180	413,8	0,357-0,457
5: Capa	GMAW	ER410NiMo	22-25	165-190	292,7	0,521-0,682

Fuente: Autores

Tabla 66. Variables del procedimiento 3 en el lado inferior del cupón 6

Pase N°	Proceso	Material de aporte	Voltaje	Amperaje	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo de calor (KJ/mm)
1: Caliente	GTAW	ER309LMo	13-15	200-203	122,4	0,510-0,597
2: Caliente	GTAW	ER309LMo	13-15	196-205	116,5	0,525-0,633
3: Relleno	GMAW	ER410NiMo	24-26	190-205	250,0	0,766-0,895
4: Capa	GMAW	ER410NiMo	23-25	175-190	342,9	0,493-0,582
5: Capa	GMAW	ER410NiMo	22-24	170-190	363,6	0,432-0,527

Fuente: Autores

### 4.3 Tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWHT)

Una vez finalizados los procesos de soldadura en los seis cupones, se realizaron los tratamientos térmicos, de acuerdo a lo que se indica en cada WPS, empleando un horno tipo mufla dentro del Taller de Fundición de la ESPOCH, en el área de ensayos y tratamientos térmicos de la Facultad de Mecánica. El procedimiento y resultados del ensayo para el alivio de tensiones se muestran a continuación.

#### 4.3.1 Procedimiento del PWHT

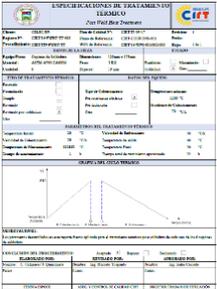
El PWHT consiste en tres etapas fundamentales, el calentamiento, mantenimiento de temperatura y enfriamiento. En las cuales la velocidad del cambio de temperatura son variables importantes para la calidad en los resultados, pero sobre todo la temperatura de mantenimiento, ya que como se comprobó en el capítulo dos, esta temperatura tiene mayor influencia en la microestructura que el tiempo de mantenimiento, sin embargo, el tiempo de mantenimiento debe cubrir el mínimo requerido para el espesor del cupón. En la Tabla 67 se describe el procedimiento empleado.

Tabla 67. Procedimiento del PWHT en cupones de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Registro de temperaturas para el ciclo térmico.	-Procedimiento CIRT-SOLD-TT-17 -Registro del ensayo digital o impreso	10 min	
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada).	-Termohigrómetro	5 min	
3	Limpieza superficial del componente (remoción de grasa, arena, moho, polvo, etc; desigualdades o irregularidades).	-Limpiador líquido -Paños o liencillos que no desprendan hilos o pelusas -Cepillo de acero o amoladora	2 - 15 min	
4	Realización del tratamiento térmico de acuerdo a las especificaciones del material. Medición y control de las temperaturas del horno. Incremento de temperatura.	-Horno o mufla -Instrumentos de medición (sensores) -Controladores digitales de temperatura -Hoja de registro de TT	50°C/hr	

Fuente: Autores

Tabla 67. (Continuación) Procedimiento del PWHT en cupones de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
5	Sostenimiento de temperatura dentro del horno, una vez alcanzada la temperatura del set point.	-Horno o mufla -Instrumentos de medición (sensores) -Controladores digitales de temperatura -Hoja de registro de TT	2 min/mm (1 hr/plg)	
6	Enfriamiento después del tiempo de sostenimiento dentro del horno y posterior apertura de la puerta o escotillas. Enfriamiento hasta temperatura ambiente.	-Horno o mufla -Instrumentos de medición (sensores) -Controladores digitales de temperatura -Hoja de registro de TT	50°C/hr	
7	Realización del registro fotográfico de las piezas sometidas al ensayo.	-Cámara digital -Lámpara o linterna de ser necesario	5 - 15 min	
8	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo TT.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico	20 - 40 min	

Fuente: Autores

#### 4.3.2 Resultados

El PWHT fue realizado de acuerdo a lo descrito en la parte superior, controlándose constantemente los parámetros de variación de temperatura para obtener una curva similar a la teórica. No se encontraron problemas durante la ejecución del ensayo, ni posterior al mismo. Los resultados se presentan mediante el registro del ensayo en el Anexo AC.

#### 4.4 Ensayos no destructivos posterior a la soldadura

Como parte del proceso de control y aseguramiento de la calidad en los procedimientos, fueron realizados END de acuerdo a la metodología establecida en el capítulo 3. Estos ensayos incluyen VT, PT, MT y UT a todos los cupones de soldadura. El procedimiento y resultados obtenidos para cada cupón se muestran a continuación.

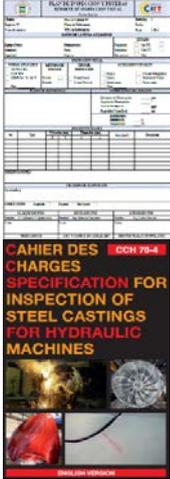
##### 4.4.1 Procedimientos de END

Los procedimientos que se indican a continuación fueron empleados siguiendo la misma metodología para cada cupón de soldadura.

##### 4.4.1.1 Ensayo visual

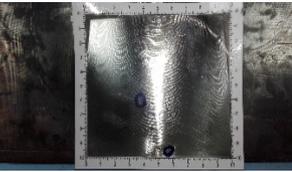
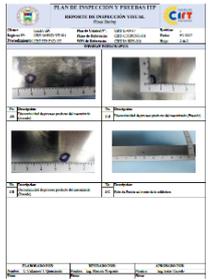
El procedimiento para los ensayos visuales (VT) se describe a continuación en la Tabla 68.

Tabla 68. Procedimiento de END por VT

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Evaluación de la hoja de especificación de calidad correspondiente a la pieza a inspeccionar. Registro de inspección de ensayo visual.	-Procedimiento CIRT-END-VT-17 -Hoja de especificación de calidad correspondiente -Registro del ensayo digital o impreso	10 min	
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada, luminosidad mínima, factibilidad para la selección del método de ensayo VT más adecuado).	-Termohigrómetro -Luxómetro -Medidor de distancia	5 min	

Fuente: Autores

Tabla 68. (Continuación) Procedimiento de END por VT

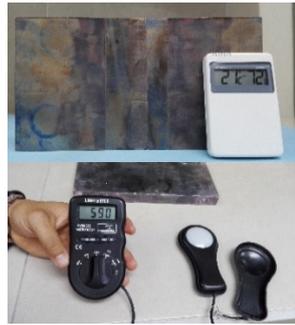
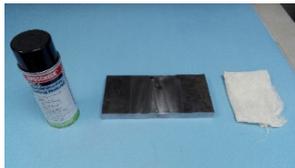
Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
3	Limpieza superficial del componente y zonas a inspeccionar (remoción de grasa, arena, moho, polvo, etc; desigualdades o irregularidades). Secado del componente.	-Limpiador líquido -Paños o liencillos que no desprendan hilos o pelusas -Cepillo de acero o amoladora	2 - 15 min	
4	Seccionamiento de la pieza a inspeccionar en zonas de áreas de 100 cm <sup>2</sup> cada una. Medición de la rugosidad superficial.	-Marcador o señalador -Rugosímetro	5 - 20 min	
5	Realización del ensayo de inspección visual. Medición y evaluación de los discontinuidades presentes.	-Guantes de latex -EPP -Instrumento de ampliación -Boroscopio -Instrumento de medición -Hoja de registro de VT	3 - 5 min/zona	
6	Realización del registro fotográfico de las piezas inspeccionadas.	-Cámara digital -Lámpara o linterna de ser necesario	2 - 5 min	
7	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo VT.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico	20 - 40 min	

Fuente: Autores

#### 4.4.1.2 Ensayo por líquidos penetrantes

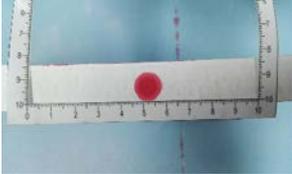
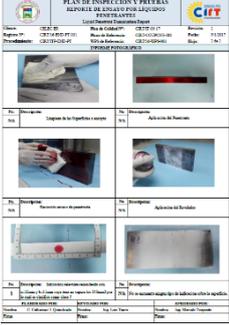
El procedimiento para los ensayos por líquidos penetrantes (PT) se describe a continuación en la Tabla 69.

Tabla 69. Procedimiento de END por PT

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	<p>Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Evaluación de la hoja de especificación de calidad correspondiente a la pieza a inspeccionar. Registro de inspección de ensayo por líquidos penetrantes.</p> <p>Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada, luminosidad mínima, factibilidad para la selección del método de ensayo PT más adecuado).</p>	<p>-Procedimiento CIRT-END-PT-17 -Hoja de especificación de calidad correspondiente -Registro del ensayo digital o impreso</p>	10 min	
2	<p>Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada, luminosidad mínima, factibilidad para la selección del método de ensayo PT más adecuado).</p>	<p>-Termohigrómetro -Luxómetro -Medidor de distancia</p>	5 min	
3	<p>Limpieza superficial del componente y zonas a inspeccionar (remoción de grasa, arena, moho, polvo, etc; desigualdades o irregularidades). Secado exhaustivo del componente.</p>	<p>-Limpiador líquido (cleaner) -Paños o liencillos que no desprendan hilos o pelusas -Cepillo de acero o amoladora</p>	2 - 15 min	
4	<p>Seccionamiento de la pieza a inspeccionar en zonas de áreas de 100 cm<sup>2</sup> cada una. Medición de la rugosidad superficial.</p>	<p>-Marcador o señalador -Rugosímetro</p>	5 - 20 min	

Fuente: Autores

Tabla 69. (Continuación) Procedimiento de END por PT

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
5	Aplicación del penetrante. Remoción del exceso de penetrante.	-Tinta penetrante coloreada o fluorescente (dye) -Esponja o paño -Guantes de latex	10 - 20 min	
6	Aplicación del revelador. Secado del revelador.	-Revelador correspondiente a la tinta penetrante (developer) -Guantes de latex	10 - 20 min	
7	Realización del ensayo de inspección por líquidos penetrantes. Medición y evaluación de los indicaciones presentes.	-Guantes de latex -EPP -Luz blanca o UV -Instrumento de ampliación -Instrumento de medición -Hoja de registro de PT	3 - 5 min/zona	
8	Realización del registro fotográfico de las piezas inspeccionadas.	-Cámara digital -Lámpara o linterna de ser necesario	2 - 5 min	
9	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo PT.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico	20 - 40 min	

Fuente: Autores

#### 4.4.1.3 Ensayo por partículas magnéticas

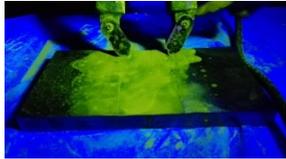
El procedimiento para los ensayos por partículas magnéticas (MT) se describe a continuación en la Tabla 70.

Tabla 70. Procedimiento de END por MT

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Evaluación de la hoja de especificación de calidad correspondiente a la pieza a inspeccionar. Registro de inspección de ensayo por partículas magnéticas.	-Procedimiento CIRT-END-MT-17 -Hoja de especificación de calidad correspondiente -Registro del ensayo digital o impreso	15 min	
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada, luminosidad mínima/máxima, factibilidad para la selección del método de magnetización del ensayo MT más adecuado).	-Termohigrómetro -Luxómetro -Medidor de distancia	5 min	
3	Limpieza superficial del componente y zonas a inspeccionar (remoción de grasa, arena, moho, polvo, etc; desigualdades o irregularidades). Secado exhaustivo del componente.	-Limpiador líquido -Paños o liencillos que no desprendan hilos o pelusas -Cepillo de acero o amoladora	2 - 15 min	
4	Medición de la rugosidad superficial.	-Rugosímetro	5 min	
5	Revisión de las condiciones de magnetización.	-Equipo de magnetización (generador, cables, terminales) -Bloques de referencia -Medidor de campo magnético -Guantes de latex	5 - 10 min	

Fuente: Autores

Tabla 70. (Continuación) Procedimiento de END por MT

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
6	Magnetización del componente a inspeccionar.	-Equipo de magnetización (generador, cables, terminales) -Guantes de latex	1 - 3 min/zona	
7	Aplicación del medio de detección.	-Partículas secas o húmedas (normales o fluorescentes) -EPP -Guantes de latex	1 - 3 min/zona	
8	Realización del ensayo de inspección por partículas magnéticas. Medición y evaluación de los indicaciones presentes.	-Guantes de latex -EPP -Luz blanca o UV -Instrumento de ampliación -Instrumento de medición -Hoja de registro de MT	3 - 5 min/zona	
9	Realización del registro fotográfico de las piezas inspeccionadas.	-Cámara digital -Lámpara o linterna de ser necesario	2 - 5 min	
10	Limpieza y desmagnetización del componente inspeccionado.	-Agentes de limpieza -EPP -Equipo de magnetización (generador, cables, terminales)	10 - 15 min	
11	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo MT.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico	20 - 40 min	

Fuente: Autores

#### 4.4.1.4 *Ensayo por ultrasonido*

El procedimiento para los ensayos por ultrasonido (UT) se describe a continuación en la Tabla 71.

Tabla 71. Procedimiento de END por UT

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Evaluación de la hoja de especificación de calidad correspondiente a la pieza a inspeccionar. Registro de inspección de ensayo por ultrasonido.	-Procedimiento CIRT-END-UT-17 -Hoja de especificación de calidad correspondiente -Registro del ensayo digital o impreso	15 min	
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada, luminosidad mínima, factibilidad para la selección del método de ensayo UT más adecuado).	-Termohigrómetro -Luxómetro -Medidor de distancia	5 min	
3	Limpieza superficial del componente y zonas a inspeccionar (remoción de grasa, arena, moho, polvo, etc; desigualdades o irregularidades). Secado del componente.	-Limpiador líquido (cleaner) -Paños o liencillos que no desprendan hilos o pelusas -Cepillo de acero o amoladora	2 - 15 min	
4	Medición de la rugosidad superficial.	-Rugosímetro	1 - 3 min	
5	Revisión de los componentes (hardware) del equipo antes del ensayo. Preparación de las curvas y diagramas necesarios para el ensayo.	-Generador de ultrasonido -Palpadores y zapatas -Gel acoplante -Curvas/Diagramas DAC SDH/DGS	10 - 15 min	
6	Calibración de los parámetros de referencia empleando el bloque, curvas y diagramas.	-Generador de ultrasonido -Palpadores y zapatas -Gel acoplante -Bloque(s) de referencia	5 - 15 min	

Fuente: Autores

Tabla 71. (Continuación) Procedimiento de END por UT

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
7	Medición y señalización del área de barrido del palpador para el ensayo de ultrasonido con haz angular.	-Marcador o señalador -Instrumento de medición	2 - 5 min	
8	Realización del ensayo de inspección por ultrasonido. Medición y evaluación de los indicaciones presentes.	-Guantes de latex -EPP -Generador de ultrasonido -Palpadores y zapatas -Gel acoplante -Hoja de registro de UT	5 - 8 min/zona	
9	Realización del registro fotográfico de las piezas inspeccionadas.	-Cámara digital -Lámpara o linterna de ser necesario	2 - 5 min	
10	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo UT.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico -Mucha paciencia	30 - 60 min	

Fuente: Autores

#### 4.4.2 Resultados

Una vez finalizados los END, se procesaron las discontinuidades presentadas y se compararon con los criterios de aceptación de la especificación CCH 70-4. Los registros de los ensayos por VT se muestran del Anexo AD al Anexo AI, los ensayos por PT se muestran del Anexo AJ al Anexo AO, los ensayos por MT se muestran del Anexo AP al Anexo AU y los ensayos por UT se muestran del Anexo AV al Anexo BA, allí se puede observar con detalle los resultados de cada cupón de soldadura. Dentro de los END superficiales solo se presentaron discontinuidades relevantes en el cupón 1, mientras que mediante el END volumétrico se visualizaron indicaciones en el cupón 1, 4 y 5; resultando

discontinuidades relevantes únicamente las presentadas en el cupón 1, lo cual coincide con el otro tipo de ensayos aplicados. Debido a las características de esta discontinuidad, y a través de la información obtenida de los diferentes ensayos, se concluyó que se trataba de un defecto por falta de penetración en la raíz de la junta. Este defecto se presentó de manera continua a lo largo de todo el cordón, por lo cual indicaba un error en la ejecución del procedimiento 1, probablemente durante el pase caliente, esto puede deberse al insuficiente aporte de calor durante ese pase y una falta de limpieza adecuada.

#### 4.4.2.1 *Ensayo visual*

La Tabla 72 resume los resultados obtenidos por el ensayo visual en los seis cupones.

Tabla 72. Resultados de los ensayos por VT en cupones de soldadura de ASTM A743 CA-6NM

Procedimiento	Cupón	Indicaciones	Relevantes	Observaciones
1	1	Sí	Sí	Falta de penetración en la raíz a través de todo el cordón. No aprueba los criterios de aceptación para calidad tipo 1.
	2	No	N/A	N/A
2	3	No	N/A	N/A
	4	No	N/A	N/A
3	5	No	N/A	N/A
	6	No	N/A	N/A

Fuente: Autores

#### 4.4.2.2 *Ensayo por líquidos penetrantes*

La Tabla 73 resume los resultados obtenidos por el ensayo de líquidos penetrantes en los seis cupones.

Tabla 73. Resultados de los ensayos por PT en cupones de soldadura de ASTM A743 CA-6NM

Procedimiento	Cupón	Indicaciones	Relevantes	Observaciones
1	1	Sí	Sí	Falta de penetración en la raíz. No aprueba los criterios de aceptación para calidad tipo 1.
	2	No	N/A	N/A
2	3	No	N/A	N/A
	4	No	N/A	N/A

Fuente: Autores

Tabla 73. (Continuación) Resultados de los ensayos por PT en cupones de soldadura de ASTM A743 CA-6NM

Procedimiento	Cupón	Indicaciones	Relevantes	Observaciones
3	5	No	N/A	N/A
	6	No	N/A	N/A

Fuente: Autores

#### 4.4.2.3 Ensayo por partículas magnéticas

La Tabla 74 resume los resultados obtenidos por el ensayo de partículas magnéticas en los seis cupones.

Tabla 74. Resultados de los ensayos por MT en cupones de soldadura de ASTM A743 CA-6NM

Procedimiento	Cupón	Indicaciones	Relevantes	Observaciones
1	1	Sí	Sí	Falta de penetración en la raíz. No aprueba los criterios de aceptación para calidad tipo 1.
	2	No	N/A	N/A
2	3	No	N/A	N/A
	4	No	N/A	N/A
3	5	No	N/A	N/A
	6	No	N/A	N/A

Fuente: Autores

#### 4.4.2.4 Ensayo por ultrasonido

La Tabla 75 resume los resultados obtenidos por el ensayo de ultrasonido en los seis cupones.

Tabla 75. Resultados de los ensayos por MT en cupones de soldadura de ASTM A743 CA-6NM

Procedimiento	Cupón	Indicaciones	Relevantes	Observaciones
1	1	Sí	Sí	Falta de penetración en la raíz a través de todo el cordón. No aprueba los criterios de aceptación para calidad tipo 1.
	2	No	N/A	N/A
2	3	No	N/A	N/A
	4	Sí	No	Aprueba los criterios de aceptación para calidad tipo 1.
3	5	Sí	No	Aprueba los criterios de aceptación para calidad tipo 1.
	6	No	N/A	N/A

Fuente: Autores

## 4.5 Ensayos mecánicos

De acuerdo al código ASME sección IX, para la validación de los WPS se requiere 2 probetas de tensión y 4 de doblez lateral guiado por cada cupón de soldadura. La obtención de estas probetas se realizó usando un procedimiento similar al descrito en la Tabla 43, mediante el centro de mecanizado CNC.

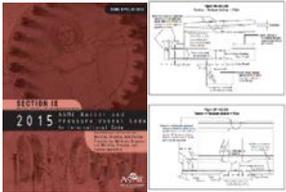
### 4.5.1 Ensayos de tensión

Los ensayos de tensión se realizaron dentro de las instalaciones de *Lenmav* en la ciudad de Riobamba, siguiendo las recomendaciones establecidas en ASME sección IX y ASTM E8, como se indicó en el apartado 3.6.1.

#### 4.5.1.1 Procedimiento del ensayo de tensión

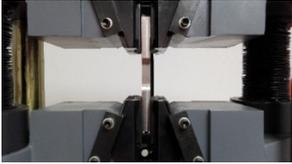
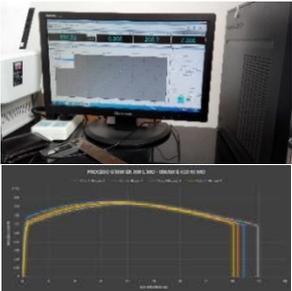
La Tabla 76 indica el procedimiento empleado para el desarrollo del ensayo de tensión en las doce probetas, correspondientes a los tres procedimientos de soldadura.

Tabla 76. Procedimiento del ensayo de tensión

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Registro de ensayo de tensión para toma de cargas y desplazamientos.	-Procedimiento CIRT-EM-TS-17 -Registro del ensayo digital o impreso	10 min	
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada).	-Termohigrómetro	5 min	
3	Revisión dimensional y geométrica de las probetas de ensayo.	-Calibrador -Flexómetro -Galgas de radios	5 - 15 min	

Fuente: Autores

Tabla 76. (Continuación) Procedimiento del ensayo de tensión

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
4	Señalización de las marcas iniciales para la medición de deformación.	-Cinzel o identador -Martillo -Flexómetro	2 - 5 min	
5	Colocación de la probeta dentro de las mordazas de la máquina. Colocación del deformímetro digital para la medición de la deformación.	-Probetas de tensión -Máquina de ensayos universal -Deformímetro digital -EPP	5 - 10 min	
6	Realización del ensayo de tensión. Aplicación de la precarga. Aplicación de la carga completa hasta el límite de fluencia. Desmontaje del deformímetro digital.	-Probetas de tensión -Máquina de ensayos universal -Deformímetro digital -EPP	20 - 35 min	
7	Aplicación de la carga completa hasta la carga de fractura del material. Desmontaje de la probeta de la máquina de ensayos universal.	-Probetas de tensión -Máquina de ensayos universal -EPP	10 - 20 min	
8	Realización del registro fotográfico de las piezas sometidas al ensayo.	-Cámara digital -Lámpara o linterna de ser necesario	5 - 15 min	
9	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo TS.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico	20 - 40 min	

Fuente: Autores

#### 4.5.2 Resultados

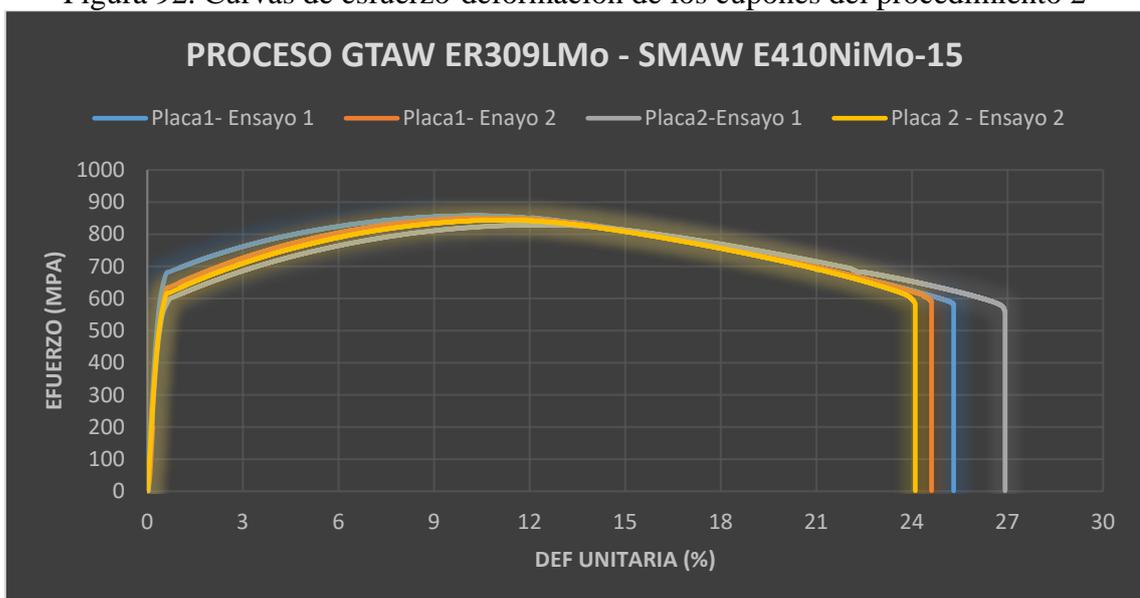
Los resultados del ensayo de tensión se representan a través de sus curvas de esfuerzo-deformación, de donde pueden obtenerse los valores de Esfuerzo de Fluencia ( $S_y$ ), Esfuerzo Máximo o *Esfuerzo Último* ( $S_{ut}$ ) y porcentaje de elongación ( $A\%$ ). La Figura 91, Figura 92 y Figura 93 corresponden a las curvas de esfuerzo-deformación de los cupones de los *procedimientos* 1, 2 y 3 respectivamente.

Figura 91. Curvas de esfuerzo-deformación de los cupones del procedimiento 1



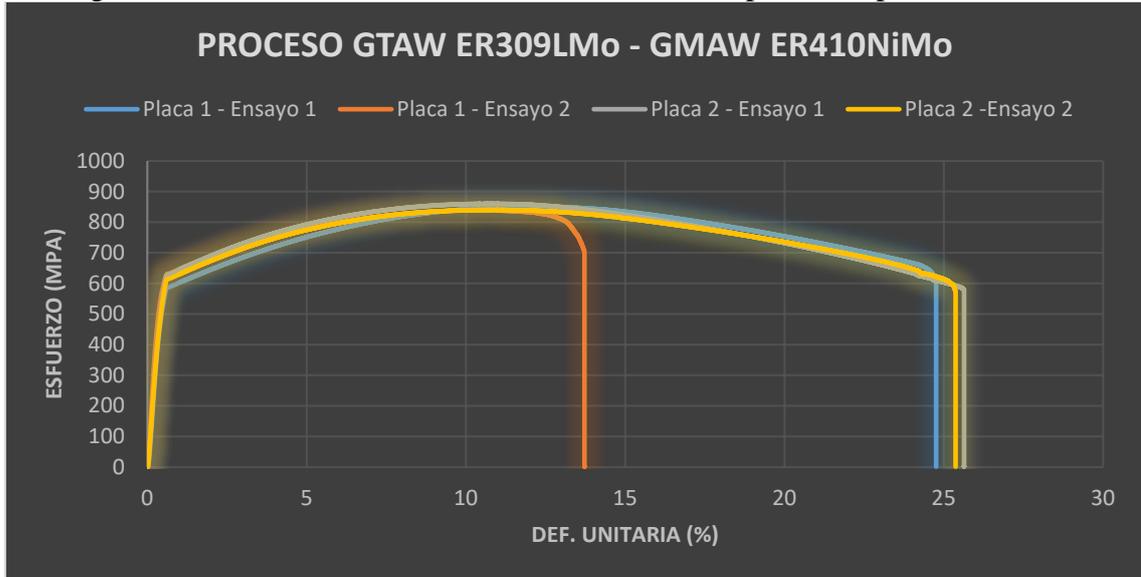
Fuente: Autores

Figura 92. Curvas de esfuerzo-deformación de los cupones del procedimiento 2



Fuente: Autores

Figura 93. Curvas de esfuerzo-deformación de los cupones del procedimiento 3



Fuente: Autores

Los valores de las variables de importancia obtenidos de los ensayos de tensión de todas las probetas se indican en la Tabla 77. Como puede observarse los valores de *Esfuerzo Máximo* en todas las probetas superan el valor mínimo requerido de acuerdo a la especificación del material, resultando satisfactorio el ensayo de tensión.

Tabla 77. Variables obtenidas de los ensayos de tensión en las probetas de ASTM A743 CA-6NM

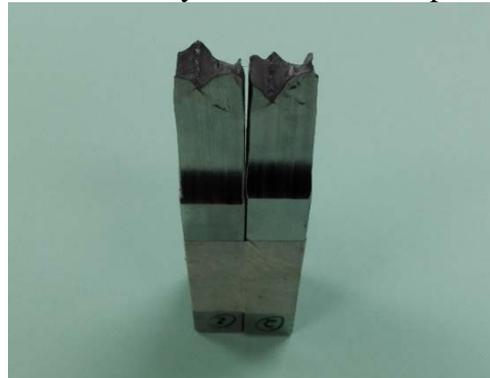
Ensayo	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Elongación (%)
Proc.1_1_1	658,97	861,89	24,23
Proc.1_1_2	564,38	869,74	26,18
Proc.1_2_1	489,27	870,16	25,00
Proc.1_2_2	554,59	872,55	26,00
Proc.2_1_1	665,48	857,85	25,31
Proc.2_1_2	580,15	850,88	24,61
Proc.2_2_1	589,78	829,36	26,92
Proc.2_2_2	607,78	844,27	24,10
Proc.3_1_1	586,44	850,41	24,76
Proc.3_1_2	621,35	838,71	13,72
Proc.3_2_1	628,94	859,91	25,64
Proc.3_2_2	614,42	840,10	25,37

Fuente: Autores

Es interesante notar el bajo esfuerzo de fluencia presentado en la probeta 1 del cupón 2 (Proc.1\_2\_1), esto puede deberse a un error durante la toma de datos dentro de la

realización del ensayo o por la inadecuada colocación del deformímetro digital. La probeta 2 del cupón 5 (Proc.3\_1\_2) presenta una reducida ductilidad en comparación con las demás, de alrededor del 50%, habiéndose producida una fractura tipo frágil en la zona de la soldadura, como indica en la Figura 94. Se sugiere realizar posteriores estudios de fractografía empleando un MEB para determinar la causa de este tipo de falla. Los registros de los ensayos de tensión con mayor información para cada cupón se presentan del Anexo BB al Anexo BG.

Figura 94. Resultado del ensayo de tensión de la probeta 2 del cupón 5



Fuente: Autores

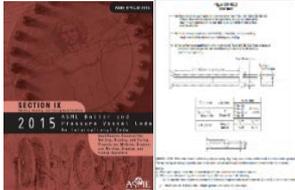
#### 4.5.3 Ensayos de doblez lateral guiado

Los ensayos de doblez lateral se realizaron dentro de las instalaciones de la ESPOCH en el Laboratorio de Resistencia de Materiales, siguiendo las recomendaciones establecidas en ASME sección IX y ASTM E190, como se indicó en el apartado 3.6.2.

##### 4.5.3.1 Procedimiento el ensayo de doblez lateral guiado

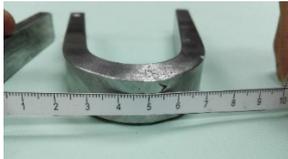
La Tabla 78 indica el procedimiento empleado para el desarrollo del ensayo de doblez lateral en las 24 probetas correspondientes a los tres procedimientos de soldadura

Tabla 78. Procedimiento del ensayo de doblez lateral guiado

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Registro de ensayo de doblez.	-Procedimiento CIRT-EM-DB-17 -Registro del ensayo digital o impreso	10 min	

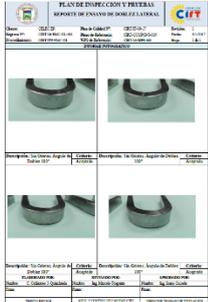
Fuente: Autores

Tabla 78. (Continuación) Procedimiento del ensayo de doblez lateral guiado

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada).	-Termohigrómetro	5 min	
3	Revisión dimensional y geométrica de las probetas de ensayo.	-Calibrador -Flexómetro -Galgas de radios	5 - 10 min	
4	Montaje del rodillo aplicador de carga y los soportes del Jig en la máquina de ensayos universal.	-Máquina de ensayos universal -Equipos de ensayo de doblez -Llaves de tuercas -Llave inglesa -EPP	5 - 10 min	
5	Colocación de la probeta dentro del equipo para ensayo de doblez.	-Probetas de doblez -Equipos de ensayo de doblez -Máquina de ensayos universal -Flexómetro -Señalador -EPP	5 - 10 min	
6	Realización del ensayo de doblez. Aplicación de la precarga. Aplicación de la carga completa hasta obtener un ángulo de 180° o se produzcan grietas o poros.	-Probetas de doblez -Equipos de ensayo de doblez -Máquina de ensayos universal -EPP	10 - 15 min	
7	Desmontaje de la probeta de la máquina de ensayos universal. Medición y evaluación de los discontinuidades presentes en caso de presentarse.	-Probetas de doblez -Equipos de ensayo de doblez -Flexómetro -Instrumento de ampliación visual -Señalador -EPP	5 - 10 min	

Fuente: Autores

Tabla 78. (Continuación) Procedimiento del ensayo de doblez lateral guiado

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
8	Realización del registro fotográfico de las piezas sometidas al ensayo.	-Cámara digital -Lámpara o linterna de ser necesario	5 - 15 min	
9	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo DB.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico	10 - 20 min	

Fuente: Autores

#### 4.5.4 Resultados

Los ensayos de doblez lateral se evalúan a través del ángulo máximo alcanzado y el apareamiento de aberturas en el lado convexo exterior en el cual se aplicó la carga durante el ensayo de doblez, el criterio de aceptación de ASME sección IX para evaluar la ductilidad en soldaduras indica que no debe haber aberturas redondeadas (poro) mayores a 1/8 in (3.2 mm) y en ningún caso se acepta el apareamiento de grietas. Las probetas del cupón 1 no se encontraron dentro del criterio aceptación, coincidiendo con lo encontrado mediante los END, siendo estas probetas las únicas rechazadas. Un resumen de los resultados se muestra en la Tabla 79, y con mayor detalle del Anexo BH al Anexo BM.

Tabla 79. Resultados obtenidos en los ensayos de doblez lateral guiado en probetas ASTM A743 CA-6NM

Procedimiento	Cupón	Probeta	Ángulo máx. (°)	Abertura	Observaciones
1	1	1	120	Sí	Lineal 4 mm
		2	136	Sí	Lineal 4 mm
		3	180	Sí	Lineal 3 mm
		4	180	Sí	Lineal 3 mm
	2	1	180	No	N/A
		2	180	No	N/A
		3	180	No	N/A
		4	180	No	N/A

Fuente: Autores

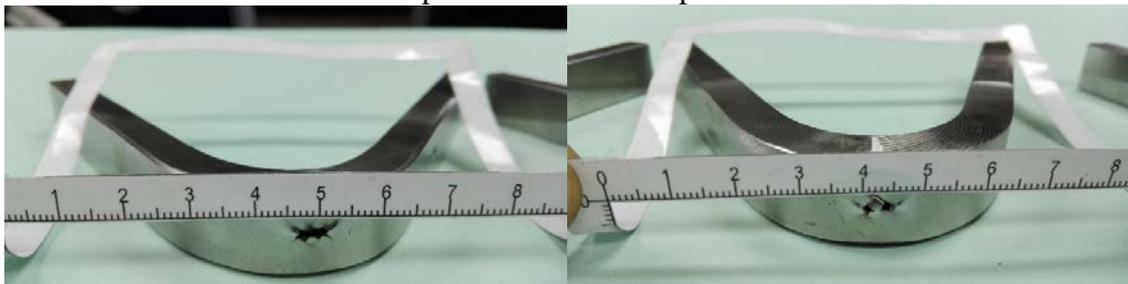
Tabla 79. (Continuación) Resultados obtenidos en los ensayos de doblez lateral guiado en probetas ASTM A743 CA-6NM

Procedimiento	Cupón	Probeta	Ángulo máx. (°)	Abertura	Observaciones
2	3	1	180	No	N/A
		2	180	No	N/A
		3	180	No	N/A
		4	180	No	N/A
	4	1	180	No	N/A
		2	180	No	N/A
		3	180	No	N/A
		4	180	No	N/A
	5	1	180	No	N/A
		2	180	No	N/A
		3	180	No	N/A
		4	180	No	N/A
3	1	1	180	Sí	Dos redondeadas de 1,5 y 1 mm
		2	180	No	N/A
	6	3	180	Sí	Dos redondeadas de 1,5 y 1 mm
		4	180	Sí	Una redondeada de 2 mm

Fuente: Autores

Como se indica en la tabla anterior, las probetas del cupón 1 y 6 presentaron indicaciones, encontrándose las probetas del cupón 6 dentro del criterio de aceptación de ASME sección IX. Resultando satisfactorio el ensayo de doblez lateral guiado para los cupones 2, 3, 4, 5 y 6; mientras que, para el cupón 1 se rechazó el ensayo por encontrarse fuera del criterio de aceptación, dos imágenes de las probetas más críticas del cupón 1 se indican en la Figura 95, estas imágenes corresponden a las probetas 1 y 2. Puede observarse los máximos ángulos de doblez alcanzados en ambas probetas, los cuales son muy inferiores a 180°, donde alcanzaron el apareamiento de las aberturas.

Figura 95. Resultado del ensayo de doblez lateral guiado de la probeta 1 y 2 respectivamente del cupón 1



Fuente: Autores

## 4.6 Ensayos de dureza y microdureza

Los ensayos de medición de dureza se realizaron para comprobar la homogeneidad de dicha propiedad en la zona de la soldadura, debido a las variaciones microestructurales por las altas tasas de cambio en la temperatura. Se realizaron dos tipos de ensayos, el de dureza para medir esta propiedad en el área general de las tres principales zonas (MB-ZAT-ZF) y tener un promedio de dureza en cada zona, y así evaluar su capacidad de encontrarse dentro de los límites que indica la especificación del material (285 HBW); y el de microdureza, el cual permite recolectar mayor información sobre los cambios incluso dentro de cada zona, ya que como se estudió mediante las curvas de distribución de calor, los picos de temperatura dependen de la distancia desde el eje del cordón de soldadura.

### 4.6.1 Ensayos de dureza

El ensayo de dureza se realizó en las instalaciones del CIRT, dentro del Laboratorio de Metalografía y Ensayos No Destructivos. Se empleó un durómetro portátil de tipo herradura marca EMCO-TEST y un indentador de dureza Brinell para la realización del ensayo, siguiendo la metodología indicada en el apartado 3.6.4.

#### 4.6.1.1 Procedimiento del ensayo de dureza

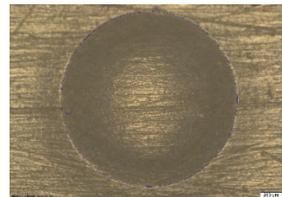
La Tabla 80 ejemplifica el procedimiento realizado para el ensayo de dureza en las muestras de los cupones de los tres procedimientos de soldadura, con y sin PWHT, para cuantificar la variación de dureza obtenida con la realización del tratamiento térmico de alivio de tensiones residuales.

Tabla 80. Procedimiento de ensayos de dureza en muestras de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Registro de ensayo de dureza.	-Procedimiento CIRT-EM-DR-17 -Registro del ensayo digital o impreso	10 min	

Fuente: Autores

Tabla 80. (Continuación) Procedimiento de ensayos de dureza en muestras de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada).	-Termohigrómetro	5 min	
3	Limpieza superficial del componente (remoción de grasa, arena, moho, polvo, etc; desigualdades o irregularidades), y pulido ligero en caso de ser requerido.	-Limpiador líquido -Paños o liencillos que no desprendan hilos o pelusas -Cepillo de acero o amoladora -Pulidora	3 - 10 min	
4	Montaje y calibración del equipo de medición de dureza con el bloque de referencia correspondiente.	-Equipo de medición de dureza -Identador -Bloque de referencia -Llaves de tuercas	5 - 10 min	
5	Señalización de las marcas para la medición de dureza.	-Marcador o señalador -Flexómetro o regla	2 - 5 min	
6	Colocación de la probeta dentro del durómetro	-Probetas de dureza -Durómetro -EPP	2 - 5 min	
7	Realización del ensayo de dureza. Aplicación de la precarga. Aplicación de la carga completa.	-Probetas de dureza -Durómetro -EPP	1 - 2 min/huella	
8	Desmontaje de la probeta del durómetro. Medición de la dureza (huellas) de manera directa o indirecta de acuerdo al tipo de identador empleado.	-Probetas de dureza -Reloj comparador -Microscopio óptico	10 - 20 min	

Fuente: Autores

Tabla 80. (Continuación) Procedimiento de ensayos de dureza en muestras de ASTM A743 CA-6NM

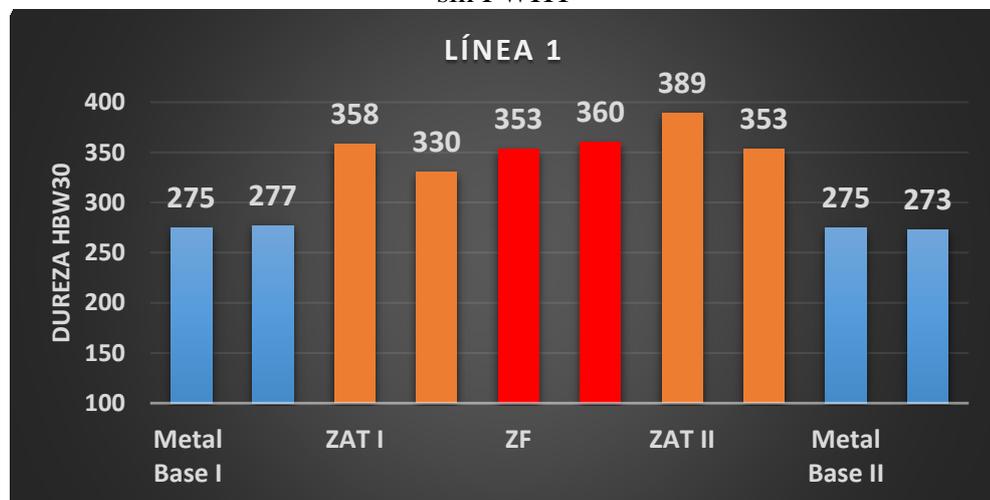
Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
9	Realización del registro fotográfico de las piezas sometidas al ensayo.	-Cámara digital -Lámpara o linterna de ser necesario	5 - 10 min	
10	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo DR.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico	20 - 40 min	

Fuente: Autores

#### 4.6.1.2 Resultados

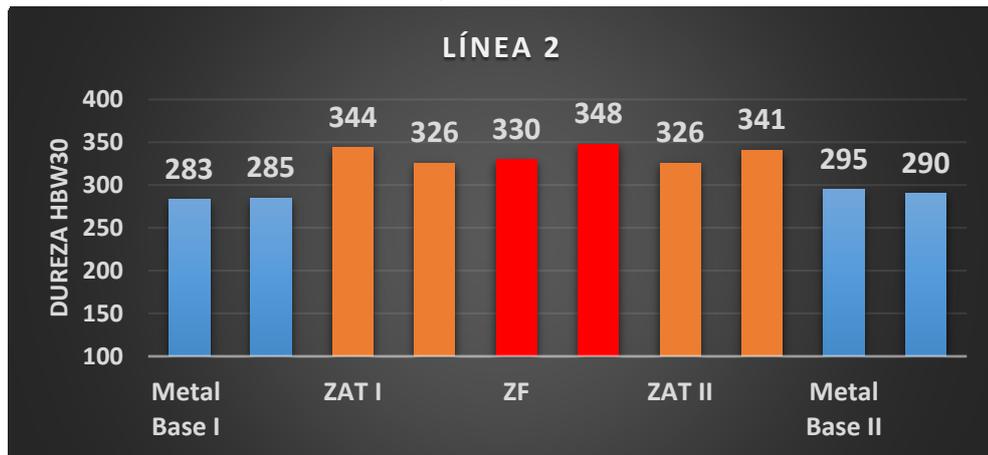
Los ensayos de dureza Brinell (HBW) se realizaron en las muestras de los cupones de soldadura obtenidas del corte transversal. Fueron realizadas mediciones a lo largo de líneas que atraviesan las tres principales zonas del pozo de soldadura, la línea 1 y 3 se encuentran a 3 mm de cada borde de la muestra respectivamente, mientras la línea 2 atraviesa el centro de la junta. En las gráficas siguientes, se presentan los resultados de dureza obtenidos para cada línea, dando un total de tres gráficas por muestra; se indican dos muestras por cada procedimiento de soldadura, la primera sin los efectos del PWHT, mientras que la segunda se midió su dureza después de haberse realizado el PWHT.

Figura 96. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT



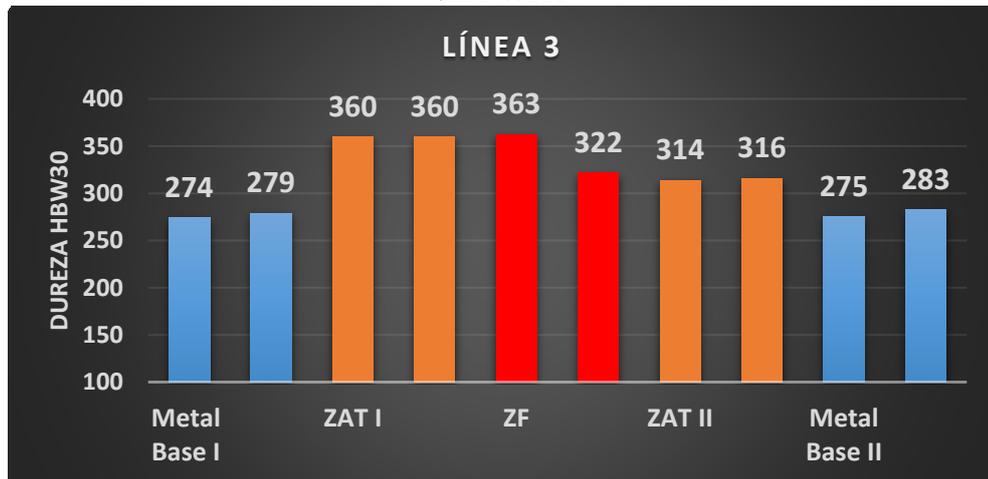
Fuente: Autores

Figura 97. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT



Fuente: Autores

Figura 98. Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT



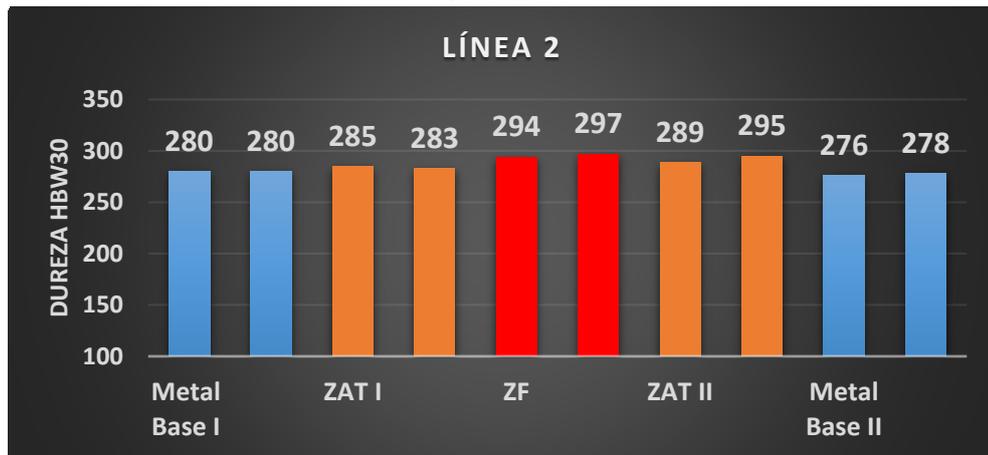
Fuente: Autores

Figura 99. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT



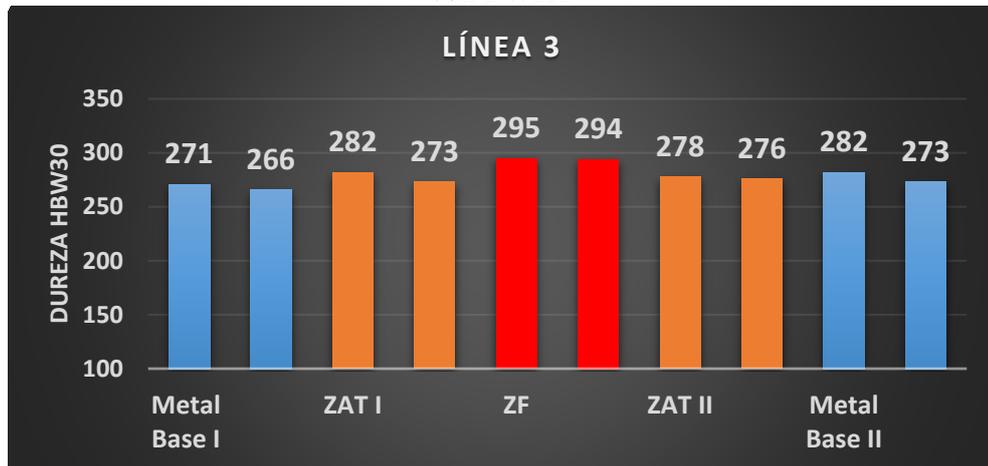
Fuente: Autores

Figura 100. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT



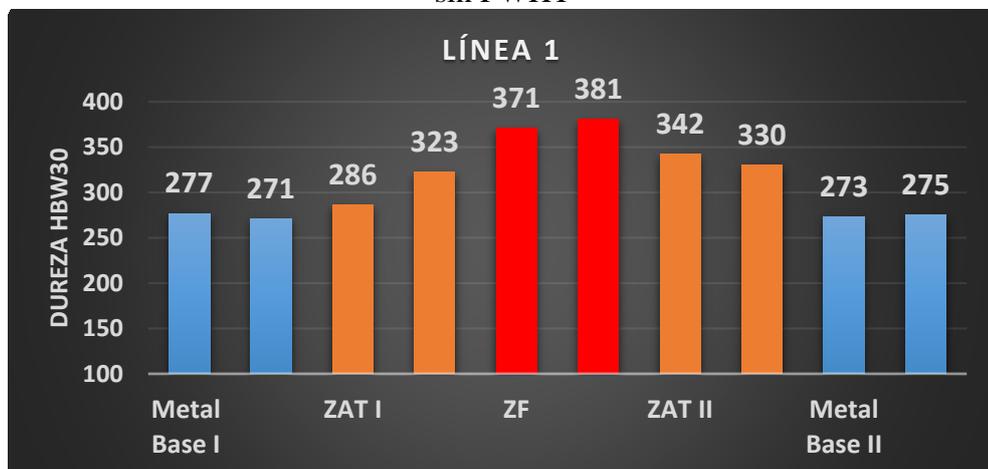
Fuente: Autores

Figura 101. Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT



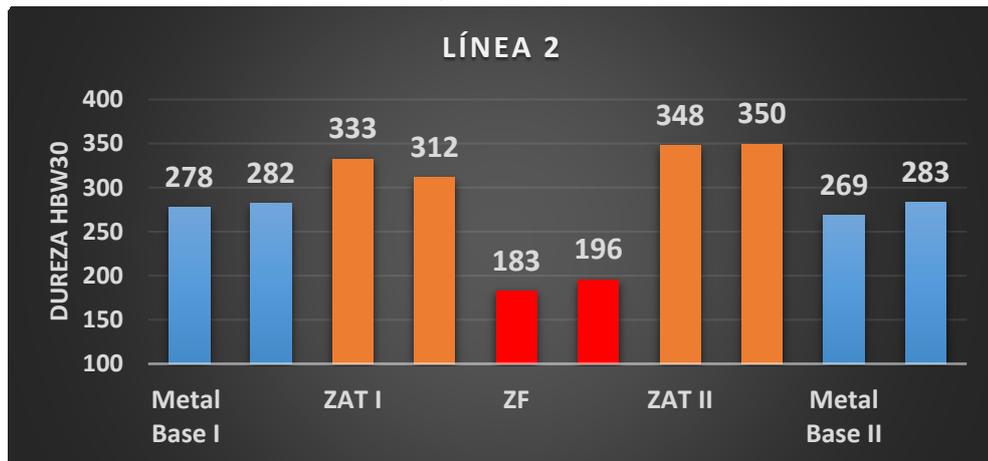
Fuente: Autores

Figura 102. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT



Fuente: Autores

Figura 103. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT



Fuente: Autores

Figura 104. Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT



Fuente: Autores

Figura 105. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT



Fuente: Autores

Figura 106. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT



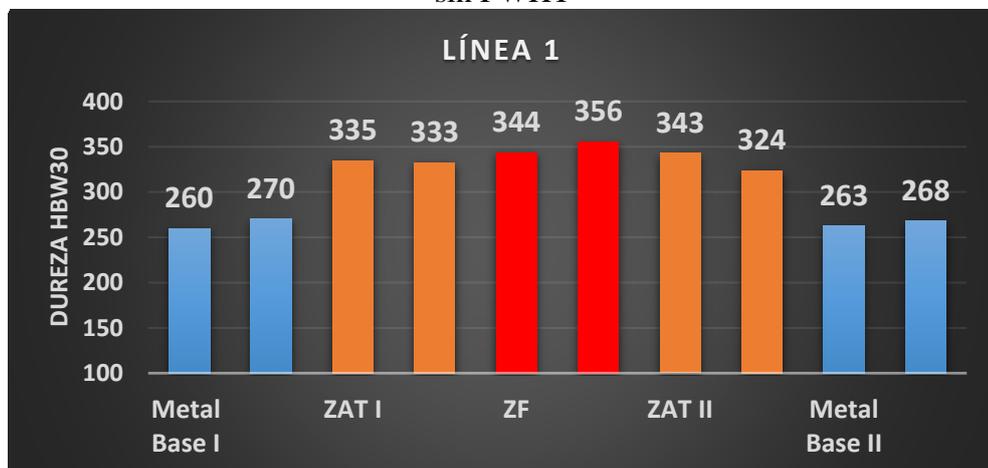
Fuente: Autores

Figura 107. Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT



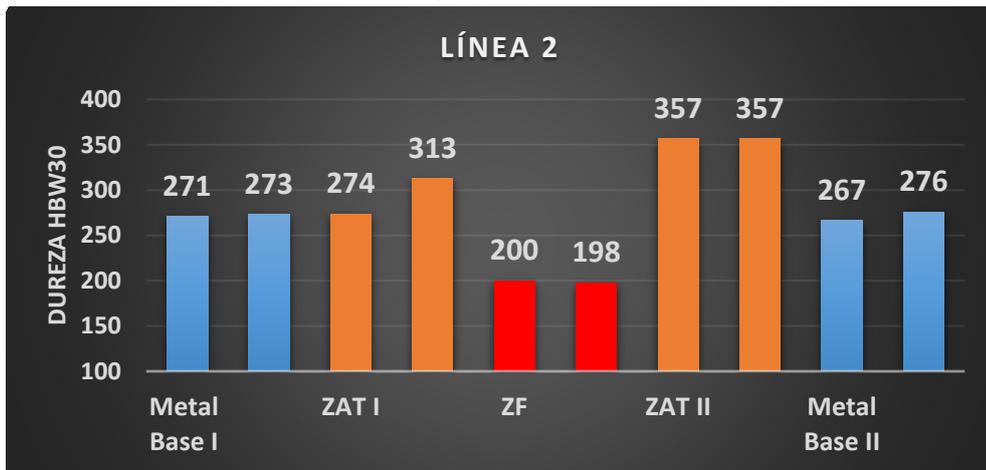
Fuente: Autores

Figura 108. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 sin PWHT



Fuente: Autores

Figura 109. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 3 sin PWHT



Fuente: Autores

Figura 110. Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 3 sin PWH



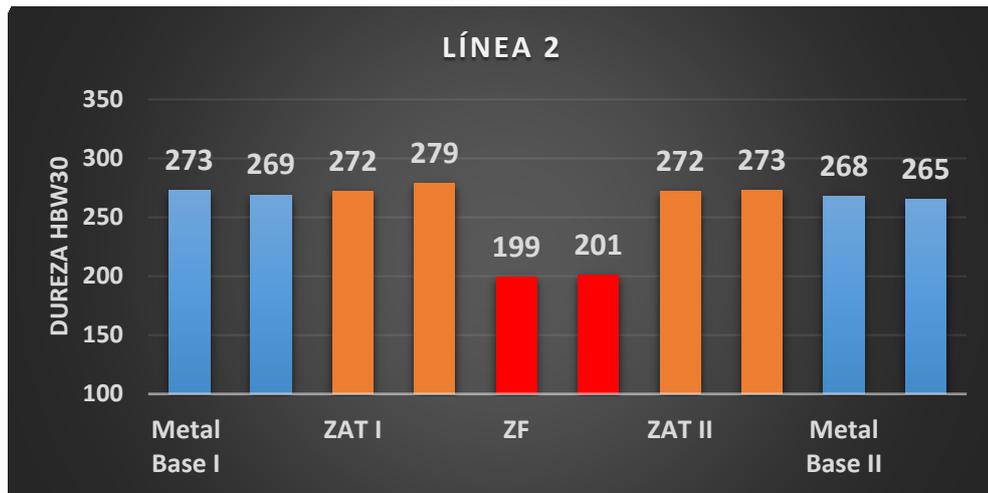
Fuente: Autores

Figura 111. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT



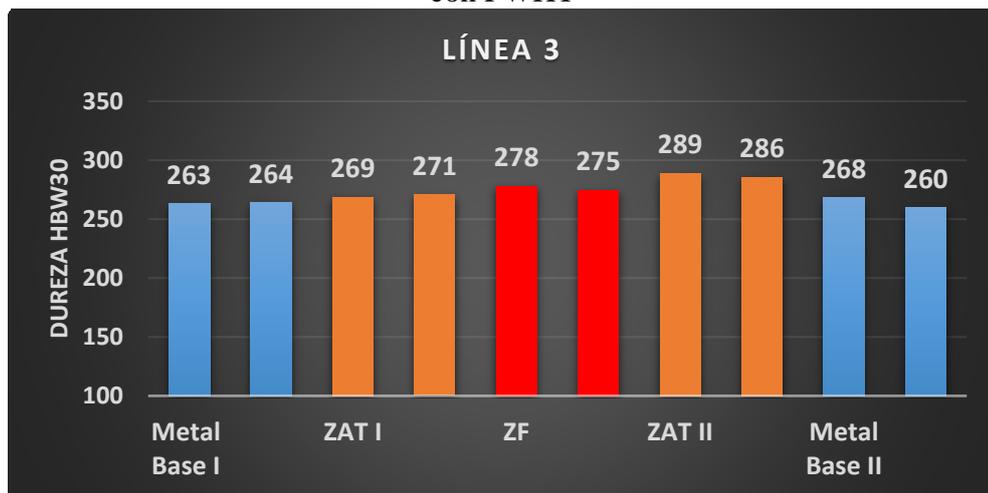
Fuente: Autores

Figura 112. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT



Fuente: Autores

Figura 113. Mediciones de dureza HBW30 de línea 3 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT



Fuente: Autores

De acuerdo a los datos, puede notarse la influencia del PWHT al realizar una homogeneización de las propiedades del pozo de soldadura con respecto al MB. Ninguna zona posee una dureza mayor o igual a 300 HBW30 después del PWHT.

#### 4.6.2 Ensayos de microdureza

El ensayo de microdureza se realizó en las instalaciones del CIRT, dentro del Laboratorio de Metalografía y Ensayos No Destructivos. Se empleó un microdurómetro electrónico marca Struers y un indentador de microdureza Vickers (HV) para la realización del ensayo, siguiendo la metodología indicada en el apartado 3.6.5.

#### 4.6.2.1 Procedimiento del ensayo de microdureza

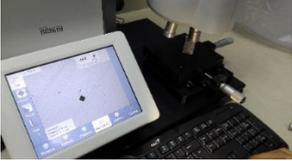
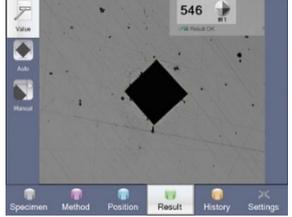
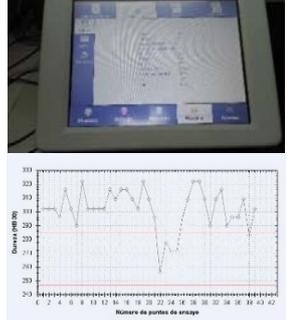
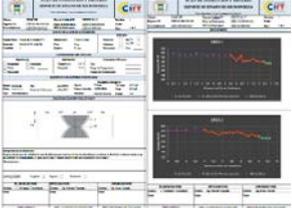
La Tabla 81 ejemplifica el procedimiento realizado para el ensayo de microdureza en las muestras de los cupones de los tres procedimientos de soldadura, con y sin PWHT, para cuantificar la variación de dureza dentro de cada zona y poder medir el ancho de la ZAT. La cantidad de indentaciones empleadas es mucho mayor comparada con el ensayo de dureza, debido a que son más pequeñas y, permite obtener mayor información.

Tabla 81. Procedimiento de ensayos de microdureza en muestras de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Registro de ensayo de microdureza.	-Procedimiento CIRT-EM-MDR-17 -Registro del ensayo digital o impreso	10 min	
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada).	-Termohigrómetro	5 min	
3	Limpieza superficial del componente (remoción de grasa, arena, moho, polvo, etc; desigualdades o irregularidades), y pulido ligero en caso de ser requerido.	-Limpiador líquido -Paños o liencillos que no desprendan hilos o pelusas -Cepillo de acero o amoladora -Pulidora	3 - 10 min	
4	Calibración del equipo de medición de microdureza con el bloque de referencia correspondiente.	-Equipo de medición de microdureza -Identador HV -Bloque de referencia	5 - 10 min	
5	Señalización de las marcas para la medición de microdureza.	-Marcador o señalador -Flexómetro o regla	2 - 5 min	

Fuente: Autores

Tabla 81. (Continuación) Procedimiento de ensayos de microdureza en muestras de ASTM A743 CA-6NM

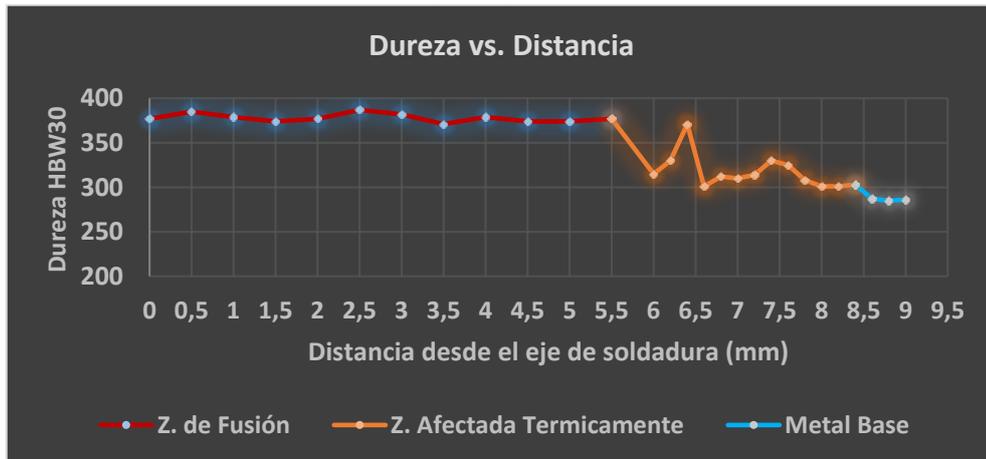
Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
6	Colocación de la probeta dentro del microdurómetro. Realización del ensayo de microdureza. Aplicación de la precarga. Aplicación de la carga completa.	-Probetas de ensayo de microdureza -Microdurómetro	1 - 2 min/huella	
7	Corrección de las mediciones de las diagonales de la huella en caso de ser necesario.	-Probetas de ensayo de microdureza -Microdurómetro	1 - 2 min/huella	
8	Desmontaje de la probeta del microdurómetro. Evaluación de las microdurezas y exportación de los resultados a un archivo xls.	-Microdurómetro	5 min	
9	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo MDR.	-Computador -Registro de inspección -Registro fotográfico	10 - 20 min	

Fuente: Autores

#### 4.6.2.2 Resultados

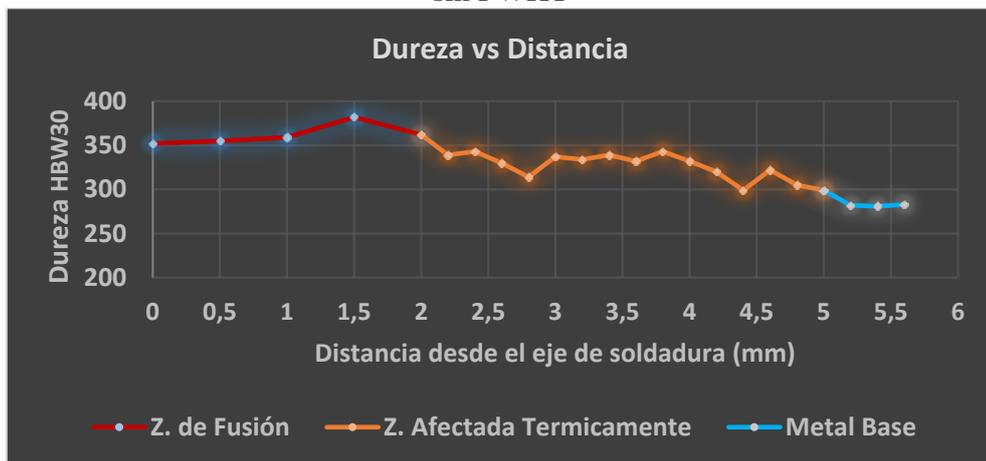
Los ensayos de microdureza se realizaron en las muestras de los cupones de soldadura obtenidas del corte transversal. Fueron realizadas mediciones a lo largo de líneas que atraviesan las tres principales zonas del pozo de soldadura, la línea 1 se encuentran a 3 mm del borde de la muestra, mientras la línea 2 atraviesa el centro de la junta. En las gráficas siguientes, se presentan los resultados obtenidos para muestras antes y después del PWHT.

Figura 114. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT



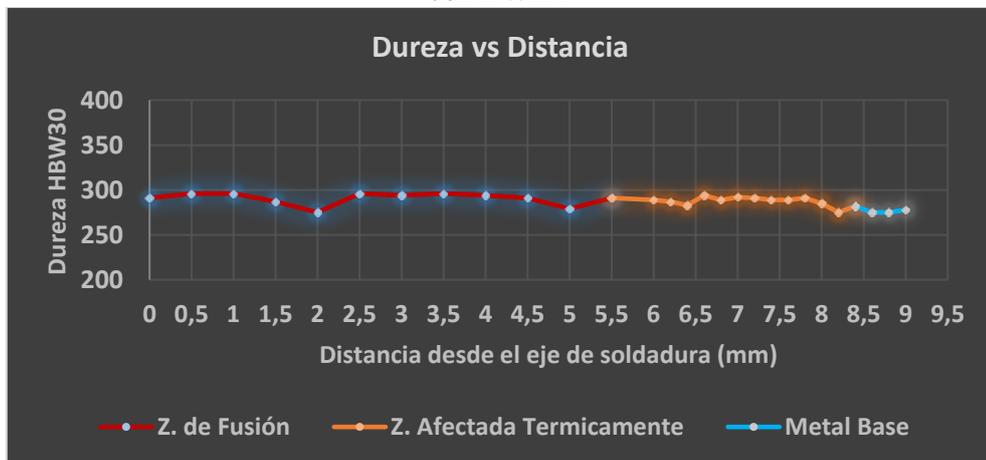
Fuente: Autores

Figura 115. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 1 sin PWHT



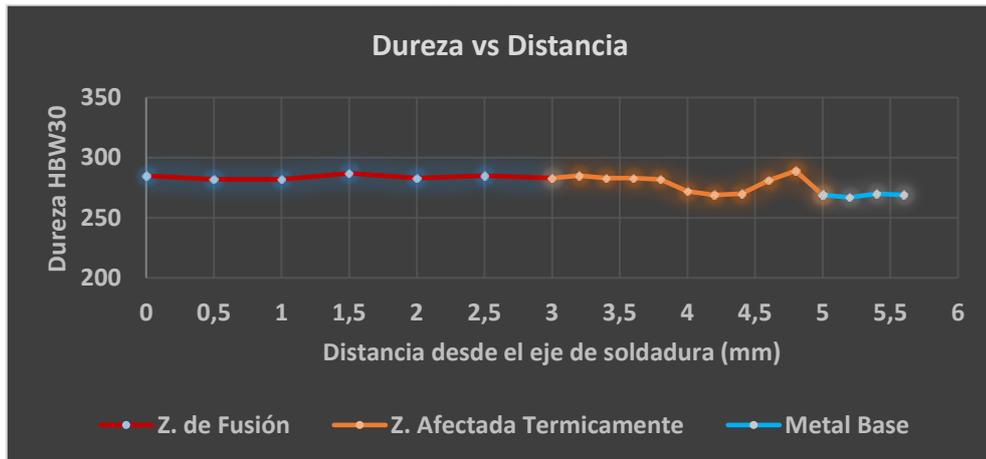
Fuente: Autores

Figura 116. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT



Fuente: Autores

Figura 117. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 1 con PWHT



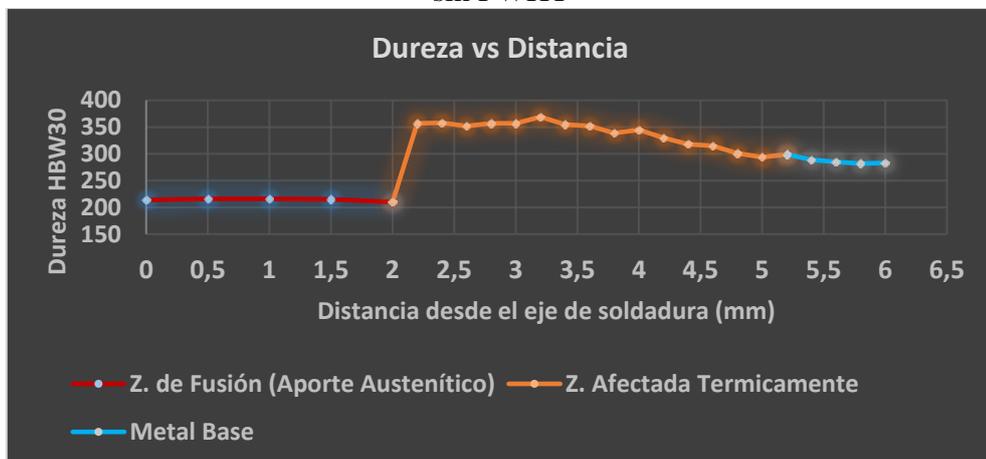
Fuente: Autores

Figura 118. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT



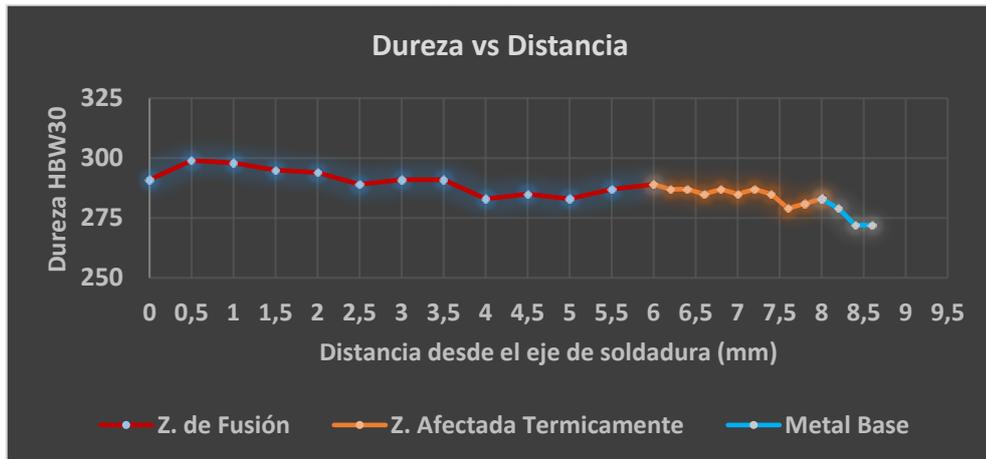
Fuente: Autores

Figura 119. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 2 sin PWHT



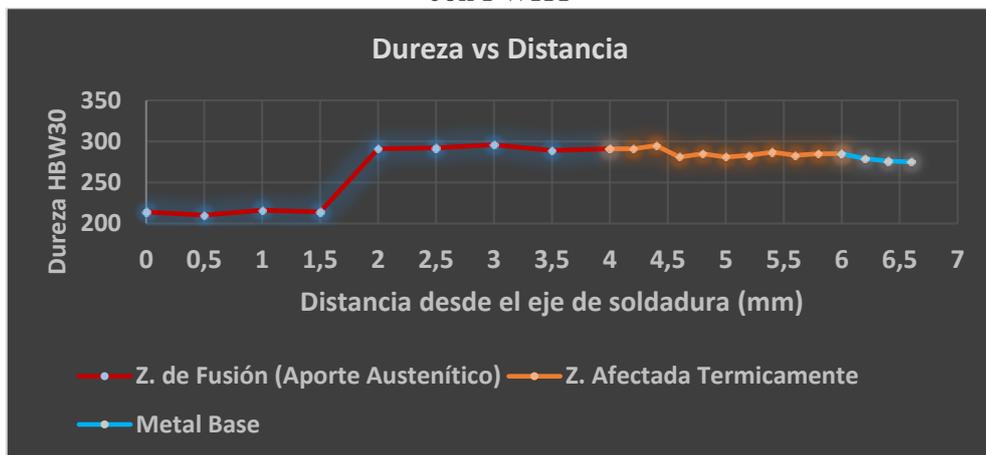
Fuente: Autores

Figura 120. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT



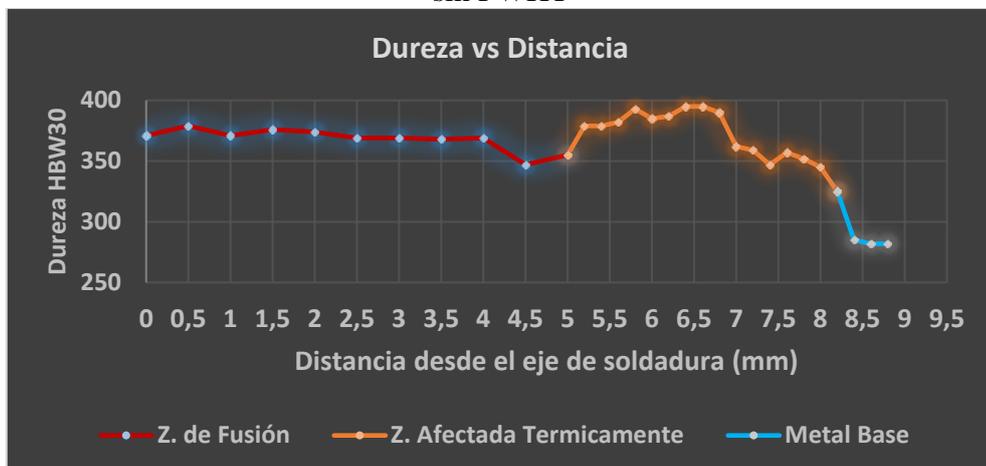
Fuente: Autores

Figura 121. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 2 con PWHT



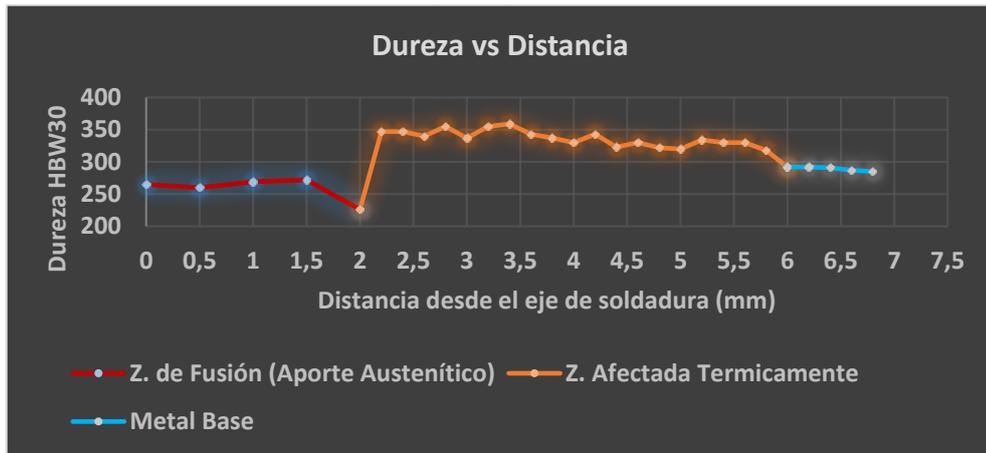
Fuente: Autores

Figura 122. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 sin PWHT



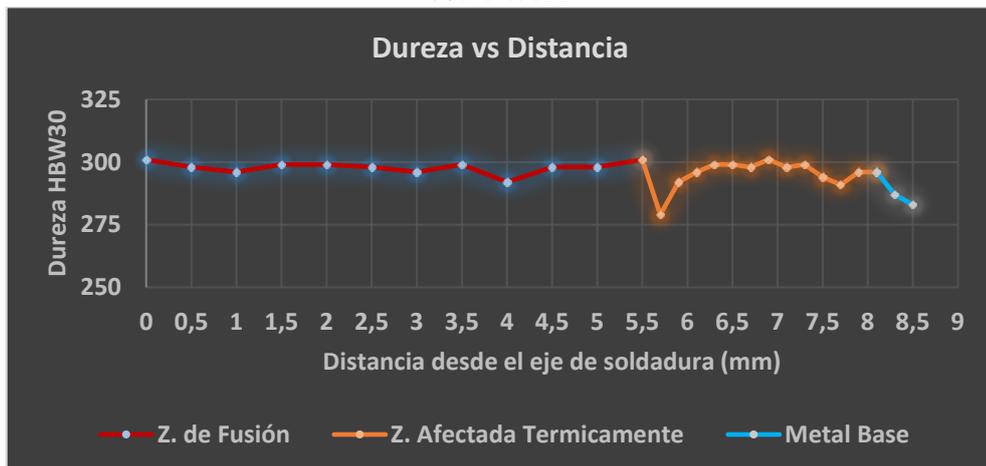
Fuente: Autores

Figura 123. Mediciones de dureza HBW30 de línea 2 de la muestra del procedimiento 3 sin PWHT



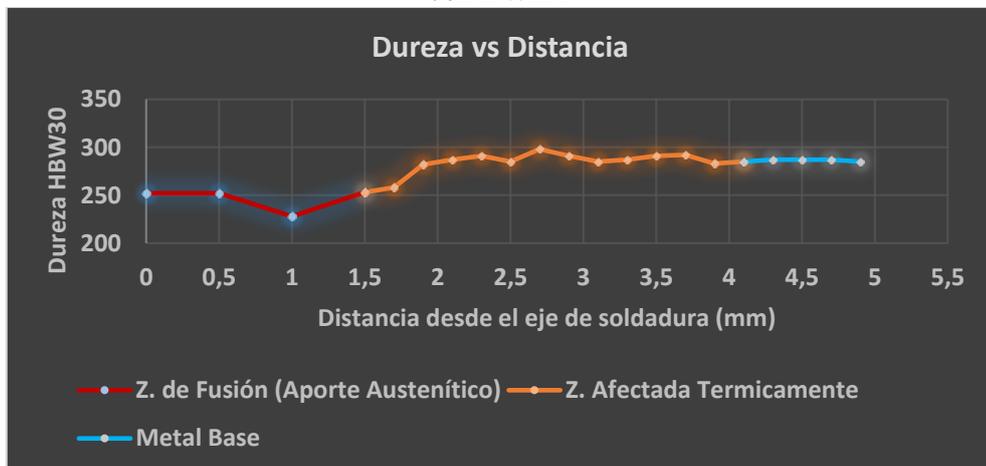
Fuente: Autores

Figura 124. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT



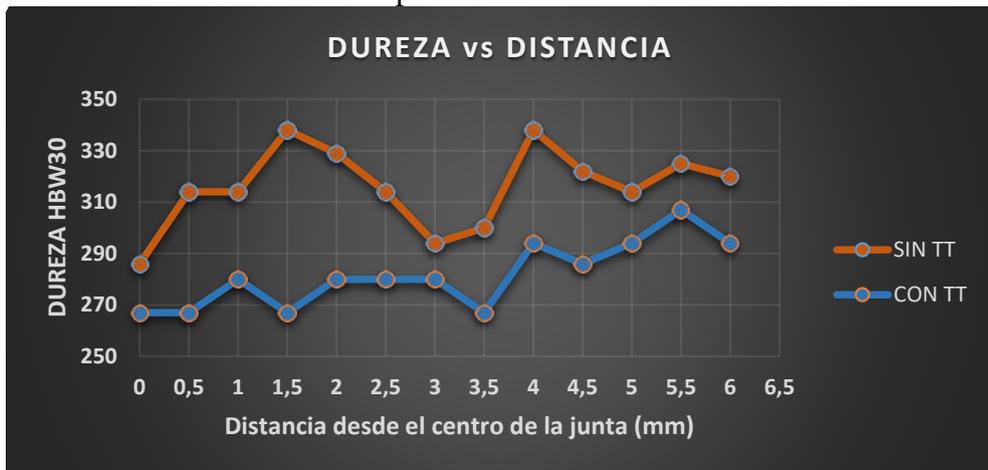
Fuente: Autores

Figura 125. Mediciones de dureza HBW30 de línea 1 de la muestra del procedimiento 3 con PWHT



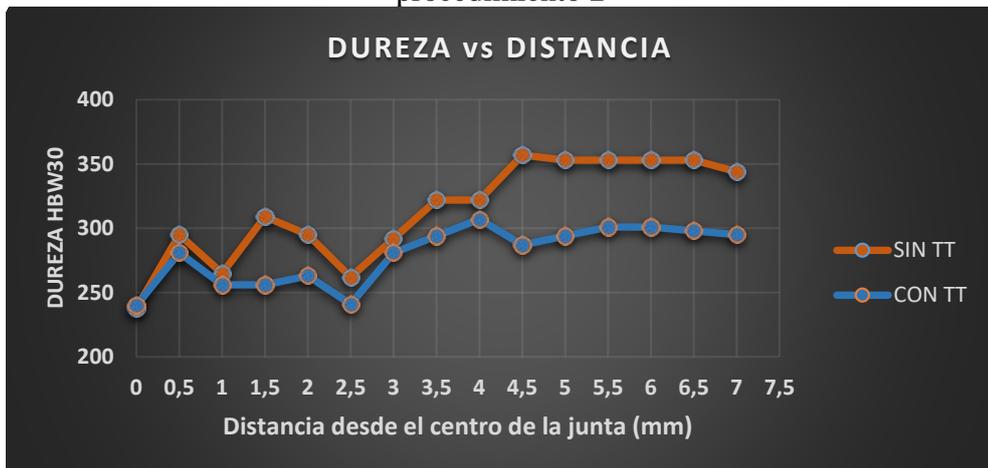
Fuente: Autores

Figura 126. Mediciones de dureza HBW30 en el eje vertical de la muestra del procedimiento 1



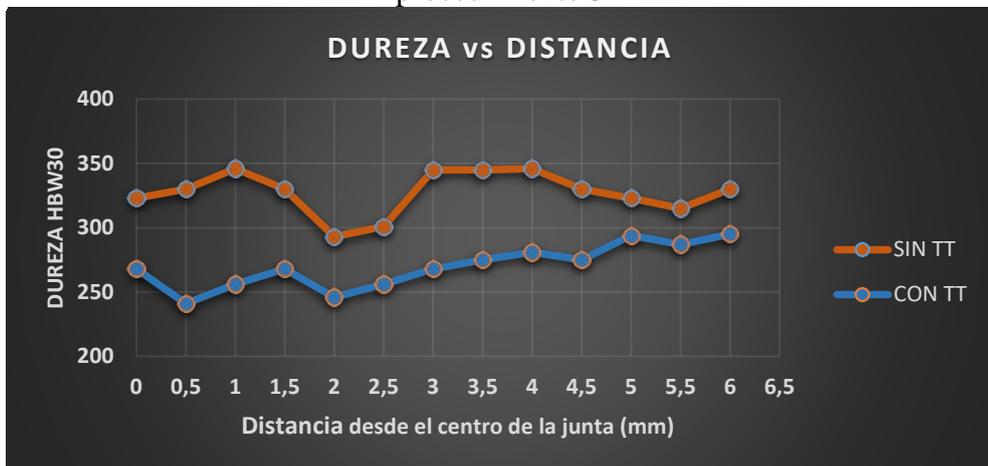
Fuente: Autores

Figura 127. Mediciones de dureza HBW30 en el eje vertical de la muestra del procedimiento 2



Fuente: Autores

Figura 128. Mediciones de dureza HBW30 en el eje vertical de la muestra del procedimiento 3



Fuente: Autores

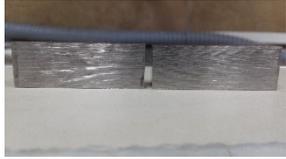
## 4.7 Ensayos de metalografía

Los ensayos de metalografía se realizaron en las instalaciones del CIRT. Se empleó un microscopio metalográfico marca Olympus GX-51 para la realización del ensayo, y varios equipos de marca Struers para el acondicionamiento de las muestras, siguiendo la metodología indicada en el apartado 3.6.3.

### 4.7.1 Procedimiento de metalografía

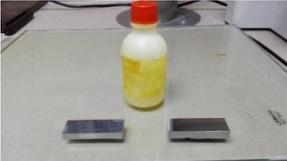
El acondicionamiento de las muestras metalográficas fue realizado de acuerdo al estándar ASTM E3, posteriormente se realizó el ataque químico/electro-químico para revelar las microestructuras y analizar inclusiones, fases, y mediciones comparativas del tamaño de las agujas de la martensita.

Tabla 82. Procedimiento de preparación de muestras y análisis metalográfico en muestras de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
1	Revisión previa de documentos para la realización del ensayo. Registro del ensayo de metalografía.	-Procedimiento CIRT-INS-MG-17 -Registro del ensayo digital o impreso	10 min	
2	Medición de las condiciones ambientales del lugar del ensayo (temperatura y humedad adecuada).	-Termohigrómetro	5 min	
3	Corte metalográfico en frío del espécimen de análisis mediante Labotom.	-Labotom -Especímen para analizar -EPP	2 - 5 min	
4	Limpieza superficial del componente (remoción de grasa, arena, moho, polvo, etc; desigualdades o irregularidades).	-Limpiador líquido -Paños o liencillos que no desprendan hilos o pelusas -Cepillo de acero o amoladora	2 - 5 min	

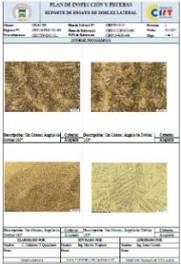
Fuente: Autores

Tabla 82. (Continuación) Procedimiento de preparación de muestras y análisis metalográfico en muestras de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
5	En caso de poseer muestras muy pequeñas (díficiles de manipular), montarlas en resina epóxica, baquelita u otro polímero mediante CitoPress.	-CitoPress -Especímen para analizar -EPP	15 - 20 min	
6	Desbaste progresivo con discos de diamante aglomerado en resina en LaboPol.	-LaboPol -Especímen para analizar -Discos abrasivos de 80, 120, 500 y 1200 granos/in -Lijas de SiC de 1500 y 2000 granos/in -EPP	25 - 40 min/espe cimen	
7	Pulido progresivo con discos de paños de tela suave y pasta de diamante/alúmina (Al2O3) en LaboPol.	-LaboPol -Especímen para analizar -Discos de paño -Pasta de diamante de 9, 6 y 1 um -Alúmina de 1, 0.3 y 0.1 um -EPP	10 - 20 min/espe cimen	
8	Observación y análisis de las inclusiones presentes mediante microscopio metalográfico.	-Microscopio metalográfico -Objetivo de 10X -Computador -Especímen para analizar	5 - 10 min/espe cimen	
9	Preparación y ataque químico con reactivo Vilella's para revelar microestructura de acero inoxidable martensítico.	-Especímen para analizar -Reactivo Vilella's -Pipeta o gotero -Algodón -EPP	5 - 10 min/espe cimen	

Fuente: Autores

Tabla 82. (Continuación) Procedimiento de preparación de muestras y análisis metalográfico en muestras de ASTM A743 CA-6NM

Etapa	Descripción	Materiales	Tiempo	Gráfico
10	Preparación y ataque electrolítico con reactivo Ácido Oxálico al 10% para revelar microestructura de acero inoxidable austenítico mediante MoviPol.	-Especímen para analizar -Reactivo Ácido Oxálico al 10% -MoviPol -EPP	5 - 15 min/espe cimen	
11	Observación y análisis de las microestructuras presentes mediante microscopio metalográfico.	-Microscopio metalográfico -Objetivos de 5X, 10X, 20X, 50X y 100X -Computador -Especímen para analizar	10 - 30 min/espe cimen	
12	Análisis de fases, medición de tamaño de grano, registro fotográfico de zonas del pozo de soldadura y alrededores.	-Microscopio metalográfico -Objetivos de 5X, 10X, 20X, 50X y 100X -Computador -Software Stream Basic -Especímen para analizar	20 - 40 min/espe cimen	
13	Cuantificación y procesamiento de los datos obtenidos. Realización del reporte del ensayo MG.	-Computador -Registro del ensayo -Registro fotográfico	40 - 80 min	

Fuente: Autores

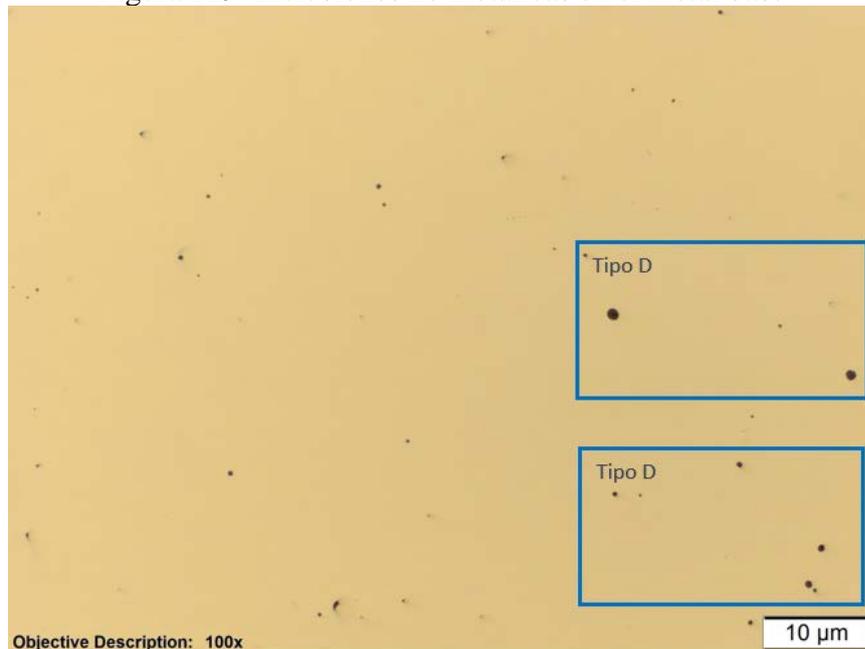
#### 4.7.2 Resultados

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en el análisis metalográfico para las muestras desarrolladas bajo los tres procedimientos de soldadura, donde se muestra una comparativa entre las muestras antes y después del PWHT.

#### 4.7.2.1 *Análisis de inclusiones no metálicas*

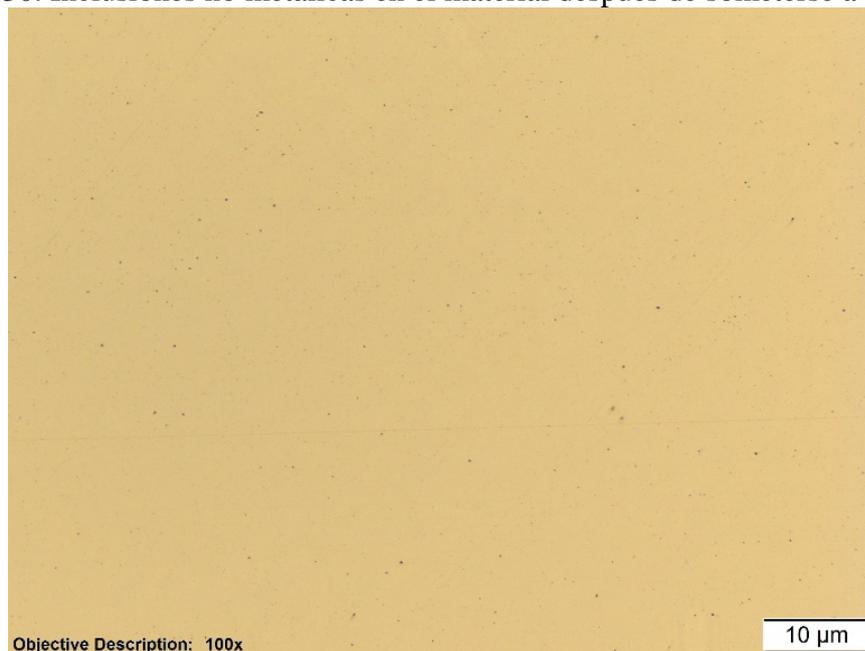
La Figura 129 constituye una micrografía a 100X del metal base en estado de suministro, donde se observa la presencia de inclusiones no metálicas tipos D óxidos globulares con una densidad de 1 ½ de acuerdo al método Worst Fields bajo la norma ASTM.

Figura 129. Inclusiones no metálicas en el metal base



Fuente: Autores

Figura 130. Inclusiones no metálicas en el material después de someterse a soldadura



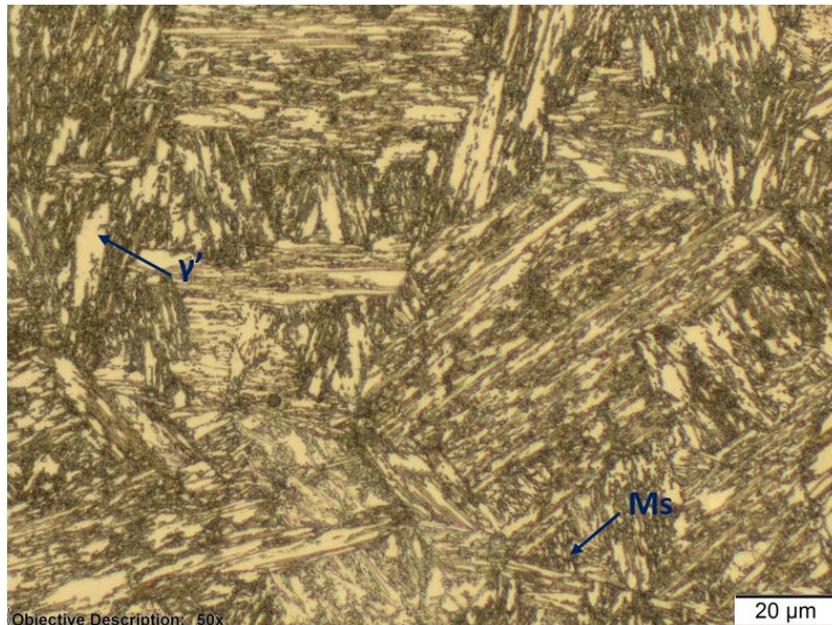
Fuente: Autores

De igual manera una vez realizado el procedimiento de soldadura se procedió a realizar el análisis de inclusiones cuyo resultado se muestra en la Figura 130, se observa que la densidad de inclusiones ha disminuido considerablemente, esto podría indicar que probablemente estas inclusiones debido al aporte de calor de la soldadura han migrado hacia los límites de grano.

#### 4.7.2.2 *Microestructura presente en el metal base*

La Figura 131 corresponde a la micrografía del metal base acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM en estado de suministro, obtenida a una magnificación de 500X y atacada químicamente mediante el reactivo Vilella, empleando campo claro.

Figura 131. Microestructura del acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM



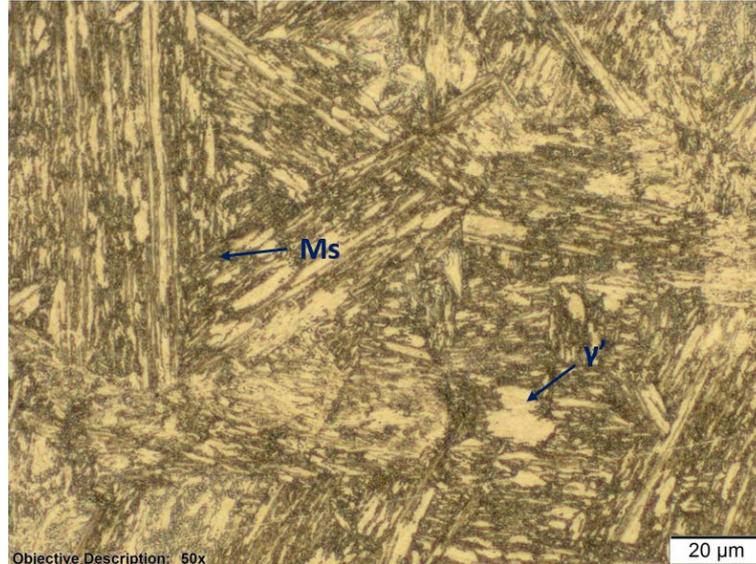
Fuente: Autores

#### 4.7.2.3 *Microestructura presente en el procedimiento CIRT/16-WPS-001*

Las siguientes micrografías fueron obtenidas a una magnificación de 500X y atacadas químicamente mediante el reactivo Vilella, empleando campo claro.

En la Figura 132 se muestra la microestructura presente en la zona afectada térmicamente antes del tratamiento térmico post soldadura, la cual se caracteriza principalmente por la presencia en su totalidad de martensita revenida (Ms) y austenita retenida ( $\gamma'$ ).

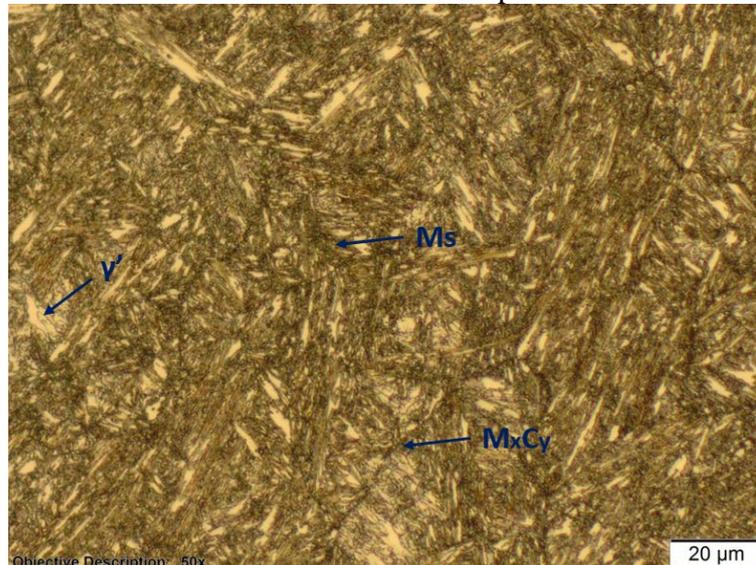
Figura 132. Microestructura de la ZAT sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-001



Fuente: Autores

La Figura 133 corresponde a la zona afectada térmicamente después de tratamiento térmico post soldadura donde se presentan, a más de los mismos componentes microestructurales (Ms,  $\gamma'$ ) carburos ( $M_xC_y$ ) y una reducción en el tamaño de los listones de martensita.

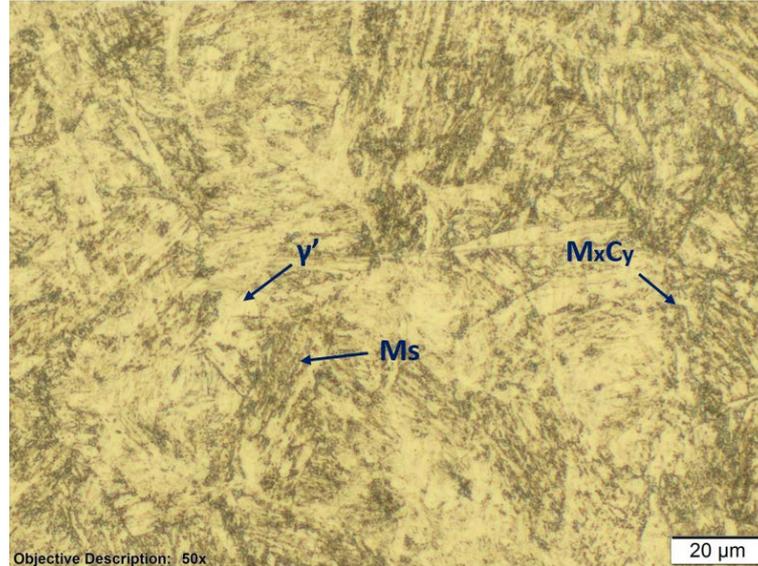
Figura 133. Microestructura de la ZAT con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-001



Fuente: Autores

La Figura 134 representa la microestructura de la zona fundida antes del tratamiento térmico post soldadura, se observa presencia de martensita revenida (Ms), austenita retenida ( $\gamma'$ ) y carburos ( $M_xC_y$ ).

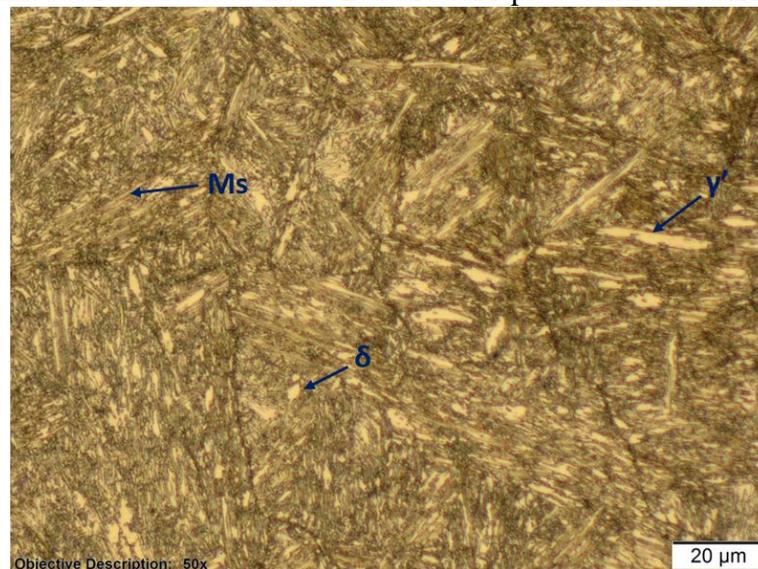
Figura 134. Microestructura de la ZF sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-001



Fuente: Autores

La Figura 135 corresponde a la zona fundida después de tratamiento térmico post soldadura donde existe presencia de martensita revenida y austenita retenida, además se observan pequeñas islas de ferrita ( $\delta$ ), reducción en el tamaño de los listones de martensita y límites de grano más marcados.

Figura 135. Microestructura de la ZF con del PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-001



Fuente: Autores

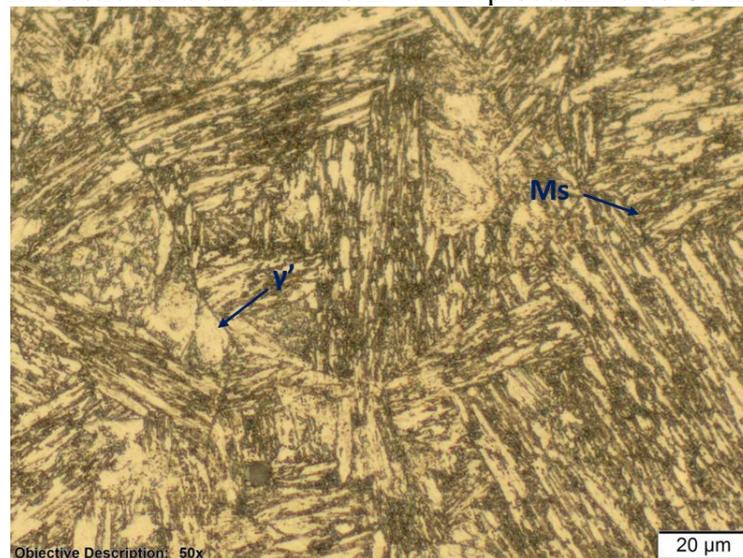
#### 4.7.2.4 Microestructura presente en el procedimiento CIRT/16-WPS-002

Las micrografías mostradas a continuación fueron obtenidas a una magnificación de

500X y el ataque químico para el material de aporte martensítico se realizó con Vilella, mientras que para el material de aporte austenítico se realizó ataque electrolítico.

La Figura 136 corresponde a la ZAT antes del PWHT, la cual se caracteriza principalmente por la presencia de martensita revenida (Ms) y austenita retenida ( $\gamma'$ ).

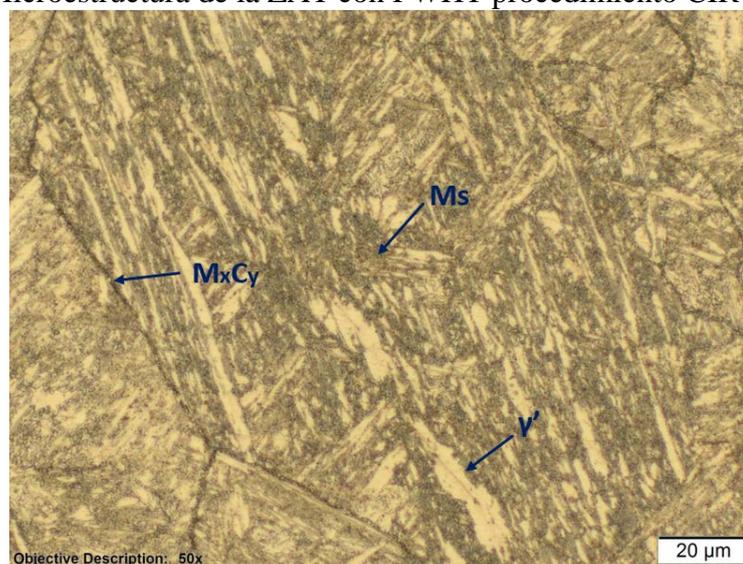
Figura 136. Microestructura de la ZAT sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002



Fuente: Autores

La Figura 137 corresponde a la ZAT después del PWHT donde existe presencia de martensita revenida, austenita retenida, carburos ( $M_xC_y$ ), se evidencia una reducción en el tamaño de los listones de martensita y límites de grano más marcados.

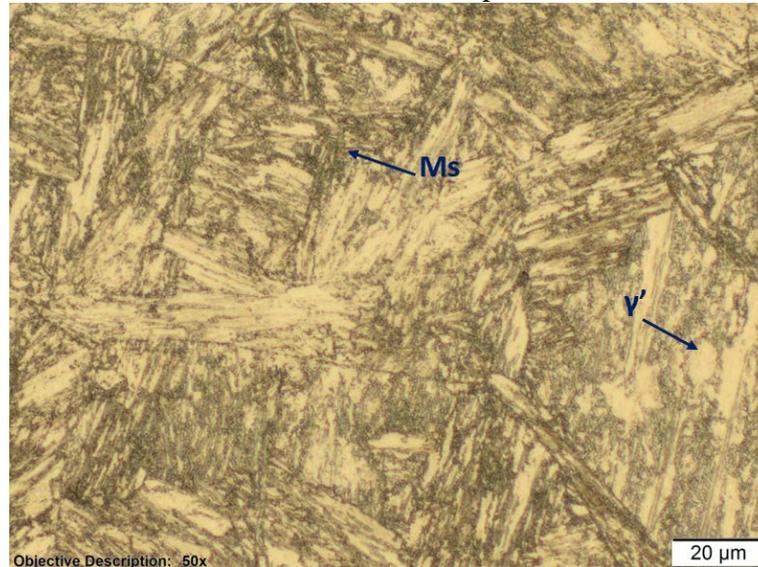
Figura 137. Microestructura de la ZAT con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002



Fuente: Autores

La Figura 138 corresponde a la zona fundida del material de aporte martensítico antes del tratamiento térmico post soldadura, en donde se observa principalmente presencia de martensita revenida (Ms) y austenita retenida ( $\gamma'$ ).

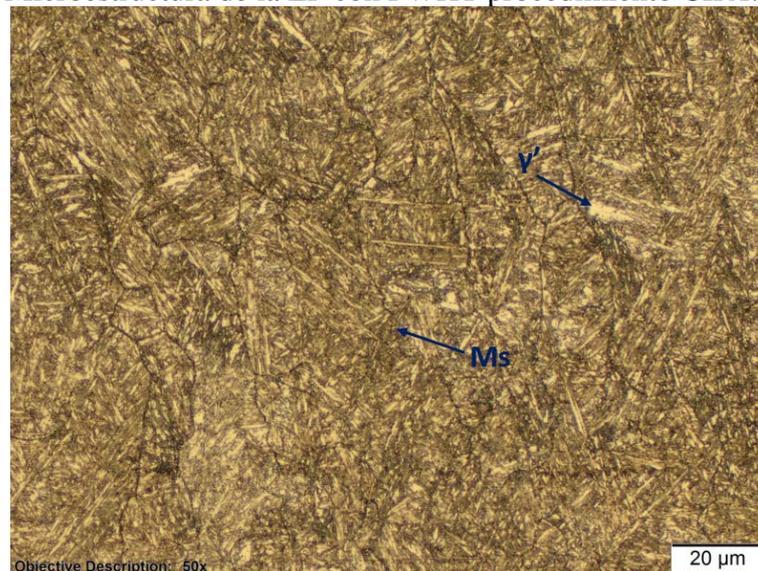
Figura 138. Microestructura de la ZF sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002



Fuente: Autores

La Figura 139 corresponde a la zona fundida del material de aporte martensítico después del tratamiento térmico post soldadura, donde existe presencia de martensita revenida, austenita retenida en menor cantidad, además se evidencia una reducción en el tamaño de los listones de martensita y límites de grano más marcados.

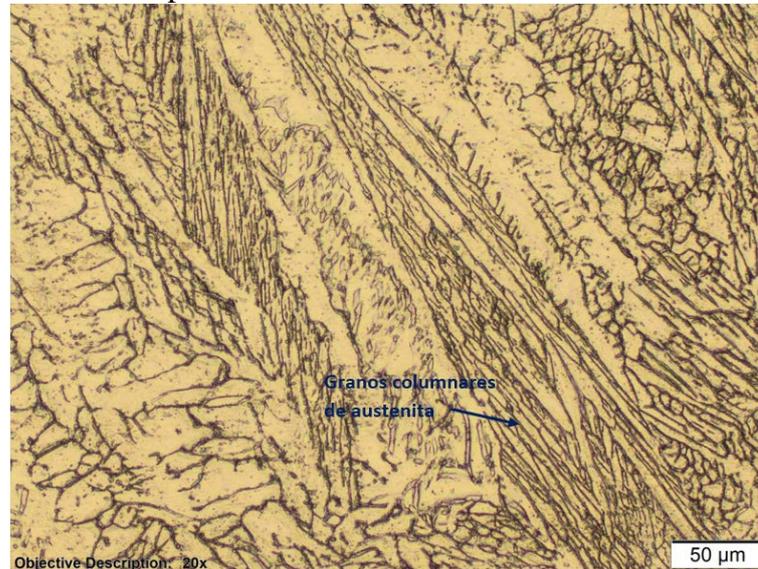
Figura 139. Microestructura de la ZF con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002



Fuente: Autores

La Figura 140 corresponde a una micrografía a 200X de magnificación, de la ZF del material de aporte austenítico antes del PWHT, revelada con ataque electrolítico de ácido oxálico, en donde se observa granos austeníticos de tipo columnar dendrítico.

Figura 140. Microestructura de la ZF del material de aporte austenítico sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002



Fuente: Autores

En la Figura 141 se puede observar la micrografía a una magnificación de 200X de la zona fundida del material de aporte austenítico después del tratamiento térmico post soldadura, en donde los granos austeníticos ahora se presentan de forma más equiaxial.

Figura 141. Microestructura de la ZF del material de aporte austenítico con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-002



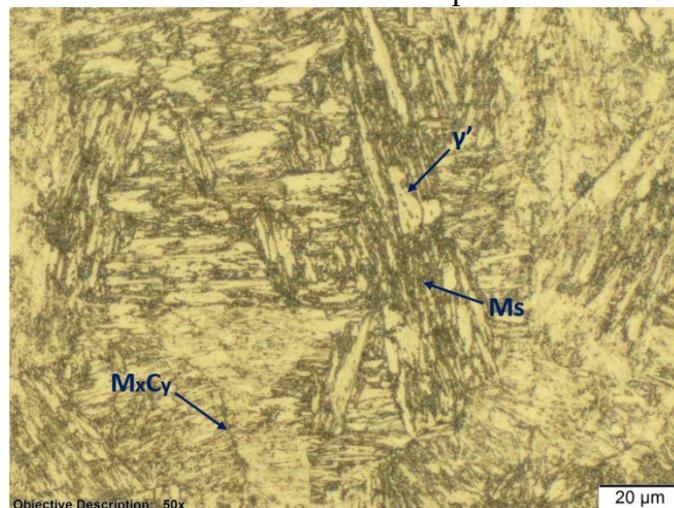
Fuente: Autores

#### 4.7.2.5 Microestructura presente en el procedimiento CIRT/16-WPS-003

Las micrográficas tienen una magnificación de 500X, el ataque químico para el material de aporte martensítico es el reactivo Vilella, para el aporte austenítico ataque electrolítico.

La Figura 142 corresponde a la ZAT sin PWHT, donde existe presencia de martensita revenida (Ms), austenita retenida ( $\gamma'$ ) y carburos ( $M_xC_y$ ) en los límites de grano.

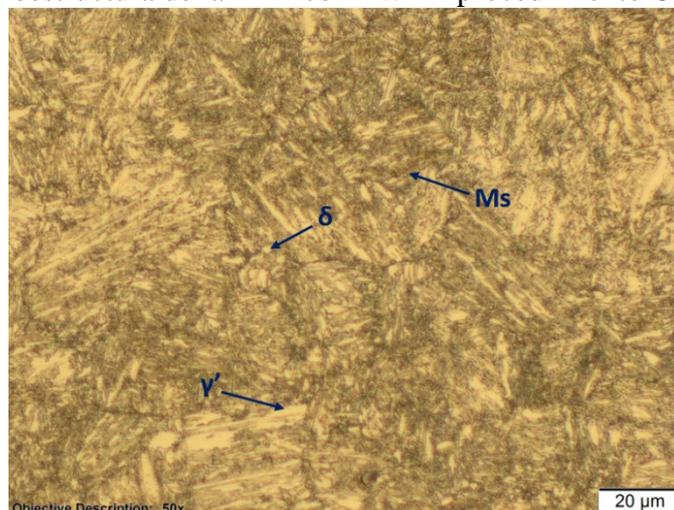
Figura 142. Microestructura de la ZAT sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003



Fuente: Autores

La Figura 143 corresponde a la ZAT con PWHT existe presencia de martensita revenida, austenita retenida, islas de ferrita delta y una reducción en el tamaño de los listones de martensita.

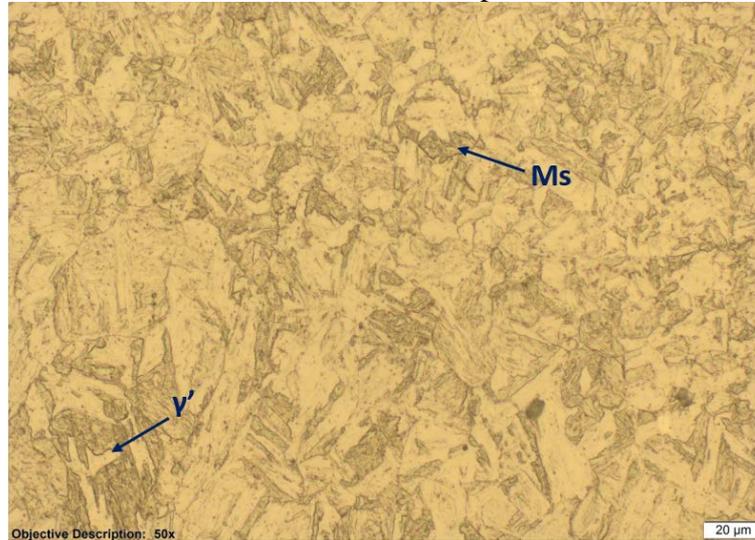
Figura 143. Microestructura de la ZAT con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003



Fuente: Autores

La Figura 144 corresponde a la zona fundida del material de aporte martensítico antes del tratamiento térmico post soldadura, en donde se observa principalmente presencia de martensita revenida (Ms) y austenita retenida ( $\gamma'$ ).

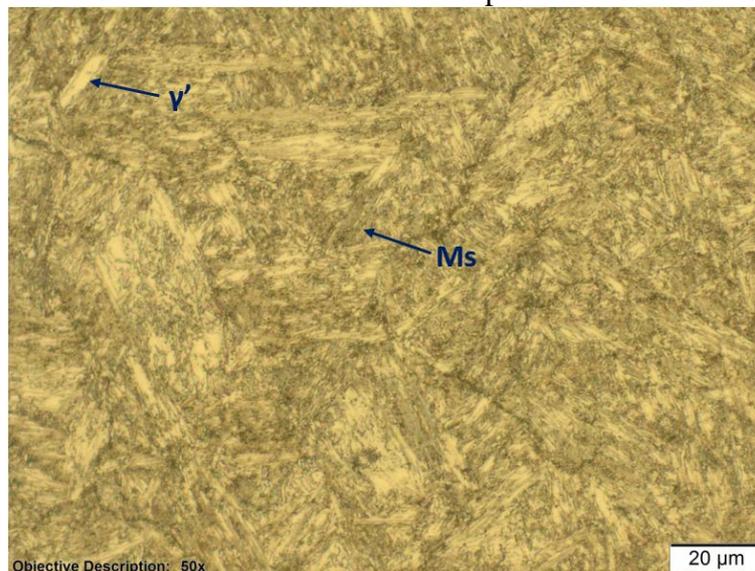
Figura 144. Microestructura de la ZF sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003



Fuente Autores

La Figura 145 corresponde a la zona fundida del material de aporte martensítico después del tratamiento térmico post soldadura, donde existe presencia de martensita revenida, austenita retenida en menor cantidad en comparación a la muestra sin PWHT, además se evidencia una reducción en el tamaño de los listones de martensita y límites de grano más marcados.

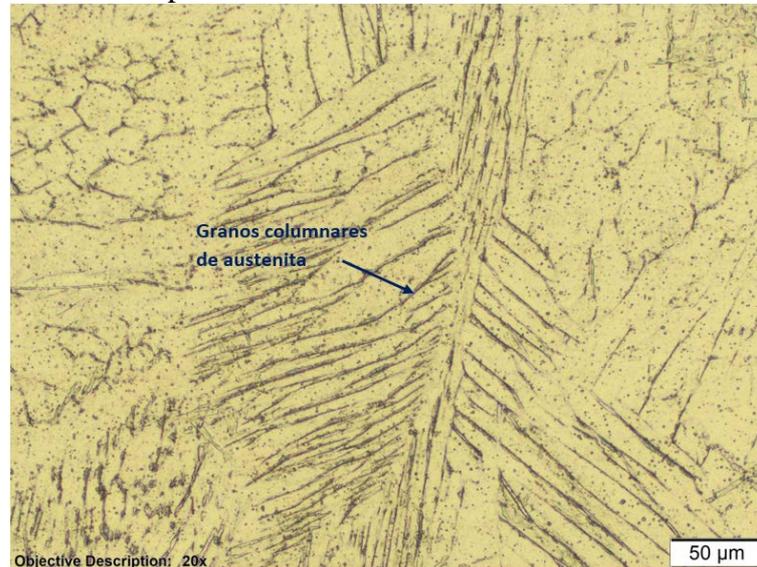
Figura 145. Microestructura de la ZF con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003



Fuente: Autores

En Figura 146 la se puede observar la micrografía a una magnificación de 200X de la zona fundida del material de aporte austenítico antes del tratamiento térmico post soldadura, en donde se observa granos austeníticos de tipo columnar dendrítico.

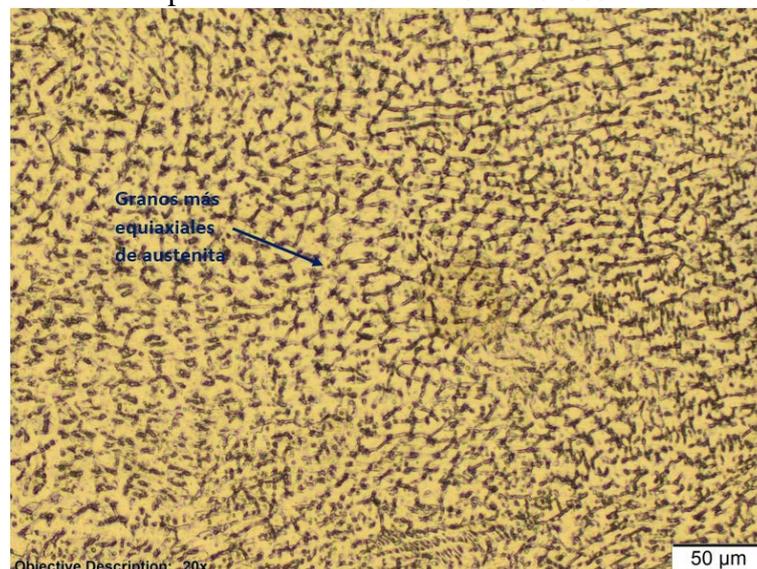
Figura 146. Microestructura de la ZF del material de aporte austenítico sin PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003



Fuente: Autores

En la Figura 147 se puede observar la micrografía a una magnificación de 200X de la zona fundida del material de aporte austenítico después del tratamiento térmico post soldadura, en donde los granos austeníticos ahora se presentan de forma más equiaxial.

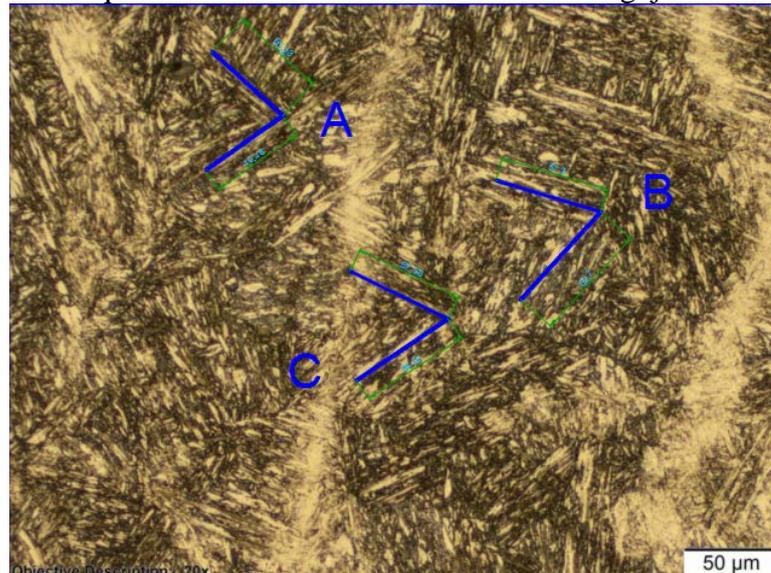
Figura 147. Microestructura de la ZF del material de aporte austenítico con PWHT procedimiento CIRT/16-WPS-003



Fuente: Autores

Se observó además una disminución del tamaño de las agujas de la martensita como efecto del PWHT en la zona afectada térmicamente y zona de fusión, las cuales fueron medidas usando el software Stream Basic de Olympus, en la Figura 148 se puede observar el procedimiento que consistió en tomar tres muestras y cuantificar la longitud de cada uno de los lados para finalmente obtener un promedio, los resultados para los tres procedimientos de soldadura se muestran a continuación en las siguientes tablas.

Figura 148. Esquema de mediciones de tamaño de las agujas de martensita



Fuente: Autores

Tabla 83. Medición del tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZAT para el procedimiento CIRT/16-WPS-001

Muestra	ZAT sin PWHT			ZAT con PWHT		
	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial
A	57,31	56,61	56,96	44,68	42,77	43,725
B	57,58	58,06	57,82	41,05	44,9	42,975
C	57,3	62,7	60	43,92	46,19	45,055
	<b>Promedio Total</b>		<b>58,26</b>	<b>Promedio Total</b>		<b>43,92</b>

Fuente: Autores

Tabla 84. Medición del tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZF para el procedimiento CIRT/16-WPS-001

Muestra	ZF sin PWHT			ZF con PWHT		
	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial
A	56,63	55,38	56,005	37,35	39,91	38,63
B	65,05	67,62	66,335	47,73	50,42	49,075
C	52,6	54,92	53,76	35,73	40,7	38,215
	<b>Promedio Total</b>		<b>58,7</b>	<b>Promedio Total</b>		<b>41,97</b>

Fuente: Autores

Tabla 85. Medición del tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZAT para el procedimiento CIRT/16-WPS-002

Muestra	ZAT sin PWHT			ZAT con PWHT		
	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial
A	42,45	40,66	41,555	37,22	37,88	37,55
B	41,2	40,27	40,735	36,33	33,37	34,85
C	45,36	46,05	45,705	37,85	40,79	39,32
	<b>Promedio Total</b>		42,67	<b>Promedio Total</b>		37,24

Fuente: Autores

Tabla 86. Medición de tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZF para el procedimiento CIRT/16-WPS-002

Muestra	ZF sin PWHT			ZF con PWHT		
	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial
A	44,14	45,34	44,74	27,22	27,77	27,495
B	49,19	41,19	45,19	28,44	30,41	29,425
C	48,46	37,85	43,155	28,75	29,28	29,015
	<b>Promedio Total</b>		44,36	<b>Promedio Total</b>		28,65

Fuente: Autores

Tabla 86. Medición de tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZAT para el procedimiento CIRT/16-WPS-003

Muestra	ZAT sin PWHT			ZAT con PWHT		
	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial
A	44,24	45,15	44,70	29,04	30,6	29,82
B	50,15	51,28	50,72	28,83	30,66	29,75
C	44,21	46,67	45,44	29,41	30,89	30,15
	<b>Promedio Total</b>		46,95	<b>Promedio Total</b>		29,91

Fuente: Autores

Tabla 87. Medición de tamaño de las agujas de martensita ( $\mu\text{m}$ ) en la ZF para el procedimiento CIRT/16-WPS-003

Muestra	ZF sin PWHT			ZF con PWHT		
	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial	Lado 1	Lado 2	Prom. Parcial
A	42,63	38,51	40,57	39,54	29,83	34,69
B	44,13	41,08	42,61	41,84	37,11	39,48
C	42,03	38,26	40,15	39,20	33,42	36,31
	<b>Promedio Total</b>		41,11	<b>Promedio Total</b>		36,82

Fuente: Autores

Se muestra una reducción del tamaño de las agujas de la martensita en un promedio de 24.61%, 28.5%, 12.71%, 35.41%, 36.29% y 20.21% para los cupones N°1, N°2, N°3, N°4, N°5 y N°6 respectivamente. A través de los ensayos de dureza se corroboró la

influencia directa del tamaño de grano con la dureza producida, encontrándose también este efecto antes del PWHT en el centro de la junta (raíz), donde recibe los pases de relleno, los cuales a través de su aporte de calor producen un revenido parcial.

## CAPÍTULO V

### 5. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se mostrarán de manera comparativa los resultados generales obtenidos en la realización de ensayos no destructivos sobre los 6 cupones de soldadura, además se presentarán las gráficas con los valores de dureza y microdureza de las muestras antes y después del PWHT donde se evidenciará el efecto del tratamiento térmico, una vez que se presentaron los resultados obtenidos por medio del ensayo de tracción se comparará la influencia del material de aporte y las características de los tres procedimientos de soldadura y su afectación en las propiedades mecánicas, finalmente se compararán los resultados del análisis metalográfico y características micro estructurales antes y después del tratamiento térmico.

#### 5.1 Resultados por inspección no destructiva

En la Tabla 88 se muestra de manera resumida el total de discontinuidades encontradas por inspección con END bajo los métodos VT, PT, MT, UT y la calificación para cada uno de los cupones de acuerdo a los criterios de aceptación ya establecidos para cada caso.

Tabla 88. Resultados de inspección no destructiva en los cupones de soldadura

PROCEDIMIENTO	Cupón	VT	PT	MT	UT	Calificación
CIRT/16-WPS-001	N°1	4	1	1	1	Rechazado
	N°2	0	0	0	0	Aprueba
CIRT/16-WPS-002	N°1	0	0	0	0	Aprueba
	N°2	0	0	0	1	Aprueba
CIRT/16-WPS-003	N°1	0	0	0	1	Aprueba
	N°2	0	0	0	0	Aprueba

Fuente: Autores

Solamente el cupón N°1 realizado con el procedimiento CIRT/16-WPS-001 es rechazado debido a una discontinuidad que ha sido clasificada como falta de penetración y por su magnitud ha sido revelada por los 4 tipos de END, en tanto que los demás cupones son aceptados pues no presentan discontinuidades relevantes.

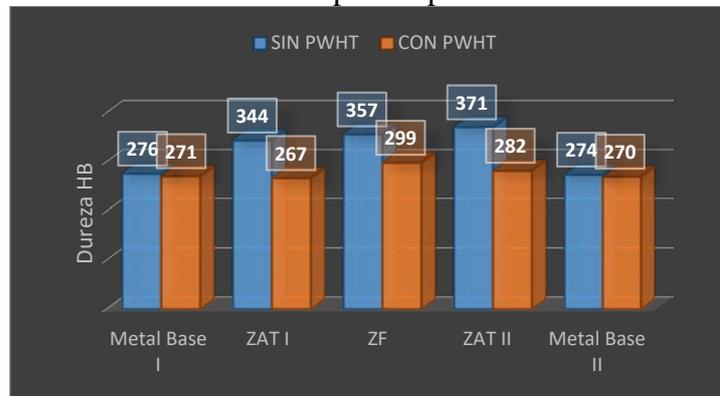
## 5.2 Resultados del ensayo de dureza

Las gráficas que se muestran a continuación permiten comparar el efecto del PWHT sobre la dureza del material en las distintas zonas ensayadas.

### 5.2.1 Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-001

La Figura 149 muestra la comparación antes y después del PWHT de los valores de dureza sobre la línea 1.

Figura 149. Dureza sobre la línea 1 para el procedimiento CIRT/16-WPS-001

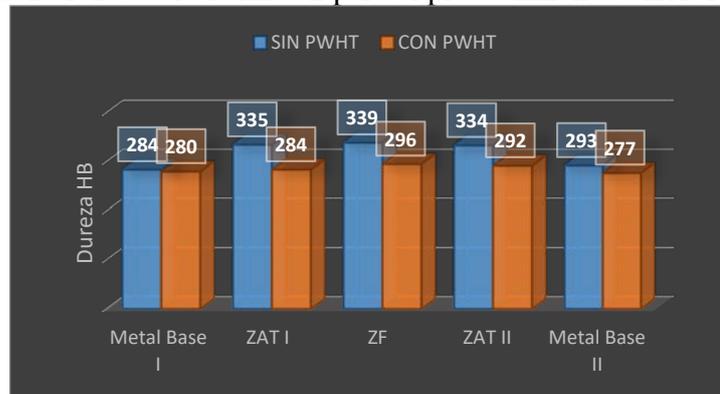


Fuente: Autores

En la zona de fusión se registra el valor de dureza más elevado con 299 HB, sin embargo, el efecto del tratamiento térmico es evidente.

La Figura 150 muestra la comparación antes y después del PWHT de los valores de dureza sobre la línea 2.

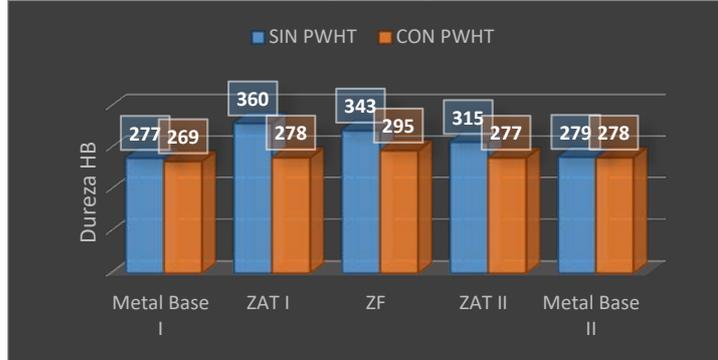
Figura 150. Dureza sobre la línea 2 para el procedimiento CIRT/16-WPS-001



Fuente: Autores

La Figura 151 muestra la comparación antes y después del PWHT de los valores de dureza sobre la línea 3.

Figura 151. Dureza sobre la línea 3 para el procedimiento CIRT/16-WPS-001



Fuente: Autores

La ZF presenta mayor dureza con 295 HB. Finalmente en la Tabla 89 se presenta el porcentaje de reducción de la dureza evidenciada para el proceso CIRT/16-WPS-001.

Tabla 89. Reducción de dureza en el procedimiento CIRT/16-WPS-001

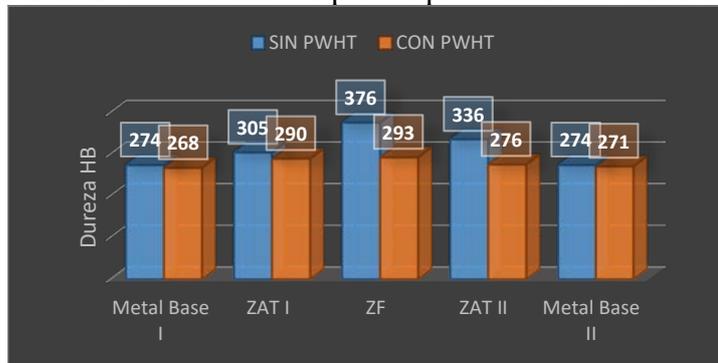
Línea 1	Línea 2	Línea 3
19,40%	12,68%	18,06%

Fuente: Autores

### 5.2.2 Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-002

La Figura 152 muestra la comparación antes y después del PWHT de los valores de dureza sobre la línea 1.

Figura 152. Dureza sobre la línea 1 para el procedimiento CIRT/16-WPS-002

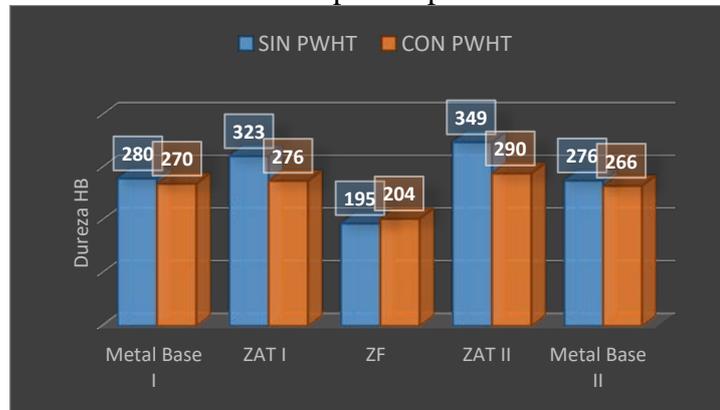


Fuente: Autores

El mayor valor de dureza registrado se presenta en la zona de fusión con 293 HB.

La Figura 153 muestra la comparación antes y después del PWHT de los valores de dureza sobre la línea 2.

Figura 153. Dureza sobre la línea 2 para el procedimiento CIRT/16-WPS-002

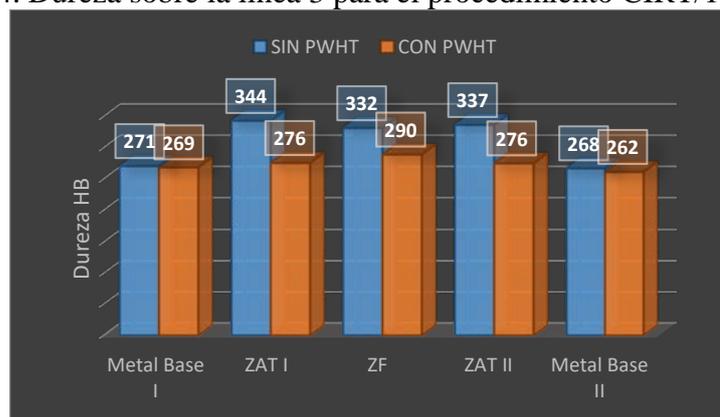


Fuente: Autores

Al ser el material de aporte en la raíz de tipo austenítico, como era de esperarse el tratamiento térmico post soldadura no ha producido cambios significativos en su dureza, mientras tanto en las otras zonas el efecto es evidente donde se registra el mayor valor en la zona afectada térmicamente II con 290 HB.

La Figura 154 muestra la comparación antes y después del PWHT de los valores de dureza sobre la línea 3.

Figura 154. Dureza sobre la línea 3 para el procedimiento CIRT/16-WPS-002



Fuente: Autores

Sobre la línea 3 después del PWHT en la zona fundida se presenta el mayor valor de dureza con 290 HB, finalmente en la Tabla 90 se presenta el porcentaje de reducción de dureza evidenciada para el procedimiento CIRT/16-WPS-002.

Tabla 90. Reducción de dureza en el procedimiento CIRT/16-WPS-002

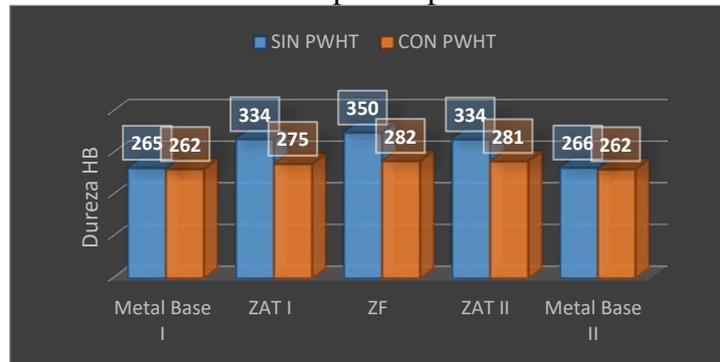
Línea 1	Línea 2	Línea 3
22,07%	16,91%	15,69%

Fuente: Autores

### 5.2.3 Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-003

La Figura 155 muestra la comparación antes y después del PWHT de los valores de dureza sobre la línea 1.

Figura 155. Dureza sobre la línea 1 para el procedimiento CIRT/16-WPS-003

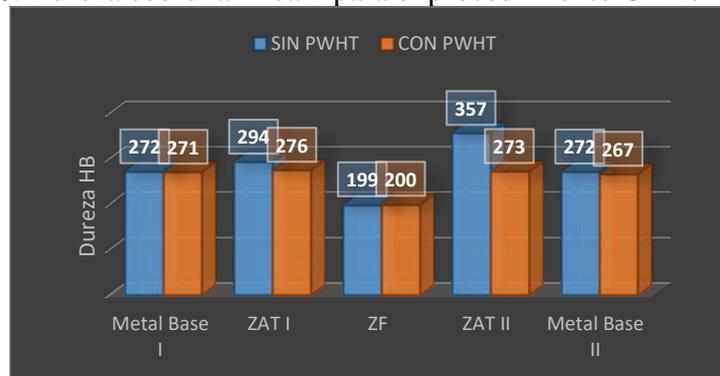


Fuente: Autores

Se evidencia que la zona fundida presenta el mayor valor de dureza en el material con 282 HB.

La Figura 156 muestra la comparación antes y después del PWHT de los valores de dureza sobre la línea 2.

Figura 156. Dureza sobre la línea 2 para el procedimiento CIRT/16-WPS-003



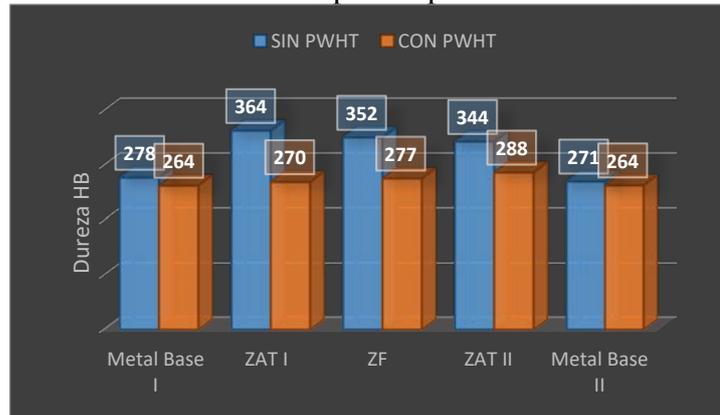
Fuente: Autores

Sobre el material de aporte austenítico no tiene ningún efecto el tratamiento térmico post

soldadura a diferencia que en las otras zonas donde se registra el mayor valor de dureza con 276 HB en el ZAT.

La Figura 157 muestra la comparación antes y después del PWHT de los valores de dureza sobre la línea 3.

Figura 157. Dureza sobre la línea 3 para el procedimiento CIRT/16-WPS-003



Fuente: Autores

El valor de dureza más elevado se registra en la ZAT con 288 HB, finalmente en la Tabla 91 se presenta el porcentaje de reducción de dureza para el procedimiento CIRT/16-WPS-003.

Tabla 91. Reducción de dureza en el procedimiento CIRT/16-WPS-003

Línea 1	Línea 2	Línea 3
19,43%	23,53%	20,88%

Fuente: Autores

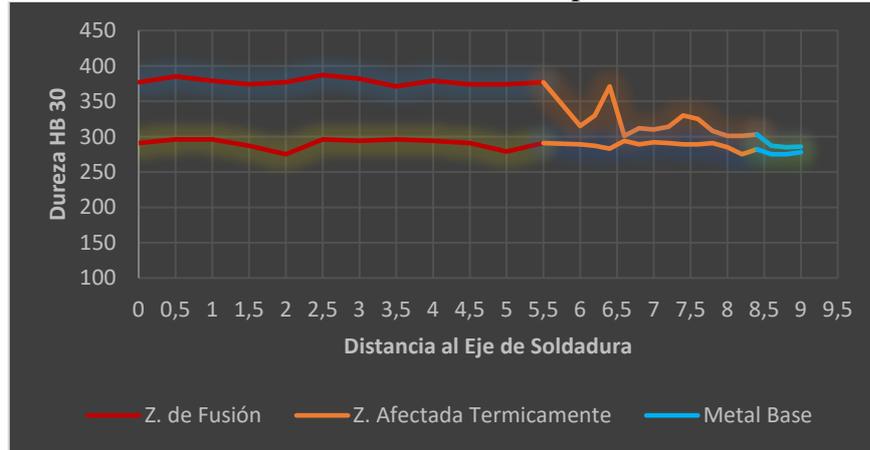
### 5.3 Resultados del ensayo de microdureza

Las gráficas mostradas a continuación permiten comparar el perfil de microdureza en la zona fundida, zona afectada térmicamente hasta llegar al metal base en muestras antes y después del PWHT.

#### 5.3.1 Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-001

La Figura 158 muestra la comparación entre el perfil de microdureza antes y después del PWHT sobre la línea 1.

Figura 158. Perfil de microdureza en la línea 1 con el procedimiento CIRT/16-WPS-001



Fuente: Autores

La Figura 159 muestra la comparación entre el perfil de microdureza antes y después del PWHT sobre la línea 2.

Figura 159. Perfil de microdureza en la línea 2 con el procedimiento CIRT/16-WPS-001



Fuente: Autores

Las gráficas permiten observar el efecto de tratamiento térmico en la reducción de los valores de microdureza en todas las zonas y además se evidencia la homogenización de la microdureza en el cordón de soldadura hasta llegar al metal base.

En la Tabla 92 se han resumido los resultados desarrollados para el proceso CIRT/16-WPS-001 referentes al tamaño del ZAT medido en base a los valores de microdureza en comparación con el calculado y el porcentaje de reducción de microdureza después del tratamiento térmico post soldadura.

Tabla 92. Tamaño del ZAT y reducción del microdureza en el procedimiento CIRT/16-WPS-001

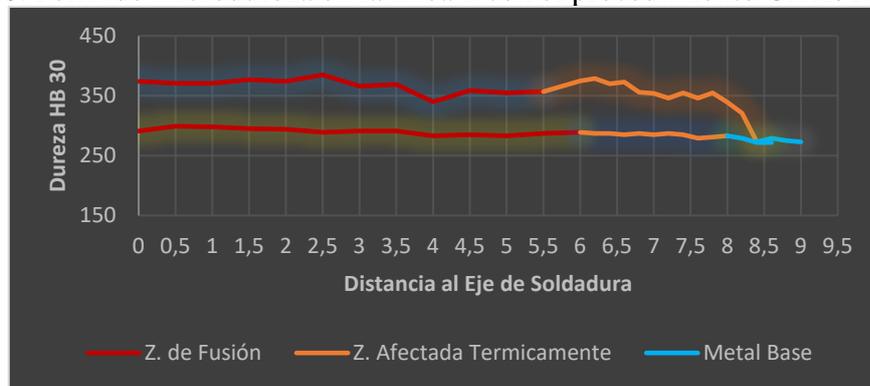
	Tamaño de ZAT (mm)		Reducción de Dureza (%)
	Por Microdureza	Calculado	
Línea 1	2,4	2,706	24
Línea 2	2,6	2,181	24

Fuente: Autores

### 5.3.2 Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-002

La Figura 160 muestra la comparación entre el perfil de microdureza antes y después del PWHT sobre la línea 1.

Figura 160. Perfil de microdureza en la línea 1 con el procedimiento CIRT/16-WPS-002



Fuente: Autores

La Figura 161 muestra la comparación entre el perfil de microdureza antes y después del PWHT sobre la línea 2.

Figura 161. Perfil de microdureza en la línea 2 con el procedimiento CIRT/16-WPS-002



Fuente: Autores

Se puede observar un cambio brusco en los valores de microdureza en la transición entre la zona de fusión y la zona afectada térmicamente debido a que la línea 2 atraviesa sobre el material de aporte austenítico y en comparación con el material de aporte martensítico posee menor dureza y además dadas sus características no experimenta ningún cambio después del PWHT.

En la Tabla 93 se han resumido los resultados encontrados para el procedimiento de soldadura CIRT/16-WPS-002 referentes al tamaño del ZAT medido en base a los valores de microdureza en comparación con el calculado y el porcentaje de reducción de microdureza después del tratamiento térmico post soldadura.

Tabla 93. Tamaño del ZAT y reducción del microdureza en el procedimiento CIRT/16-WPS-002

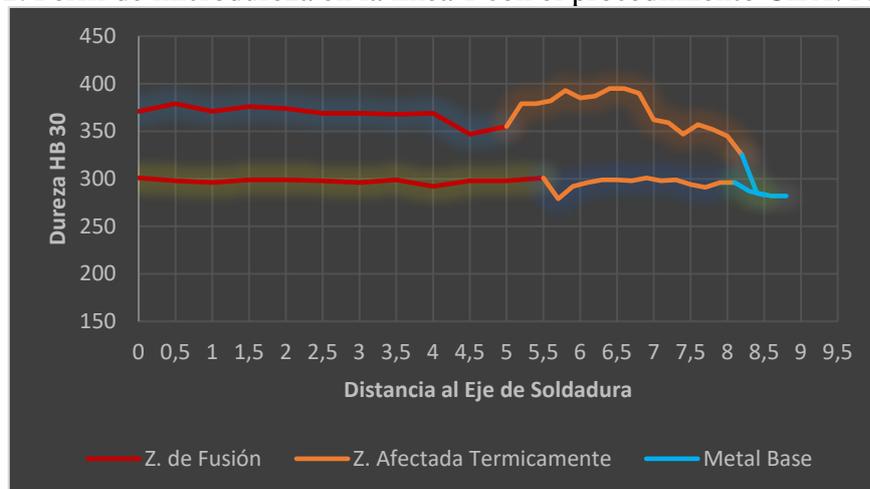
	Tamaño de ZAT (mm)		Reducción de Dureza (%)
	Por Microdureza	Calculado	
Línea 1	2,2	2,706	21
Línea 2	3,0	2,181	17

Fuente: Autores

### 5.3.3 Resultados para el procedimiento CIRT/16-WPS-003

La Figura 162 muestra la comparación entre el perfil de microdureza antes y después del PWHT sobre la línea 1.

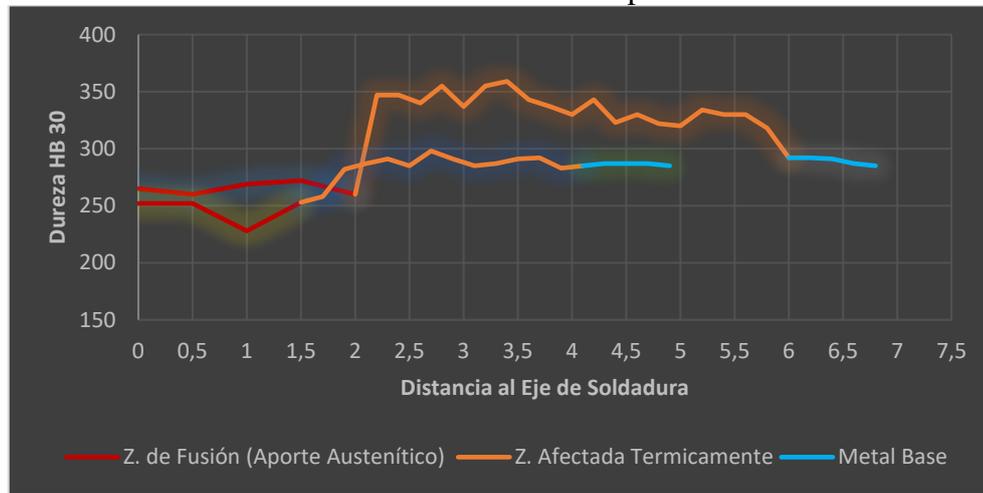
Figura 162. Perfil de microdureza en la línea 1 con el procedimiento CIRT/16-WPS-003



Fuente: Autores

La Figura 163 muestra la comparación entre el perfil de microdureza antes y después del PWHT sobre la línea 2.

Figura 163. Perfil de microdureza en la línea 2 con el procedimiento CIRT/16-WPS-003



Fuente: Autores

Al igual que en el proceso anterior se puede observar un cambio brusco en los valores de microdureza en la transición entre la zona fundida y la zona afectada térmicamente debido a que la línea 2 atraviesa sobre el material de aporte austenítico ya posee menor dureza en comparación con el material de aporte martensítico, además dadas sus características no experimenta ningún cambio importante después del tratamiento térmico post soldadura.

En la Tabla 94 se presentan los resultados obtenidos para el procedimiento de soldadura CIRT/16-WPS-003 donde se indica el tamaño de la zona afectada térmicamente medido en base a los valores de microdureza en comparación con el calculado, así como también el porcentaje de reducción de los valores de microdureza después del tratamiento térmico post soldadura para las líneas 1 y 2 donde se llevó a cabo el análisis.

Tabla 94. Tamaño del ZAT y reducción de microdureza en el procedimiento CIRT/16-WPS-003

	Tamaño de ZAT (mm)		Reducción de Dureza (%)
	Por microdureza	Calculado	
Línea 1	3,0	2,942	24
Línea 2	3,6	2,181	14

Fuente: Autores

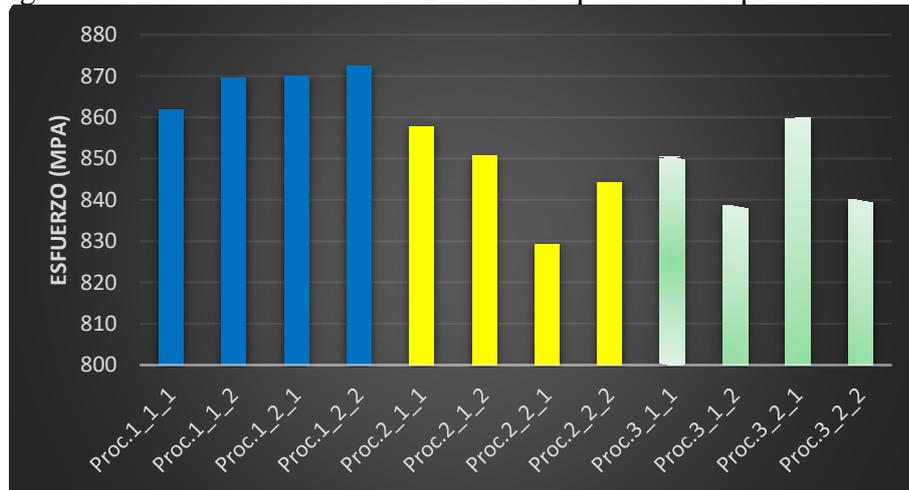
## 5.4 Resultados en los ensayos mecánicos

La información que se presenta a continuación permitirá comparar los resultados obtenidos al realizar los ensayos mecánicos de tensión y doblez lateral guiado en las probetas obtenidas bajo los tres procedimientos de soldadura desarrollados que permitan su correspondiente calificación.

### 5.4.1 Resultados en el ensayo de tensión

La Figura 164 muestra una comparación entre los valores del esfuerzo de máximo registrado para cada una de las probetas ensayadas, donde se han diferenciado por colores los tres procedimientos empleados.

Figura 164. Resultados del esfuerzo máximo para los tres procedimientos



Fuente: Autores

En la Tabla 95 se indica el esfuerzo máximo registrado durante el ensayo que corresponde al procedimiento 1 y la comparación con el menor esfuerzo obtenido en las muestras del procedimiento 2 y 3.

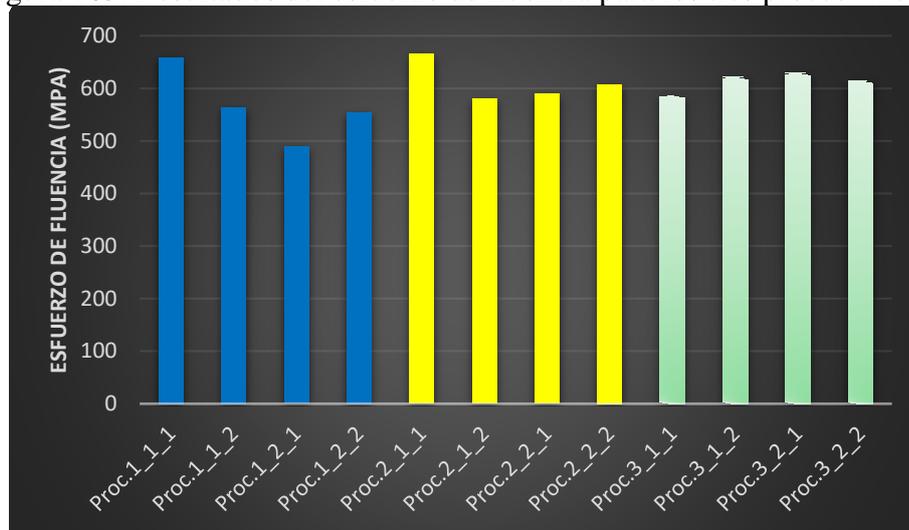
Tabla 95. Comparación de los valores del esfuerzo máximo entre procedimientos

Muestra	Esf. Máximo (MPa)	Porcentaje por debajo del mayor
Mayor en Proc.1	872,55	----
Menor En Proc.2	829,36	4,9%
Menor En Proc.3	838,71	3,9%

Fuente: Autores

Con la realización del ensayo de tensión se pudo cuantificar además los valores del esfuerzo de fluencia para cada una de las probetas, en la Figura 165 se muestra una comparación de los resultados obtenidos, donde se diferencian por colores las cuatro muestras ensayadas para cada uno de los tres procedimientos de soldadura desarrollados en la investigación.

Figura 165. Resultados del esfuerzo de fluencia para los tres procedimientos



Fuente: Autores

En la Tabla 96 se muestran el esfuerzo de fluencia máximo registrado en la ejecución del ensayo, el cual corresponde a la probeta del proceso 2, la misma que se compara con los valores mínimos registrados en el proceso 1 y 3.

Tabla 96. Comparación de los valores del esfuerzo de fluencia entre procedimientos

	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Porcentaje por debajo del mayor valor
Mayor valor en Proc.2	665,48	----
Menor valor en Proc.1	489,27	26,5%
Menor valor en Proc.3	586,44	11,9%

Fuente: Autores

La Tabla 97 mostrada a continuación resume los resultados obtenidos durante el ensayo, en ella se especifica la zona donde se ha producido la fractura de la probeta y analizando su esfuerzo máximo alcanzado se ha realizado la correspondiente calificación, se concluye que todas las probetas ensayadas aprueban satisfactoriamente el ensayo de tensión.

Tabla 97. Resultados y calificación del ensayo de tensión

Procedimiento	Muestra	Resistencia a la Tracción (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Fractura	Criterio
CIRT/16-WPS-001	N°1	861,89	658,97	Metal Base	Aprueba
	N°2	869,74	564,38	Metal Base	Aprueba
	N°3	870,16	489,27	Metal Base	Aprueba
	N°4	872,55	554,59	Metal Base	Aprueba
CIRT/16-WPS-002	N°1	857,85	665,48	Metal Base	Aprueba
	N°2	850,88	580,15	Metal Base	Aprueba
	N°3	829,36	589,78	Metal Base	Aprueba
	N°4	844,27	607,78	Metal Base	Aprueba
CIRT/16-WPS-003	N°1	850,41	586,44	Metal Base	Aprueba
	N°2	838,71	621,35	Metal Base	Aprueba
	N°3	859,91	628,94	Zona Fundida	Aprueba
	N°4	840,1	614,42	Metal Base	Aprueba

Fuente: Autores

#### 5.4.2 Resultados en el ensayo de doblez

En la Tabla 98 presentada a continuación se resumen los resultados correspondientes al ensayo de doblez lateral guiado, donde se contabilizan las pruebas realizadas para cada procedimiento, la cantidad de muestras que presentan algún tipo de grieta y el total de muestras aprobadas.

Tabla 98. Resultados y calificación del ensayo de doblez

Procedimiento	Muestras ensayadas	Muestras defectuosas	Características	Muestras aprobadas
CIRT/16-WPS-001	8	4	4 aberturas mayores a 3 mm	4
CIRT/16-WPS-002	8	0	Sin presencia de aberturas	8
CIRT/16-WPS-003	8	1	Abertura menor a 3 mm	8

Fuente: Autores

## 5.5 Calificación de los procedimientos

Una vez que se han realizado todas las pruebas mecánicas es posible calificar los procedimientos de soldadura desarrollados de acuerdo a los resultados obtenidos, en la Tabla 99 se ha registrado la totalidad de probetas que han sido puestas a prueba en los ensayos mecánicos desarrollados.

Tabla 99. Calificación de los procedimientos de soldadura

Procedimiento	Total ensayos de tensión	Muestras aprobadas de tensión	Total ensayos de dobléz	Muestras aprobadas de dobléz	Calificación del Procedimiento
CIRT/16-WPS-001	4	4	8	4	Aprueba
CIRT/16-WPS-002	4	4	8	8	Aprueba
CIRT/16-WPS-003	4	4	8	8	Aprueba

Fuente: Autores

En el proceso N°2 CIRT/16-WPS-001 se ha registrado que 4 de las 8 probetas en las cuales se realizó el ensayo de dobléz no han calificado es decir todas las muestras del cupón de soldadura 1, sin embargo, el cupón 2 desarrollado bajo el mismo procedimiento de soldadura no presentan ningún problema, lo que permite calificar y aprobar satisfactoriamente los tres procedimientos desarrollados.

Finalmente, para documentar la calificación de los tres procedimientos de soldadura se realizaron sus respectivos Registros de Calificación del Procedimiento (PQR), los mismos que se adjuntan del Anexo BN al Anexo BP.

## 5.6 Resultados del análisis de metalografía

Después de realizado el análisis metalográfico sobre las muestras con y sin PWHT, las microestructuras presentes en la zona fundida, zona afectada térmicamente y metal base se encuentran enlistadas en la Tabla 100 mostrada a continuación.

Tabla 100. Microestructuras presentes en los procedimientos de soldadura

Procedimiento	Zona Fundida	ZAT	Metal Base
CIRT/16-WPS-001	Martensita revenida	Martensita revenida	Martensita revenida
	Austenita retenida	Austenita retenida	Austenita retenida
	Carbuos	Carbuos	
	Ferrita delta		
CIRT/16-WPS-002	Martensita revenida	Martensita revenida	Martensita revenida
	Austenita retenida	Austenita retenida	Austenita retenida
		Carbuos	
CIRT/16-WPS-003	Martensita revenida	Martensita revenida	Martensita revenida
	Austenita retenida	Austenita retenida	Austenita retenida
		Carbuos	
		Ferrita delta	

Fuente: Autores

Como se puede observar la principal microestructura presente en el metal base es martensita revenida, seguida de la austenita retenida, la cual continúa siendo preponderante después del procedimiento de soldadura ya que en la zona de fusión y zona afectada térmicamente continúan apareciendo, sin embargo, en estas dos zonas se observó además la presencia de pequeños carburos de forma muy notoria en las muestras antes del PWHT, los cuales se ubican en los límites de grano, resultando perjudicial para el material. Mediante el tratamiento térmico se ha logrado la disolución de una buena cantidad de estos carburos, además de su migración al interior del grano, disminuyendo su afectación sobre las propiedades del material, generando un ligero aumento a la abrasión como efecto positivo.

Por otro lado, del análisis llevado a cabo con respecto al tamaño de las agujas de martensita, se pudo observar la tendencia a disminuir su tamaño después de realizado el tratamiento térmico post soldadura, tanto en la zona afectada térmicamente como en la zona fundida, en la Tabla 101 se muestra el porcentaje de disminución evidenciado para los tres procedimientos de soldadura.

Tabla 101. Porcentaje de disminución del tamaño de las agujas de martensita después del PWHT

Procedimiento	ZAT	ZF
CIRT/16-WPS-001	25%	29%
CIRT/16-WPS-002	13%	35%
CIRT/16-WPS-003	36%	20%

Fuente: Autores

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

Para la recuperación se empleó tres procedimientos de soldadura, que incluyen combinaciones SMAW-GMAW-GTAW. Se usaron materiales de aporte austenítico (ER309LMo) para los primeros pases y martensítico (E410NiMo-15 o ER410NiMo) para los pases siguientes, permitiendo una mayor ductilidad en la raíz de la junta soldada.

Se realizó precalentamiento y PWHT para el alivio de tensiones residuales, además del control de temperatura entre pases, con un aporte de energía por debajo de 1 KJ/mm en los tres procedimientos desarrollados, habiéndose controlado adecuadamente el aporte de calor, encontrándose por debajo del promedio de estudios similares.

Ensayos no destructivos (END) de tipo VT, PT, MT y UT se realizaron en todos los cupones. Mediante la inspección por ensayos no destructivos fue rechazado el cupón de soldadura N°1 desarrollado bajo el procedimiento CIRT/16-WPS-001, ya que presentó una discontinuidad relevante caracterizada como falta de penetración en la raíz de la junta, la cual se encontró fuera de los criterios de aceptación para un nivel de calidad 1 de acuerdo a CCH 70-4.

Se realizaron ensayos mecánicos de tensión y doblez lateral guiado para la calificación de los procedimientos de soldadura de acuerdo a los requerimientos de ASME sección IX. Todas las probetas obtenidas bajo los tres procedimientos de soldadura han calificado satisfactoriamente el ensayo de tensión.

El esfuerzo último mínimo de las probetas de tensión fue de 829.36 MPa, correspondiente a la probeta N°1 del cupón N°4, soldada bajo el procedimiento CIRT/16-WPS-002. Encontrándose un 10% por encima del mínimo requerido en la especificación del material base (755 MPa). La probeta N°2 del cupón N°5 soldada bajo el procedimiento CIRT/16-WPS-003 presentó una reducida ductilidad en comparación con las demás, de alrededor del 50%, habiéndose producida una fractura tipo frágil en la zona de la soldadura.

Mediante los ensayos de doblez lateral guiado, se presentaron aberturas en las cuatro probetas del cupón N°1, y en tres del cupón N°6. Encontrándose bajo los criterios de aceptación todas las probetas del cupón N°6, mas no así para las probetas del cupón N°1. Por lo cual, se rechazó el cupón N°1 al no cumplir con los requerimientos de ASME sección IX.

Todos los cupones de soldadura cumplieron con los requerimientos establecidos para los ensayos mecánicos, excepto el cupón N°1. A pesar de ello, los tres procedimientos fueron aprobados, debido a que se realizó el procedimiento CIRT/16-WPS-001 en los cupones N°1 y N°2, fallando solo uno de estos; por lo cual, se concluyó que no se trató de un error en los parámetros del procedimiento, sino en la ejecución del proceso de soldadura, esto fue corroborado debido a los resultados obtenidos de los END.

Después de haberse realizado los ensayos mecánicos de doblez lateral guiado y tensión, y obtenerse valores positivos de aprobación en los tres procedimientos de soldadura desarrollados CIRT/16-WPS-001, CIRT/16-WPS-002 y CIRT/16-WPS-003; los procedimientos han sido aprobados y calificados dentro de los registros de calificación CIRT/16-PQR-001, CIRT/16-PQR-002 y CIRT/16-PQR-003 respectivamente.

El aporte de calor alcanzado durante los picos de temperatura en el proceso de soldadura, se manifiesta en el alto incremento de dureza en el pozo de la soldadura, alcanzado valores máximos de 387, 385 y 395 HBW30, para los procedimientos CIRT/16-WPS-001, CIRT/16-WPS-002 y CIRT/16-WPS-003 respectivamente, encontrándose los dos primeros en la ZF y el último en la ZAT. Estos valores de dureza representan un incremento de aproximadamente 45% con respecto al material base.

El efecto del tratamiento térmico post soldadura (PWHT) realizado en los tres procedimientos es evidente en la reducción de la dureza del pozo de soldadura. En todos los ensayos realizados sobre las dos zonas principales (ZF y ZAT), la mayor dureza después de haberse aplicado el PWHT, se registra en la zona de fusión, a excepción de los procedimientos N°2 y N°3 donde el material de aporte es de tipo austenítico en la línea 2, por lo cual, poseía menor dureza con respecto a las demás zonas, incluso antes del efecto del PWHT.

El perfil de microdurezas sobre las zonas principales del ensayo permitió observar la homogeneización del pozo de soldadura después del PWHT, sin cambios bruscos en los valores de dureza entre la zona de fusión, zona afectada térmicamente y metal base, lo cual es satisfactorio para las propiedades mecánicas del material a través de microestructuras más regulares.

La reducción de dureza en las zonas cercanas al borde externo de la junta fue 19.40%, 22.07% y 20.88%, mientras en la zona central de la junta (raíz) fue 12.68%, 16.91% y 23.53% para los procedimientos CIRT/16-WPS-001, CIRT/16-WPS-002 y CIRT/16-WPS-003 respectivamente.

Se evaluó la influencia de los pases múltiples de soldadura en la dureza de la ZF, encontrándose una menor dureza y tamaño de grano en la zona central de la junta, esto debido al efecto de revenido parcial que sufren estas zonas por los pases siguientes. Encontrándose una reducción de hasta 16.4% en la dureza de la raíz de la junta, comparada con la dureza de las zonas cercanas al borde externo.

Se evaluó los cambios en las microestructuras de todos los procedimientos, encontrándose un refinamiento en el tamaño de grano de la martensita revenida para todos los casos después de someterse al PWHT, con una disminución del tamaño de las agujas de la matriz de un 25% y hasta un 36%, también ligera presencia de islas de ferrita delta (alrededor de un 5% a 8%) y austenita retenida (alrededor de un 15% a 20%)

Se evidenció la formación de carburos en menor proporción en los límites de grano previa a la aplicación del PWHT, lo cual podría producir tendencia a la fragilidad en estas zonas, resultando en un detrimento de las propiedades mecánicas y, su posterior disolución y migración hacia el interior del grano martensítico producido durante el aumento de calor del PWHT, lo cual resulta beneficioso para la resistencia a la abrasión de la matriz martensítica, una característica supremamente importante en los álabes.

Aunque no se presentaron grandes cambios de las propiedades mecánicas en el centro de la ZF de las juntas con raíz de aporte austenítico, si se evidenció un cambio en la morfología del grano, pasando de una forma columnar dendrítica a un grano de apariencia más equiaxial con la aplicación del PWHT.

## 6.2 Recomendaciones

Se recomienda tener un cuidado especial en la limpieza antes, durante y después de los procesos de soldadura, debido a que presenta una gran influencia en la aparición de discontinuidades en ensayos posteriores, resultando la mayor causa de fallas durante la operación y puesta en marcha de componentes hidráulicos que han sido reparados por procesos de soldadura.

Se sugiere seguir los procedimientos establecidos en esta investigación para la recuperación por soldadura de álabes de turbinas hidráulicas, ya que son el compendio de varios códigos y especificaciones, las cuales han sido validadas a través de ensayos mecánicos, por lo cual garantizan la calidad de su resultado.

Debido a los límites de la investigación, existen muchas propiedades que aún pueden ser evaluadas y cuantificadas, por lo cual se recomienda continuar la investigación con el estudio del ciclo térmico para la disolución de carburos, variando la temperatura de sostenimiento ligeramente y/o el tiempo de permanencia, realizando posteriores ensayos de análisis de composición química y difracción de rayos X, para cuantificar y caracterizar los carburos que se forman en la zona fundida, además de la cantidad de las fases presentes en la microestructura.

Se recomienda continuar con la experimentación de la temperatura de sostenimiento del PWHT y/o la influencia de un ciclo térmico de doble revenido, debido a su influencia directa en la dureza resultante del pozo de soldadura. Se sugiere esto debido a que los valores de dureza obtenidos no son mayores de 300 HBW30 después del PWHT, pero, aun así, se encuentran en muchos casos por encima del límite de 285 HBW establecido en la especificación del material base.

Se recomienda también la realización de ensayos de fractografía en las probetas de tensión a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), para entender y conocer de una mejor manera los mecanismos de falla producidos en las probetas.

Se recomienda realizar simulaciones numéricas computacionales empleando el método de elementos finitos, para calcular la distribución de temperaturas en las placas o

componentes de las turbinas hidráulicas y así, dimensionar la cantidad de material que se ve afectado por los picos de temperatura.

Finalmente, se recomienda realizar un estudio de la influencia directa de la cantidad del aporte austenítico en la junta soldada, y los efectos que produce en la resistencia a carga cíclica (fatiga) y absorción de energía (impacto) de los cupones de soldadura, mediante la evaluación de ensayos mecánicos.

## BIBLIOGRAFÍA

**ALLAUCA, Ronald Joel.** *Implementación de procedimiento de inspección y reparación de rodets de la turbina Francis de una central hidroeléctrica.* (tesis). (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica Del Litoral. Guayaquil. [En línea] 29 de Septiembre de 2015. [Consulta: 22 de Noviembre de 2015.] Disponible en: [http://www.dspace.espol.edu.ec/x\\_mlui/handle/123456789/30243](http://www.dspace.espol.edu.ec/x_mlui/handle/123456789/30243).

**AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.** *Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC). Section V - Nondestructive Examination.* New York, USA: ASME, Julio de 2015c. Vol. 5. ISBN: 978-0-7918-6992-5.

**AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.** *Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC). Section II - Materials Part D Properties (Metric).* New York, USA: ASME, Julio de 2015a. Vol. 2. ISBN: 978-0-7918-6977-2.

**AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.** *Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC). Section IX - Welding, Brazing, and Fusing Qualifications.* New York, USA: ASME, Julio de 2015b. Vol. 9. ISBN: 978-0-7918-6998-7.

**AMERICAN WELDING SOCIETY.** *Welding Handbook. Materials and Applications, Part 1.* [ed.] Annette O'Brien. Novena Edición. Miami: American Welding Society, 2011. Vol. 4. ISBN: 978-0-87171-759-7.

**AMERICAN WELDING SOCIETY.** *Welding Handbook. Welding Processes, Part 1.* [ed.] Annette O'Brien. Novena Edición. Miami: American Welding Society, 2004. Vol. 2. ISBN: 0-87171-729-8.

**AMERICAN WELDING SOCIETY.** *Welding Handbook. Welding Science and Technology.* [ed.] Annette O'Brien. Novena Edición. Miami: American Welding Society, 2001. Vol. 1. ISBN: 0-87171-657-7.

**AMREI, Mohsen; et al.** *Effects of various post-weld heat treatments on austenite and carbide formation in a 13Cr4Ni steel multipass weld.* *Metallogr. Microstruct. Anal.* Materials Park, USA: Springer Science+Business Media New York and ASM International, 2016a. Vol. 5, pp. 50-61. DOI: 10.1007/s13632-015-0251-z.

**AMREI, Mohsen.; et al.** *Microstructure characterization and hardness distribution of 13Cr4Ni multipass weld metal.* *Materials Characterization.* Amsterdam, Países Bajos: Elsevier, 2016b. Vol. 111, pp. 128-136. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.11.022.

**AMREI, Mohsen; et al.** *Microstructure characterization of single and multipass 13Cr4Ni steel welded joints.* *Metallogr. Microstruct. Anal.* Materials Park, USA: Springer

Science+Business Media New York and ASM International, 2015. Vol. 4, pp. 207-218. DOI: 10.1007/s13632-015-0202-8.

**ASM INTERNATIONAL.** *Cast Stainless Steels*. 10th Ed. ASM Handbook. Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 1997. Vol. 1. ISBN 0-87170-380-7.

**ASM INTERNATIONAL.** *High-Alloy Steels*. 10th Ed. ASM Handbook. Volume 15: Casting. Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 1998a. Vol. 15. ISBN 0-87170-007-7.

**ASM INTERNATIONAL.** *Selection of Cast Stainless Steels*. 10th Ed. ASM Handbook, Volume 6: Welding, Brazing and Soldering. Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 1998b. Vol. 6. ISBN: 0-87170-382-3.

**ASM INTERNATIONAL.** *Stainless Steel Casting Alloys: Metallographic Techniques and Microstructures*. 10th Ed. ASM Handbook, Volume 9, Metallography and Microstructures. Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 1998c. Vol. 9, pp. 9, 569, 572, 1265, 1444. ISBN 0-87170-007-7.

**ASTM INTERNATIONAL.** ASTM A743-A743M-13ae1. *Standard Specification for Castings, Iron- Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pensilvania, USA: ASTM International, 2013.

**AWS.** *Welding Handbook*, Welding Processes, Part 1. Novena Edición. Miami: American Welding Society , 2004. Vol. 2. ISBN: 0-87171-729-8.

**AWS.** *Welding Handbook*. Materials and Applications, Part 1. Novena Edición. Miami : American Welding Society, 2011. Vol. 4. ISBN: 978-0-87171-759-7.

**BHADESHIA, Harshad.** *The theory and significance of retained austenite in steels*. (tesis). (Doctorado). Universidad de Cambridge. United Kingdom. [En línea] Septiembre de 1979. [Consulta: 04 de Marzo de 2016.] Disponible en: <http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2004/retained.austenite.html>.

**BILMES, P.; et al.** *Characteristics and effects of austenite resulting from tempering of 13Cr-NiMo martensitic steel weld metals*. Materials Characterization. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier, 2001. Vol. 46, pp. 285-296.

**BILMES, P.; et al.** *Toughness and microstructure of 13Cr4NiMo high-strength steel welds*. Journal of Materials Engineering and Performance. Materials Park, USA: ASM International, Diciembre de 2000. Vol. 9, 6, pp. 609 - 615.

**BOUDREAULT, E.; et al.** *In situ post-weld heat treatment on martensitic stainless steel turbine runners using a robotic induction heating process to control temperature distribution.* Series: Earth and Environmental Science. Montreal, Canadá: IOP, 2014. Vol. 22. DOI:10.1088/1755-1315/22/1/012016.

**CABALLERO, Ramón.** *Análisis de falla de un rodete fatigado perteneciente a CELEC-Ecuador, mediante las técnicas de replicado fractográfico, replicado de extracción y observación en microscopía electrónica de barrido.* New York: Hitachi High Technologies Canada, Inc, 2017.

**CAHIER DES CHARGES.** *Specification for inspection of steel casting for hydraulic machines.* Viena, Austria : CCH 70-4, Octubre de 2014. Vol. 4.

**CAICEDO, Mauricio.** *Manual técnico de procedimientos para la ejecución de un mantenimiento mayor de una unidad de generación hidroeléctrica, tipo Francis de eje vertical de la Central Hidroeléctrica Agoyán.* Baños de Agua Santa, Ecuador: Central Hidroeléctrica Agoyán, 2005.

**CAISAGUANO, Daniel Alex.** *Desarrollo de procedimientos de soldadura, calificación de soldadores y control de calidad de estructuras soldadas de acuerdo con AWS D1.1.* (tesis). (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Riobamba. [En línea] 27 de Octubre de 2014. [Consulta: 20 de Noviembre de 2015.] Disponible en: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/3520#sthash.zEax6CDC.dpuf>.

**CARPINTERI, Andrea: et al.** *High cycle fatigue in a hydraulic turbine runner.* Dept of Civil- Environmental Engineering and Architecture, Parma. [En línea] 2011. [Consulta: 20 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://www.gruppofrattura.it/pdf/cp/CP2012/007.pdf>.

**CARROUGE, D.; et al.** *Effect of  $\delta$ -ferrite on impact properties of supermartensitic stainless steel heat affected zones.* Science and Technology of Welding and Joining. Londres: Taylor & Francis Group, 2004. Vol. 9, 5, pp. 377-389. ISSN: 1743-2936.

**CARROUGE, D.; et al.** *Microstructural change in high temperature heat-affected zone of low carbon weldable "13 %Cr" martensitic stainless steels.* Stainless Steel World. Londres: Oil & Gas, Octubre de 2002.

**CARROUGE, Dominique.** *Phase transformations in welded supermartensitic stainless steels.* (tesis). (Doctorado). Universidad de Cambridge. UK. [En línea] Octubre de 2002. [Consulta: 12 de Marzo de 2016.] Disponible en: <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/219194>.

**CELEC E.P.** *1987-2012 energía para el desarrollo, Unidad de negocio Hidroagoyán.* Baños de Agua Santa : Edimpres S.A., Vol. 1. 2012.

**CELEC E.P.** *Corporación Eléctrica del Ecuador. Generación Hidroeléctrica.* [En línea] CELEC EP, 2015a. [Consulta: 12 de Septiembre de 2015.] Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/capacidad-instalada/generacion/hidroelectrica.html>.

**CELEC E.P.** *Corporación Eléctrica del Ecuador. Proyectos Hidráulicos.* [En línea] CELEC EP, 2015b. [Consulta: 12 de Septiembre de 2015.] Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/generacion/hidraulicos.html>.

**COSTA, Fabricio Paúl.** *Control de calidad de soldadura y recubrimientos en la fabricación de tubos de acero para la conducción de agua potable-proyecto de rehabilitación grandes acueductos plan Huancavilca.* (tesis). (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil. [En línea] 2013. [Consulta: 8 de Septiembre de 2015.] Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/25213/1/TESIS%20FABRICIO%20COSTA%20C..pdf>.

**CRAWFORD, James D.** *CA-6NM- An Update.* 29th Annual Steel Founders' Society of America Technical and Operating Conference and printed in Steel Foundry Facts. Noviembre de 1974.

**DAHL, Gjert Aaberge.** *Hydraulic design of a Francis turbine that will be influenced by sediment erosion.* (thesis). (Master). Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. [En línea] Junio de 2014. [Consulta: 04 de Septiembre de 2015.] Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:741702/FULLTEXT01.pdf>.

**DIVYA, M.; et al.** *Effect of grain boundary character distribution on the impact toughness of 410NiMo weld metal.* Metallurgical and Materials Transactions A. Materials Park, USA: The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, Julio de 2016. Vol. 47 A, pp. 3397-3411. DOI: 10.1007/s11661-016-3481-z.

**DORJI, Ogyen; & GHOMASHCHI, Reza.** *Hydro turbine failure mechanisms: An overview.* Engineering Failure Analysis. Adelaide, Australia: Elsevier, 2 de Mayo de 2014. Vol. 44, pp. 139-147. ISSN: 1350-6307.

**DUNCAN, William Jr.** *Turbine repair. Facilities Instructions, Standars, & Techniques,* Vol. 2-5, Facilities Engineering Branch, Denver, Colorado. [En línea] Septiembre de 2000. [Consulta: 18 de Agosto de 2015.] Disponible en: [http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist2\\_5/vol2-5.pdf](http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist2_5/vol2-5.pdf).

**ELTVIK, Mette.** *Sediment erosion in Francis turbines.* (thesis). (Master). Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. [En línea] Junio de 2009. [Consulta: 12 de Septiembre de 2015.] Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:723975/FULLTEXT01.pdf>.

**ESCALER, Xavier; et al.** *Detection of cavitation in hydraulic turbines.* Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, pp. 983-1007, ELSEVIER. [En línea] 2006.

[Consulta: 18 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://www.researchgate.net/publication/223536484> *Detection of cavitation in hydraulic turbines.*

**FERNÁNDEZ DíEZ, Pedro.** *Turbinas hidráulicas.* Santander: Universidad de Cantabria, 2002.

**FERREÑO, D.; et al.** *Análisis de fallo por fractura frágil de una turbina Pelton.* Engineering Failure Analysis 18. [En línea] Enero de 2011. [Consulta: 12 de Enero de 2016.] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/229242799Failure\\_analysis\\_of\\_a\\_Pelton\\_turbine\\_manufactured\\_in\\_soft\\_martensitic\\_stainless\\_steel\\_casting](https://www.researchgate.net/publication/229242799Failure_analysis_of_a_Pelton_turbine_manufactured_in_soft_martensitic_stainless_steel_casting).

**FICHTNER, JV.** *Chapter 1: Turbine.* Lot: Mechanical Equipment: Middle Marsyangdi, 2014, pp. 1-34.

**FLORES, Miriam; et al.** *A fatigue analysis of a hydraulic Francis turbine runner.* World Journal of Mechanics, Vol. 2, pp. 28-34, Scientific Research. [En línea] Febrero de 2012. [Consulta: 18 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=17683>.

**FOLKHARD, Erich.** *Welding metallurgy of stainless steel.* New York: Springer-Verlag Wien, 1988. ISBN-13: 978-3-7091-8965-8.

**FRUNZAVARDE, D.; et al.** *Failure analysis of a Francis turbine runner.* 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conf. Science: Earth and Environmental Science 12, IOP Publishing. [En línea] 2010. [Consulta: 23 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/12/1/012115>. DOI :10.1088 / 1755-1315/12/1/012115.

**GALLEGO, Juan Esteban.** *Caracterización de una turbina del tipo Francis utilizada por una empresa local de generación de energía.* (trabajo de grado). (Ingeniería). Universidad EAFIT, Medellín. [En línea] 2006. [Consulta: 22 de Agosto de 2015.] Disponible en: [https://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/4405/JuanEstebanGalloBetancur\\_2006.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/4405/JuanEstebanGalloBetancur_2006.pdf?sequence=2&isAllowed=y).

**GANESAN, Rubesh.** *Improving the quality of high alloy CA6NM stainless steel castings.* (thesis). (Master). Iowa State University. Ames. [En línea] 2015. [Consulta: 15 de Enero de 2016.] Disponible en: <http://lib.dr.iastate.edu/etd/14656>.

**GARCÍA, Rafael; & PÉREZ, Norberto.** *Análisis de la falla y malfuncionamiento de una turbina hidráulica de 15MW.* Boletín IIE, México. [En línea] Abril de 2007. [Consulta: 6 de Septiembre de 2015.] Disponible en: <http://www.iie.org.mx/boletin022007/act.pdf>.

**GIRALDO, Jorge Enrique.** *El agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) en soldaduras de aceros.* (trabajo de grado). (Especialista). Universidad Nacional de Colombia. Medellín. [En línea] 1999. [Consulta: 05 de Abril de 2016.] Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/40013/>.

**GOGSTAD, Peter Joachim.** *Hydraulic design of Francis turbine exposed to sediment erosion.* (thesis). (Master). Norwegian University of Science and Technology. Trondheim. [En línea] Enero de 2012. [Consulta: 21 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:536445/FULLTEXT01.pdf>.

**GOLDING, Mark.** *Materiales de metro de tipo 410NiMo para aplicaciones en plantas de generación hidroeléctricas.* TEDELBI, S.L., Donostia-San Sebastián. [En línea] 2010. [Consulta: 16 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://www.tedelbi.com/novedades/materiales-tipo-410.pdf>.

**GOOCH, T. G.** *Heat treatment of welded 13%Cr-4%Ni martensitic stainless steels for sour service.* Welding Research, Welding Journal. [En línea] Julio de 1995. [Consulta: 12 de Enero de 2016.] Disponible en: [https://app.aws.org/wj/supplement/WJ199507\\_s213.pdf](https://app.aws.org/wj/supplement/WJ199507_s213.pdf).

**GRANOBLES, Jean Pierre.** *Estudio de la resistencia a la erosión-corrosión de los impulsores de una bomba WEMCO recubiertos por rociado térmico.* (tesis). (Ingeniería). Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali. [En línea] 20 de Enero de 2013. [Consulta: 16 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/5006/1/TME01388.pdf>.

**HAYS, Charles; & PATRICK, David.** *Hardness conversion data for CA6NM alloy.* Metallography. New York, USA: Elsevier, 1983. Vol. 16, pp. 229-233.

**HOEPFFNER, Hakim.** *Influencia de la transformación martensítica en la vida a fatiga de los aceros inoxidable austeníticos metaestables.* (tesis). (Master). Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. [En línea] Mayo de 2008. [Consulta: 2016 de Enero de 15.] Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/4786>.

**HOYOS PULGARÍN, Elizabeth.** *Efecto de la técnica de pases de revenido en las propiedades mecánicas del acero ASTM A743: Grado CA6NM.* (tesis). (Master). Universidad Nacional de Colombia. Medellín. [En línea] 2009. [Consulta: 04 de Marzo de 2016.] Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2172/>.

**KALPAKJIAN, Serope; & SCHMID, Steve.** *Metales y aleaciones ferrosas: producción, propiedades generales y aplicaciones.* Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta Edición. Cuerna Vaca : Pearson Educación, 2008.

**KHURANA, S.; et al.** *Effect of cavitation on hydraulic turbines - a review.* International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 2, INPRESSCO. [En línea] 1 de

Marzo de 2012. [Consulta: 15 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://inpressco.com/wp-content/uploads/2012/03/Paper6172-1774.pdf>. ISSN 2277.

**KOU, Sindo.** *Welding metallurgy*. Segunda Edición. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2003. ISBN 0-471-43491-4.

**LEE, Hwa-Teng; et al.** *Application and characteristics of low-carbon martensitic stainless steels on turbine blades*. Materials Transactions. Japón: The Japan Institute of Metals and Materials, Enero de 2015. Vol. 56, 4, pp. 563-569. DOI: 10.2320/matertrans.M2014307.

**LIPPOLD, John C; & KOTECKI, Damian J.** *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Primera Edición. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005. ISBN: 0-471-47379-0.

**LIPPOLD, John C.** *Welding metallurgy and weldability*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015. ISBN 978-1-118-23070-1.

**LÓPEZ PÉREZ, Verónica; & RAMÍREZ, Wilson.** *Diseño de un horno para tratamiento térmico del rodete de la turbina Francis (CELEC Unidad de Negocio Hidroagoyán)*. (tesis). (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Riobamba. [En línea] 2011. [Consulta: 2016 de Abril de 2016.] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1398/1/15T00485.pdf>.

**MAGNAFLUX.** *Magnaflux. Non-Destructive Testing Products & Equipment*. [En línea] 2016. [Consulta: 25 de Marzo de 2016.] Disponible en: <http://magnaflux.com/Magnaflux>.

**MANDINA, Marcello; et al.** *Metallurgical and weldability aspects of the new-generation martensitic stainless steels: a case study*. The welding of stainless steels: experiences and innovations, GE Oil & Gas. [En línea] Diciembre de 2013. [Consulta: 15 de Enero de 2016.] Disponible en: [http://site.ge-energy.com/businesses/ge\\_oilandgas/en/newsletter/geog\\_viewsandnews\\_1213/pdf/GE\\_WeldingStainlessSteelsCase.pdf](http://site.ge-energy.com/businesses/ge_oilandgas/en/newsletter/geog_viewsandnews_1213/pdf/GE_WeldingStainlessSteelsCase.pdf).

**MARENDA, Anderson; et al.** *Effect of post-weld heat treatment on fatigue crack propagation in welded joints in CA6NM martensite stainless steel*. Welding International, Vol. 20 (12), pp. 947-952, London, Taylor & Francis. [En línea] December de 2006. [Consulta: 25 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1533/wint.2006.3689>.

**MARKOVIC, Svetislav.** *Cavitation wear of the blades of Francis turbine*. Tribology in Industry, Vol. 28, pp. 17-22. [En línea] Abril de 2006. [Consulta: 25 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://www.tribology.fink.rs/journals/2006/3-4/3.pdf>.

**MEIMANDI, Shilan; et al.** *Macro-defects characterization in cast CA-6NM martensitic stainless steel*. Materials Characterization. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier, Febrero de 2017. Vol. 124, pp. 31-39. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.11.040.

**MIRAKHORLI, F.; et al.** *Hybrid fiber laser-arc welding of 10-mm thick CA6NM stainless steel*. Materials Science and Technology (MS&T). Pittsburgh, Pennsylvania, USA: TMS, Octubre de 2014. pp. 1891 - 1900.

**MIRAKHORLI, F.; et al.** *Phase structures and morphologies of tempered CA6NM stainless steel welded by hybrid laser-arc process*. Materials Characterization. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier, 2017. Vol. 123, pp. 264-274. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.10.029.

**MURRAY, Spiegel.** *Mecánica Teórica*. Mexico D.F.: McGRAW-HILL, 1977.

**NEGRU, Radu, MARSAVINA, L.; & MUNTEAN, Seby.** *Analysis of flow induced stress field in a Francis turbine runner blade*. Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Vol. 57 (61), Fasc. 6, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi” din Iași. [En línea] 2011. [Consulta: 22 de Agosto de 2015.] Disponible en: [http://www.bulipi-eee.tuiasi.ro/archive/2011/fasc.6/p36\\_f6\\_2011.pdf](http://www.bulipi-eee.tuiasi.ro/archive/2011/fasc.6/p36_f6_2011.pdf).

**NEOPANE, Hari Prasad.** *Sediment erosion in hydro turbines*. (thesis). (Doctor). Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. [En línea] Marzo de 2010. [Consulta: 15 de Septiembre de 2015.] Disponible en: [http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/233519/326677\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1](http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/233519/326677_FULLTEXT01.pdf?sequence=1).

**NEOPANE, Hari P.; et al.** *Sediment erosion in hydraulic turbines*. Global Journal of Researches in Engineering, Vol. 11, Issue 6, Global Journals Inc., USA. [En línea] Noviembre de 2011. [Consulta: 18 de Agosto de 2015.] Disponible en: [https://globaljournals.org/GJRE\\_Volume11/3-Sediment-Erosion-in-Hydraulic-Turbines.pdf](https://globaljournals.org/GJRE_Volume11/3-Sediment-Erosion-in-Hydraulic-Turbines.pdf). ISSN:2249-4596.

**OLYMPUS CORPORATION.** *Detectores de defectos OmniScan MX2*. Olympus. Your vision, our future. [En línea] 2016. [Consulta: 25 de Marzo de 2016.] Disponible en: <http://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/>.

**OSORIO RAMÍREZ, Juan; et al.** *Efecto del tratamiento térmico post soldadura sobre la microestructura del acero inoxidable grado CA6NM para la construcción de rodetes hidráulicos*. Scientia et Technica Año XIII. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia Septiembre de 2007. Vol. 1, 36, pp. 901-906. ISSN: 0122-1701.

**PANTHEE, Amod; et al.** *Quality control in welding repair of Pelton runner*. Renewable Energy. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier, 2015. Vol. 79, pp. 96-102. DOI: 10.1016/j.renene.2014.10.042.

**PÁSTOR, Mario.** *Introducción a la metalurgia de la soldadura.* Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Riobamba, 2004.

**PEDRO, Jorge.** *Detección de cavitación en turbina Francis.* (Trabajo final de carrera). (Ingeniería). Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. [En línea] 2004. [Consulta: 22 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/2632>.

**PÉREZ CARGUA, Miguel; & PULLAS REA, Luis.** *Influencia de la utilización de insertos de varilla corrugada sobre las soldaduras de perfil estructural.* (tesis). (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo: Riobamba. [En línea] 25 de Mayo de 2010. [Consulta: 26 de Marzo de 2016.] Disponible en: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/270#sthash.DI72US14.dpuf>.

**PHILLIPS, David H.** *Welding metallurgy of stainless steels.* Welding Engineering, An Introduction. Primera Edición. Chichester: Wiley, 2016.

**POTTER, Steven R.** *In situ Francis turbine blade replacement due to gross cavitation.* Voith Hydro Services Inc, Springfield, USA. [En línea] 23 de Mayo de 2013. [Consulta: 22 de Agosto de 2015.] Disponible en: [http://www.nwhydro.org/eventscommittees/Docs/2013\\_Tech\\_Workshop/Insitu%20Francis%20Turbine%20Blade%20Replacement%20-%20Potter.pdf](http://www.nwhydro.org/eventscommittees/Docs/2013_Tech_Workshop/Insitu%20Francis%20Turbine%20Blade%20Replacement%20-%20Potter.pdf).

**PUKASIEWICZ, A.; et al.** *Effect of post-weld heat treatment on fatigue crack propagation in welded joints in CA6NM martensite stainless steel.* Londres, UK: Welding International, 2006. Vol. 20, 12, pp. 947-952.

**RIVERA, Guillermo Rodolfo.** *Reacondicionamiento de los álabes directrices de una turbina hidráulica tipo Francis en hidroeléctrica los Esclavos y su análisis de costos.* (tesis). (Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. [En línea] Mayo de 2009. [Consulta: 28 de Agosto de 2015.] Disponible en: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0168\\_MT.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0168_MT.pdf).

**ROJAS MARÍN, Jessika Viviana.** *Identificación y cuantificación de fases en acero inoxidable ASTM A743 grado CA6NM mediante la técnica de difracción de rayos x.* (tesis). (Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia: UNC, 2009.

**ROMERO, Sandra Patricia.** *Influencia del modo de transferencia por arco pulsado en el proceso de soldadura GMAW con alambre compueto con núcleo metálico sobre la soldabilidad del acero ASTM A 131 grado AH32.* (tesis). (Magister). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. [En línea] 15 de Septiembre de 2012. [Consulta: 5 de Mayo de 2017.]

**ROMO, Sebastián Andrés.** *Evaluación de la resistencia a erosión por cavitación de superficies texturizadas.* (tesis). (Magister). Universidad Nacional de Colombia.

Colombia. [En línea] 2013. [Consulta: 5 de Septiembre de 2015.] Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/34912/1/1128391052.2014.pdf>.

**SAGÑAY, Byron Roberto; & PILAMUNGA, Leonardo.** *Estudio de factibilidad para el diseño de una planta industrial de mecanizado para la reconstrucción de turbinas Francis y Pelton de generación eléctrica para la empresa CELEC E.P.* (tesis). (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Riobamba. [En línea] 2012. [Consulta: 20 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2439>.

**SÁNCHEZ, Carlos Fernando.** *Estudio de los tratamientos térmicos que se realizan en las partes de las turbinas de la central hidroeléctrica Agoyán para minimizar los costos de reparación.* (tesis). (Ingeniería). Universidad Técnica de Ambato. Ambato [En línea] Junio de 2011. [Consulta: 8 de Septiembre de 2015.] Disponible en: <http://repo.uta.edu.ec/handle/123456789/1233?locale=en>.

**SARAFAN, S.; et al.** *Characteristics of electron beam welded CA6NM. Advances in Hydroelectric Turbine Manufacturing and Repair.* Montreal, Canadá: Materials Science and Technology (MS&T), Octubre de 2013.

**SAVAGE, W. F., NIPPES, E. F. y SZEKERES, E. S. 1976.** *A study of weld interface phenomena in a low alloy steel.* New York: AWS, Septiembre de 1976. Vol. 55, 09, pp. 260s-268s.

**STEEL FOUNDERS' SOCIETY OF AMERICA.** *Supplement 8: High alloy data sheets corrosion series.* Steel Castings Handbook. Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 2004. ISBN: 978-0-87170-556-3.

**STRUERS.** *Products and metallography equipment.* Struers, Ensuring Certainty. [En línea] Struers Inc, 2016. [Consulta: 2016 de abril de 14.] Disponible en: <http://www.struers.com/en/Products>.

**THAPA, Biraj Singh; et al.** *Some applications of computational tools for R&D of hydraulic turbines.* Rentech Symposium Compendium, Volume 1, Nepal, RENTECH. [En línea] 22 de Diciembre de 2011. [Consulta: 16 de Agosto de 2015.] Disponible en: <http://www.ku.edu.np/ttl/images/BST.Files/some%20applications%20of%20computational%20tools%20for%20rd%20of%20hydraulic%20turbines.pdf>.

**THE WELDING INSTITUTE.** *Senior welding inspector WIS10.* TWI: Materials joining and engineering technologies. [En línea] United Kingdom, 01 de Junio de 2009. [Consulta: 28 de abril de 2016.] Disponible en: <http://www.twitraining.com/home/course-schedule/cswip-senior-welding-inspector-level-3>.

**THIBAUT, Denis; et al.** *Residual stress and microstructure in welds of 13%Cr–4% martensitic stainless steel.* Journal of Materials Processing Technology. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier, Febrero de 2009. Vol. 209, 4, pp. 2195-2202. ISSN: 0924-0136.

**TRUDEL, Alexandre; et al.** *Residual stress effects on the propagation of fatigue cracks in the weld of a CA6NM stainless steel.* 13th International Conference on Fracture. Beijing, China: ResearchGate, Junio de 2013. pp. 16-21.

**UZUNALI, Umut Yasar; & CUVALCI, Hamdullah.** *The effects of post weld heat treatment on the mechanical properties of tempered martensite and high strength steel welded joints.* The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15). Incheon, Korea: ASEM, Agosto de 2015.

**VILLAVICENCIO, Julio César.** *Relación, microestructura/propiedad en la soldadura GTAW entre aceros inoxidable y aceros al carbono.* (tesis). (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Riobamba. [En línea] Julio de 2010. [Consulta: 06 de Abril de 2016.] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/393>.

**WANG, P.; et al.** *Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr–4Ni martensitic.* Materials Science and Engineering A. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier, 2010. 527, pp. 3210-3216. DOI:10.1016/j.msea.2010.01.085.

**ZAPPA, Sebastián; et al.** *Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of supermartensitic stainless steel deposit.* Journal of Materials Engineering and Performance. Materials Park, USA: ASM International, Febrero de 2017. Vol. 26, 2, pp. 514-521. DOI: 10.1007/s11665-016-2467-8.

**ZHAÑAY, Kléver Alejandro.** *Procedimiento de reconstrucción por soldadura de álabes móviles de la turbina Francis de eje vertical de la central hidroeléctrica Agoyán.* (tesis). (Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana. Ambato, Ecuador: UPS, Junio de 2006.

**ZOU, De-ning; et al.** *Influence of tempering process on mechanical properties of 00Cr13Ni4Mo supermartensitic stainless steel.* Journal of Iron and Steel Research, International. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier, 2010. Vol. 17, 8, pp. 50-54.